



Restlevensduur van 30 kunstwerken met minimaal 20 jaar verlengd

Liggerkoppen kathodisch beschermd

dr.ir. Ernst Klamer

Royal HaskoningDHV

ir. Joost Gulikers

Rijkswaterstaat

ir. Hans van den Hondel

Vogel Kathodische Bescherming BV

prof.dr. Rob Polder

TNO, TU Delft

Rijkswaterstaat heeft in het kader van onderhoud aan haar kunstwerken ruim 1500 koppen van voorgespannen liggers in circa 30 viaducten gerepareerd en voorzien van kathodische bescherming (KB). De liggerkoppen vertoonden matige tot zware schade als gevolg van wapeningscorrosie door het indringen van chloriden, waardoor het noodzakelijk was in te grijpen. Met behulp van kathodische bescherming is het corrosieproces tot stilstand gebracht. Hierdoor is het risico op verdere degradatie en het bezwijken van de voorspanning weggenomen en zullen de betonreparaties langer in stand blijven.

- 1 Afgedrukte betondekking en corrosie van de zachtstaalwapening
- 2 Oppervlakkige corrosie van de voorspanning (ankerblok)

Tijdens inspecties van verschillende viaducten in en over de snelweg constateerde Rijkswaterstaat dat een aantal van deze viaducten aanzienlijke schade vertoonde aan de uiteinden van de liggers. Bij een groot aantal liggers bleek dat aan de uiteinden stukken beton waren afgesprongen en werden scheuren geconstateerd in het beton. Nader onderzoek leerde dat de kunstwerken die last hadden van deze problematiek waren gebouwd tussen 1965 en 1976 en waren uitgevoerd met voorgespannen betonnen T-liggers. Deze zogenoemde contactliggers zijn liggers zonder druklaag die in langs- en dwarsrichting zijn voorgespannen.

Oorzaak

Uit onderzoek bleek chloride geïnitieerde wapeningscorrosie de oorzaak van de schade te zijn. Door lekkage van de voegovergangen werden de koppen van de liggers gedurende lange tijd blootgesteld aan vochtige omstandigheden. Door indringing van chloriden is in eerste instantie corrosie ontstaan aan de zachtstaalwapening, mede door de geringe dekking (gemiddeld ca. 25 mm). Hierdoor werd de betonnen dekking afgedrukt, in het bijzonder in de hoeken achter de oplegblokken (foto 1).

Constructieve risico's

De liggers zijn voorgespannen met een Dywidag voorspanstelsysteem, dat bestaat uit drie tot zes voorspanstaven per ligger. Deze staven zijn verankerd met een ankerblok en een moer. Omdat het risico bestond dat ook het voorspanstelsysteem gecorrodeerd zou zijn, is door SGS Intron een destructief onderzoek uitgevoerd naar de conditie van de verankering. Hierbij is een deel van het beton achter de ankerblok met water weggestraald en is onderzocht in hoeverre de ankerkoppen waren aangetast (foto 2). Uit nadere inspectie bleek dat er sprake was van oppervlakkige corrosie zonder noemenswaardige materiaalafname. Wel was het advies om op korte termijn verdere corrosie te stoppen.

Door Royal HaskoningDHV is vervolgens onderzoek gedaan naar de constructieve gevolgen van de materiaalafname van de wapening en van het (rekenkundig) bezwijken van een van de voorspanstaven. Geconcludeerd werd dat de afname van de wapeningsdoorsnede nog niet tot een onveilige constructie had geleid, maar dat verdere corrosie wel moest worden gestopt, voornamelijk om de betondekking rond de voorspanning in stand te houden. Uit de berekeningen volgde tevens dat bij de liggers met een beperkt aantal voorspanstaven (drie of vier) het bezwijken van een van de voorspankabels al zou kunnen leiden tot het bezwijken van een ligger. Hieruit volgde het advies om op korte termijn de kunstwerken met drie of vier voorspanstaven als eerste aan te pakken.



Kathodische bescherming

Kathodische bescherming is een techniek om corrosie van staal tot verwaarloosbare snelheid af te remmen door het verlagen van de elektrochemische potentiaal van het te beschermen metaal. Kathodische bescherming wordt onderverdeeld in galvanische systemen en systemen met opgedrukte stroom.

Bij *galvanische systemen* wordt een opofferingsanode (bijvoorbeeld zink of aluminium) aangebracht, die een lagere rustpotentiaal heeft dan het al of niet corroderende wapeningsstaal. Door een directe metallische koppeling van de wapening met het minder edele anodemateriaal ontstaat een galvanische cel waarbij het anodemateriaal in oplossing gaat. Bij deze reactie komen elektronen vrij die vervolgens naar het wapeningsstaal worden getransporteerd. Hierdoor wordt de anodische ijzerreactie geremd terwijl de kathodische reactie wordt gestimuleerd. Voordeel van een dergelijk systeem is dat het relatief goedkoop is ten opzichte van een KB-systeem met opgedrukte stroom, omdat er geen spanningsbron en bekabeling nodig is. Nadeel van een galvanisch KB-systeem is dat op voorhand niet goed is te zeggen in welke mate de wapening en voorspanning worden beschermd. Het is niet (eenvoudig) mogelijk om achteraf het systeem bij te sturen of aan te passen om zo meer of minder bescherming te krijgen. Bovendien wordt het anodemateriaal letterlijk verbruikt, waardoor de levensduur beperkt is.

Bij een *KB-systeem met opgedrukte stroom* wordt de wapening met behulp van een externe spanningsbron tegen corrosie beschermd. Door de wapening en het voorspanstaal via een regelbare (gelijk-)spanningsbron te koppelen aan een inerte anode zal er een beschermstroom gaan lopen naar de wapening en de voorspanning. Voordeel van een dergelijk systeem is dat de mate van bescherming te regelen valt door het aanpassen van de elektrische spanning. Een potentieel risico is echter dat het systeem kan resulteren in zeer negatieve potentialen van de voorspanning. In deze situaties is er sprake van overbescherming waarbij als kathodische reactie (zeer kleine) waterstofatomen worden gevormd. Deze atomen kunnen het voorspanstaal binnendringen en daar uiteindelijk (veel grotere) waterstofmoleculen vormen. Dit resulteert in (extra) mechanische spanningen in de kristalstructuur van het voorspanstaal. In combinatie met de al aanwezige hoge spanning in het voorspanstaal kan dit leiden tot het bros bezwijken van de voorspanning. Doorgaans zijn systemen op basis van opgedrukte stroom duurder dan galvanische systemen, maar daar tegenover staan de langere levensduur en de betere mogelijkheden van regeling en monitoring in de gebruiksfase.



3

Oplossing

Rijkswaterstaat heeft vervolgens in samenwerking met Royal HaskoningDHV, TNO en SGS Intron een principeoplossing ontworpen waarbij als eerste de lekke voegovergangen worden vervangen om daarmee de toevoer van water en dooizouten te stoppen. Door deze maatregel kan echter niet worden voorkomen dat de wapening verder corrodeert, omdat het beton al is verontreinigd met chloriden. Het verwijderen van het met chloriden verontreinigde beton bleek geen haalbare oplossing, vanwege de krachtswerking rondom de verankering van de voorspanning in de liggerkop. Om sloop van het kunstwerk te voorkomen, werd besloten een uitvraag op de markt te zetten waarin werd gevraagd om, naast het vervangen van de voegovergangen, de uiteinden van de aangetaste liggers over 1 m te saneren, te repareren en te voorzien van kathodische bescherming (KB). Zo moest de wapening en de voorspanning gedurende minimaal 20 jaar worden beschermd tegen corrosie. Tevens werd ervoor gekozen om 20 jaar onderhoud en monitoring van het KB-systeem mee te nemen in de uitvraag. Ervaringen in het verleden bij Rijkswaterstaat met KB hadden namelijk geleerd dat de betrokkenheid van de beheerder na oplevering snel afneemt. Hierdoor werd de werking van het KB-systeem niet meer in de gaten gehouden. In het verleden heeft dit geleid tot systemen die vroegtijdig zijn uitgezet of niet meer bleken te werken. Dit ondanks het feit dat de regelgeving (CUR-Aanbeveling 45 en NEN-EN-ISO 12696) eist dat een KB-systeem ten minste jaarlijks elektrisch wordt gecontroleerd en visueel geïnspecteerd.

Door de opdrachtgever is uiteindelijk gekozen om al in de uitvraag een KB-systeem met opgedrukte stroom voor te

- 3 Ernstig beschadigde liggerkop na verwijderen losliggend beton
- 4 Krappe werkruimte voor het herstellen van beton
- 5 Aanbrengen geleidende coating (CAST3+-systeem)



schrijven (zie kader 'Kathodische bescherming'), om zo voldoende zekerheid te krijgen over de mate van bescherming.

Uitvoering

De aanbesteding is uiteindelijk gegund aan de aannemerscombinatie Mourik-Salverda. Na het vervangen van de voegover-

gangen is door Mourik-dochter Vogel Kathodische Bescherming BV het beton gesaneerd door alle losliggende delen te verwijderen. Bij enkele liggers bleek dat het beton dusdanig verwas aangetast, dat aan de onderzijde enkel een piramidevormig drukgebied boven de oplegging overbleef (foto 3). Bij grote afname (> 10%) van het oplegvlak werd door een constructeur van Royal HaskoningDHV een beoordeling van de constructieve veiligheid gemaakt, waarna de liggerkop alsnog werd hersteld.

Na het verwijderen van alle loszittende betondelen zijn de meetcellen ten behoeve van de monitoring aangebracht (zie onder kop 'Monitoring') door deze in te boren bij de wapening en de voorspanning. Vervolgens is het beton hersteld met reparatiemortel die geschikt is voor het toepassen van KB. Vooral de krappe werkruimte, de diepe ligging van de koppen op de steunpunten en de uitvoering die voor een aantal kunstwerken in de nacht moest plaatsvinden, bemoeilijkten deze werkzaamheden (foto 4).

Na het uitharden van de reparatiemortel is een geleidende coating (het CAST3+-systeem; een tweecomponenten aluminosilicaat/polymeer gevuld met koolstof) als (secundaire) anode op het betonoppervlak van de liggerkop aangebracht (foto 5). Hierin wordt de primaire, stroomvoerende anode (een CuNbPt-draad) ingewerkt. Gezien de krappe werkruimte is gekozen de coating aan te brengen door deze op het betonoppervlak te spuiten. Vervolgens zijn de meetcellen en de anode-



en kathodeverbindingen per drie liggerkoppen aangesloten op een decentrale voedings- en monitoringsunit, die op zijn beurt met twee (data- en stroom-)kabels is verbonden met de centrale meet- en regelunit (foto 6). Deze unit verzamelt alle meetresultaten per kunstwerk en kan op afstand ('remote') worden uitgelezen. Bovendien kan de spanning op het KB-systeem, afhankelijk van de resultaten van de metingen, (op afstand) worden aangepast. Alle kabels zijn weggewerkt in (rvs-)buizen.

De voeding van het KB-systeem wordt bij de meeste kunstwerken verzorgd door een dubbele accu die wordt gevoed door middel van zonnepanelen (foto 7). Op vier locaties is hiervan afgeweken vanwege de lokale omstandigheden (schaduw, bebouwing, bebossing) en is het systeem aangesloten op het stroomnet.

Monitoring

Om de mate van bescherming te meten, zijn bij de wapening en de voorspanning meetcellen (referentie-elektroden en zogenoemde potential decay probes) geplaatst om de staalpotentiaal



6

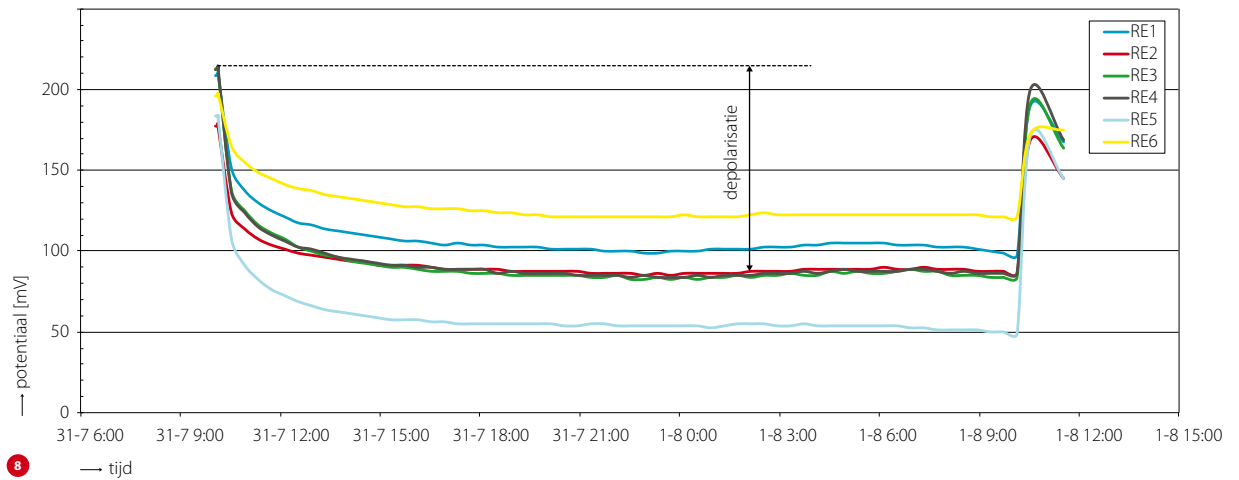


7

te meten. Conform NEN-EN-ISO 12696 en CUR-Aanbeveling 45 is het staal voldoende beschermd indien de depolarisatie van het staal (de verschuiving van de staalpotentiaal naar positievere waarden) in de eerste 24 uur na het (tijdelijk) uitzetten van het KB-systeem minimaal 100 mV bedraagt. Daarbij wordt met behulp van meetcellen (type geactiveerd titanium, Ti^* , waarbij het titanium oppervlak wordt bedekt met een laag platina) de depolarisatie gemeten ten opzichte van de zogenoemde 'instant-off'-potentiaal, ofwel de potentiaal aan het staaloppervlak direct na het afschakelen van de opgebrachte elektrische spanning (fig. 8).

Om waterstofverbrossing te voorkomen, zijn in elke liggerkop tevens speciale meetcellen geplaatst ter plaatse van de meest aan het oppervlak gelegen voorspanning, van een type die de absolute potentiaal kunnen meten (type Ag/AgCl). Om waterstofverbrossing te voorkomen, moet de potentiaal volgens de eerdergenoemde normen altijd minder negatief zijn dan -900 mV (t.o.v. een Ag/AgCl/0,5 M KCl referentie-elektrode). De kunst is nu een spanning te vinden waarbij voldoende beschermstroom loopt om minimaal 100 mV depolarisatie ter plaatse van zachtstaalwapening te krijgen, zonder dat de absolute potentiaal aan het staaloppervlak van de voorspanning negatiever wordt dan -900 mV. Daarbij is de grens voor de absolute potentiaal aan het staaloppervlak van de voorspanning leidend. In vrijwel alle liggerkoppen (98,7%) bleek bij het opstarten dat aan beide criteria kon worden voldaan. Bij de resterende liggerkoppen moest op dat moment genoeg

- 8 Voorbeeld van een depolarisatiemeting na afschakelen spanning
- 9 Voorbeeld overzicht depolarisatiewaarden per kunstwerk

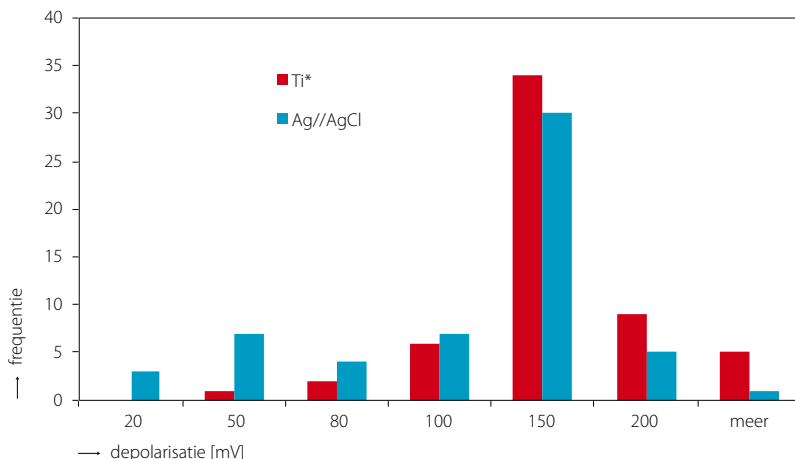


8

worden genomen met minder dan 100 mV depolarisatie, omdat anders de absolute potentiaal aan het voorspanstaal te negatief zou worden. Na verloop van enige tijd, nadat de stroombehoefte in de systemen was afgenomen, konden ook deze liggerkoppelen aan beide criteria voldoen.

Ervaringen en resultaten

De eerste opgeleverde KB-systemen zijn nu circa 1,5 jaar werkzaam. Metingen aan het KB-systeem geven aan dat de wapening goed wordt beschermd, zoals blijkt uit de depolarisatiewaarden van de Ti^* -potential decay probes (≥ 100 mV) (fig. 9). Ook de voorspanning, die door haar diepere ligging ten opzichte van de wapening minder beschermstroom krijgt, wordt voldoende beschermd. Dit blijkt uit de depolarisatiewaarden van de Ag/AgCl referentie-elektroden. Ook blijkt het risico op overbescherming van het voorspanstaal nihil te zijn.



9

In geen van de metingen is een absolute staalpotentiaal (instant-off-waarde) gevonden die het criterium van -900 mV overschrijdt (meest negatieve waarde > -600 mV). Tot slot blijkt de benodigde hoeveelheid beschermstroom gering te zijn. Na het opstarten ging er in eerste instantie relatief veel stroom lopen, maar na enige weken tot maanden nam het stroomverbruik af tot circa 10-30% van het startniveau. Een verdere afname wordt verwacht naarmate het staal gedurende een langere periode door het KB-systeem is beschermd en de condities rondom het staal minder corrosief worden.

Conclusie

Ernstige corrosie van voorspanning zou op termijn grote nadelige gevolgen kunnen hebben voor de constructieve veiligheid van de viaducten. Met de gekozen oplossing van het waterdicht maken van de voegovergangen en het beschermen van de wapening en voorspanning door middel van kathodische bescherming, is de constructieve veiligheid van de liggers weer gewaarborgd en wordt de restlevensduur van de kunstwerken met minimaal 20 jaar verlengd. Hierdoor is voorkomen dat ingrijpende saneringsmaatregelen noodzakelijk zijn. Een belangrijk aspect hierbij is dat de opdrachtgever vooraf contractueel heeft vastgelegd dat onderhoud en monitoring door de aannemer worden uitgevoerd, gedurende een periode van 20 jaar.

Doordat de schade zich manifesteerde aan een groot aantal seriematig vervaardigde liggers was het mogelijk een 'standaard'-aankoop toe te passen op een groot aantal kunstwerken. De uitvoeringsfase van het project is in februari 2014 afgerond. In principe is de aanpak geschikt voor toepassing op vergelijkbare kunstwerken. Met het oog op eventuele vervolgprojecten zullen de werking van het KB-systeem en de resultaten van de monitoring de komende jaren kritisch worden geëvalueerd. ☒