



Meesterproef met onderzoek en ontwerp verbreding  
bestaand betonnen kunstwerk

# Verbreding kokerbrug Holendrecht

*Als afronding van de opleiding Betonconstructeur PMSE is een meesterproef uitgevoerd gericht op het onderzoek naar, en het ontwerp van een verbreding van een bestaande kokerbrug in knooppunt Holendrecht. Door een constructief onderzoek van de bestaande constructie gevolgd door een uitgebreide variantenstudie voor de verbreding en verbinding, is op basis van een trade-off-matrix de beste optie voor de verbreding bepaald. Deze is verder uitgewerkt tot een definitief ontwerp voor de bovenbouwconstructie.*

Onderdeel van de wegwitbreiding Schiphol-Amsterdam-Almere (SAA) is de uitbreiding van de A9 Holendrecht-Diemen (Gaasperdammerweg). Voor een goede doorstroming van het verkeer is het daarbij noodzakelijk ook knooppunt Holendrecht (A2/A9) uit te breiden. Zo worden onder meer de twee bestaande verbindingbogen die over de A2 gaan, uitgebreid met extra rijstroken. Om hier ruimte aan te bieden, moet de noordelijke verbindingboog van de A9 aan de zuidzijde met circa 4,5 m worden verbreed en aan de noordzijde met circa 6,5 m. Deze uitbreiding is in het kader van een meesterproef nader onderzocht en ontworpen.

### Opzet meesterproef

Het afstudeerrapport is opgezet als een constructief berekenings-rapportage waarbij het ontwerp is uitgewerkt conform de Euro-codes EN1990/1991/1992, de NEN 8700-serie en de richtlijnen van Rijkswaterstaat (ROK1.2 en RBK1.1). De architectonische eisen uit de vraagspecificatie zijn losgelaten ten behoeve van de ontwerprijheid in de variantenstudie. Achtereenvolgens zijn in de rapportage de navolgende onderdelen op systematische wijze uitgewerkt:

- vaststellen van de uitgangspunten en toetsingscriteria op niveau nieuwbouw en verbouw voor beoordeling van zowel de bestaande constructie als de verbredingen;
- bepalen van de in rekening te brengen belastingen en vaststellen van de belastingscombinaties;
- inventarisatie van de bestaande constructie waarbij de volgende onderdelen zijn beschouwd:
  - bepaling afmetingen en capaciteit bestaande constructie op basis van archiefgegevens;
  - bepaling gevolgen van koppeling van de verbreding aan de bestaande constructie, waarbij aan de hand van een gevoeligheidsanalyse enkele varianten van de koppeling zijn beschouwd;
- variantenstudie voor een viertal mogelijke type verbredingen;
- definitief ontwerp voor de verbreding op basis van een trade-off-matrix gekozen beste variant.

### Bestaande constructie

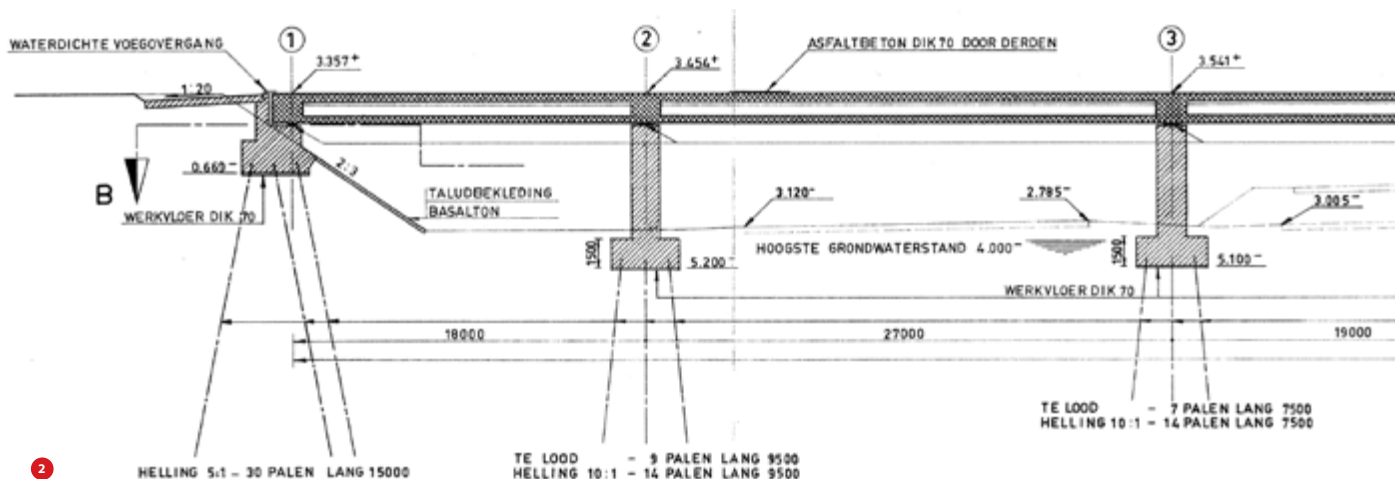
De bestaande constructie betreft een voorgespannen kokerbrug in de noordelijke verbindingboog van de A9 die in 1979 is gebouwd (KW12 Alida). De kokerbrug heeft een totale lengte van circa 122 m verdeeld over zes overspanningen met een maximale overspanning van 27 m (fig. 2). De koker heeft een uitwendige hoogte van 1,5 m en een totale breedte van 14,5 m en biedt daarmee in de huidige situatie ruimte aan twee rijstroken plus een vluchtstrook.

Op basis van archieftekeningen en -berekeningen is de geometrie en de aanwezige voorspanning en wapening in kaart gebracht. Hieruit volgt dat de bestaande kokerbrug is uitgevoerd in betonsterkteklasse B37,5. Het brugdek is destijds gebouwd volgens de schuifmethode zodat ten behoeve van de bouwfase,

### ENCI Studieprijs 2016

Dit is het tweede artikel in een serie met bijdragen van prijswinnaars van de ENCI Studieprijs 2016. De studie 'Verbreding bestaande kokerbrug in knooppunt Holendrecht' die in dit artikel wordt beschreven, ontving de eerste prijs in de categorie 'Professional Masteropleidingen'. De jury over deze studie: "[...] Alhoewel gebruikgemaakt wordt van bestaande rekenmethodes, is de aanpak origineel te noemen. [...] De verschillende aspecten van de studie zijn heel systematisch aangepakt en in stappen op een gedreven wijze uitgewerkt. Gaande van de analyse van de bestaande brug, de vergelijking van de verschillende varianten en de uitwerking van het finaal gekozen ontwerp, dat bestaat uit in situ voorgespannen plaatbruggen aan beide zijden van de bestaande kokerbrug. Alle berekeningen zijn zorgvuldig uitgevoerd en de resultaten zijn duidelijk gepresenteerd." Ook de examencommissie had veel lof voor de studie. Na verdediging is de meesterproef beoordeeld met het eindcijfer 9. Meer informatie op [www.cementonline.nl/encistudieprijs](http://www.cementonline.nl/encistudieprijs).





- 2 Langsdoorsnede bestaande kokerbrug
- 3 Wapeningsconfiguratie bestaande kokerbrug
- 4 Mogelijke rijstrookindeling voor belastingsmodel
- 5 Belasting bij een verkeersongeval op het brugdek

met een continu veranderend momentenverloop, er centrische voorspanning in de gehele kokerdoorsnede is toegepast. Na gereedkomen is deze aangevuld met een continuïteitsvoorspanning in de kokerwanden, zodat voor de eindfase beide voorspannsystemen actief zijn (fig. 3).

Bij deze bouwwijze is het brugdek gebouwd in elf moten bestaande uit elk twee stortfasen. De eerste stort betreft de vloer en de tweede stort het kokerdak en wand. Vanwege de beperkte inwendige hoogte van de koker van 0,95 m is als bekisting voor de tweede stort de binnenzijde van de koker volledig gevuld met EPS.

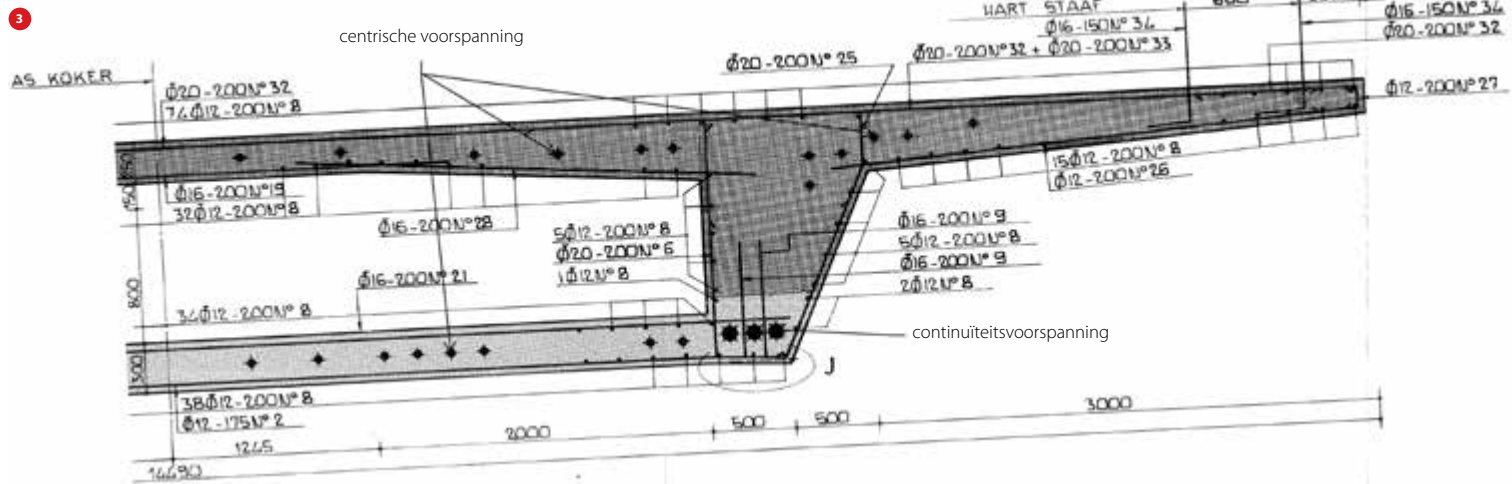
Beoordeling bestaande constructie

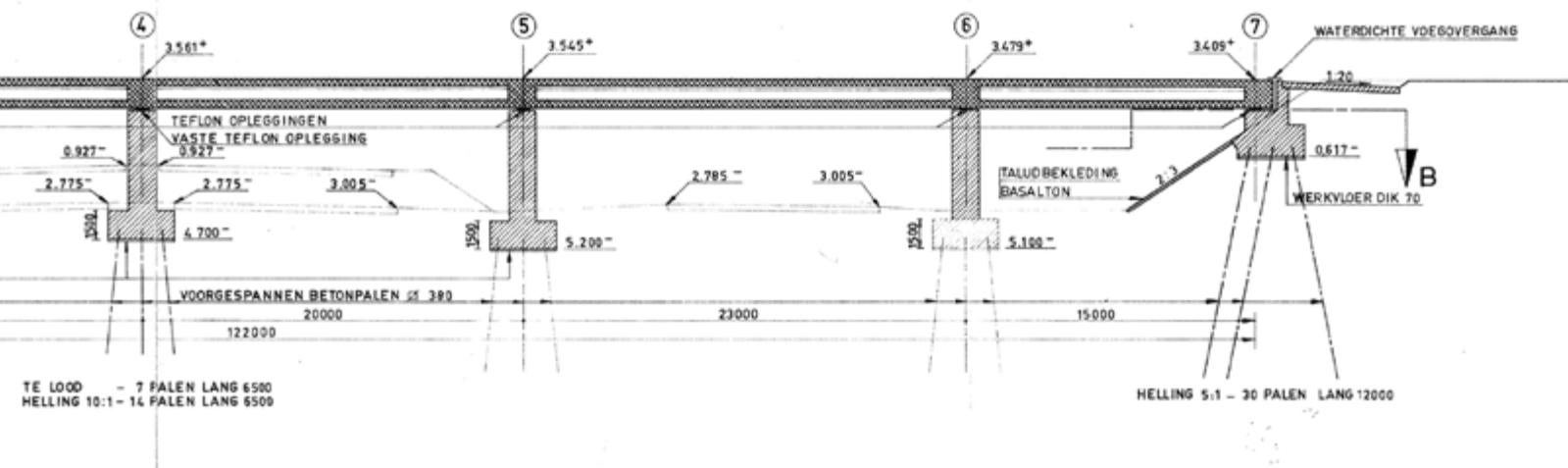
Voor de maatgevende overspanning zijn met behulp van deze constructiegegevens de doorsnedecapaciteiten bepaald door middel van diverse handmatige doorsnedeberekeningen. De (rest)capaciteit van de bestaande constructie is in kaart gebracht voor het veiligheidsniveau 'verbouw'. Hierbij is gebruikgemaakt van een eerder uitgevoerde herberekening van het kokerdak, waarbij een verkeersbelasting in een strook van 8,5 m breed (2 rijstroken + reststrook), gepositioneerd

boven het gesloten gedeelte van de koker (het deel tussen de kokerwanden), is beoordeeld.

De momentcapaciteit in dwarsrichting bleek niet te voldoen aan de onderzijde van het kokerdak en de boven- en onderzijde van de kokervloer. Oorzaak hiervan is de toegenomen verkeersbelasting. Deze zorgt ten gevolge van de plaatsing in het midden van de koker tevens voor trek in de kokervloer. De momentcapaciteit van de koker in langsrichting en de dwarskracht- en wringcapaciteit in langs- en dwarsrichting voldoen wel.

Versterking van het kokerdak en de kokervloer is een zeer arbeidsintensieve en kostbare operatie. Tevens is, zoals gezegd, de inwendige hoogte van de koker beperkt en gevuld met EPS zodat de mogelijkheden voor een versterking worden beperkt. Omdat in de nieuwe situatie op het kunstwerk een brede middenberm wordt gerealiseerd, die is gelegen boven het gesloten gedeelte van de koker, is langs de randen van de middenberm een vaste voertuigkering aangebracht. Hiermee is de aanwezigheid van verkeer ter plaatse van het midden van het kokerdak (m.u.v. een calamiteitsituatie) uitgesloten en is de verwachting dat daarmee de capaciteit voldoende is.





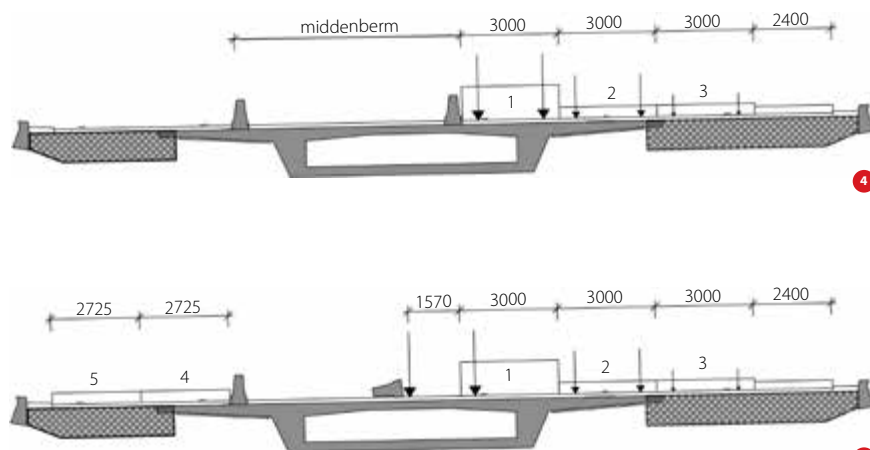
Met de controleberekeningen die in het definitief ontwerp zijn uitgevoerd voor de nieuwe situatie, blijkt dit ook het geval te zijn. Dit heeft wel tot gevolg dat er een restrictie geldt met betrekking tot de wegindeling op het kunstwerk, aangezien conform de ROK normaliter ook op middenbermen met verkeersbelasting moet worden gerekend in verband met toekomstvastheid (fig. 4 en 5).

### Verbinding bestaand – nieuw

Om de verbredening van het kunstwerk mogelijk te maken, moet het aan beide zijden worden uitgebreid met een nieuwe constructie. De bestaande en nieuwe constructie worden aan elkaar gekoppeld om voor de weggebruikers nadelige verschilverplaatsingen te voorkomen. Hierdoor ontstaat er echter wel een uitwisseling van krachten, waarbij er ten gevolge van de verschillen in ouderdom door krimp en kruip tevens een herverdeling van spanningen zal optreden. Zo zal de voorspankracht in de nieuwe constructie gedeeltelijk wegkruipen in het bestaande deel en zal de verbreding naar verwachting gaan hangen aan de bestaande constructie. Er is daarom gekozen de verbredingen eerst zelfdragend te bouwen, waardoor elastische vervormingen ten gevolge van eigen gewicht en voorspanning ongehinderd kunnen plaatsvinden. Met behulp van een stortstrook zal vervolgens later de verbinding worden gerealiseerd. Hierdoor zal een gedeelte van de krimp- en kruipvervorming al optreden en worden de eerdergenoemde gevolgen van de verbinding gedeeltelijk beperkt.

#### Keuze verbinding

Om het type verbinding te bepalen, is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om de consequenties voor de bestaande constructie in beeld te brengen en een overwogen keuze te kunnen maken voor de uitvoering van de aansluiting. Op basis van een eenvoudig model van het kokeroverstek is de optredende krachtswerking bepaald ten gevolge van de verkeersbelasting en ten gevolge van een verschilbelasting tussen bestaand en nieuw. Hieruit volgt dat een momentvaste verbinding gunstiger is dan een scharnierende verbinding als het gaat om de krachtswerking ten gevolge van verkeer op het overstek. Deze is daarentegen wel weer gevoeliger voor verschilverplaatsingen die



kunnen optreden door zettingen, maar ook door verkeer dat alleen op de verbreding aanwezig is.

In het eerdergenoemde omschreven rekenmodel is alleen gekeken naar de krachtswerking in het overstek. Aanvullend is met behulp van een raamwerkberekening van de totale doorsnede de invloed van de stijfheidsverschillen tussen bestaand en nieuw beschouwd. Hierbij is rekening gehouden met twee verschillende type verbindingen en een variatie van stijfheidsverschillen. Tevens is een mogelijk gedeeltelijke sloop van het overstek beschouwd. Hieruit volgde dat door het behouden van de bestaande kokeroverstekken (uitkraging 3,0 m) en het realiseren van een scharnierende aansluiting, gebruik wordt gemaakt van de vervormbaarheid van het overstek in dwarsrichting en dat de wederzijdse krachtswerking ten gevolge van verticale belastingen wordt beperkt. Dit resulteert voor deze variant dan ook in een beperkte gevoeligheid van de samengestelde constructie ten gevolge van onderlinge stijfheidsverschillen.

### Variantenstudie

Naast het type verbinding is ook de uitbreiding zelf beschouwd. Voor vier mogelijke type verbredingen is een variantenstudie uitgevoerd. Voor elke variant zijn op basis van globale

ontwerpberekeningen de calculatiehoeveelheden bepaald. Hierbij is rekening gehouden met de resultaten die volgen uit de voorgaande beoordeling van de bestaande constructie. Tevens is voor elke variant een omschrijving van de uitvoeringsmethodiek en een globale kostenraming op basis van directe kosten opgesteld. Met behulp van een trade-off-matrix is zo een weloverwogen keuze gemaakt voor de variant die in het definitief ontwerp verder is uitgewerkt.

**Vier varianten**

De vier varianten voor de verbreding zijn:

1. uitvoering met prefab kokerliggers;
2. uitvoering met prefab railbalkliggers;
3. uitvoering als in situ voorgespannen plaat;
4. uitvoering als in situ kokerligger (fig. 6).

Voor de prefab varianten is de dekbreedte van de verbreding groter dan voor de in situ variant. De krachtsverdelingscapaciteit in dwarsrichting is voor de prefab varianten namelijk kleiner. Hierdoor is er voor gekozen het kokeroverstek gedeeltelijk te slopen zodat een hoge randbelasting op de buitenste prefab ligger wordt voorkomen.

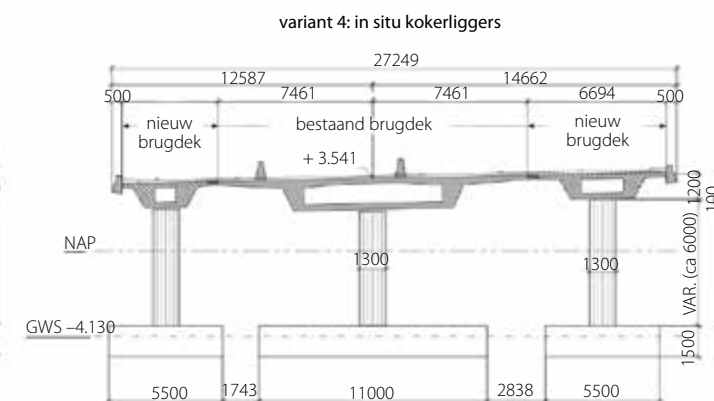
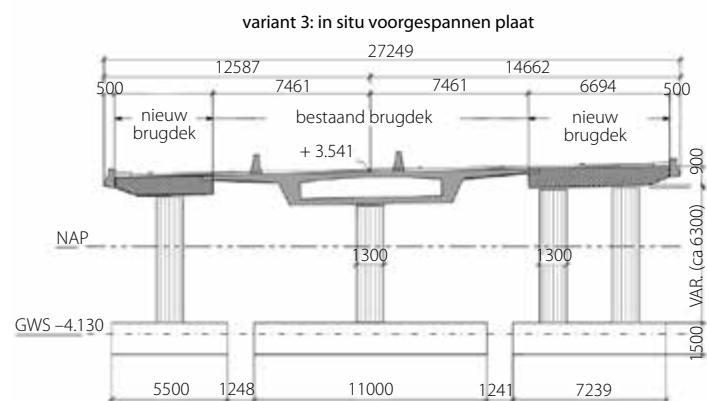
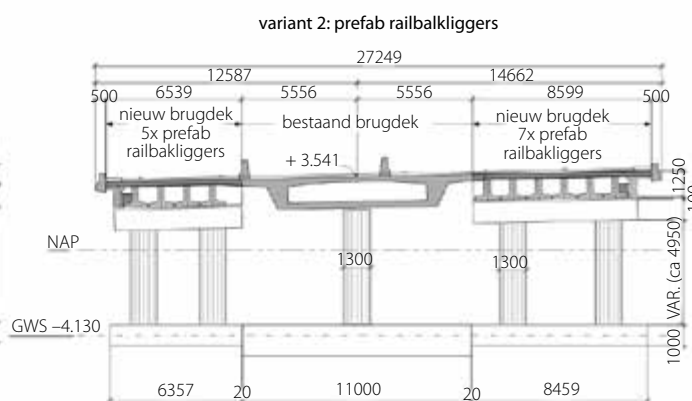
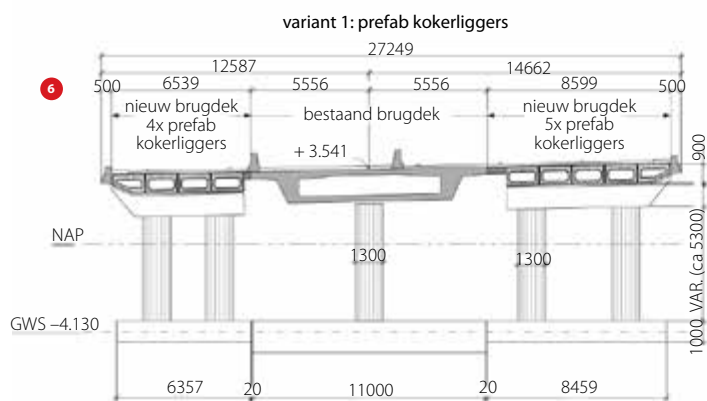
**Verbinding varianten**

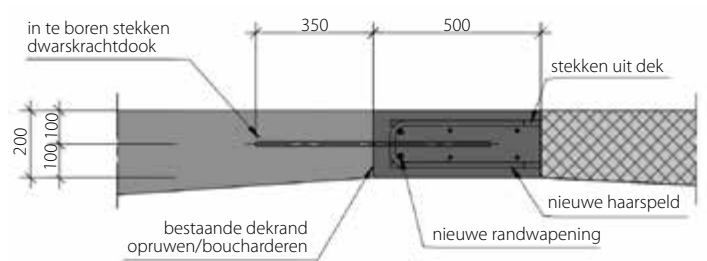
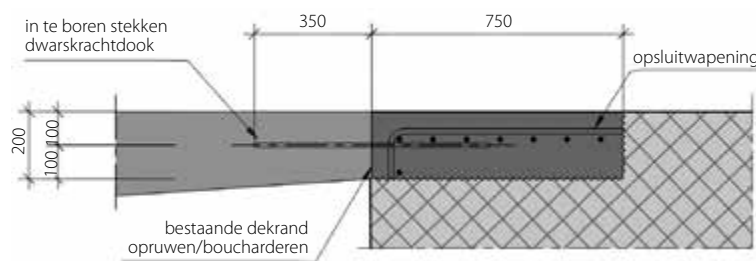
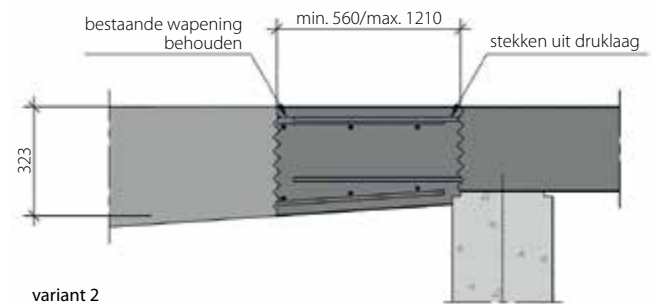
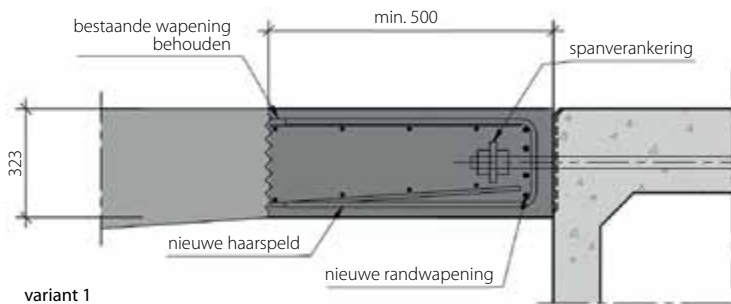
Elke dekvariant geeft andere mogelijkheden voor de realisatie

**Tabel 1** Eigenschappen verbinding vier varianten

Variant	Resultaten ontwerpberekening
1	Inklemming d.m.v. blinde verankering dwarsvoorspanning in stortstrook. Voorspankracht = ca. 400 kN/m. Sloop bestaand over $b = 1,85$ m. Nadeel: risico op optreden trekkracht in bovenflens bij te hoge weerstand nieuwe opleggingen.
2	Inklemming d.m.v. overlapping bestaande en nieuwe dekwapening in stortstrook (natte knoop verbinding). Sloop bestaand over $b = 1,85$ m. Voordeel: opvangen zeeg prefabliggers met in situ druklaag.
3	Scharnier d.m.v. in bestaande bovenflens te verlijmen dwars- en normaalkrachten dook ( $\varnothing 12-100$ ). Verlijmen staalstrips $50 \times 3$ h.o.h. 500 mm tegen onderzijde bestaande bovenflens. Voordeel: vervormbaar dus minder gevoelig voor verschilvorming. Voordeel: beperkte sloopwerkzaamheden, dus bestaande dragende constructie blijft intact.
4	Scharnier d.m.v. in bestaande bovenflens te verlijmen dwars- en normaalkrachten dook ( $\varnothing 12-200$ ). Voordeel: slappere ondersteuning door nieuw dek, dus geen versterking bestaande bovenflens benodigd.

van de verbinding. Op basis van de resultaten van de eerdergenoemde gevoeligheidsanalyse is in de variantenstudie per variant de keuze gemaakt hoe de verbinding wordt gerealiseerd. Deze varianten zijn in figuur 7 en tabel 1 uitgewerkt. Mede door de gedeeltelijke sloop van het kokeroverstek is bij de prefab varianten uitgegaan van een inklemming door het opnemen van de bestaande wapening in de stortstrook. Voor de in situ varianten is uitgegaan van een scharnier door het





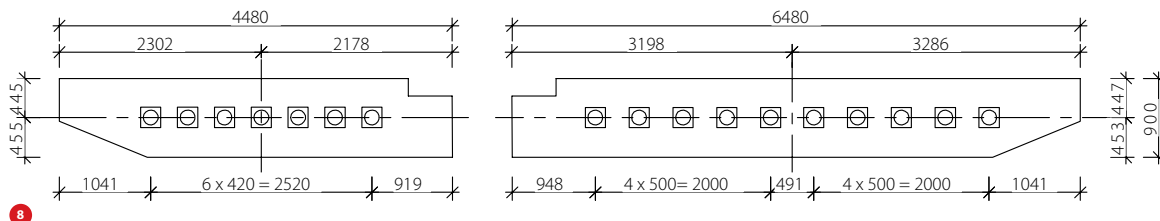
variant 1

variant 2

variant 3

variant 4

7



8

- 6 Varianten verbreding
- 7 Verbinding vier varianten
- 8 Voorspanning in voorgespannen platen (aanzicht spatvlak)

inboren en verlijken van een dwars- en normaalkrachtdoek, aangezien uit de eerdere gevoeligheidsanalyse volgt dat dit de voorkeursvariant betreft.

### Keuze

Uit de trade-off-matrix volgt dat variant 3, de in situ voorgespannen plaat, de beste variant is (tabel 2).

### Definitief ontwerp

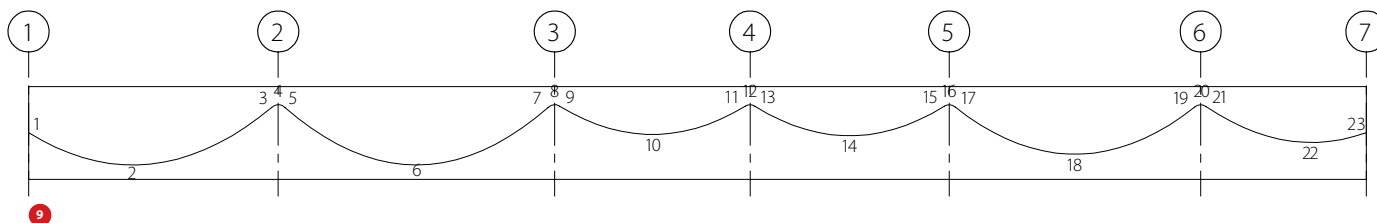
Het definitief ontwerp is uitgewerkt voor de bestaande koker die aan beide zijden is verbreed met behulp van een in situ voorgespannen plaat. Deze plaat heeft een constructiehoogte van 900 mm uitgevoerd in beton C55/67 en is voorzien van tien 12-strengs voorspankabels aan de noordzijde en zeven 12-strengs voorspankabels aan de zuidzijde (fig. 8). Er is een

Tabel 2 Resultaten trade-off-matrix variantenstudie

Variant 1	Variant 2	Variant 3	Variant 4
prefab kokerliggers $h = 900$ mm met dwarsvoorspanning	prefab railbalkliggers $h = 1000$ mm + druklaag $h = 250$ mm	in situ voorgespannen plaat $h = 900$ mm voersp. 10x VSL E6-12 zachtstaal 90 kg/m <sup>3</sup>	in situ voorgespannen kokerligger $h = 1200$ mm vloer $h = 0,25$ m wand $b_{\min} = 0,5$ m dak $h = 0,25$ m voersp. 4x VSL E6-22 zachtstaal 150 kg/m <sup>3</sup>
verbinding d.m.v. dwarsnaspansing	verbinding d.m.v. opnemen wapening	verbinding d.m.v. inboren stekken	verbinding d.m.v. inboren stekken
€ bovenbouw: 100%	€ bovenbouw: 99%	€ bovenbouw: 82%	€ bovenbouw: 84%
TOM-Score: 137	TOM-Score: 143	TOM-Score: 119	TOM-Score: 130

- 9 Verloop kabel 17 (verticaal verschaald) in langsrichting
- 10 Normalkracht t.g.v. verhinderde vervorming
- 11 SCIA-rekenmodel bestaande uit plaat- en schaalementen
- 12 De eerste ligger van KW12 Alida wordt geplaatst

foto: Rijkswaterstaat

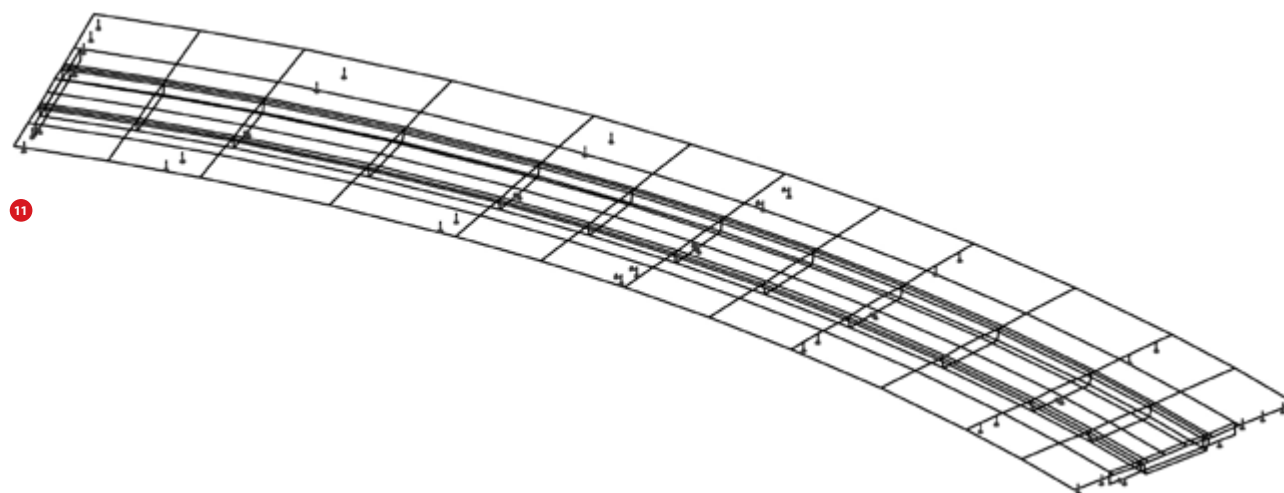


gekromd kabelverloop aangehouden met een nagenoeg constante verticale kromtestraal van circa 150 m voor de velden en 7,5 m ter plaatse van de tussensteunpunten (fig. 9). Uitgaande van tweezijdig spannen op de dekuiteinden bedraagt het maximale totale voorspanverlies ten gevolge van het gekromde kabelverloop in de eindfase circa 450 N/mm<sup>2</sup> indien de verbreding geheel zelfdragend los wordt gebouwd. Aanvullend zal ten gevolge van de verhinderde krimp- en kruipvervorming voor de periode  $t = 56$  dagen tot  $t = \infty$  door de verbinding van het nieuwe aan het bestaande deel een behoorlijk aandeel

(ca. 50%) van de normaaldrukkracht uit voorspanning weggelopen naar de bestaande constructie (fig. 10).

### Rekenmodel

Ten behoeve van de bepaling van de krachswerking is een SCIA-rekenmodel van de totale bovenbouwconstructie opgesteld. Vanwege het in rekening brengen van de onderlinge samenwerking en de krachtsverdeling in dwarsrichting, is daarbij gebruikgemaakt van een rekenmodel bestaande uit plaat- en schaalementen. De opleggingen zijn ingevoerd als





12

verende knoopondersteuning. De schematisering resulteert uiteindelijk in een compleet model opgebouwd uit twaalf segmenten ter benadering van de horizontale boogstraal van het kunstwerk (fig. 11). Een handmatige controle van de uitvoer van het complete model is zeer complex. Ter validatie zijn daarom tijdens de opbouw van het model tussentijdse controles uitgevoerd (m.b.v. een handberekening) voor diverse constructieonderdelen/modellerings.

#### Aanpassingen

Op basis van de maatgevende krachtwerking zijn doorsnede-berekeningen uitgevoerd voor de toetsing van de bestaande constructie en zijn de nieuwe verbredingen gedimensioneerd. Het verhogen van de voorspankracht in verband met het verlies ten gevolge van de verhinderde vervorming, is niet rendabel. Daarom is ervoor gekozen ter plaatse van de maatgevende sneden bijlegwapening toe te passen. Als veilige bovengrens-benadering zijn de verbredingen tevens gedimensioneerd als geheel zelfdragend (dus los van de bestaande constructie).

#### Praktijk

Het project is inmiddels uitgevoerd met een prefab liggerdek en niet met een in situ plaat zoals uit de meesterproef naar voren

#### Uitvoering in de praktijk

Van het project zoals het daadwerkelijk is uitgevoerd, is in *Cement 2017* het artikel 'Kokerbruggen Holendrecht verbreed' verschenen. Dit artikel is te raadplegen op [www.cementonline.nl](http://www.cementonline.nl).

kwam. Dit in verband met de bouwtijd en de beperking van de hinder voor het verkeer (zie kader 'Uitvoering in de praktijk'). Uit de opgestelde kostenraming bleken de prefab varianten echter duurder dan de in situ varianten vanwege de kostbare sloopwerkzaamheden van de kokeroverstekken inclusief de benodigde hulpconstructie ter bescherming van de onderdoorgaande A2. Een in de meesterproef niet nader beschouwde variant voor een prefab liggerdek waarbij de kokeroverstekken ook volledig worden behouden, heeft dan uiteindelijk ook geleid tot het door het projectteam gekozen ontwerp voor realisatie.

De meesterproef heeft als een constructief zelfstandig project van VO- tot DO-fase wel geleid tot meer kennis en inzicht in de mogelijkheden van hergebruik en verbreding van bestaande constructies. ☒