
Hergebruik prefab T-liggers (1)

Haalbaarheidsonderzoek en uitgangspunten
SBIR-consortium Liggers2.0



Royal HaskoningDHV heeft samen met partners onderzocht of het mogelijk is geprefabriceerde betonnen liggers uit bestaande bruggen en viaducten te hergebruiken voor nieuwe bruggen en viaducten. Dit naar aanleiding van de Strategic Business Innovation Research (SBIR) van Rijkswaterstaat, die bruikbare innovaties voor circulaire viaducten wil laten ontwikkelen. De oplossing is door een onafhankelijke beoordelingscommissie uitgekozen om via een test- en prototypefase daadwerkelijk te worden toegepast.

In de huidige praktijk wordt ongeveer 97% van het bouwafval gerecycled en gebruikt als fundamenteermateriaal voor wegen.

Door minder wegenbouw neemt de vraag naar verwachting echter met 40% af. Tegelijkertijd wordt verwacht dat het aanbod juist zal toenemen, aangezien steeds meer constructies het einde van hun ontwerplevensduur bereiken. In nieuw beton kan betongranulaat ook als grof en/of fijn toeslagmateriaal worden gebruikt. Voor het bewerken van betonpuin tot toeslagmateriaal is echter veel energie nodig, waarbij momenteel nog emissies vrijkomen.

Circulariteit kan naar een hoger niveau worden getild wanneer bouwelementen worden hergebruikt in nieuwbouw in plaats van het hergebruiken van betongranulaat als toeslagmateriaal in nieuw beton. Waardebehoud, in de vorm van het verlengen van de levensduur of duurzaam hergebruik van bestaande objecten, staat dan ook hoog in de rangschikking van de circulaire ontwerpprincipes van Rijkswaterstaat [2] (fig. 2).

Vraag en antwoord

Betonnen bruggen en viaducten in Nederland worden momenteel in ongeveer 90% [3] van de gevallen om functionele redenen gesloopt. Meestal zijn deze technisch in staat

auteurs



IR. ROB VERGOOSSEN

Expert Bruggen
Royal HaskoningDHV



ING. GERT-JAN VAN ECK PMSE

Projectleider /
Technisch Manager
Royal HaskoningDHV



IR. DANNY JILISSEN

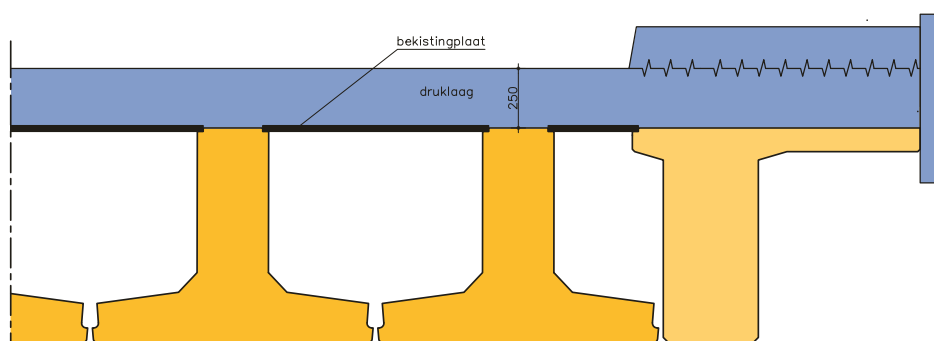
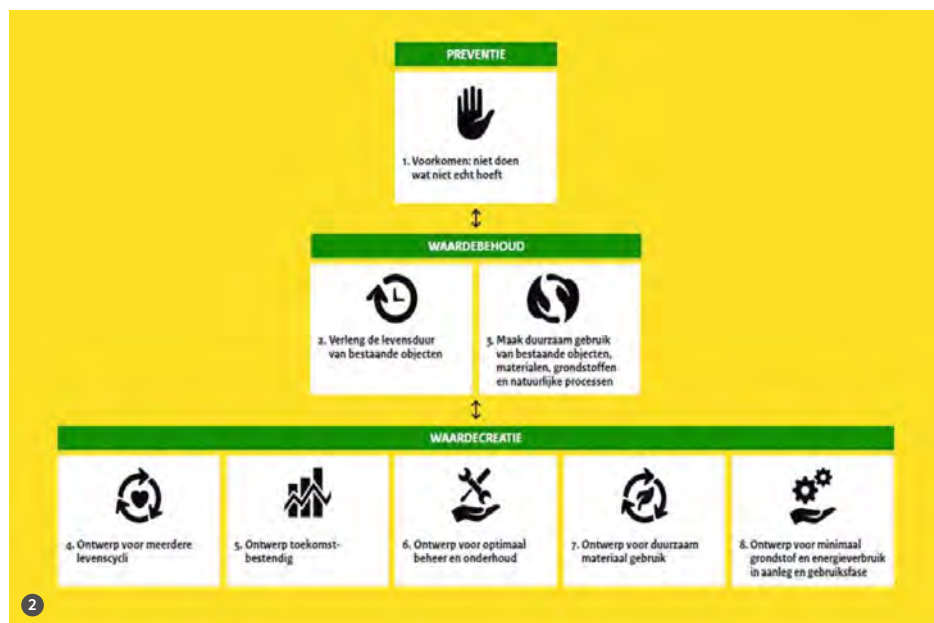
Constructeur
Royal HaskoningDHV

om nog decennia te presteren, maar vooral door veranderingen in de weginrichting voldoet de indeling en/of locatie niet aan de nieuwe wensen.

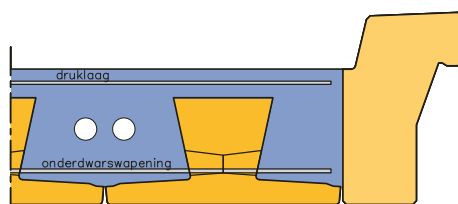
Jaarlijks worden er gemiddeld 45 nieuwe bruggen en viaducten gebouwd voor Rijkswaterstaat. Tegelijkertijd worden zo'n 15 bestaande constructies afgebroken. Het blijkt dat ongeveer de helft van deze gesloopte constructies bestaat uit geprefabriceerde betonnen liggers. De gemiddelde leeftijd bij sloop is slechts 40 jaar, terwijl deze constructies voor minimaal 100 jaar zijn ontworpen. In totaal zijn er 1637 bruggen en viaducten (eind 2020) met geprefabriceerde liggers in het wegennet van Rijkswaterstaat. De gemiddelde leeftijd van deze kunstwerken is slechts 25 jaar.

Naar schatting bestaat ongeveer 55% van de liggerconstructies van de brugvoorraad van Rijkswaterstaat uit (omgekeerde T-)liggers (railbalkliggers) met een in-situ druklaag (fig. 3). Kokerliggers met dwarsvoorspanning zonder druklaag en omgekeerde T-liggers met een volstortdek maken respectievelijk ongeveer 25% en 15% uit. De overige liggerconstructies zijn voornamelijk in een veldfabriek gemaakte liggertypen T-contactliggers (Krikke-liggers) en T-liggers met tussenstort (type 'Hollandse Brug') die voorzien zijn van nagerekt voorspanstaal. →

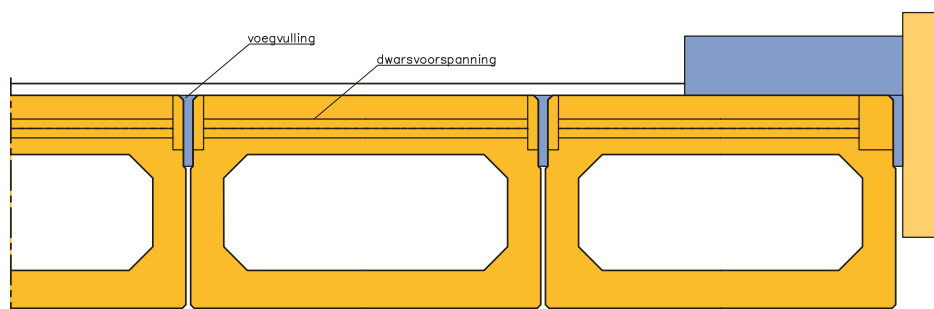
Uit onderzoek van Rijkswaterstaat blijkt dat de gemiddelde kubusdruksterkte van beton 104,4 MPa is voor liggers van vóór 1976



3a



3b



3c

TWEELUIK

Dit artikel is het eerste deel van een tweeluik over de innovatie hergebruik prefab liggers. In dit artikel wordt het haalbaarheidsonderzoek en de algemene uitgangspunten beschreven. Het tweede deel (verschijnt eind 2022 in het themanummer Bestaande constructies) gaat over de uitvoering en de constructieve onderbouw van het viaduct.

SBIR

Rijkswaterstaat heeft als ambitie om in 2030 klimaatneutraal en circulair te werken. Zo wil Rijkswaterstaat als launching customer binnen de eigen invloedssfeer maximaal bijdragen aan het terugdringen van de CO₂-uitstoot en het materiaalgebruik.

In de week van de circulaire economie in 2021 heeft Rijkswaterstaat de markt uitgedaagd om circulaire oplossingen te ontwikkelen en te valideren voor viaducten. Dit is gedaan via een Strategic Business Innovation Research (SBIR) Circulaire viaducten. Uit de in totaal 32 inschrijvingen zijn eerst de 10 meest veelbelovende voorstellen geselecteerd om door te gaan naar de fase van haalbaarheidsonderzoek (fase 1). Deze haalbaarheidsonderzoeken zijn door een brede onafhankelijke commissie beoordeeld. De commissie heeft drie consortia geselecteerd om door te gaan naar de prototype-fase (fase 2). Het consortium met Royal HaskoningDHV is met de innovatie 'Hergebruik Prefab Liggers' als eerste van de drie gekwalificeerd om het prototype daadwerkelijk te realiseren.

De partners binnen dit consortium zijn Dura Vermeer, Vlasman Sloopwerken en Haitsma Prefab Beton, waarbij SGS als partner de kwaliteitsverklaring uitgeeft. Het consortium wil als Combinatie Liggers2.0 de innovatie ook een commercieel vervolg geven (fase 3).

Op dit moment komen voornamelijk omgekeerde T-liggers vrij en in mindere mate de in een veldfabriek gemaakte liggertypen. Over enkele jaren komen mogelijk ook de kokerliggers met grotere overspanningen vrij, aangezien dat type later is ontwikkeld en toegepast, dus nog jonger is. De omgekeerde T-liggers met een volstortdek komen relatief weinig voor in het areaal van Rijkswaterstaat in verband met de beperkte overspanning. In het SBIR-onderzoek is gefocust op de omgekeerde T-liggers met druklaag, omdat deze nu vrij komen en goed herbruikbaar zijn.

Donorproject: Ring Zuid Groningen

In Groningen vindt een grootschalige ombouw van de zuidelijke ringweg plaats, bekend als 'Aanpak Ring Zuid'. Vlasman, onderdeel van het SBIR-consortium, heeft als sloopbedrijf van Aannemer Combinatie Herepoort de opdracht gekregen om viaduct KW21 Europa-plein uit 1985 te slopen. In plaats van het hele viaduct te slopen en tot puin te vermalen, is gekozen om 26 voorgespannen prefab omgekeerde T-liggers uit de hoofdoverspanningen te hergebruiken voor het SBIR-project (foto 1, foto 4-7). Zeven liggers blijven binnen de provincie Groningen en zijn ingezet voor de aanleg van een tijdelijke brug in Appingedam voor een periode van circa 10 jaar.

16 liggers worden toegepast voor een viaduct van Rijkswaterstaat over de rijksweg (verder niet bij naam genoemd). Dura Vermeer heeft de opdracht om dit viaduct te realiseren. Naast het gebruik van de bestaande prefab liggers worden hier ook nieuwe (rand)liggers toegepast, gemaakt en geleverd door de andere partner uit het consortium, Haitsma Prefab Beton.

Sterkte volgen norm

Nieuwe bruggen worden ontworpen volgens de Eurocode voor een ontwerp levensduur van 100 jaar. In de Voorschriften Beton Bruggen (NEN 6723 - VBB 1995) als onderdeel van de TGB 1990 is voor bruggen de referentieperiode op 80 jaar gesteld. In de normen en richtlijnen tot de invoering van de TGB 1990 werd geen expliciete ontwerp levensduur of referentieperiode voorgeschreven.

De sterkteklasse (betonkwaliteit) is tot de invoering van de Eurocode gemaximeerd tot B52,5 op basis van ROBK 1/2 - VB 74/84 en B65 op basis van de VBC. Uit grootschalig onderzoek van Rijkswaterstaat [5] kan worden geconcludeerd dat de gemiddelde kubusdruksterkte van beton 104,4 MPa is voor geprefabriceerde betonnen liggers die vóór 1976 zijn geproduceerd. De sterktetoeename is ruim 50% ten opzichte van de oorspron- →





kelijke gemiddelde kubussterkte van 28 dagen van circa 60 MPa voor K600-B52,5. Dit is veel meer dan de voorspelde 21% met formule 3.2 van Eurocode 2 [7], met $s = 0,2$ en $t = 45$ jaar (16440 dagen).

$$\beta_{cc}(t) = e^{\left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)} \quad (1)$$

$$\beta_{cc}(t) = e^{0,2 \left(1 - \sqrt{\frac{28}{16440}}\right)} = 1,21$$

Vermoedelijk was de sterkte na 28 dagen dus fors hoger dan een B52,5 waar volgens de destijds geldende normen mee is gerekend. Dit kan worden verklaard doordat na

16 uur de volledige voorspanning wordt aangebracht om de dagcyclus te halen. De aanwezige sterkte is dan reeds circa 40 MPa. Een gemiddelde kubusdruksterkte na 28 dagen van ruim 80 MPa lijkt hiermee reëel. Dit komt goed overeen met de huidige praktijk waar veelal een betonsterkteklasse van C60/75 wordt gehaald.

Restlevensduur donorproject

Omdat de liggers van het donorproject een stuk jonger zijn (ca. 35 jaar) dan de liggers uit het Rijkswaterstaatonderzoek [5], is voor deze liggers aanvullend onderzoek gedaan. De gevonden gemiddelde kubusdruksterkte

De liggers beschikken over voldoende dwarskracht- capaciteit voor toepassing in het nieuwe viaduct op beoordelings- niveau nieuwbouw en gevolgklasse CC3

was 112 MPa en daarmee nog iets hoger dan het gemiddelde dat volgt uit [5].

Naast onderzoek naar de sterkte is ook de restlevensduur beschouwd. Hiervoor zijn verschillende boorkernen uit een proefligger onderzocht. Het prefab beton met hoge sterkte heeft een zeer lage water-cementfactor (minder dan 0,4) en dus een veel dichtere microstructuur dan standaard beton. Uit het onderzoek bleek dat de carbonatatie diepte na 35 jaar kleiner is dan 1 mm en dat de chloride-indringing verwaarloosbaar is. Dit kwam overeen met de verwachting en resultaten op proefstukken uit prefab liggers in andere kunstwerken.

Uit de proeven bleek tevens dat het beton niet gevoelig is voor overige aantastingsmechanismen, waaronder ASR. Op basis van de verschillende proeven is aangetoond dat deze prefab liggers nog zeker 100 jaar meekunnen en ook de aanwezige dekking op wapening- en voorspanstaal voldoet aan de eisen voor 100 jaar ontwerplevensduur van de Eurocode.

Constructieve veiligheid

Het te realiseren viaduct voor Rijkswaterstaat is een geheel nieuwe constructie. Door gebrek aan regelgeving is het overeengekomen uitgangspunt (OG-ON) dat voor dit project moet worden voldaan aan het nieuwbouwniveau volgens de Eurocode. Omdat het een kunstwerk voor Rijkswaterstaat betreft, wordt gevolgklasse CC3 met een ontwerplevensduur van 100 jaar geëist.

De hergebruikte liggers zijn voor de nieuwe situatie doorgerekend en voldoen aan Eurocode nieuwbouw.

Grenstoestanden Uit de aangehouden eisen en referentieperiode volgt de betrouwbaarheidsindex die directe invloed heeft op de aan te houden partiële belastingfactoren in de uiterste grenstoestand (UGT). Naast de UGT moet een constructie ook voldoen aan bruikbaarheidsgrenstoestanden (BGT) en worden getoetst op vermoeiing. Hierbij zijn de partiële belastingfactoren voor elke gevolgklasse gelijk, namelijk 1,0.

Bij het ontwerpen van nieuwe liggers zijn eisen met betrekking tot de scheurvorming over het algemeen maatgevend. In de

oude normen werden voorgespannen liggers ontworpen op het decompressie criterium (geen trek) ten gevolge van buiging in de BGT. Hiervoor werd de karakteristieke combinatie aangehouden. Volgens de Eurocode geldt voor de liggers een spanningswisseling in het voorspanstaal in de frequente combinatie. Ook in de vermoeiingscombinatie geldt een soortgelijke spanningswisseling. Door de hoge voorspangraad zijn de liggers in de BGT te beschouwen als ongescheurd, waardoor altijd aan deze toelaatbare spanningen voor scheurvorming en vermoeiing wordt voldaan.

Dwarskracht In de afgelopen decennia zijn de formules voor de dwarskrachtcapaciteit veranderd. De hergebruikte liggers zijn ontworpen op basis van de VB 74/84 of RVB 1962/67. Voor inpassing in het nieuwe viaduct moeten de liggers worden ingekort (meer over de uitvoering hiervan is te lezen in deel 2). Hierdoor worden de originele liggereinden met een hogere concentratie beugels verwijderd en blijft alleen een basis beugelwapening $\emptyset 10-300$ (FeB 500) aanwezig. Deze basiswapening voldoet aan de minimale eisen voor beugelwapening conform Eurocode 2. Waar men in de oude normen en bij beoordeling van bestaande constructies volgens NEN 8702 of de RBK de dwarskrachtcapaciteit van het betonaandeel ($V_{Rd,c}$) en het aandeel uit beugels ($V_{Rd,s}$) onder beperking van de helling van de drukdiagonaal, mag optellen, mag dat in de Eurocode niet. De dwarskrachtcapaciteit moet bij beperkte beugelwapening dus volledig uit het beton komen.

Naast de bekende formules uit Eurocode 2 (6.2a en 6.2b) voor het bepalen van de dwarskrachtcapaciteit $V_{Rd,c}$ biedt dezelfde Eurocode in art. 6.2.2 nog een mogelijkheid om voldoende dwarskrachtcapaciteit aan te tonen. In vrij opgelegde voorgespannen elementen zonder dwarskrachtwapening wordt de dwarskrachtweerstand van de delen die niet door buiging gescheurd zijn, waar de buigtrekspanning kleiner is dan $f_{ctk;0,05} / \gamma_c$, begrensd door de treksterkte van het beton. Hiervoor moet de hoofd-trekspanning (σ_1) in de liggers worden getoetst. →

AANVULLENDE REGELGEVING VOOR HERGEBRUIK

Er zijn initiatieven om aanvullende regelgeving op te stellen op basis waarvan bij toepassing van hergebruikte betonelementen afgeweken mag worden van de Eurocode nieuwbouweisen.

De hergebruikte liggers zijn weliswaar niet nieuw, maar hebben in de praktijk wel hun draagkracht bewezen. Wij pleiten ervoor om ten behoeve van de duurzaamheidsambitie de bestaande liggers als bestaande constructies te beschouwen, waardoor voor de capaciteit de materiaalgebonden normen uit de NEN8700-serie en bij Rijkswaterstaat de RBK v1.2 [RTD:1006] van toepassing zijn. Hierbij zou het streefniveau voor de betrouwbaarheid in eerste instantie altijd Eurocode nieuwbouw moeten zijn. Indien dit niveau niet haalbaar is, zou het beoordelingsniveau enkel voor de hergebruikte elementen kunnen worden verlaagd tot het beoordelingsniveau verbouw conform NEN8700. Nieuwe onderdelen zoals de druklaag zouden altijd moeten worden uitgewerkt volgens Eurocode nieuwbouw.

De hoofdtrekspanning kan worden berekend met formule (2).

$$\sigma_1 = \sqrt{\left(\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\right)^2 + \tau_{xy}^2} + \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \quad (2)$$

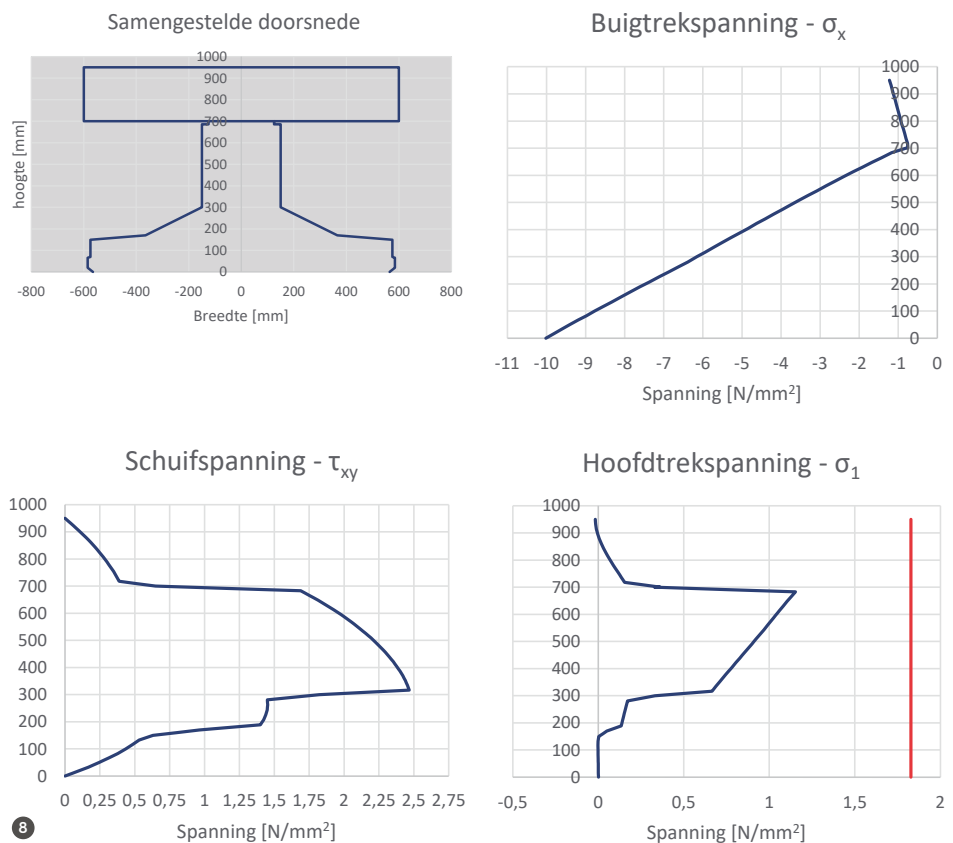
De doorgaande ontwikkeling van de betonsterkte over de tijd heeft een gunstig effect op de dwarskrachtcapaciteit. Met een hogere treksterkte van het beton is immers een hogere hoofdtrekspanning toelaatbaar.

De breedte van de samengestelde dwarsdoorsnede varieert over de hoogte. Hierdoor kan de maximum hoofdtrekspanning optreden bij een andere as dan de zwaartepuntas. Het spanningsverloop is daarom over de hoogte van de dwarsdoorsnede voor verschillende sneden in de ligger bepaald. Hiervoor is gebruikgemaakt van een FEM-model met schaalementen voor in-plane 2D-spanningen. Om rekening te houden met de bouwfaserings zijn de optredende hoofdtrekspanningen (σ_1) in de UGT bepaald door superpositie van de resultaten van twee aparte modellen: een model dat enkel de ligger representeert en een model

voor de samengestelde doorsnede (prefab ligger met de nieuwe in-situ druklaag). Het spanningsverloop in de kritische snede is weergegeven in figuur 8. De maximale hoofdtrekspanning (σ_1) in de UGT is kleiner dan de treksterkte van het beton $f_{ctd} = k_t f_{ctk} / \gamma_b$. Met een unity check van 0,63 beschikken de liggers over voldoende dwarskrachtcapaciteit voor toepassing in het nieuwe viaduct voor Rijkswaterstaat op beoordelingsniveau nieuwbouw en gevolgklasse CC3.

Toetsing modificatie

Het voorspannsysteem van de hergebruikte ligger is ontworpen voor een ligger met een lengte van 18,9 m. Voor de toekomstige toepassing moeten de liggers worden ingekort tot 14 m, wat overeenkomt met slechts 75% van de oorspronkelijke lengte. De aanwezige voorspankracht blijft echter gelijk en zorgt voor trekspanning boven in het liggerlijf. De optredende hoofdtrekspanningen (σ_1) door de modificatie zijn met dezelfde 2D-FEM-modellen onderzocht als voor het toetsen van de UGT. Hiermee zijn de veranderingen

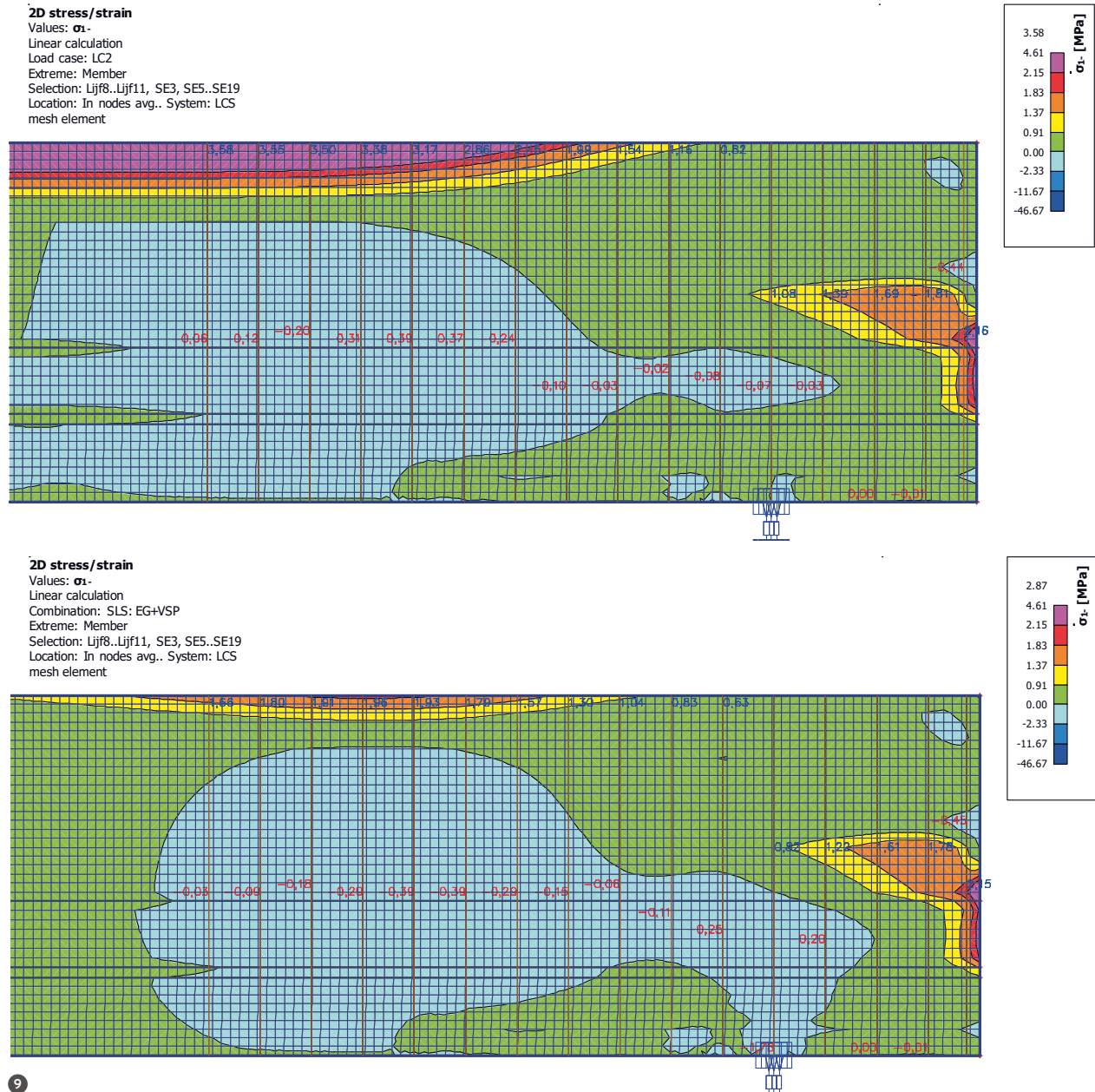


8

in de optredende spanningen ten gevolge van het inkorten van de ligger, het boren van gaten ten behoeve van de onderwape-ning van de einddwarsdrager en het hijsen van de ligger via de geboorde gaten onder-zocht. De situatie na het inkorten van de lig-ger en het verwijderen van de druklaag is maatgevend. In die situatie is enkel het eigen gewicht van de ingekorte ligger en de voorspanning aanwezig. De maatgevende hoofdtrekspanning aan de bovenzijde van de ligger, in dit geval een buigtrekspanning σ_x ,

blijft kleiner dan $f_{ctk,0,05} / \gamma_c$ (fig. 9). In het oor-spronkelijke ontwerp van de liggers was al rekening gehouden met trekspan-ningen aan de bovenzijde van de ligger. Daarom waren er twee wapeningsstaven $\varnothing 12$ in de bovenkant van de ligger (lijf) beschikbaar voor scheurbeheersing. Uit berekeningen blijkt dat deze staven vol-doende zijn om de scheurwijdte te beper-ken tot 0,05 mm, waarbij de maximale scheurwijdte in ontwerp toegestaan door Eurocode 0,20 mm is.

→



9 Hoofdtrekspanning (σ_1) voor enkel de voorspanning (a) en eigen gewicht ingekorte ligger gecombineerd met de voorspanning (b) in de BGT

Geconcludeerd kan worden dat hergebruik van bestaande liggers veel milieuvriendelijker en duurzamer is dan het gebruik van nieuw beton

SAMENWERKING

Het onderzoek wordt voornamelijk uitgevoerd in het kader van de subsidie SBIR van Rijkswaterstaat. Het werk van de consortiumpartners Dura Vermeer, Vlasman Sloopwerken, SGS en Haitsma Prefab Beton wordt zeer gewaardeerd. De liggers van het beschreven onderzoek zijn beschikbaar gesteld door IXAS Gaasperdammerweg en Aannemer Combinatie Herepoort.

Tabel 1 Verschil in duurzaamheid voor de bovenbouw van een viaduct

milieukosten [Euro]	emissie van broeikasgassen [kg CO ₂ -eq]	abiotische grondstoffen [kg Sb-eq]
-49%	-44%	-61%

Milieu-impact

Om breed toegepast te worden, moet hergebruik van bestaande liggers een positief effect hebben op het milieu ten opzichte van het crushen van het beton tot funderingsmateriaal en een situatie waarbij betongranulaat wordt hergebruikt in nieuw beton. Daarom is de impact op het milieu bij gebruik van hergebruikte prefab liggers onderzocht. Hierin zijn de milieukosten (DuBoCalc), de uitputting van abiotische grondstoffen (Antimony (Sb) equivalent) en de emissie van broeikasgassen (uitgedrukt in CO₂-equivalent) meegenomen.

De milieu-impact is onderzocht op basis van een casestudie van een viaduct met een lengte van 70 m en een breedte van 15 m. Hierbij is de toepassing van hergebruikte liggers vergeleken met nieuwe liggers. De impact op de gehele betonnen bovenbouw is weergegeven in tabel 1.

Geconcludeerd kan worden dat hergebruik van bestaande liggers veel milieuvriendelijker en duurzamer is dan het gebruik van nieuw beton. Indien een vergelijking puur op productniveau wordt gemaakt tussen een nieuwe prefab ligger en een hergebruikte prefab ligger, dan zijn de besparingen in de casestudie op alle indicatoren zelfs meer dan 90%.

Discussie

Om de huidige lineaire bouwsector meer circulair te maken, moet hergebruik gebruikelijker worden. Om dit te stimuleren, kan in contracten een eis worden geïmplementeerd die stelt dat geprefabriceerde liggers in een constructie die functioneel verouderd is, niet of enkel onder strikte voorwaarden, mogen worden vermalen. De verwachting is dat er de komende jaren meer nieuwe constructies worden gebouwd dan er bestaande constructies met omgekeerde T-liggers met druklaag worden gesloopt. Daarom moet het mogelijk zijn om binnen een redelijke afstand en tijd een nieuwe constructie te vinden die past bij de bestaande liggers.

Het hergebruik van bestaande liggers moet al in de ontwerpfasen van nieuwe viaducten en bruggen worden meegenomen. In die fase worden de overspanning en constructiehoogte vastgelegd en daarmee de mogelijke match met een donorviaduct.

Conclusies

Geconcludeerd is dat hergebruik van geprefabriceerde liggers technisch haalbaar is. De resterende levensduur van bestaande prefab liggers is ruimschoots 100 jaar. De hergebruikte liggers voldoen aan alle gestelde eisen in de vigerende normen en richtlijnen. Op basis van toetsing conform de Eurocode en ROK v1.4 voldoen de hergebruikte liggers voor toepassing in het viaduct voor Rijkswaterstaat op het beoordelingsniveau nieuwbouw met gevolgklasse CC3 voor een ontwerplevensduur van 100 jaar.

Al met al blijkt dat hergebruik van prefab liggers een significante invloed heeft op de milieu-impact ten opzichte van het toepassen van nieuwe liggers. ●

LITERATUUR

- 1 Nederland circulair in 2050, Rijksbreed programma Circulaire Economie. Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Ministerie van Economische zaken, 2016.
- 2 Circulaire ontwerp-principes. Rijkswaterstaat, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2020.
- 3 Nooij, S., Willems, A., Heystek, A.P., Slooppoorzaken bruggen en viaducten in en over rijkswegen, INFR160633, IV-Infra, 2016.
- 4 NEN 6700 Technische Grondslagen voor Bouwconstructies – TGB 1990 Algemene basiseisen, Nederlands Normalisatie-instituut, 1992.
- 5 TNO-rapport Analyse van de materiaaleigenschappen voor de bepaling van het afschuifdraagvermogen van bestaande betonnen kunstwerken, TNO-060-DTM-2011-01450-2, maart 2012.