



1 Uitvoering van de versterkingen Merwededebrug. © Rijkswaterstaat

DE EVOLUTIE VAN RENOVATIEWERK- ZAAMHEDEN AAN STALEN BRUGGEN

Maarten Rikken en Dimitri Tuinstra, Arup, Nederland

Tegenwoordig zijn procedures voorgeschreven voor het toetsen van de kwaliteit en de duurzaamheid van producten, denk aan het simuleren van zittingen en opstaan in stoelen door een machine. Gedurende zo'n test wordt gekeken of de wisselende belastingen geen scheurtjes initiëren in het onderstel van de stoel. Een vergelijkbaar verschijnsel kan optreden in stalen bruggen: 'haarscheurtjes' initiëren en groeien ten gevolge van verkeersbelasting in de constructie, een fenomeen waar we recentelijk de gevolgen van hebben ondervonden bij de Merwedebrug. (fig. 1)

De 'haarscheurtjes' zijn veroorzaakt door vermoeiing, een degradatiemechanisme dat veroorzaakt wordt door de sterk toenemende verkeersaantallen en aslasten in het Nederlandse hoofdwegennet. Dit probleem doet zich niet alleen voor bij de Merwedebrug, integendeel: Rijkswaterstaat is al jaren bezig om de levensduur van stalen bruggen te verlengen. Het incident van de al omberuchte Merwedebrug deed zich echter voor in de hoofdconstructie, terwijl de andere bruggen hoofdzakelijk vermoeiingsschade vertonen in het stalen rijdek. Dit type schade is minder bedreigend voor de integriteit van de brug, maar dient op den duur toch te worden opgelost.

Het traject van de vermoeiingsschade in een stalen rijdek en de daarbij horende renovatiewerkzaamheden duurt al 20 jaar. In deze 20 jaar hebben ervaringen van onderzoeksinstanties, ingenieursbureaus en aannemers bijgedragen aan tal van technisch uitdagende renovatiewerkzaamheden aan stalen bruggen.

Dit artikel toont de evolutie van de renovatie van acht stalen bruggen dat begeleid is door Arup en Royal Haskoning DHV in opdracht van Rijkswaterstaat en neemt de lezer mee door de verschillende technische en uitvoeringskeuzes die gemaakt zijn om tot een toekomstbestendige oplossing te komen voor de stalen bruggen in ons hoofdwegennet.

ACHTERGROND

Nieuw type rijvloer (fig. 2)

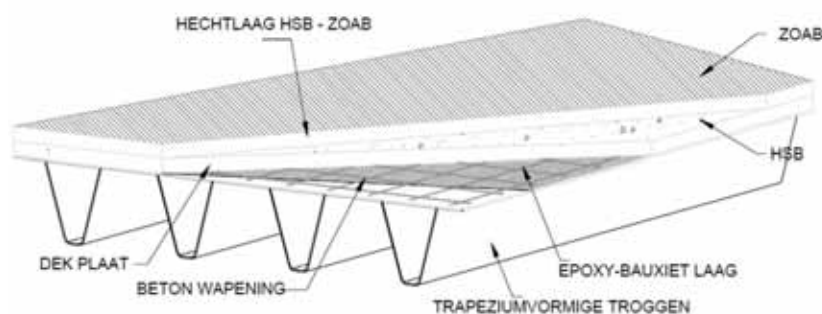
Het ontwerp van de orthotrope rijvloer is na de Tweede Wereldoorlog ontwikkeld, waarbij de longitudinale verstijvers en dwarsdragers geoptimaliseerd zijn zodat het materiaal efficiënter gebruikt kan worden en het eigen gewicht van de brug afneemt.

Het gebruik van trapeziumvormige langsvorstijvers (troggen) biedt de meeste gewichtsbesparing, maar men was er zich in die tijd niet van bewust dat bij dit ontwerp de vermoeiingsproblemen het grootst zouden zijn.

Verkeersontwikkelingen

De verkeersintensiteit is sinds de jaren zestig van de vorige eeuw exponentieel toegenomen op het hoofdwegennet in Nederland en het vrachtverkeer is daarbij jaarlijks zwaarder geworden. Bij het lichter uitvoeren van de orthotrope rijvloer is hiermee niet voldoende rekening gehouden waardoor vermoeiingsscheuren kunnen ontstaan in verschillende lasverbindingen van het stalen rijdek en de levensduur van de brug wordt verkort.

In 1997 zijn er vermoeiingsscheuren gedetecteerd in het beweegbare deel van het orthotrope rijdek van de 2e Van Brienenoordbrug, slechts zeven jaar na de opening in 1990. (fig. 3)



2 Principe orthotrope plaatvloer met HSB-overlaging



3 Vervanging klap Basculebrug 2e Van Brienenoordbrug in 1997. © Rijkswaterstaat



© Thea van den Heuvel

4 Aanbrengen HSB-overlaging ...

... 5 ondergeconditioneerde omstandigheden

Onderzoek

Rijkswaterstaat richtte in 1998 de projectgroep Problematiek Stalen Rijkdekken (PSR) op met als doel de vermoeiingsproblematiek in de rijkdekken beter te leren begrijpen en een levensduurverlengende oplossing te vinden voor de rijkdekken in bestaande bruggen. In dit traject werden externe onderzoeksinstanties als TNO, Adviesbureau Hageman en TU Delft ingeschakeld wat onder andere heeft geresulteerd in grootschalige vermoeiingstesten en een breed scala aan levensduurverlengende oplossingen.

Deze onderzoeken hebben bijgedragen aan een beter begrip van het degradatiemechanisme in de rijvloer en de ontwikkeling van een ontwerp oplossing: het aanbrengen van een spanningsverlagende laag, gewapend hogesterktebeton (HSB). Deze oppervlakte laag heeft een aantal voordelen ten opzichte van conventionele asfaltlagen waarbij de vergrote stijfheid de belangrijkste is. De HSB-laag vergroot de buigstijfheid van de gecombineerde staalbetonlaag en spreidt de lokale aslasten van vrachtverkeer waarbij de wisselspanningen ter plaatse van de lasverbindingen reduceren en de vermoeiingslevensduur toeneemt.

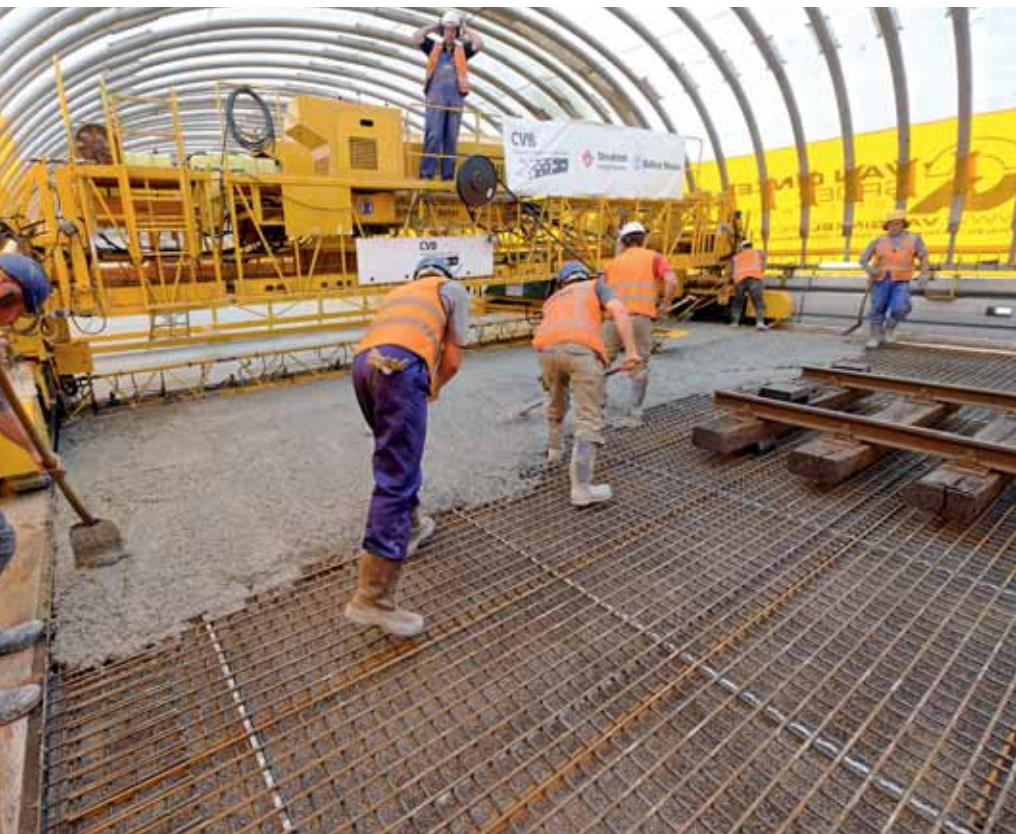
Eerste Pilot

Rijkswaterstaat is na verschillende testen met de HSB-overlaging in gecontroleerde omstandigheden (fig. 4 en 5) begonnen met een eerste pilot op de Calandbrug in de Rotterdamse haven. (fig. 6) Verschillende aannemerscombinaties zijn destijds vroeg betrokken in het onderzoekstraject, omdat de

renovatiwerkzaamheden complex en vernieuwend zijn. Zo is er veel geëxperimenteerd met het betonmengsel, de tussenlaag tussen staal en HSB en is de betondekking bovenop de wapeningsnetten geoptimaliseerd. Ook zijn er verschillende reparatietechnieken getest voor de aanwezige vermoeiingsscheuren in het dek. Na het succesvol afronden van de



6 Herstel Calandbrug



© Thea van den Heuvel

pilot op de Calandbrug is deze techniek ook toegepast op de Moerdijkbrug (fig. 7) en de brug bij Hagestein over de Lek.

Aanpak Renovatie

In 2006 is vanuit Rijkswaterstaat het Project Renovatie Bruggen (PRB) opgestart. Het bijbehorende projectteam heeft de keuze gemaakt en de voorbereidingen gedaan voor de renovatie van acht stalen bruggen in het Nederlandse hoofdwegennet. (fig. 8) Vanaf 2009 is dit verder uitgewerkt door de Managing Contractor (MC), een combinatie bestaande uit Royal Haskoning DHV, Arup en Greisch. De acht bruggen zijn hoofdzakelijk gebouwd in de jaren '60 en '70 van de vorige eeuw en ontwikkelden vermoeiingsschade in het rijdek. Het aanbrengen van de HSB-overlaging kan dit probleem oplossen, maar een herberekening van de hoofddragconstructie moet aantonen of dit constructief mogelijk is of dat er versterkingen nodig zijn. Verder kunnen aangescherpte richtlijnen reden zijn tot versterkingen en kunnen inspecties op de brug andere problemen aan het licht brengen.



7 HSB-overlaging Moerdijkbrug. © Aerial



8 Locaties van de acht stalen bruggen in het MC-contract

De MC is naast de herberekening en het versterkingsontwerp verantwoordelijk voor het opstellen van het contract voor de uitvoering en het begeleiden van de aanbesteding en uitvoering van het werk. Drie aannemerscombinaties zijn vroegtijdig geselecteerd middels een raamcontract voor het aanbrengen van het HSB en benodigde versterkingen, te weten KWS met Mercon en Hollandia, Combinatie Versterken Bruggen met Ballast Nedam, Strukton en Victor Buyck en de combinatie Heijmans en Iemants. De aannemerscombinaties hebben daarbij een rol bij het ontwikkelen en verbeteren van de renovatiemethode. De MC zal verder de aannemer begeleiden tijdens de uitvoering en daarbij de hinder voor omwonenden en doorgaand verkeer trachten te minimaliseren.

Na de succesvolle overlaging met HSB van de bruggen in de eerste pilot, kreeg de MC de taak om eenzelfde oppervlaktelaag aan te brengen op acht stalen bruggen. De levensduur van de bruggen dient te worden verlengd met ten minste 30 jaar wat rekenkundig moet worden aangetoond. De scope¹ is echter niet beperkt gebleven tot alleen het aanbrengen van HSB om de vermoeiingsproblematiek van het stalen rijdek te verhelpen. Aanvullende wensen, reparaties en het vervangen van onderdelen van de brug zijn redenen om af te wijken van de vooraf gedefini-

eerde scope. De doelstelling en scope voor de MC werd hierdoor in de loop van het project steeds complexer en omvangrijker.

Uitvoering

In drie verschillende fases wordt de renovatie-evolutie weergegeven:

- de eerste fase kenmerkt zich door het rationaliseren van het HSB-ontwerp. De HSB-overlaging is door alle aannemerscombinaties aangebracht op drie bruggen;
- in de tweede fase is het HSB-ontwerp geoptimaliseerd voor de drie volgende bruggen en is de scope voor de renovatie verbreed door meer stakeholders in het project te betrekken;
- de derde en tevens laatste fase loopt momenteel waarin wederom de leermomenten van de eerdere bruggen worden toegepast.

In elke fase worden achtereenvolgens beschreven: *Kenmerken van de bruggen – de Renovatie Scope – Herberekening en Uitvoeringaspecten – Lessons Learned.*

FASE 1 MUIDEN, BEEK EN SCHARBERG (2009 – 2011)

Voorafgaand aan fase 1 heeft het PRB-projectteam samen met de aannemerscombinaties de eerste pilot-projecten (Calandbrug, Moerdijkbrug en de brug bij Hagestein) geëvalueerd en is het HSB-ontwerp geoptimaliseerd. Deze eerste fase kenmerkt zich dan ook door het inpassen van deze voortschrijdende inzichten op de eerste drie bruggen in het PRB.

Kenmerken Bruggen

De belangrijkste kenmerken van de drie bruggen in fase 1 zijn getoond in nevenstaande 7 tabel. De Muiderbrug is een liggerbrug die in 2009 is omgebouwd tot een tuibrug. (fig. 9) Deze renovatie was noodzakelijk om de verkeerscapaciteit te vergroten en de doorstroming op het traject Almere-Amsterdam-Schiphol te verbeteren. Een laatste aanpassing aan de brug was het aanbrengen van de HSB-overlaging op de brug om ook de levensduur van het stalen rijdek te vergroten. De andere twee



9 Middelste brug: Muiderbrug, omgebouwd naar tuibrug

bruggen zijn gelegen in Limburg. De brug bij Beek is een boogbrug die de A2 over het spoortraject Maastricht-Venlo voert. (fig. 10). De Scharbergbrug tenslotte is een liggerbrug over de Maas en het Koningin Julianakanaal nabij de Belgische grens in de A76. (fig. 11)

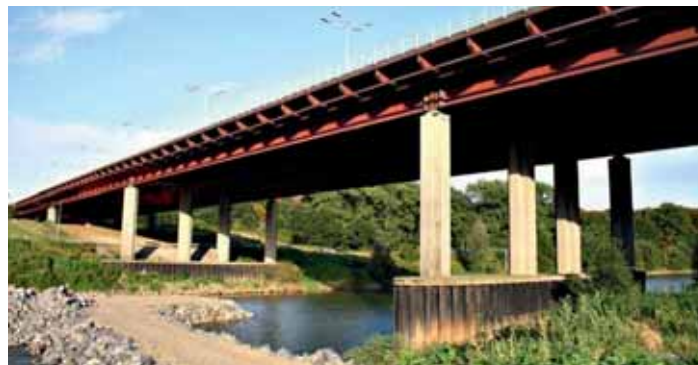
FASE 1

Renovatie Scope

Brug	Open sinds	Renovatiejaar	Totale lengte	Type Brug	Locatie
Muiderbrug	1972	2009-2010	303 m	liggerbrug	A1 (Muiden)
Beek	1969	2010	117 m	boogbrug	A2 (Beek)
Scharbergbrug	1973	2011	302 m	liggerbrug	A76 (Elsloo)



10 Brug in de A2 bij Beek over het spoor Maastricht-Venlo



11 Scharbergbrug in de A76 bij Elsloo over de Maas/Julianakanaal



Renovatie-evolutie in 3 fasen:
 Fase 1 / 2009-2011
 Rationaliseren Ontwerp

FASE 2 / 2013-2015
 Optimaliseren

Fase 3 / 2016-heden
 Toepassen leermomenten

De renovatie scope van deze bruggen is bij aanvang van de projecten gedefinieerd als het verlengen van de levensduur van de stalen, orthotrope rijvloer met 30 jaar door het aanbrengen van HSB. Rekenkundig dient deze levensduurverlenging te worden aangetoond. Het aanbrengen van de nieuwe oppervlakte laag betekent verder een toename van het eigen gewicht dat moet worden afgedragen door de hoofddragconstructie naar de onderbouw. De gevolgen van deze toename voor de constructie is onderzocht met rekenmodellen en inspecties. Indien de capaciteit ontoereikend is, wordt er een versterkingsontwerp gemaakt voor de benodigde onderdelen. Een herberekening van de Muiderbrug is voltooid en de daaruit voortkomende versterkingen zijn uitgevoerd bij aanvang van het project.

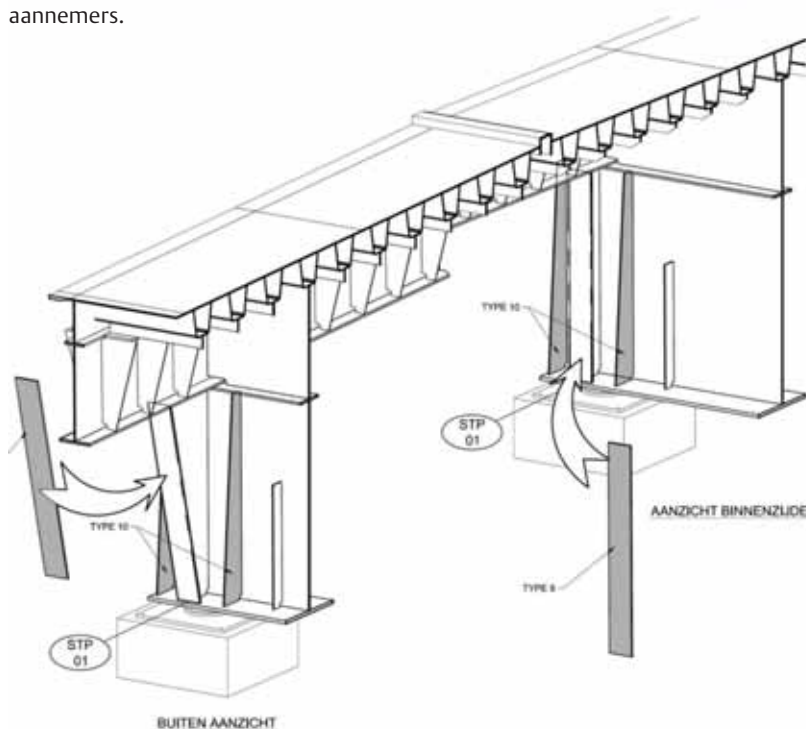
Herberekening en Uitvoeringsaspecten

Het aanbrengen van de HSB-overlaging is binnen dit project als eerste toegepast op de Muiderbrug. De spanningen ter plaatse van de verschillende lasverbindingen zijn met gedetailleerde, numerieke berekeningen geverifieerd voor de situatie na aanbrengen van HSB en getoetst aan resultaten van laboratoriumproeven op de TU Delft. Een overlaging van 75 mm blijkt daarbij noodzakelijk voor de Muiderbrug om de beoogde spanningsverlaging, en daarmee de 30 jaar levensduurverlenging te realiseren. Nadat het HSB was aangebracht op deze brug zijn er additionele proeven uitgevoerd om de rekenmodellen te valideren. Met rekstrookmetingen aan de onderzijde van het rijdek zijn karakteristieken van de nieuwe overlaging getoetst zoals de composietwerking tussen beton en staal en de mate van scheurvorming in het beton. Het verwijderen van het asfalt, het stralen van het rijdek, repareren van de vermoeiingsscheuren en het aanbrengen van het HSB vindt plaats onder gecontroleerde omstandigheden in een tent. Verder zijn er tijdens dit eerste renovatieproject een aantal uitvoeringsaspecten geoptimaliseerd zoals het aanbrengen van HSB in grote oppervlakken, de verdichting van de betonspecie en de stabiliteit en maatvoering van het wapeningsnet (Ø12-75). Tenslotte zijn de reparatiemethoden aan het stalen rijdek verder ontwikkeld.

Bij de boogbrug Beek en de Scharbergbrug bleken naast de HSB-overlaging ook versterkingen noodzakelijk aan de hoofddragconstructie.

Redenen hiervoor zijn (naast uiteraard het zwaarder geworden verkeer, de verkeersintensiteitstoename en de gewichtstoename door het aanbrengen van het HSB) de voortschrijdende inzichten die opgenomen zijn in toetsingsnormen en aangescherpte veiligheidsnormen. De globale versterkingsmaatregelen bij de Scharbergbrug zijn voornamelijk toegespitst op het aanbrengen van verstijvers (fig. 12) bij de steunpunten en het versterken van de onderflens van de hoofdligger. Deze versterkingmaatregelen moeten hoofdzakelijk de dwarskrachtcapaciteit van de hoofddragconstructie verbeteren doordat het eigen gewicht van de brug groter werd na het aanbrengen van de HSB-overlaging. Het aanbrengen van het HSB en de staalversterkingen zijn met zo min mogelijk hinder voor verkeer en scheepvaart aangebracht, wat is gerealiseerd in een gedetailleerde, voorgeschreven bouwfasering voor de aannemers.

Vermoeiingsproblemen in de hoofddragconstructie in de brug bij Beek (fig. 13) zijn geconstateerd in de geklonken verbindingen tussen de I-vormige hangers en de boog. Numerieke berekeningen toonden aan dat deze verbindingen niet meer voldeden aan huidige veiligheidsnormen om de belasting af te dragen. De vermoeiingslevensduur van deze verbinding was niet afdoende. Met additionele berekeningen en testen op de brug is het gedrag van de verbinding verder onderzocht en is het berekeningsmodel gevalideerd met als resultaat dat de verbinding versterkt moest worden. Er is gekozen voor een bypass (fig. 14), die de huidige verbinding ontlast en de krachtafdracht tussen hanger en boog gedeeltelijk overneemt. Deze bypass bestaat uit twee platen aan weerszijden van de verbinding die verbonden zijn aan de constructie met voorspan-injectiebouten.



12 Verstijving hoofdligger Scharbergbrug t.p.v. de opleggingen





14 Bypass krachtsoverdracht van hanger naar boog in de brug bij Beek. © Arup

Lessons Learned

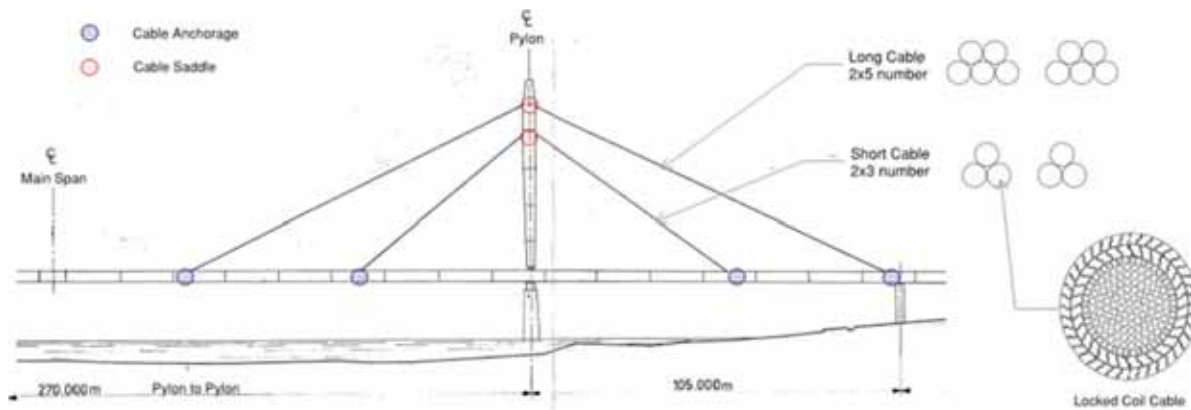
In deze eerste fase hebben de drie geselecteerde aannemerscombinaties proof kunnen draaien met het aanbrengen van de HSB-overlaging. De ervaringen in deze fase zijn toegepast in de volgende fases. Ook blijken de aangescherpte veiligheidseisen ten opzichte van de eisen die golden ten tijde van de bouw, reden om versterkingen aan de hoofddragconstructie door te voeren. De vermoeiingsproblematiek blijkt niet alleen van toepassing op het orthotrope rijdek, maar ook op verbindingen elders in de constructie. Het vergroten van het eigen gewicht door het aanbrengen van HSB is daarnaast ook reden tot het aanbrengen van staalversterkingen.

FASE 2 GALECOPPERBRUG, BRUG BIJ EWIJK EN KREEKRAKBRUG (2013 – 2017)

Nadat het HSB-ontwerp is geoptimaliseerd en de aannemers ervaring hebben opgedaan met het aanbrengen van de laag, was het tijd om deze ervaring in te zetten in de volgende drie bruggen in het PRB-project. Naast het vervangen van de asfaltlaag door HSB, zijn er meer aanpassingen doorgevoerd aan de bruggen in deze fase waardoor het technisch zeer uitdagende projecten bleken, zowel voor de MC als de aannemer.

Kenmerken Bruggen

De drie bruggen in deze fase zijn alle gerenoveerd in de periode tussen 2013 en 2017. Kenmerkend voor deze bruggen is dat ze gelegen zijn op belangrijke punten in het Nederlandse hoofdwegennet. Zo overspant de brug bij Ewijk (Tacitusbrug), gelegen in het traject Arnhem-Nijmegen, de Waal. (fig. 15a en b)



15a Tacitusbrug Ewijk - brug 1 stalen koker tuibrug met 2x één centrale pyloon



15b Tacitusbrug Ewijk - links onderzijde brug 1 rechts, nog net zichtbaar, brug 2 betonnen koker tuibrug

In 2010 is reeds begonnen met de uitbreiding van de A50 tussen de knooppunten Ewijk en Valburg en de daarbij horende bouw van een tweede, betonnen brug over de Waal. Deze betonnen brug is, net als de eerste brug, uitgevoerd als een tuibrug, maar het koker-vormige hoofddraagsysteem is uitgevoerd met voorgespannen betonnen elementen in plaats van in staal met een orthotroop rijdek. (fig. 16) Het verkeer is omgeleid over de tweede brug na voltooiing van de betonnen brug, waarna de eerste brug gerenoveerd kon worden. Tijdens de renovatie maakte geen

verkeer gebruik van de brug, waarvan handig gebruik is gemaakt. De totale lengte van de brug bij Ewijk is 1055 m, waarbij de hoofdoverspanning, ondersteund door de tuien, 270 m bedraagt.

De Galecopperbrug is een dubbele tuibrug over het Amsterdam-Rijnkanaal in de A12 bij Utrecht. (fig. 17) Twee aparte tuibruggen, één voor elke rijrichting met een identiek ontwerp zijn geopend in 1971 en 1976. De hoofddraagconstructie van deze bruggen lijkt aan de buitenkant hetzelfde, maar door de verschil-

lende detaillering van het dek is de vermoeiingslevensduur voor beide rijdekken verschillend. Kleine afwijkingen in het ontwerp van de orthotrope rijvloer hebben grote gevolgen voor de vermoeiingslevensduur. Dit kwam ook nadrukkelijk naar voren bij de Kreekrakbrug: deze brug is een liggerbrug over de Schelde-Rijnverbinding in Zeeland in de A58. (fig. 18) De detaillering van deze brug heeft geresulteerd in berekende vermoeiingsschades op heel andere plaatsen in de constructie dan bij de brug bij Ewijk en de Galecopperbrug.

FASE 2

Brug	Open sinds	Renovatiejaar	Totale lengte	Type Brug	Snelweg
Galecopperbrug	1971&1976	2013-2016	320 m	Tuibrug	A12
Tacitusbrug	1976	2013-2017	1055 m	Tuibrug	A50
Kreekrakbrug	1974	2014-2015	240 m	Liggerbrug	A58



16 Tacitusbrug – links brug 1; rechts brug 2: betonnen koker tuibrug met 2x twee pylonen. © Thea van den Heuvel



17 Galecopperbrug met tent voor overlagingwerkzaamheden – VSLiggers geplaatst. © Snowwhite



18 Stalen liggerbrug op de voorgrond over de Schelde-Rijnverbinding in de A58. © Aerial

Renovatie Scope

De belangrijke ligging van de bruggen in het hoofdwegennet en de uiteenlopende constructieve eigenschappen hebben geresulteerd in uitdagende renovatiewerkzaamheden. De uitdaging voor deze bruggen ligt niet alleen in het aanbrengen van de HSB-overlaging om daarmee de levensduur van het rijdek te verlengen met 30 jaar, maar ook in het inpassen van wensen en eisen van andere stakeholders. Zo hebben lokale gemeentes, brugbeheerders, regionale organisatieonderdelen van Rijkswaterstaat, de binnenvaart en de omgeving allemaal specifieke input die de renovatiewerkzaamheden complexer en omvangrijker maken. Een voorbeeld hiervan is een wens van de binnenvaart om de doorvaarthoogte onder de drie bruggen te vergroten. (fig. 19) Ook was de gemeente Utrecht bezig met een planstudie om de capaciteit van de ring Utrecht in de toekomst uit te breiden en wilde daarmee de mogelijkheid hebben om extra rijstroken bij te plaatsen op de Galecopperbrug in beide rijrichtingen. HSB als oppervlaktelaag in plaats van Zeer Open Asfalt Beton (ZOAB) heeft gevolgen voor de

geluidshinder voor omwonenden, waardoor er een laag ZOAB bovenop het HSB noodzakelijk was voor de brug bij Ewijk. Deze maatregel vergroot het eigen gewicht, dat moet worden afgedragen naar de onderbouw door de hoofdconstructie en tuien. Dit zijn alle voorbeelden voor de uitdijende scope voor deze bruggen: niet alleen moest rekendkundig worden aangetoond dat de HSB-overlaging afdoende was voor de extra levensduur van het stalen rijdek, maar ook moesten deze wensen en eisen worden ingepast in het versterkingsontwerp. Daarbij zijn de bruggen in fase 2 in slechtere staat, waardoor er meer reparaties noodzakelijk zijn aan het rijdek en meer versterkingen aan de hoofdconstructie nodig zijn. Deze reparatie- en versterkingswerkzaamheden dienen uitgevoerd te worden in veelal beperkte werkruimten, waardoor gezondheids- en veiligheidsoverwegingen een grotere impact hebben op de uitvoerwerkzaamheden. Een greep uit de vele herberekenings- en uitvoeringsaspecten wordt gepresenteerd in de volgende paragraaf.

Herberekening en Uitvoeringsaspecten

Gedetailleerde, numerieke vermoeiingsberekeningen hebben de levensduur van de verschillende lasverbindingen in het orthotrope rijdek bepaald op eenzelfde manier als voor de bruggen in fase 1. De voorspelde vermoeiingsschade is tijdens de renovatie bevestigd. Zo zijn op de 1055 m lange brug bij Ewijk meer dan 2000 reparaties uitgevoerd aan het rijdek nadat het asfalt was verwijderd. Daarnaast zijn veel reparaties uitgevoerd aan de onderzijde van het rijdek onder moeilijke omstandigheden. Deze werkzaamheden drukken zwaar op doorlooptijden van de totale renovatie. Het aanbrengen van HSB vond bij de Galecopperbrug in verschillende fases plaats om zoveel mogelijk rijstroken open te houden voor het verkeer en daarmee de totale hinder voor het wegverkeer te minimaliseren. Ongeveer 10 weken per rijstrook is er nodig om de asfaltlaag te verwijderen, het dek schoon te stralen, de vermoeiingsscheuren te detecteren en te repareren (fig. 20a+b) en om de HSB-laag met alle onderdelen aan te brengen.



19 Vijzelen brug nabij de oplegpunten. © Thea van den Heuvel



20a+b Lassen vermoeiingsscheuren Galecopperbrug onder geconditioneerde omstandigheden



Een juiste inschatting van het aantal uit te voeren reparaties is essentieel voor het naleven van de geplande bouwfaserings die is opgesteld om de hinder voor weggebruikers tijdens de uitvoering te minimaliseren.

Naast de vele reparaties aan het dek heeft de renovatie van de Galecopperbrug te maken met uiteenlopende eisen van stakeholders met grote gevolgen voor de hoofdconstructie. Zo diende de wens van de gemeente om de ring in de toekomst uit te breiden, te worden ingepast en moest de brug worden opgevijzeld om de doorvaarthoogte te vergroten. De oplossing voor deze eisen is gevonden in het ontwerpen van VoorSpanLiggers (VSL's), uitgevoerd in hoge sterkte staal met een lengte, die gelijk is aan de totale lengte van de brug (320 m). (fig. 21) Vier van dit soort liggers zijn gemaakt en aan de buitenkanten van beide bruggen aangebracht. Bij het ontwerp van deze kokerliggers is rekening gehouden met het in de toekomst aanbrengen van extra rijstroken op de liggers.

Deze liggers zijn verder op discrete punten verbonden aan de hoofdconstructie van de brug. Na het plaatsen van de VSL's is de brug opgevijzeld om de beoogde doorvaarthoogte te realiseren. Een deel van het eigen gewicht van de brug wordt nu afgedragen door de VSL's, waardoor de kracht in de tuien is gereduceerd. Dit laatste maakt van de Galecopperbrug een hybride draagconstructie, omdat de hoofdo overspanning van 180 m niet alleen wordt ondersteund door de tuiconstructie, maar ook door de VSL's. De 1500 ton wegende liggers en de daarop uitgeoefende belastingen vereisen een aparte fundering die uitgevoerd is met grondverdringende, geschroefde stalen buispalen met groutinjectie, die trillingsvrij en in beperkte werkhoogte zijn aangebracht.

Naast het aanbrengen van de VSL's, maakten aangescherpte veiligheidseisen aanpassingen aan de Galecopperbrug noodzakelijk. Zo zijn de tuien ingepakt met een brandwerende bekleding om in geval van brand nabij de

verankeringen van de tuien, voldoende tijd te hebben om de brug te ontruimen. Numerieke modellen zijn gemaakt die een in brand staand voertuig nabootsen nabij de ankerpunten om zo het effect van temperatuursverhoging op sterkte- en stijfheidskarakteristieken van de tuiconstructie te simuleren. Ook zijn de barriers vervangen door een zware, voertuigerende constructie om zo de tuien te beschermen tegen aanrijding door vrachtwagens. Deze laatste twee voorbeelden laten zien dat de veiligheid van een constructie in extreme situaties ook wordt meegenomen in een herberekeningsprogramma van bestaande kunstwerken.

Ook de renovatiewerkzaamheden van de brug bij Ewijk zijn niet beperkt gebleven tot het aanbrengen van HSB en het repareren van het dek. Na uitgebreide inspectie bleken de vier tuien van de brug in de hoofdo overspanning toe aan vervanging. (fig. 22) De tuien van Ewijk bestonden uit vijf (buitenkant) en drie (binnenkant) gebundelde 'locked



21 Inhangen VSLiggers in Galecopperbrug
© Arup

22 Vervanging tuien brug 1- Tacitusbrug Ewijk
© Arup

coil-kabels' die verankerd waren in de stalen kokerconstructie van het brugdek en die continu waren doorgevoerd over de zadelpunten in de pylonen. Omdat de Waal één van de drukst bevaren waterwegen in Europa is, moet de vervanging geschieden zonder de vaarweg te stremmen. Tijdelijke steunpunten om de brug te ondersteunen tijdens het vervangen van de tuien, zijn niet toegestaan. Uiteindelijk hebben 192 en 115 parallelle strengen (respectievelijk buiten- en binnenkant) met een diameter van 15,7 mm en met een totale lengte van 246 kilometer(!) de bestaande kabels vervangen. (fig. 23) Uitgebreide niet-lineaire berekeningen tonen aan dat de tuien één voor één konden worden vervangen door het nieuwe kabelsysteem. Dit is mogelijk omdat het eigen gewicht van de brug is gereduceerd door het verwijderen van de asfaltlaag, omdat er geen verkeer op de brug is en omdat zoveel mogelijk werkbelasting is verwijderd. De doorbuiging van de brug en de krachten in de kabels zijn tijdens de vervanging continu gemeten en vergeleken met de numerieke modellen om het proces nauwlettend in de gaten te houden. De zadel- en ankerpunten moesten verder worden aangepast aan het nieuwe kabelsysteem, wat een complexe operatie was door de beperkte werkruimte. Experimenteel onderzoek in Chicago heeft het vermoeiingsgedrag getest van de nieuwe ankerpunten voor de grootste kabeldiameter ter wereld.

Naast het vervangen van de kabels van de brug bij Ewijk, is de binnenkant van de koker nabij de steunpunten versterkt om de dwarskrachtcapaciteit te vergroten. Deze versterkingen aan de brug zijn onder meer noodzakelijk vanwege het toegenomen eigen gewicht door de gecombineerde oppervlakte van HSB en dubbellaags ZOAB, vanwege de eis van de omgeving voor vermindering van geluidsproductie. De tweede, betonnen brug aan de westzijde van de eerste brug, verandert de windstroming: een nader onderzoek naar het dynamisch gedrag van de brug is daardoor uitgevoerd met windtunneltesten in Italië op een geschaald model, waarbij ook de tijdelijke situatie tijdens de kabelvervanging is onderzocht. Ten slotte zijn ook de trek-drukopleggingen vervangen en is de brug één meter opgevijseld om de doorvaarthoogte voor de scheepvaart te vergroten en de toegenomen doorbuiging door het eigen gewicht te compenseren.

De hoofdo overspanning van de Kreekrakbrug is 140 m waardoor een liggerbrug afdoende is om de Schelde-Rijnverbinding te overspannen. De invloed van stakeholders naast Rijkswaterstaat, is verder geringer bij deze brug dan bij de Galecopperbrug en de brug bij Ewijk en bovendien is de brug in minder slechte staat dan de andere bruggen in fase 2. Dit laatste heeft te maken met een afwijkende detaillering van het orthotrope rijdek. Naast het aanbrengen van de HSB-overlaging, zijn de hoofdliggers versterkt en moet de door-

vaarhoogte worden vergroot. Door laatstgenoemde werkzaamheden gecombineerd en gefaseerd uit te voeren, is langdurige beperking van de doorvaart voorkomen en is de hoeveelheid toe te voegen versterkingsstaal gereduceerd. De hinder voor verkeer en scheepvaart is hiermee beperkt.

Lessons Learned

Het combineren van de originele scope, het aanbrengen van HSB om daarmee de levensduur van het rijdek te verlengen met 30 jaar, de uitgebreide versterkingen aan de hoofd draagconstructie en het inpassen van alle wensen en eisen van stakeholders, heeft geresulteerd in bruggen die weer 30 jaar mee kunnen volgens de huidige veiligheidseisen. Aanvullende functionaliteit, gewijzigde regelgeving en de slechte staat van de brug heeft echter geresulteerd in omvangrijke en daardoor kostbare werkzaamheden. De doelstelling is behaald, maar de werken waren zeer ingrijpend. Men kan zich afvragen of de oorspronkelijke doelstelling van het PRB, een levensduurverlenging van 30 jaar voor het orthotrope rijdek en de hoofd draagconstructie, niet te beperkt is. Op welk moment wordt het duurzamer om een geheel nieuwe brug te bouwen of om te kiezen voor een levensduurverlenging die afwijkt van de beoogde 30 jaar? Is het mogelijk efficiënter om naast de brug ook onderhoud- en renovatiewerkzaamheden in het wegennetwerk mee te nemen in de scope? Deze vragen staan centraal in de resterende twee renovatieprojecten in de laatste fase van het PRB-team.

FASE 3 SUURHOFF- EN VAN BRIENEN- OORDBRUG (VANAF 2017)

Voorgaande ervaringen met de HSB-overlaging en de versterkingen aan de hoofd draagconstructie zijn ingezet in de laatste fase van het PRB-project, evenals de ervaringen van de renovaties van de Galecopperbrug en de brug bij Ewijk.

Kenmerken Bruggen

De laatste twee bruggen binnen het MC-project zijn gelegen in de regio Rotterdam: de Suurhoffbrug (fig. 24) en 2e Van Brienenoordbrug. (fig. 25) het onderzoek naar scheurvorming in stalen rijdekken begon in 1997 nadat de vermoeiingsscheuren waren ontdekt in de klap van deze laatst genoemde boogbrug over de Nieuwe Maas. Het vaste gedeelte heeft te maken met dezelfde verkeersaantallen en heeft een identieke detaillering, maar de asfaltoverlaging op de vaste brug



23 Nieuwe tuien t.p.v. zadelconstructie in pylloon van brug 1- Tacitusbrug Ewijk

heeft, in tegenstelling tot de slijtlaag op de klap, een spannings-reducerende werking waardoor de levensduur van de vaste brug langer is dan de klap zelf. Deze boogbrug heeft de grootste hoofdo overspanning van Nederland (295 m) en heeft dagelijks te maken met grote verkeersaantallen van en naar Rotterdam. De ontwikkeling van het orthotrope rijdek in de jaren '70 en '80 is goed zichtbaar in het beweegbare deel van de Van Brienoordbruggen. De eerste brug is geopend in 1965 en hoewel hij aan de buitenkant hetzelfde lijkt als de tweede brug heeft de klap een ander geconstrueerd orthotroop rijdek

dat minder gevoelig is voor scheurvorming door vermoeiing. Dit laat de trend zien: men ging in die tijd bruggen steeds slanker ontwerpen, maar de exponentiele toename van het zware vrachtverkeer en de onderontwikkelde kennis omtrent vermoeiing heeft ervoor gezorgd dat niet de eerste, maar de tweede Van Brienoordbrug eerder moet worden gerenoveerd. Dit, ondanks het leeftijdsverschil van 25 jaar.

De Suurhoffbrug bestaat uit een gecombineerde spoor- en verkeersbrug, waarbij de laatstgenoemde is uitgevoerd als liggerbrug.

Deze brug overspant het Hartelkanaal in het havengebied van Rotterdam en is een belangrijke achterlandverbinding vanaf de beide Maasvlaktes voor goederen. De twee pijlers reduceren de hoofdo overspanning tot 95 meter en de brug heeft hiernaast een beweegbaar gedeelte om de bereikbaarheid voor scheepvaart tot de Rotterdamse haven te vergroten. De spoorbrug is uitgevoerd als tuibrug en heeft een gedeelte fundering met de verkeersbrug. De doorvaarthoogte onder beide onderdelen is gelijk.

FASE 3

Brug	Open sinds	Renovatiejaar	Totale lengte	Type Brug	Snelweg
Suurhoffbrug	1973	?	230 m	Liggerbrug	A15
2e Van Brienoordbrug	1990	?	295 m	Boogbrug	A16

De Suurhoffbrug heeft in het verleden twee keer een scheepvaartaanvaring te verduren gehad en significante reparaties aan de hoofd draagconstructie waren nodig door deze incidenten en door vermoeiing door verkeersbelasting. Hiermee viel het binnen de scope van het MC-project.

De renovatieprojecten van de Van Brienoordbrug en de Suurhoffbrug zijn momenteel

in voorbereiding. De uitkomst staat nog niet vast, maar de opgedane kennis uit eerdere fases van PRB wordt meegenomen in de besluitvorming. Deze projecten lopen verder in het zogenaamde 'post-Merwede tijdperk'. Het imago van stalen bruggen heeft een flinke deuk opgelopen nadat vermoeiings-scheuren werden gevonden in de hoofd draagconstructie van de Merwedebrug, die buiten

het MC-project valt. Betrouwbaarheid en veiligheid zullen door dit incident een belangrijkere rol in de renovatie spelen.

Renovatie Scope

De doelstelling die in 2009 voor de acht bruggen is gedefinieerd, is van toepassing op de laatste twee bruggen. Ook hier is vermoeiingsschade aan het orthotrope rijdek aanlei-



24 Suurhoffbrug. © Arup

Wij zijn geen eis meer aan het inwilligen,
maar een probleem aan het oplossen

ding voor de beoogde levensduur verlengen de oplossing HSB en een herberekening van de hoofddragconstructie volgens huidige richtlijnen. Het MC-team heeft echter geleerd van de renovatieprojecten in eerdere fasen en daarom zijn stakeholders vroegtijdig betrokken in het project. De input van deze stakeholders is, met name door de ervaringen met de Galecopperbrug en de brug bij Ewijk, flink uitgebreid in vergelijking met de vooraf gedefinieerde scope in 2009. Dit alles om de levensduurverlenging van 30 jaar te behalen en een toekomstvaste oplossing te realiseren voor de brug, het omliggende wegennetwerk en de omgeving.

Herberekening en Uitvoeringsaspecten

Bij de Suurhoffbrug hebben uitgebreide rekenmodellen aangetoond dat de HSB-overlaging niet alle vermoeiingsproblemen oplost van het orthotrope rijdek en de hoofddragconstructie. Omvangrijke reparaties en versterkingen bleken noodzakelijk om de 30 jaar extra levensduur te behalen. De verwachting is verder dat de verkeersintensiteit na ingebruikneming van de Tweede Maasvlakte flink gaat toenemen. De onderbouw van de verkeersbrug is niet alleen onderhevig aan belastingen van de spoor- en verkeersbrug, maar de capaciteit dient ook toereikend te zijn om het extra gewicht van HSB en staalversterkingen te dragen. Verder is er een sterke wens van de vaarwegbeheerder om de doorvaarthoogte van de bruggen te vergroten. Het opvijzelen van met name de spoorbrug vergt ingrijpende aanpassingen aan het alignement. Deze onduidelijkheden hebben geresulteerd in het (nog) niet uitvoeren van de versterkingsontwerpen. Voorlopig wordt gekozen voor instandhouding met periodieke inspecties om de vermoeiingsscheuren te monitoren en de daarbij horende reparaties uit te voeren. Parallel hieraan wordt de toekomst van de Suurhoffbrug (zowel verkeers- als spoorbrug) behandeld gedurende integrale ontwerpessies met de belangrijkste stakeholders (Havenbedrijf Rotterdam, ProRail, WNZ en Rijkswaterstaat). Hieruit is geconcludeerd dat tot het moment dat er een toekomstbestendige oplossing is voor de verbinding, er vanaf 2020 een tijdelijk brug naast de huidige Suurhoffbrug wordt aangelegd. Het aantal rijstroken op zowel de huidige als de tijdelijke brug wordt gesteld op twee, zodat de veiligheid en doorstroming van verkeer niet in gevaar komt.

De ring of ruit van Rotterdam is de grootste en drukste ringweg van Nederland. Deze ruit is omstreeks 1975 voltooid waarna in de daaropvolgende jaren de capaciteit is uitgebreid met onder andere de bouw van de 2e Van Brienenoordbrug en de 2e Beneluxtunnel. De

toenemende verkeersaantallen drukken echter zwaar op de capaciteit van de ring. Zo lopen er een aantal studies om de verkeersafdracht te optimaliseren: het doortrekken van de A4 door Midden-Delftland tussen Delft en Rotterdam, het realiseren van de Blankenburgverbinding tussen de A20 en de A15 en met name het doortrekken van de A16 vanaf Terbregseplein naar de A13. Deze infrastructuurle aanpassingen kunnen mogelijk het fileprobleem verschuiven naar de Van Brienenoordverbinding, welke momenteel al tegen en over haar capaciteit belast wordt. De aanpak om alleen naar de brug zelf te kijken, lijkt daarom onvoldoende. Een wegennetwerkaanpak voor de gehele A16 tussen knooppunt Terbregseplein en Ridderkerk-Noord, waarbij de rol van de Van Brienenoordbrug in het geheel wordt beschouwd, is belangrijk om de juiste keuze te maken. Een versterkingsontwerp om de levensduurverlenging van 30 jaar te bewerkstelligen is haalbaar, maar is dit op deze locatie de gewenste oplossing? Welke aanpassingen zijn (nog meer) nodig om te voorkomen dat de A16 volstroomt in de spits? Dit zijn de vragen die aan de hand van de opgedane ervaringen van de renovaties aan stalen bruggen binnen het PRB team beantwoord moeten worden om tot een juiste keuze voor renovatie van de brug te komen.

Lessons Learned

De gedefinieerde projectscope in 2009 blijkt niet zaligmakend voor de laatste twee bruggen in het MC-project. Alleen het vermoeiingsprobleem oplossen aan het stalen rijdek is voor de bruggen in fase 1 voldoende gebleken. Tijdens fase 2 bleek de invloed van de wensen van de stakeholders toe te nemen, waardoor het afzonderlijk beschouwen van alleen de brug in fase 3 niet gerechtvaardigd is. Een wegennetwerkschakelaanpak, waarbij ook het omliggende wegennet wordt beschouwd, is noodzakelijk voor de Suurhoff- en de 2e Van Brienenoordbrug. Waar dit toe gaat leiden bij beide bruggen is nog onduidelijk, maar duidelijk is wel dat deze beslissing alleen genomen kan worden door ervaringen

van de renovaties van de eerdere zes bruggen in het MC-project.

Een integrale, toekomstbestendige oplossing wordt momenteel onderzocht voor de Suurhoffbrug.

CONCLUSIE

Renovaties aan stalen bruggen is een technisch uitdagende bezigheid waarbij vele belangen spelen. Wat in 2009 begon als het verhelpen van een vermoeiingsprobleem aan orthotrope rijdekken is uitgegroeid tot een analyse voor een toekomstbestendige oplossing voor de brug en het omliggende wegennetwerk.

In deze tijd is veel ervaring opgedaan met het aanbrengen van HSB, staalversterkingen aan de hoofddragconstructie en het minimaliseren van de hinder tijdens de uitvoering. Bij renovatiewerkzaamheden komen in het verleden gemaakte fouten door voortschrijdende inzichten aan het licht. Anders dan bij een nieuw ontwerp, zijn de randvoorwaarden niet aan te passen en dienen innovatieve en technisch hoogstaande oplossingen te worden bedacht en uitgevoerd.

Verder is de bewegingsvrijheid tijdens de renovatie veelal beperkt omdat de brug gedeeltelijk open blijft tijdens de uitvoering, waardoor de technische oplossing met zo min mogelijk bijbehorende verkeershinder de voorkeur heeft.

De laatste twee bruggen in de serie van acht hebben een andere insteek dan de eerdere zes en de komende maanden zal uitwijzen wat de oplossing voor deze twee bruggen wordt.

De doelstelling begon met het uitvoeren van de projectscope: het aanbrengen van HSB om de levensduur van het rijdek te verlengen met 30 jaar. Dit is echter door opgedane ervaringen en kennis gegroeid naar het oplossen van een probleem aan brug en wegennetwerk. De aanpak van de Suurhoffbrug en 2^e Van Brienenoordbrug is door de Managing Contractor, in de loop der jaren omschreven als: *“Wij zijn geen eis meer aan het inwilligen, maar een probleem aan het oplossen”*.

