



Bezwijkproeven voor hergebruik van liggers in de A76

Onderzoek naar capaciteit HNP-liggers voor circulair viaduct (2)



PROJECTGEGEVENS

project
A76 Daelderweg
opdrachtgever
Rijkswaterstaat PPO
hoofdaannemer
Strukton Civiel
Nederland
ontwerper
Antea Group
onderzoekspartij
Nebest (en TU Delft)

Het ontwerp van het circulaire viaduct over de A76 bij de Daelderweg is in belangrijke mate gebaseerd op het hergebruik van bestaande HNP-liggers uit het voormalige Keizer Karelviaduct. Om dit hergebruik mogelijk te maken, is onderzoek gedaan naar capaciteit van deze liggers. Hierbij zijn enkele liggers tot aan bezwijken beproefd. De gemeten bezwijkbelastingen en waargenomen faalmechanismen zijn geanalyseerd en vertaald naar ontwerpwaarden voor hergebruik, met toepassing van de methode Design Assisted by Testing uit NEN-EN 1990.

Het gaat in het project om voor- gespannen prefab-liggers van het type HNP75/98 (fig. 2). Voor deze liggers ontbreken specifieke ontwerpvoorschriften voor hergebruik. Tegelijkertijd leidt verificatie volgens de huidige Eurocode-regels voor nieuwe constructies tot onvoldoende dwarskrachtcapaciteit, vanwege het ontbreken van effectieve dwarswapening [1]. De normatieve dwarskrachtmodellen uit NEN-EN 1992 1-1 sluiten daarmee onvoldoende aan op het werkelijke gedrag van bestaande prefab-liggers, waardoor hergebruik niet is te onderbouwen met de gangbare rekenmodellen.

Om de liggers toch op een betrouwbare manier te kunnen hergebruiken, is ervoor gekozen de capaciteit te bepalen op basis van testen. In een eerder artikel in *Cement* is beschreven hoe de liggers zijn geoogst en hoe een testprotocol is ontwikkeld om de werkelijke dwarskrachtcapaciteit experimenteel vast te stellen door middel van *full scale* bezwijkproeven. Daarbij lag de nadruk

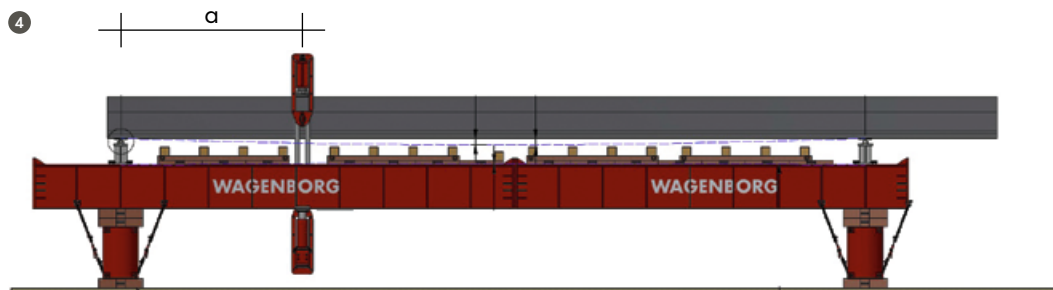
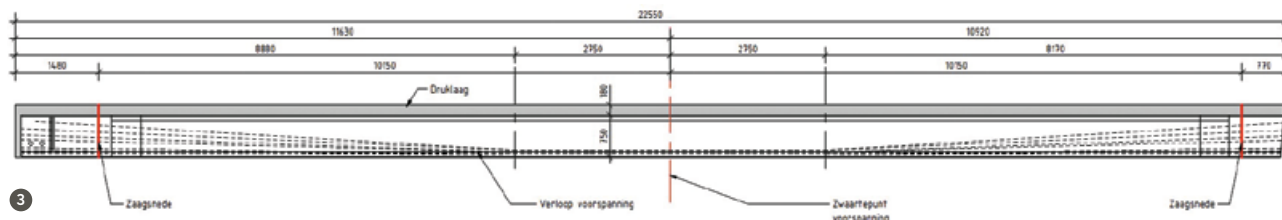
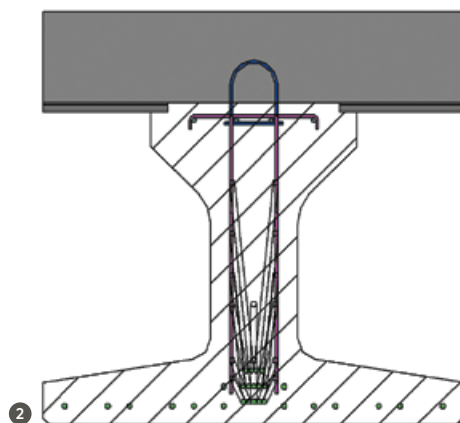
op de praktische uitvoerbaarheid van het oogstproces en de opzet van het experimentele onderzoek. Dit vervolgartikel richt zich op de analyse en interpretatie van de testresultaten.

Proefstukken en uitgangspunten

Voor de bezwijkproeven zijn 6 van in totaal 33 geoogste liggers gebruikt. Voor het afleiden van de statistische eigenschappen zijn minimaal drie proeven in de kritische doorsnede nodig. Er zijn drie extra proeven uitgevoerd om meer inzicht te krijgen in het gebied waar hetzelfde faalmechanisme werd verwacht en om meer zekerheid te krijgen over de oorspronkelijke aannames.

De oorspronkelijke lengte van de liggers was circa 23,0 m (fig. 3). Ten behoeve van de proeven zijn ze ingekort tot een lengte van ongeveer 20 m, wat overeenkomt met de lengte van de liggers in het ontwerp voor het nieuwe viaduct over de A76. Bij de beproevingen is een overspanning gehanteerd van 17 m (tabel 1, fig. 4).





auteurs



IR. MAIKEL VAN DOOREN

Productmanager
Constructieve
beproevingen & Analyse
Nebest



IR. JOSE PAREDES PINEDA ENGD.

Specialist Onderzoek
Nebest

Tabel 1 Gegevens beproefde liggers

ligger-ID	overspanning [m]	a [m]	d [mm]	a/d
22	17	3,35	838	4,0
15	17	3,75	833	4,5
32	17	4,15	830	5,0
06	17	4,15	830	5,0
09	17	4,15	830	5,0
30	17	4,98	830	6,0

De liggers zijn uitgevoerd met puntlasten op verschillende posities langs de ligger, uitgedrukt in termen van de verhouding a/d , waarbij a de afstand tussen het belastingspunt en de dichtstbijzijnde oplegging is en d de effectieve hoogte van de doorsnede. De belastingsposities zijn zodanig gekozen dat het maatgevende faalmechanisme voor hergebruik kon worden onderzocht, met nadruk op afschuif buigbreuk.

De liggers zijn beproefd inclusief de oorspronkelijke gewapende betonnen druklaag (gemiddelde dikte circa 210 mm). Het verwijderen van de druklaag zou leiden tot een niet representatief intern krachtsverloop en is daarom bewust achterwege gelaten.

De materiaaleigenschappen van het beton zijn bepaald op basis van boorkernen uit de liggers. De strekte komt overeen met betonsterkteklasse C80/95 (oorspronkelijke

Voor iedere proef is de dwarskracht in de kritieke doorsnede afgeleid

sterkteklasse was K600). De betonsterkteklasse is conform RBK 1.2 aangenomen op C35/45. Deze is niet getest, aangezien hij bij het hergebruik wordt vervangen. De liggers bevatten nauwelijks effectieve dwarswepening: de aanwezige beugels zijn niet veranderd in de onderflens en voldoen niet aan de huidige detailleringseisen uit NEN-EN 1992-1-1.

Waargenomen gedrag en faalmechanisme

Tijdens de bezwijkproeven vertoonden alle liggers een vergelijkbaar belasting- en schadeverloop. Het gedrag werd gekenmerkt door een duidelijke opeenvolging van schadeprocessen, die consistent kon worden vastgesteld op basis van visuele inspecties, akoestische emissiemetingen (AE) (fig. 5) en *Digital Image Correlation* (DIC) (fig. 6).

Bij toenemende belasting trad in eerste instantie buigscheurvorming op aan de onderzijde van de ligger. Dit moment ging gepaard met een duidelijke toename van AE-activiteit in de onderflens en een lichte afname van de initiële stijfheid in het belastingverplaatsingsdiagram. In deze fase zijn geen aanwijzingen gevonden voor schade in het lijf of delaminatie van de druklaag.

Na het ontstaan van buigscheuren ontwikkelden zich bij verdere belasting diagonale scheuren in het lijf van de ligger. Deze scheuren manifesteerden zich als afschuif-buigscheuren en concentreerden

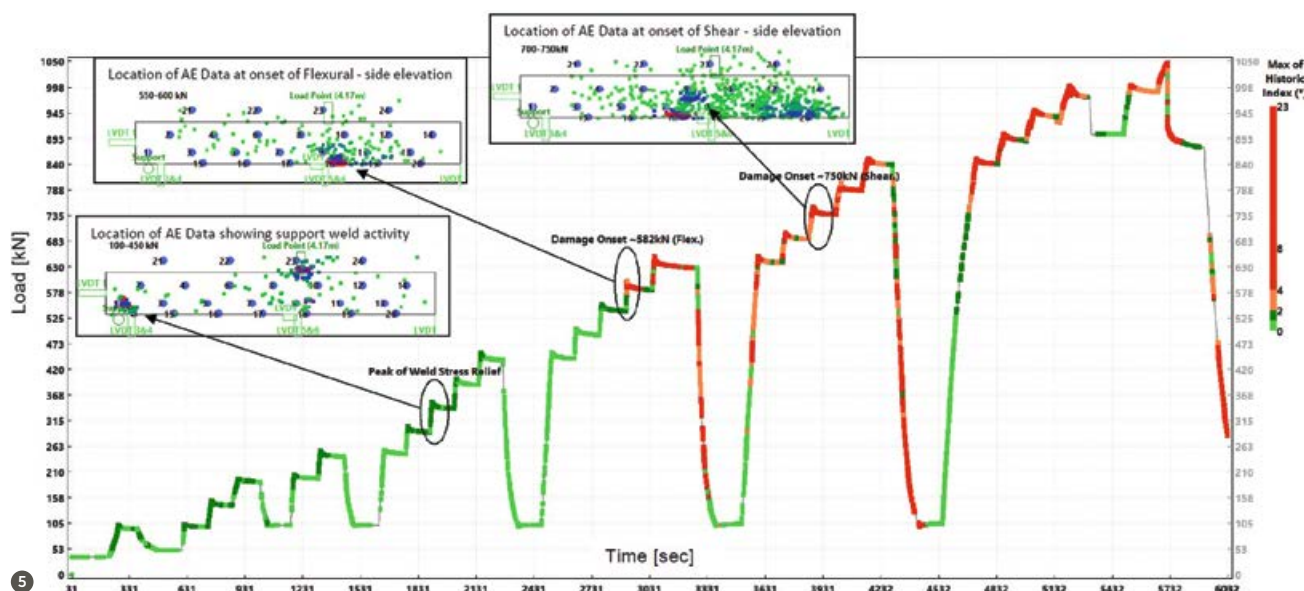
zich tussen het belastingspunt en de dichtstbijzijnde oplegging. Zowel de AE-locatieplots als de DIC-analyses bevestigden deze schadeontwikkeling (fig. 5 en foto 6).

Bij het bereiken van de maximale belasting faalden alle liggers door het verder ontwikkelen en samenkomen van diagonale scheuren in het lijf, resulterend in afschuifbuigbreuk (foto 8 en 1). Het bezwijken trad relatief plotseling op en werd niet voorafgegaan door significante plastische vervormingen. Voor geen van de beproevingen zijn aanwijzingen gevonden voor afschuif-trekbreuk, een puur buiggedomineerd faalmechanisme of delaminatie tussen ligger en druklaag.

Testresultaten en gemeten dwarskrachtcapaciteit

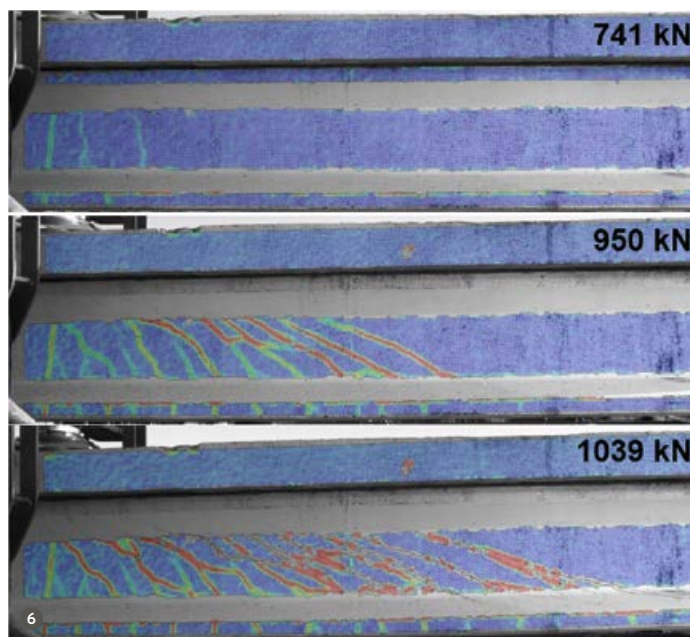
De resultaten van de bezwijkproeven zijn samengevat in tabel 2. Voor iedere proef is de belasting $F_{\max}$ vastgesteld op het moment van bezwijken (fig. 7), waarna de bijbehorende dwarskracht V_u in de kritieke doorsnede is afgeleid, rekening houdend met eigen gewicht, voorspanning en belastingspositie. Deze resultaten vormen de kern van de experimentele onderbouwing voor het hergebruik van de liggers.

De proeven zijn uitgevoerd bij a/d -verhoudingen variërend van circa 4,0 tot 6,0. Voor alle belastingsposities trad zoals gezegd bezwijken op als gevolg van afschuif-buig- →



TWEELUIK

Dit artikel is het vervolg op een eerder in *Cement* gepubliceerd artikel 'Hergebruik liggers in A76'. In dat eerste artikel zijn het oogstproces van de liggers en de ontwikkeling van een testprotocol voor experimentele bezwijkproeven beschreven. In dit tweede artikel staan de resultaten van deze bezwijkproeven centraal. Dit artikel vormt een verdieping en leest het best in samenhang met het eerste deel.



Tabel 2 Overzicht testresultaten

a/d	ligger-ID	$F_{\max}$ [kN]	faalmechanisme	V_u [kN]
4,0	22	1103	afschuif-buigbreuk	929
4,5	15	1026	afschuif-buigbreuk	838
5,0	32	993	afschuif-buigbreuk	784
5,0	06	1046	afschuif-buigbreuk	824
5,0	09	1049	afschuif-buigbreuk	827
	gemiddelde	1029		812
6,0	851	851	afschuif-buigbreuk	626

breuk. De gemeten dwarskrachtcapaciteit nam af bij toenemende a/d -verhouding, in lijn met het waargenomen faalmechanisme.

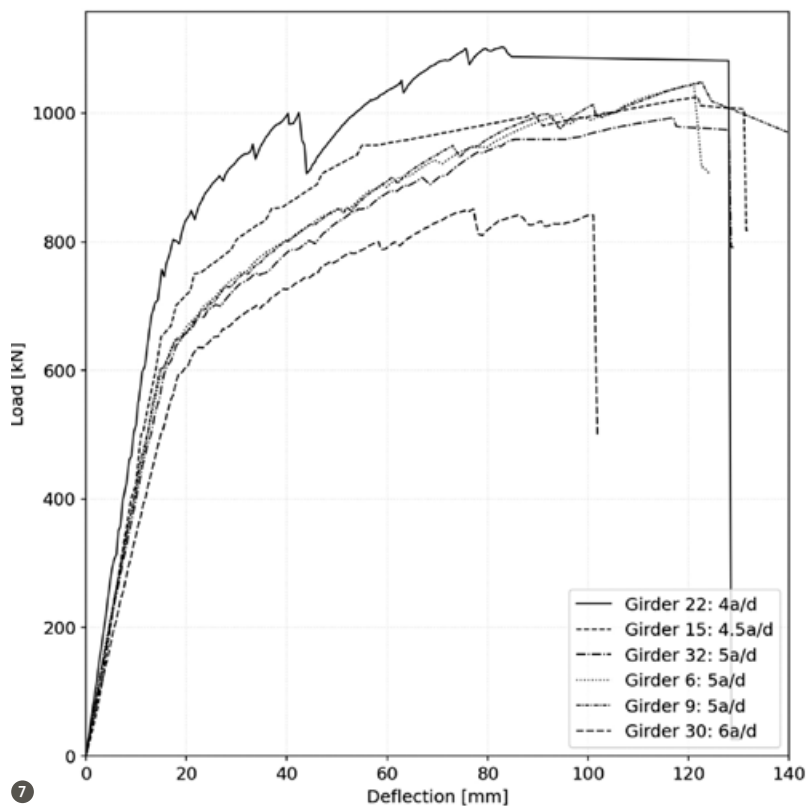
De maatgevende posities zijn vooraf bepaald op basis van een analytische en numerieke beschouwing. Daaruit volgde een maatgevende belastingspositie van $a/d \approx 5,0$. Met die positie zijn drie liggers beproefd. De gemeten dwarskrachtcapaciteiten (V_u) bedragen respectievelijk 784 kN, 824 kN en 827 kN, met een gemiddelde waarde van 812 kN. Bij lagere a/d verhoudingen ($a/d \approx 4,0$ en $a/d \approx 4,5$) zijn hogere capaciteiten gemeten tot 929 kN, terwijl bij $a/d \approx 6,0$ een lagere capaciteit van circa 626 kN is vastgesteld.

De belasting-verplaatsingsdiagrammen (fig. 7) laten zien dat de liggers tot het ontstaan van de eerste scheuren een overwegend lineair-elastisch gedrag vertonen. Het ontstaan van de eerste buigscheuren

kon consistent worden vastgesteld bij een aangebrachte belasting tussen circa 580 kN en 700 kN, afhankelijk van de belastingspositie. De uiteindelijke bezwijkbelasting ligt hier substantieel boven.

Van proeven naar ontwerp: Design Assisted by Testing

De experimenteel bepaalde dwarskrachtcapaciteiten vormen op zichzelf geen ontwerpwaarden. Om de testresultaten toe te kunnen passen in het ontwerp, is een vertaalslag nodig naar rekenwaarden die voldoen aan het vereiste betrouwbaarheidsniveau. Omdat voor dit type hergebruikte ligger geen geschikte normatieve verificatiemodellen beschikbaar zijn, is deze vertaalslag uitgevoerd met toepassing van de methode *Design Assisted by Testing* uit NEN-EN 1990 [3]. De gehanteerde methodiek en



7

de onderliggende statistische keuzes zijn uitvoerig gedocumenteerd in het kader van het *Engineering Doctorate*-onderzoek van Paredes Pineda aan de TU Delft [4].

De methode biedt een gelijkwaardige ontwerproute wanneer de weerstand van een constructief element niet betrouwbaar kan worden bepaald met bestaande rekenmodellen. De rekenwaarde van de weerstand wordt rechtstreeks afgeleid uit experimentele resultaten, waarbij expliciet rekening wordt gehouden met de statistische spreiding van de gemeten capaciteit en de gewenste betrouwbaarheid, afhankelijk van de gevolgklasse.

In dit onderzoek is de dwarskrachtcapaciteit V_u beschouwd als stochastische variabele. Doordat voor de maatgevende belastingpositie ($a/d \approx 5$) meerdere liggers zijn beproefd, zijn herhaalde waarnemingen beschikbaar voor dezelfde ontwerpsituatie. Op basis hiervan konden zowel het gemiddelde als de spreiding van de dwarskrachtcapaciteit worden bepaald.

Bij de afleiding van de rekenwaarde is uitgegaan van een lognormale verdeling van

de weerstand, in lijn met internationale aanbevelingen voor weerstandseigenschappen van betonconstructies [5]. Toepassing van deze benadering leidt tot:

$$V_{Rd} = \exp\left(\frac{1}{n} \sum \ln(V_{u,i}) - k_{d,n} V_X\right)$$

Waarbij V_X de variatiecoëfficiënt is op basis van de testresultaten en

$$k_{d,n} = \Phi(-\alpha_R \beta) \sqrt{1 + 1/n}$$

Conform NEN-EN 1990 moet hierbij een minimale variatiecoëfficiënt van 10% worden aangehouden. Voor gevolgklasse CC2 geldt $\beta = 3,8$ en voor CC3 $\beta = 4,3$. De gemiddelde dwarskrachtcapaciteit in de kritieke doorsnede bedraagt zoals gezegd 812 kN, met een steekproefstandaardafwijking van 24 kN, overeenkomend met een variatiecoëfficiënt van circa 3%. Tabel 3 geeft de afgeleide rekenwaarde van de dwarskrachtcapaciteit V_{Rd} voor gevolgklasse CC2 en CC3, uitgaande van een lognormale verdeling en een conservatief aangenomen variatiecoëfficiënt van 10%. →

De resulterende rekenwaarden van de dwarskrachtcapaciteiten zijn vergeleken met de optredende ontwerpbelasting in het nieuwe viaduct

Met de proeven is het hergebruik van de liggers in het circulaire viaduct technisch verantwoord onderbouwd

Tabel 3 Rekenwaarde-dwarskrachtcapaciteit voor verschillende belastingsposities

a/d	ligger-ID	V _u [kN]	ln V _u	CC2		CC3	
				k _{d,n}	V _{R,d}	k _{d,n}	V _{R,d}
4,0	22	929	6,83	4,30	605	4,86	572
4,5	15	838	6,73	4,30	546	4,86	516
5,0	32	784					
	06	824					
	09	827					
	gemiddelde	812	6,70	3,51	572	3,97	546
6,0	30	626	6,44	4,30	408	4,86	385

Aangezien de afschuif-buigbreuk maatgevend is en alle liggers een vergelijkbaar schadeverloop vertoonden resulterend in afschuif buigbreuk, kon voor de overige belastingsposities ($a/d \approx 4,0$; $4,5$ en $6,0$) dezelfde V_x worden toegepast, waarbij $k_{d,n}$ moet worden aangepast aan het gereduceerde aantal beschikbare proeven.

Voor de belastingsposities ($a/d \approx 4,0$; $4,5$ en $6,0$) is telkens slechts één proef uitgevoerd, hetgeen op zichzelf zou leiden tot een relatief sterke reductie bij de bepaling van de rekenwaarde.

Gezien de lage variatiecoëfficiënt van circa 3% die is vastgesteld voor de maatgevende positie ($a/d = 5$), en het hanteren van een conservatieve ondergrens van 10% conform NEN-EN 1990, is het echter logisch en voldoende conservatief om voor de overige belastingsposities dezelfde reductiefactor toe te passen bij de bepaling van de rekenwaarde. Dit resulteert in een factor van $e^{3,51 \cdot 0,10} \approx 0,70$.

Rekenwaarden dwarskrachtcapaciteit Op basis hiervan worden de volgende rekenwaarden voor de dwarskrachtcapaciteit verkregen:

→ $a/d = 4,0$: $V_{Rd} = 929 \cdot 0,70 = 650$ kN

→ $a/d = 4,5$: $V_{Rd} = 838 \cdot 0,70 = 587$ kN

→ $a/d = 6,0$: $V_{Rd} = 626 \cdot 0,70 = 438$ kN

De minimale rekenwaarde van de dwarskrachtcapaciteit bedraagt daarmee 438 kN.

De resulterende rekenwaarden van de dwarskrachtcapaciteit zijn vervolgens vergeleken met de optredende ontwerpbelasting in het nieuwe viaduct. Voor alle beschouwde belastingsposities geldt dat de rekenwaarde van de dwarskrachtcapaciteit groter is dan de ontwerpwaarde van de belasting ($V_{Rd} > V_{Ed}$). Daarmee is aangetoond dat de HNP-liggers, ondanks het ontbreken van effectieve dwarswapening en afwijking van de huidige Eurocode-detaillering, veilig kunnen worden hergebruikt binnen het



ontwerp van het circulaire viaduct A76 Daelderweg.

Hoewel afschuif-buigbreuk een relatief bros faalmechanisme is, is dit binnen het ontwerp acceptabel omdat de rekenwaarden zijn afgeleid met toepassing van een expliciete betrouwbaarheidsbenadering conform NEN-EN 1990. Het veiligheidsniveau wordt daarmee geborgd op systeemniveau, ondanks het ontbreken van normatieve detailleringseisen voor dwarswapening.

Consequenties voor hergebruik en ontwerp

De uitgevoerde bezwijkproeven en de daarop gebaseerde statistische analyse laten zien dat de dwarskrachtcapaciteit van de onderzochte HNP-liggers aantoonbaar groter is dan de optredende ontwerpbelasting in het nieuwe viaduct over de A76, ook voor toepassing in gevolgklasse CC3. Hiermee is het hergebruik van de liggers binnen het ontwerp van het circulaire viaduct technisch verantwoord onderbouwd.

De gepresenteerde resultaten zijn representatief voor de onderzochte HNP-liggers. Toepassing van de resultaten op andere liggegeometrieën, belastingconfiguraties of detailleringen vereist aanvullend onderzoek, waarbij met name het maatgevende faalmechanisme en de bijbehorende belastingpositie opnieuw moeten worden beoordeeld.

De resultaten tonen aan dat het ontbreken van effectieve dwarswapening en de afwijking van de huidige Eurocode detaillering niet automatisch hoeven te leiden tot afkeuring van bestaande liggers voor hergebruik. Door de werkelijke capaciteit experimenteel vast te stellen en deze te vertalen naar ontwerpwaarden met een betrouwbaarheidsbenadering, ontstaat een volwaardig alternatief voor de gangbare normatieve verificatie. Dit maakt het mogelijk om bestaande constructieve elementen veilig toe te passen in nieuwe kunstwerken, zonder onnodig conservatisme.

Voor het project A76 Daelderweg vormen de resultaten een essentiële basis voor het ontwerp van het nieuwe dek, waarin de hergebruikte HNP-liggers worden toegepast onder

de rijbaan. Tegelijkertijd reiken de bevindingen verder dan dit specifieke project. De gehanteerde aanpak laat zien dat bezwijkproeven, in combinatie met *Design Assisted by Testing*, kunnen fungeren als opstap naar toekomstige gebruikspoeven, waarbij liggers niet tot bezwijken hoeven te worden belast om hun geschiktheid aan te tonen.

Daarmee biedt dit onderzoek niet alleen een oplossing voor het huidige project, maar ook een generieke route voor het hergebruik van bestaande betonliggers binnen circulaire infrastructuur. De combinatie van experimenteel onderzoek, faalmechanisme-analyse en probabilistisch ontwerp vormt daarmee een robuuste basis om hergebruik structureel te verankeren binnen het ontwerp en toetsingsproces van civiele kunstwerken. ●

REFERENTIES

- 1 Comité Européen de Normalisation, Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1 General Rules and Rules for Buildings, Brussels: Comité Européen de Normalisation, 2005.
- 2 Howse, et al., AE Monitored estructure Load Test Report Asset ID: A9-Beam 06, Mistras Group, 2025.
- 3 Comité Européen de Normalisation, Eurocode 0: Basis of Structural Design, Brussels: Comité Européen de Normalisation, 2002.
- 4 J. E. Paredes Pineda, Towards structural reuse: load testing and design of reclaimed prestressed concrete girders without shear reinforcement. Engineering Doctorate report, Delft University of Technology, 2025.
- 5 Joint Committee on Structural Safety, JCSS Probabilistic Model Code – Part 3: Resistance Models, JCSS, 2020.