

BOUWEN MEET STAAL

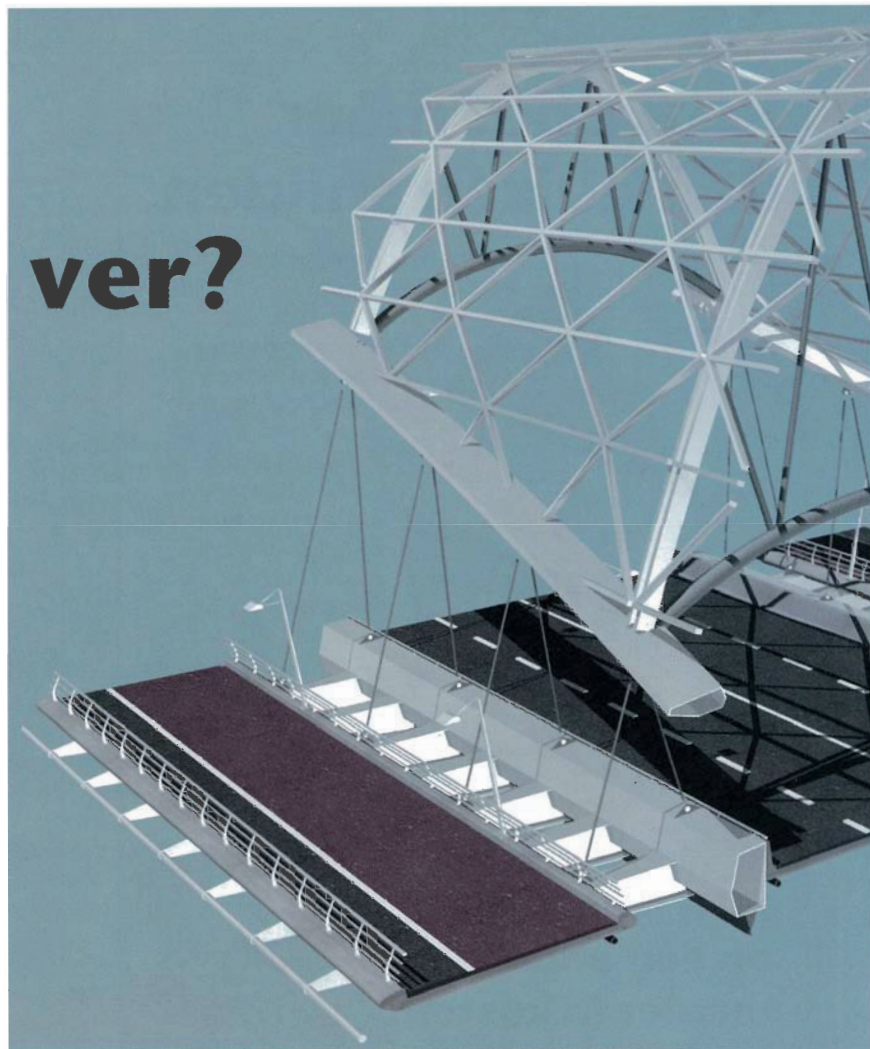
MAART/APRIL 1999

147



Een brug te ver?

Twee jaar geleden schreef de gemeente Utrecht een Europese aanbesteding uit voor het ontwerp van de Papendorpse brug over het Amsterdam-Rijnkanaal met een vrije overspanning van 150 m. Deze brug moet de vinexlocatie Leidsche Rijn ten zuiden van Utrecht ontsluiten. Ben van Berkel en DHV wonnen vorig jaar uiteindelijk de competitie met een ontwerp voor een stalen tuibrug. Adviesbureau ABT was als constructeur betrokken bij één van de drie andere ontwerpteam dat een geheel nieuw brugconcept ontwikkelde. Dit concept oogstte vooral vanwege het innovatieve karakter en de architectuur veel bewondering. De zorg omtrent de beheersbaarheid van het onconventionele ontwerp was de reden dat uiteindelijk niet voor dit plan is gekozen. Utrecht mist daardoor de primeur van een nieuw brugconcept.



Bij het ontwerp van de Papendorpse brug zijn nieuwe wegen bewandeld door de introductie van een constructief systeem dat in de bruggenbouw nog niet eerder is toegepast, namelijk een schaalconstructie. Het resultaat is een boeiend ruimtelijk concept, waarbij optimaal is ingespeeld op de huidige mogelijkheden van ontwerp, berekening, vervaardiging, transport en montage. Als bouwsysteem is de brug te beschouwen als een grote meccanodoos. Natuurlijk zijn er critici die het voor de bruggenbouw een stap te ver vinden om zo'n ruimtelijk systeem toe te passen. Maar de geschiedenis leert dat er vroeger vaker nieuwe systemen voor bruggen zijn bedacht die destijds ook vraagtekens oproepen, maar die nu gemeengoed zijn. Dat gebeurde bijvoorbeeld nog in de jaren vijftig, toen de tuibrug schoorvoetend zijn intrede deed. Met het ontwerp voor een schaalconstructie is aangetoond dat het ook in de bruggenbouw mogelijk is ruimtelijk te construeren. Het ontwerp is een weerspiegeling van de hedendaagse technische mogelijkheden en architectuurstromingen. Het is een brug voor de volgende eeuw. Dus nog even 260 dagen wachten!

Ontwerpopgave

De nieuwe Papendorpse brug over het Amsterdam-Rijnkanaal komt te liggen

tussen de bestaande wijk Kanaleneiland en de nieuwe wijk Papendorp in de vinexlocatie Leidsche Rijn bij Utrecht. De ontwerpopgave vereiste een volledig stedenbouwkundig, architectonisch en constructief uitgewerkt voorstel voor zowel de brug over het kanaal als voor de op- en afritten. De belangrijkste eisen waren:

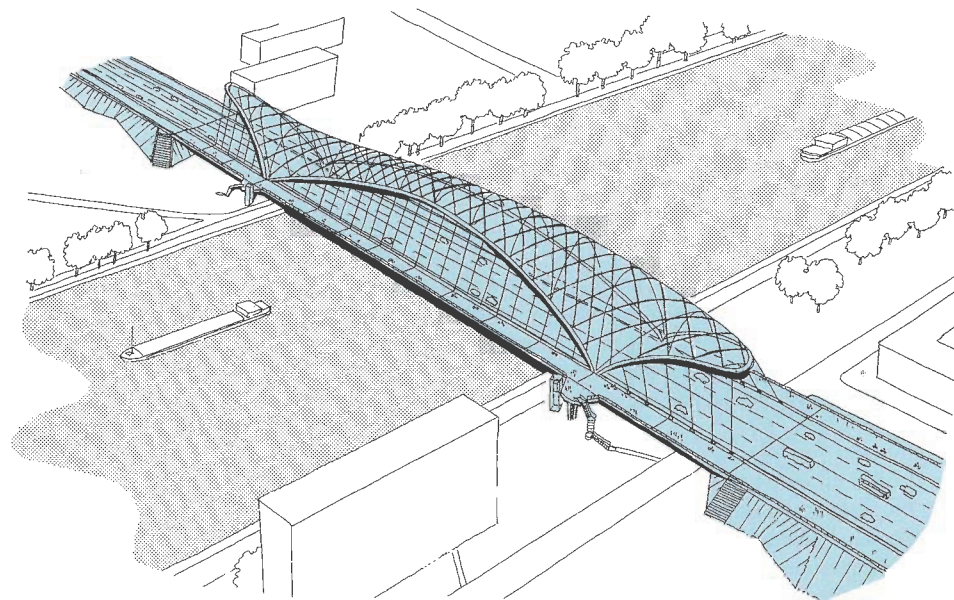
- een minimale vrije doorvaarthoogte van 10,5 m, een vrije overspanning van 150 m en aan beide uiteinden langs het kanaal een viaduct van ongeveer 50 m;
- viaducten en aarden banen voor de op- en afritten moesten zo worden ontworpen dat het hoogteverschil over de beschikbare lengte van ongeveer 600 m met een minimale inspanning kan worden overbrugd;
- het brugdek moet ruimte bieden aan twee autorijstroken, twee rijstroken voor openbaar vervoer (bus en sneltram), twee fietspaden en twee voetgangerspaden.

Aan de opgave is in twee ronden gewerkt. Om uiteenlopende redenen kon de opdrachtgever – de gemeente Utrecht – na de eerste ronde geen keuze maken tussen de inzendingen van de vier verschillende ontwerpteam. Daarom is besloten tot een tweede ronde, waarin de deelnemers een aanvullende opdracht kregen met strikte randvoorwaar-

prof.ir. A. Krijgsman

ABT Adviesbureau voor Bouwtechniek, Velp

Eerste ontwerp met lichtspalten tussen de langsliggers en de voetpaden. Deze spalten zijn in de tweede ronde vervallen.



den, zoals een taakstellend budget van 48 miljoen gulden voor uitvoerings- en engineeringkosten. In beide ronden was er stedenbouwkundig en architectonisch een grote mate van ontwerpvrijheid. Wat betreft constructie was voorgeschreven dat de brug in staal, in beton of in een combinatie van beide materialen moest worden uitgevoerd.

Ontwerpproces

Vanaf het begin van het ontwerpproces hebben architecten en constructeurs intensief samengewerkt bij het zoeken naar een antwoord op de ontwerpogave (zie kader). Centraal daarbij stond het zoeken naar een tot de verbeelding sprekend oorspronkelijk ontwerp. Dit ontwerp zou een geheel eigen plaats moeten innemen tussen alle bestaande bruggen over het Amsterdam-Rijnkanaal, zoals de vele boogbruggen en de Galecopper-brug (een tuibrug). Ondanks uiteraard allerlei divergerende bewegingen en uitstapjes, volgde het ontwerpteam dwars door het hele proces heen de richting die al bij aanvang was bepaald en die stap voor stap uiteindelijk leidde tot een ruimtelijke schaalbrug met een geheel nieuwe vorm en constructie. De ontwikkeling van dit concept met stalen netwerkschalen wordt in een apart kader verteld aan de hand van een aantal ontwerpschetsen.



(foto: Louk Heijmans, Arnhem)

Model van de brug gebaseerd op het eerste ontwerp met voor de eenvoud een enkele rij ophangstaven.

Ontwerpteam

De inbreng van verschillende disciplines zorgde binnen het ontwerpteam voor creativiteit. Jong en oud beïnvloedden elkaar tegen de achtergrond van de ervaring van de verschillende bureaus, te weten:

- Hans van Heeswijk uit Amsterdam als architect en vormgever van bruggen voor de Rijkswaterstaat;
- Bureau West 8 als architect, stedenbouwkundige en landschapsarchitect;
- ABT uit Velp als constructeur van architectonische bruggen en grote overspanningen voor gebouwen;
- Bureau Schlaich Bergemann uit Stuttgart met veel internationale ervaring als constructeur bij grote bruggen en grote overspanningen voor gebouwen.

Ontwikkelingsproces ontwerp

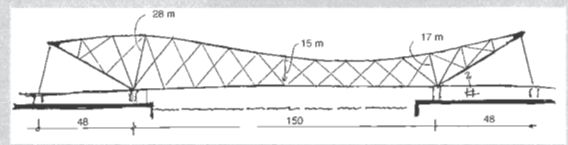
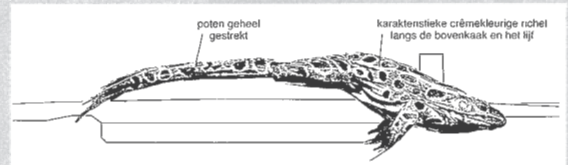
Om stedenbouwkundige en landschappelijke redenen ging architectonisch de voorkeur uit naar een brug met een bepaalde massa en sculpturaliteit als verbinding over het superrechte Amsterdam-Rijnkanaal en als focuspunt tussen de oude en de nieuwe stad met relatief lage bebouwing. IJlheid en transparantie waren hierbij niet het eerste doel. Het referentiebeeld was een reptiel dat als het ware over het kanaal springt.

Het reptiel is architectonisch vertaald in een vorm met een kop (bolle kromme) en een staart (holle kromme) en constructief vertaald in twee evenwijdige vakwerken, verbonden door windverbanden aan de bovenzijde. Ondanks de bijzondere vorm, toch te veel een traditionele vakwerkbrug.

Om deze traditionele wijze van construeren te doorbreken, ontwierpen de constructeurs een brug met een symmetrische, ter plaatse gestorte betonschaal. Uitvoeringstechnisch was dat niet haalbaar vanwege de dure hulpconstructies en bekistingen en het bouwen boven het water. Het bleek achteraf wel een eerste stap te zijn naar een ruimtelijke constructie.

Als reactie stelden de architecten een asymmetrische schaal voor met een (te) grote kop aan één zijde. Het idee om tuien te bevestigen aan het schaaloppervlak zorgde voor grote puntlasten loodrecht op het schaaloppervlak. Constructief is het gewenst om een schaalconstructie zo gelijkmatig mogelijk te belasten en puntlasten in te voeren bij de randen. Het idee ging te veel voorbij aan het begrip 'brug'.

De constructief ontwerpers stelden daarom een stalen netwerkschaal voor als drager van het brugdek, waarmee de voorgaande ideeën weer met beide benen op de grond kwamen. Hoewel het team toen nog geen idee had van de consequenties voor de vormgeving en de constructie, werd besloten dit voorstel nader uit te werken.



(foto: Louk Heijmans, Arnhem)

Het idee van een constructie met stalen netwerkschalen ontstond bij het ontwerp voor het dak van het Gelredome in Arnhem.

Constructief idee

Bij het idee van een constructie met stalen netwerkschalen kon worden teruggegaan op de ervaring bij het ontwerp voor het dak van het Gelredome in Arnhem (zie *Bouwen met Staal 143*). Dat betekent overigens niet dat het brugdek aan een stadionoverkapping hangt. Integendeel, het is een geïntegreerde ruimtelijke constructie met een geheel eigen vorm. De schaalconstructie is opgebouwd uit een stalen netwerk met randconstructies (bogen) en verbonden met de langsliggers van het dek, die als trekband fungeren. De schaalconstructie en het dek vormen samen de ruimtelijke constructie. Kromming in een schaaloppervlak is namelijk noodzakelijk om doorslag (in dit geval uitknikken van op druk belaste staven) te voorkomen.

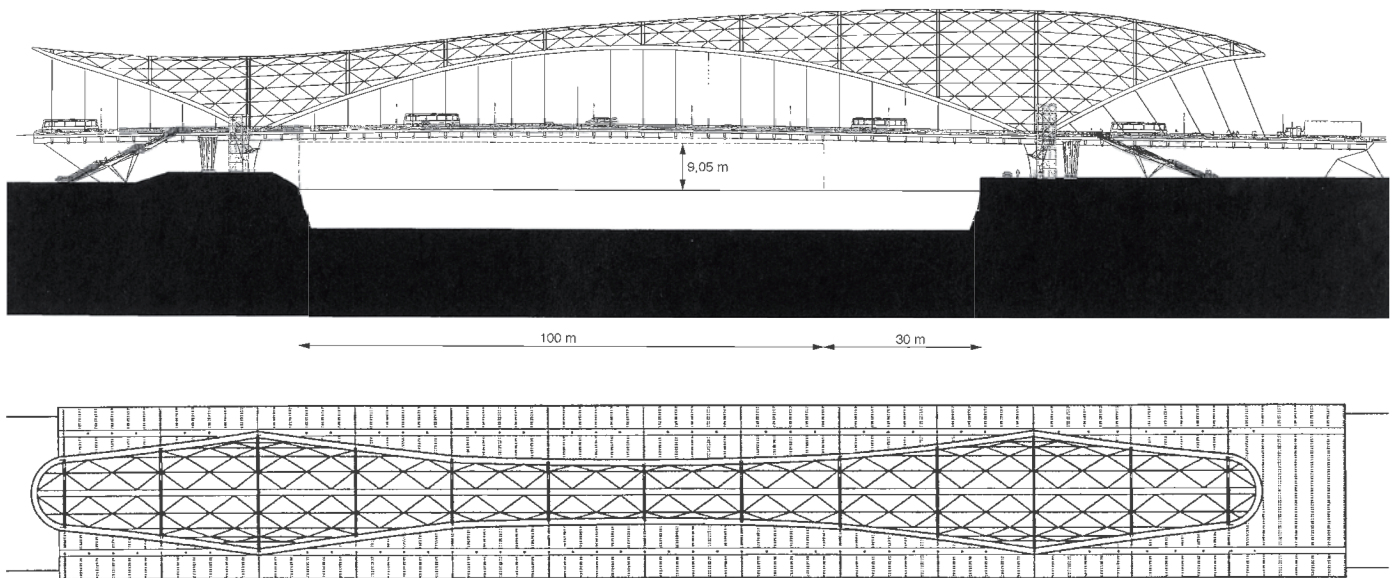
Hoofdvorm

Voor de hoofdvorm is gekozen voor een asymmetrische constructie, omdat de beide stadsdelen verschillend zijn. Deze keuze leidde tot een schaalconstructie met aan de bovenzijde een bolle en een holle kromme, met het buigpunt naast het midden van de hoofdoverspanning. Om tot de definitieve hoofdvorm te komen, is gewerkt met schaalmodellen en met computermodellen. Uiteindelijk bleek het mogelijk de vorm geheel vast

te leggen in een computermodel. Een belangrijk besluit voor de constructie van de hoofdoverspanning was om de randen van de schalen (bogen) en de twee langsliggers (hoofdliggers) van het dek in één schuin vlak te leggen. Hierdoor wordt de belasting via de ophangstaven rechtstreeks ingevoerd in het vlak van de schaalranden (bogen). Tevens is hiermee bereikt dat de horizontale oplegreacties van de schaalranden (bogen) rechtstreeks worden opgenomen door de langsliggers van het dek. Deze langsliggers lopen evenwijdig, waardoor de schaalconstructie tussen beide oplegpunten overal even breed is. Maar omdat de hoogte van de schaal verloopt, is de schaal boven de steunpunten bij de holle kromme in dwarsrichting meer gekromd dan bij de bolle kromme. Om met name in het midden voldoende kromming in het schaaloppervlak te behouden, lopen de langsliggers van het dek zo ver mogelijk uit elkaar.

Schaalnet

Het schaalnet is opgebouwd uit buisprofielen. Uit een oogpunt van vormgeving was het van belang dit net uit te voeren met een zo klein mogelijk raster. Hierdoor werd het oppervlak van een gesloten constructie zo dicht mogelijk benaderd en werd het contrast met de



opengewerkte zijvlakken zo groot mogelijk. Het nadeel van een klein raster is echter het grote aantal verbindingen. Na een variantenstudie is uiteindelijk gekozen voor een raster met een maaswijdte van 3,2 m. Uiteraard moet een schaalnet vormvast zijn. Dat kan worden bereikt door verticale verstijvingsschotten aan te brengen. Uit een berekening bleek dat deze schotten alleen bij de opleggingen nodig zijn. Daar tussenin kon worden volstaan met uitsluitend horizontale koppelingen. De twee verstijvingsschotten zijn ontworpen als een vormvast vlak, opgebouwd uit u-vormige randprofielen met diagonale staven. De randconstructies van de schalen zijn kokerprofielen met een rechthoekige doorsnede die zo zijn vormgegeven dat een vloeiend verloop ontstaat in verschillende richtingen.

Brugdek

Het brugdek is een staal-beton constructie met een betonnen dek en stalen dwarsdragers en langsliggers met een totale constructiehoogte van 1,35 m (exclusief slijtlaag) bij een overspanning van 22,8 m met twee uitkragingen van elk 5,1 m. Deze geringe hoogte is mogelijk dankzij de samenwerking tussen staal en beton en de kleine afstanden van de dwarsdragers (3,2 m), waardoor kon worden volstaan met een betondek

van 250 mm. Economisch gezien is een staal-beton dek een ideale combinatie. Door het relatief grote eigen gewicht (in dit geval ongeveer tweederde van de totale belasting) is de constructie minder gevoelig voor vermoeiing dan bij een lichte constructie, terwijl bij vriezend weer het dek minder snel glad wordt dan bij een stalen dek.

Krachtswerking

De krachtoverdracht in de schaal is berekend met een ruimtelijk computermodel. Vooraf zijn de belangrijkste trek- en drukkrachten met een handberekening bepaald, wat bovendien verhelderend werkte voor het inzicht in het krachtenspel. Voor de handberekening is de ruimtelijke constructie geprojecteerd op een vertikaal vlak, zodat een hoge wandligger op twee steunpunten ontstaat met uitkragingen aan beide zijden. In deze hoge wandligger treedt buiging op in combinatie met boogwerking (zie kader).

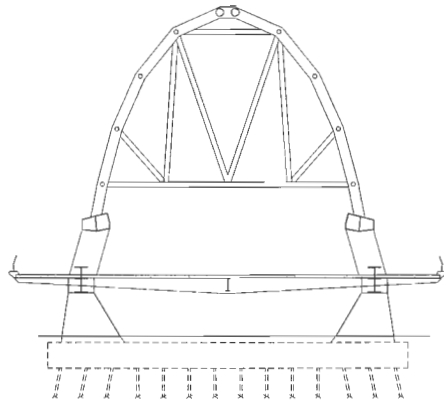
Door het grote eigen gewicht van de constructie is de toename van het veldmoment in het midden van de hoofdoverspanning bij volbelasting betrekkelijk gering: zo'n 25%. Dat betekent dat het schaalnet een belangrijke bijdrage levert in de primaire belastingoverdracht. De uitkragende brugdelen zijn zo opgehangen aan de schaalcon-

structie dat er bij de uiteinden slechts geringe krachten worden uitgeoefend op de landhoofden. Het statisch schema is dus een ligger op twee steunpunten met uitkragingen. Het schaalnet vervult tevens een belangrijke functie in de stabiliteit van de totale constructie.

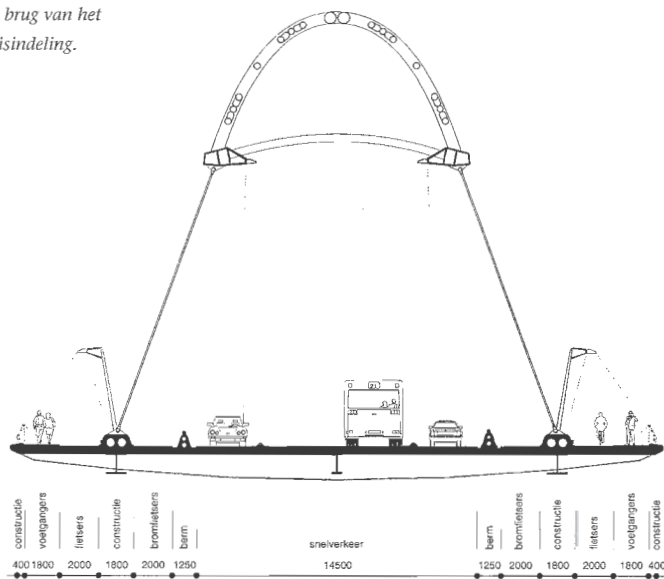
In het vlak van de randen van de schaal stabiliseren de aansluitende staven van het schaalnet de randen van de hoofdoverspanning. In horizontale richting vervult het schaalnet een belangrijke functie bij de dwarsstabiliteit van de totale constructie.

Dankzij het schaalnet konden de randliggers optimaal worden gedimensioneerd, omdat er nauwelijks knik in optreedt. Voor de ruimtelijke berekeningen zijn als belastingcombinaties gehanteerd: eigen gewicht, wind, geheel volbelast, éézijdig over de lengte volbelast én het middenveld volbelast en de eindvelden onbelast. Daarnaast is onderzoek gedaan naar de tweede orde-effecten. Die bleken slechts een geringe invloed te hebben op het krachtenspel. Voor het onderzoek naar de stabiliteit in dwarsrichting van de schaalranden is een uiterst ongunstige aanname gedaan door in de schaalranden ter plaatse van de eindschotten scharnieren aan te brengen. Zelfs bij deze zeer ongunstige aanname bleek dat de schaalranden volledig worden gesteund door het schaalnet.

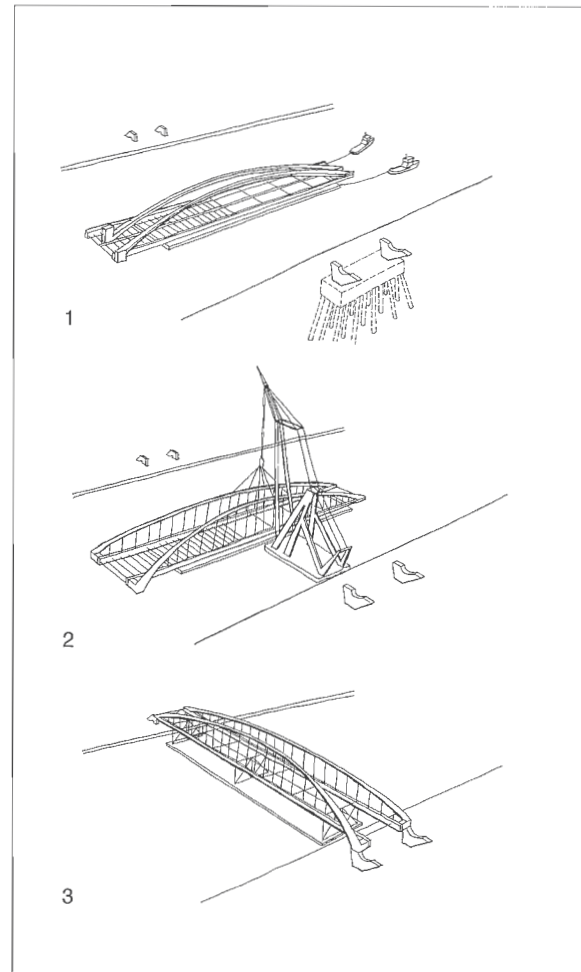
Dwarsboog met 'verstijvingsschot'
ter plaatse van het steunpunt.



Dwarsdoorsnede over de brug van het
tweede ontwerp met basisindeling.



Montage van de brug, in delen aangevoerd over het water.
Hier het eerste ontwerp met lichtspalten tussen de langsliggers
en de voetpaden en meerdere verstijvingsschotten.



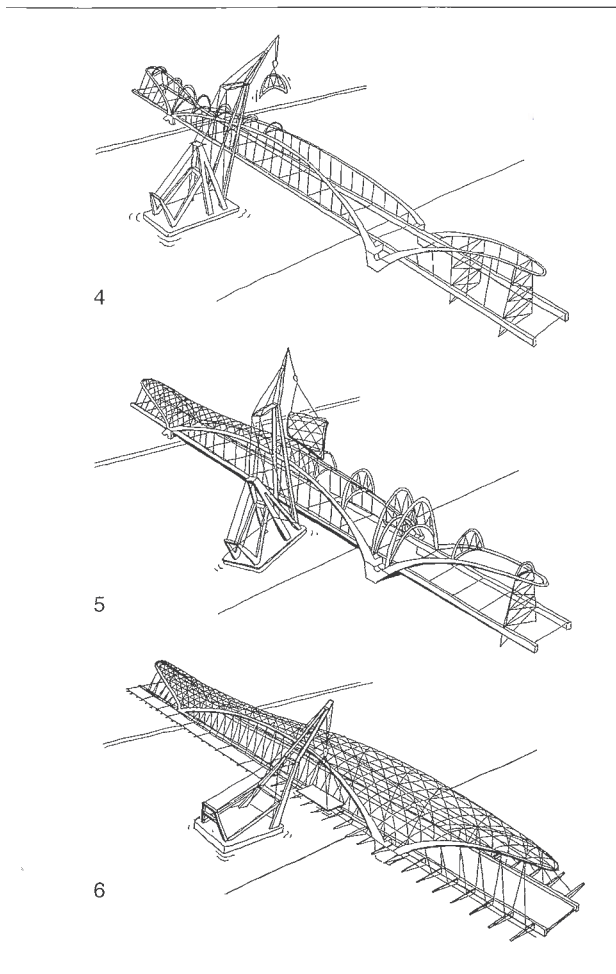
Uitvoering

Uitgangspunt bij de vervaardiging en de montage is het gebruik van zo groot mogelijk segmenten die over het water naar de bouwplaats worden vervoerd. De feitelijke bouw bestaat dan uit de volgende vier fasen.

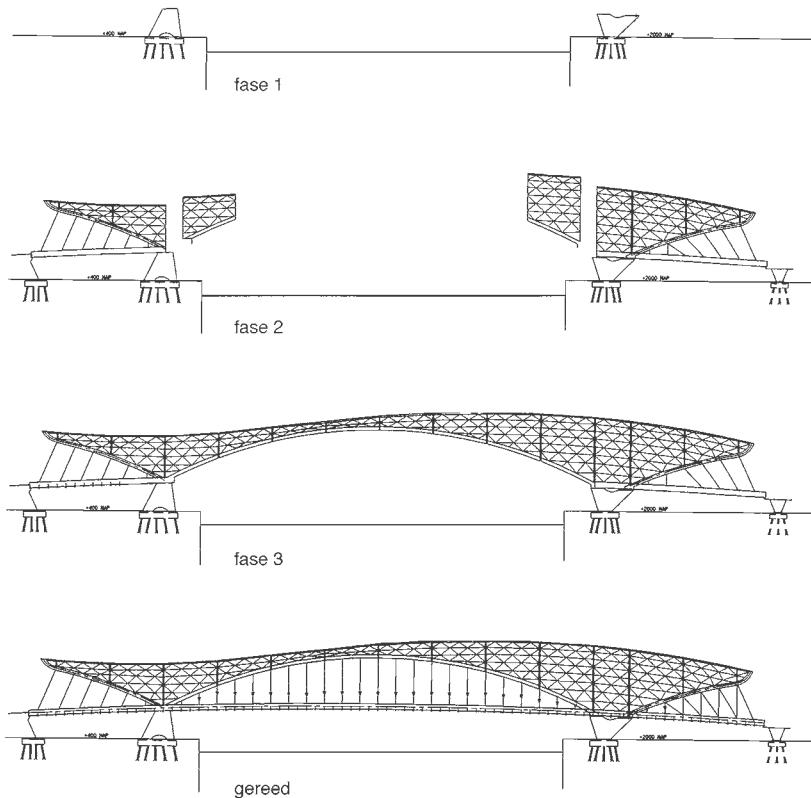
- Aanvoer van het brugdek met dwarsdragers en langsliggers op een ponton in drie delen zonder consoles voor fiets- en voetpaden. De afstand tussen de langsliggers (22,8 m) is afgestemd op de maximale breedte van de te passeren sluisen (24 m).
- Aanvoer van randconstructies van de schalen (bogen).
- Montage van het dek met schaalranden in drie delen; één middenoverspanning en twee zijoverspanningen. Deze constructie is in staat het eigen gewicht te dragen.
- Montage van de grote schaalementen met een lengte van zo'n 20 m. De schaalementen zijn hiervoor aan de bovenzijde in het midden van de brug in twee delen gesplitst.
- Nadat de ruimtelijke constructie gereed is wordt de brug afgebouwd met de consoles voor de fiets- en voetpaden en het dek.

Krachtenwerking

Voor de globale krachtenwerking is de ruimtelijke schaalconstructie geschematiseerd tot een hoge wandligger op twee steunpunten met aan beide zijden een uitkraging. Als belasting is (voor een halve brug) uitgegaan van $q_g = 150 \text{ kN/m}$ en $q_q = 75 \text{ kN/m}$, zodat $q_{\text{tot}} = q_g + q_q = 225 \text{ kN/m}$. De beide steunpuntsmomenten bedragen dan: $M_A = q_{\text{tot}} \cdot l^2 / 2 = 225 \cdot 40^2 / 2 = 180.000 \text{ kNm}$ en $M_B = q_{\text{tot}} \cdot l^2 / 2 = 225 \cdot 55^2 / 2 = 340.000 \text{ kNm}$. Voor het maximale moment in het veld wordt hiermee gevonden: $M_C = (M_A + M_B) / 2 - q_{\text{tot}} \cdot l^2 / 8 = (180 + 340) \cdot 10^3 / 2 - 225 \cdot 150^2 / 8 = -460.000 \text{ kNm}$. De maximale trekkracht boven in de schaal bij D volgt uit $N_D = M_B / h = 340.000 / 23 = 14.800 \text{ kN}$. De maximale drukkracht in het veld is dan $N_F = M_C / h = 460.000 / 19 = 24.000 \text{ kN}$. Deze laatste waarde is dan ook de maximale trekkracht in de langsligger bij C.



Alternatieve montagevolgorde (tweede ontwerp), waarbij vanuit de beide oevers wordt gewerkt met schaal-elementen van maximaal ongeveer 60 m lengte.



Onderhoud

De gehele staalconstructie krijgt een conserveringssysteem van vier lagen. Dit systeem is ongeveer dertig jaar onderhoudsvrij mits er per vijf jaar inspecties en klein preventief onderhoud plaatsvindt. Voor het onderhoud van het brugdek loopt onder de brug een onderhoudswagen. Voor inspecties en onderhoud van de bovenbouw is uitgegaan van een zogeheten knikhoogwerker met telescopisch uitschuifbare arm. Daartoe wordt op het schaaldek over de volle lengte een tandbeugelbaan aangebracht, waar overheen tijdens inspecties en onderhoud een wagen rijdt met daarop de hoogwerker. Op deze wijze is zowel de buiten- als de binnenkant van het bovenste gedeelte van de schaalconstructie bereikbaar. Het onderste gedeelte is vanaf het dek met hoogwerkers te inspecteren en te onderhouden. De geraamde onderhoudskosten (Netto Constante Waarde) bedragen 3,9 miljoen gulden, wat in overeenstemming is met de geldende richtlijnen voor stalen bruggen. Op het eerste gezicht lijkt het beheer en onderhoud nogal kostbaar, maar blijkt bij nadere studie dus alleszins mee te vallen.

Risico beperkt

Voor de technische beoordeling won de gemeente Utrecht advies in bij de Bouwdienst Rijkswaterstaat, die de (on)dankbare taak kreeg toegewezen om als adviseur commentaar te leveren op de ingediende plannen. In het kader van het beoordelen van prijsvragen lijkt dit geen juiste positie voor de Bouwdienst. Beter is het om in de jury een constructief ontwerper op te nemen. Dit jurylid kan dan als volwaardig lid zijn commentaar op de plannen naar voren brengen. Bij de beoordeling van de schaalconstructie is als belangrijk bezwaar genoemd het grote aantal verbindingen, waardoor de continuïteit van de constructie wordt onderbroken: dit is met name nadelig voor de vermoeiingsaspecten van de constructie. Uiteraard is het een constructie waarbij aan de verbindingen de hoogste aandacht moet worden besteed in het ontwerp- en uitvoeringsstadium. Maar het zijn technisch oplosbare problemen, zeker als er voor de knopen van het staalnet gebruik wordt gemaakt van gietstaal. Tegenover dit nadeel staat echter ook een groot voordeel: een groot aantal verbindingen kan bezwijken voordat de constructie als

geheel bezwijkt. Uiteraard is er door de beoordelende instanties zwaar getild aan het financiële risico bij de keuze van dit plan. Een analyse van de kostenaspecten laat echter zien dat het meest risicovolle deel van de constructie – de schaalconstructie – ongeveer 25% bedraagt van de totale bouwkosten. Hieruit volgt dat het risico voor de brug als geheel beperkt is.

Technisch gegevens

Hoofdconstructie schaalnet buisprofielen Ø323 mm; kokervormige randliggers 900x1800 mm resp. 800x1200 mm; verticale verstijvingsschotten opgebouwd uit twee U-profielen 150x600 mm resp. 200x1000 mm, vormvast gemaakt met buizen; langsliggers gelaste IPE 1000x2000; ophangstaven Ø90 mm • Conservering vierlaagssysteem (420 µm) epoxy-zincprimer (40 µm), epoxy-miocoat (150 µm), epoxy-miocoat (150 µm) en polyurethaan coating (80 µm).