

Demontabele verbinding met injectiebouten

Nijgh, M.P.; Veljkovic, Milan

Publication date

2019

Document Version

Final published version

Published in

Bouwen met Staal

Citation (APA)

Nijgh, M. P., & Veljkovic, M. (2019). Demontabele verbinding met injectiebouten. *Bouwen met Staal*, (270), 44-49.

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable). Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights. We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Green Open Access added to TU Delft Institutional Repository

'You share, we take care!' – Taverne project

<https://www.openaccess.nl/en/you-share-we-take-care>

Otherwise as indicated in the copyright section: the publisher is the copyright holder of this work and the author uses the Dutch legislation to make this work public.

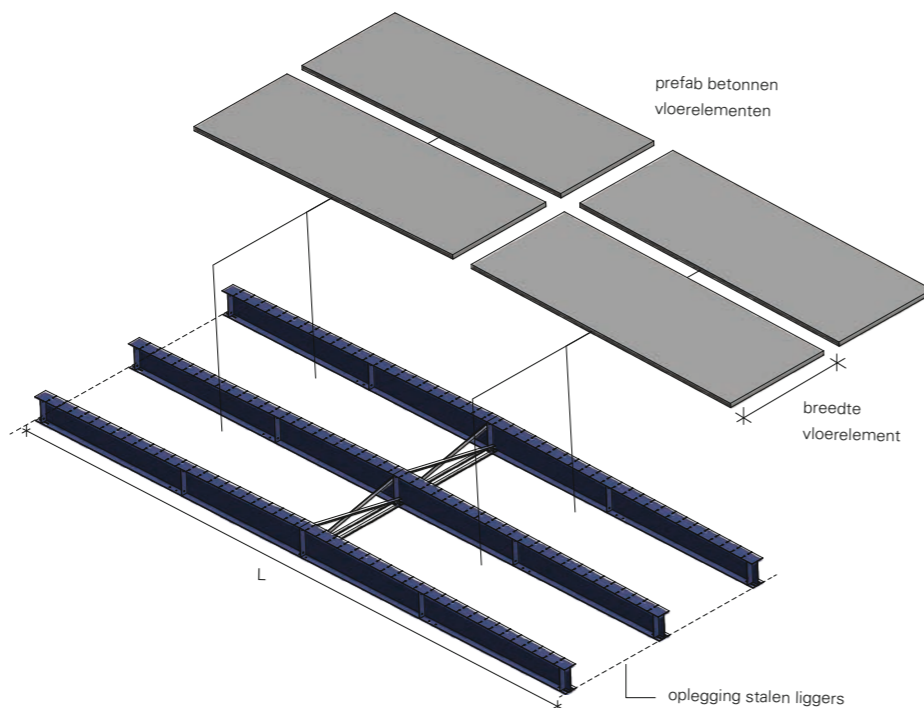
Demontabele verbinding met injectiebouten

Duurzaamheid wordt steeds belangrijker in de bouwsector. Demontabel en herbruikbaar bouwen vermindert het gebruik en verbruik van natuurlijke grondstoffen en minimaliseert afval en uitstoot van schadelijke stoffen. Binnen de sectie Steel and Composite Structures van de TU Delft is ontwikkeling van technische oplossingen voor duurzame staal-beton liggers één van de hoofdonderzoeklijnen. De crux zit – zoals praktisch altijd – in een ontkoppelbare, maar effectieve verbinding tussen vloer en constructie.

ir. M.P. Nijgh en prof.dr. M. Veljkovic

Martin Nijgh is promovendus bij de Technische Universiteit Delft en promoveert op demontabele staal-beton liggers met financiële steun van de Samenwerkende Nederlandse Staalbouw (SNS). Milan Veljkovic is hoogleraar staal- en composietconstructies bij de Technische Universiteit Delft.

Staal-beton liggers worden frequent toegepast in de utiliteitsbouw. Hierbij fungeert een (massieve) betonnen vloerplaat of een staalplaat-betonvloer als drukzone. De constructieve samenwerking tussen stalen ligger en de in het werk gestorte betonnen druklaag, wordt bereikt door stiftdeuvels die op de stalen ligger zijn gelast, wat leidt tot een reductie van de benodigde staaldoorsnede. De ingestorte stiftdeuvels verhinderen een eenvoudige demontage van de vloer. Aangezien de functionele levensduur van een gebouw over het algemeen korter is dan de technische levensduur^[1], wordt de potentie van de toegepaste bouwmaterialen slechts ten dele benut door vroegtijdige sloop, tenzij het gebouw (op dezelfde locatie) kan worden herbested. Stalen constructies zijn over het algemeen intrinsiek demontabel door het gebruik van geboude verbindingen. Staal-beton liggers met in het werk gestorte betonnen vloeren



1. Impressie demontabel vloersysteem van stalen liggers en prefab betonnen vloerelementen.

hebben het nadeel dat bij demontage van het gebouw, zagen noodzakelijk is, juist om vloerelementen met transportabele afmetingen te verkrijgen. Wat betreft montage- en demontagesnelheid is het gebruik van geprefabriceerde betonnen vloerelementen dan ook een logische keuze (afb. 1). Hoe groter de prefab vloerelementen, hoe sneller de assemblage en demontage van het systeem. Een belangrijke randvoorwaarde aan de afmetingen van de prefab betonnen vloerelementen is vergunningsvrij transport. De constructieve samenwerking tussen stalen ligger en prefab betonelementen kan worden gerealiseerd met ingestorte, demontabele afschuifverbindingen. Dit onderzoek is gericht op het vinden van een geschikt demontabel verbindingmiddel.

Kinderschoenen

Het ontwerpen van demontabele, herbruikbare constructies staat nog in de kinderschoenen. Intuïtief dient de ontwerpfilosofie van demontabele en herbruikbare constructies uit te gaan van lineair-elastisch gedrag, omdat dan na demontage met voldoende zekerheid sprake is van constructieve elementen die 'als nieuw' zijn (geen plastische vervormingen) in geval van statische belastingen. Een lineair-elastisch ontwerp van een staal-beton ligger vraagt om een spanningsbeperking in het staal (vloesterkte), het beton (druk- en treksterkte), en (quasi) lineair-elastisch gedrag van het demontabele afschuifverbindingmiddel.

De toleranties van de stalen ligger en prefab betonnen vloerelementen spelen een belang-

rijke rol bij het assembleren en demonteren van een herbruikbare staal-beton ligger. Assemblage is alleen mogelijk indien de ingestorte demontabele afschuifverbindingen simultaan uitlijnen met de boutgaten in de stalen liggers. EN 1090-2^[2] bevat een uitgebreid overzicht van toegestane geometrische afwijkingen van staalproducten, bijvoorbeeld de hart-op-hart afstand tussen kolommen (afb. 2a), rechtheid van liggers (afb. 2b) en de positie van gaten voor verbindingen (afb. 2c). Ook de relatieve verschuiving (slip) tussen ligger en het prefab betonnen vloerelement, die optreedt door het eigengewicht van de vloer, heeft invloed op de uitlijning. Met een grote gatspeling neemt de kans toe dat alle verbindingen simultaan uitlijnen met de boutgaten.

Gatspeling

In het geval van een grote gatspeling zullen de verbindingen niet aanliggen tegen de wand van het boutgat. Hierdoor is er geen constructieve samenwerking tussen de ligger en de vloerelementen. Dit laatste probleem kan worden opgelost door voorspannen of injecteren van de boutverbinding. Het nadeel van voorspanbouten is dat de conditie van de wrijvingsoppervlakken van belang is voor de krachtoverdracht. De wrijvingsoppervlakken kunnen worden beschadigd tijdens het transport en de installatie/verwijdering van de vloerelementen. Het gedrag van een afschuifverbinding met injectiebouten is daarentegen alleen afhankelijk van de eigenschappen van het injectiemateriaal (een epoxyhars, in Nederland over het algemeen RenGel SW404 + HY2404/5159, voorheen bekend onder de naam Araldite) en de gatspeling. In dit proces wordt de epoxyhars door een gat in de boutkop in de verbindingsholte geïnjecteerd (afb. 3). In het geval van een demontabele constructie moeten de constructieve elementen die met de epoxyhars in aanraking komen, vooraf worden voorzien van een lossingsmiddel om hechting te voorkomen.

De huidige Eurocode-voorschriften^[3] met betrekking tot injectiebouten schrijven voor dat de stuikweerstand van de hars lineair afneemt met de gatspeling. Vanaf een nominale gatspeling van 12 mm kan een verbinding met injectiebouten volgens de Eurocode geen

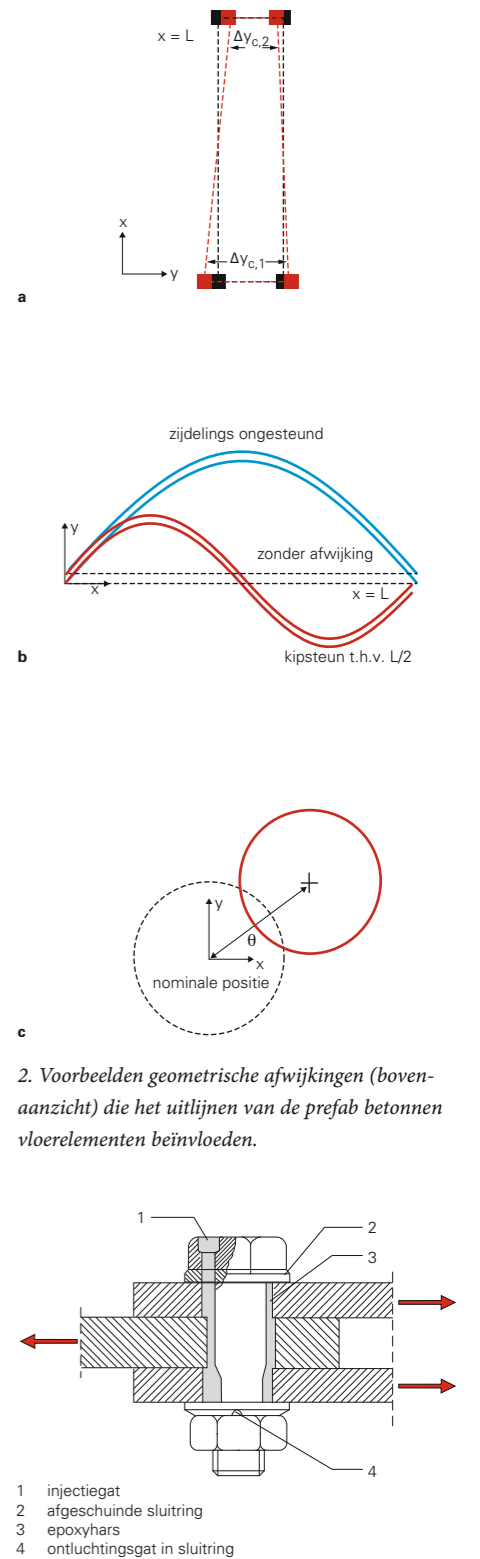
kracht meer overbrengen. De Eurocode gaat uit van staal-op-staal verbindingen, terwijl het toepassingsgebied in dit geval een staal-op-beton verbinding betreft. De huidige rekenregels zijn gebaseerd op een maximale slip van 0,30 mm over een periode van 50 jaar – hiermee voldoen de regels voor verbindingen met injectiebouten aan dezelfde voorschriften als verbindingen met voorspanbouten. Voor verbindingen die niet slip-critisch zijn, maar waarbij wel stijfheid vereist is (zoals bij een staal-beton ligger), zijn de huidige regels wellicht te restrictief. Verder onderzoek moet dit uitwijzen.

Casestudy: parkeergarage

De uitvoerbaarheid en de mechanische eigenschappen van een demontabele en herbruikbare staal-betonligger zijn getest in het Stevin II-lab van de TU Delft^[4]. Daartoe is een ontwerp gemaakt voor een staal-beton ligger met een vrije overspanning van 16 m voor een parkeergarage^[5]. De overspanning is geschaald naar 90% (14,4 m) vanwege de beschikbare ruimte in het lab.

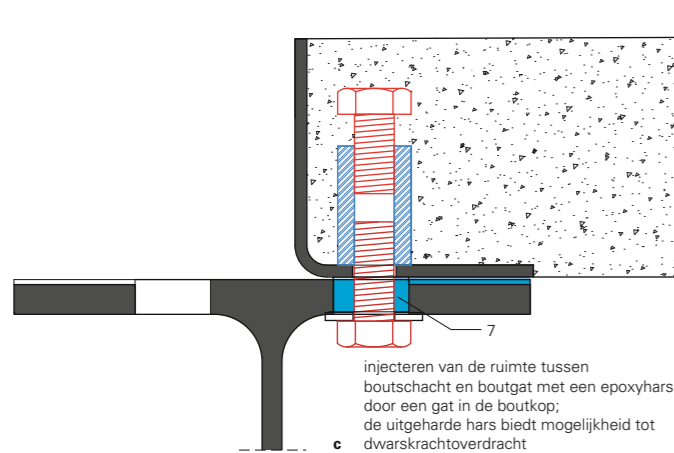
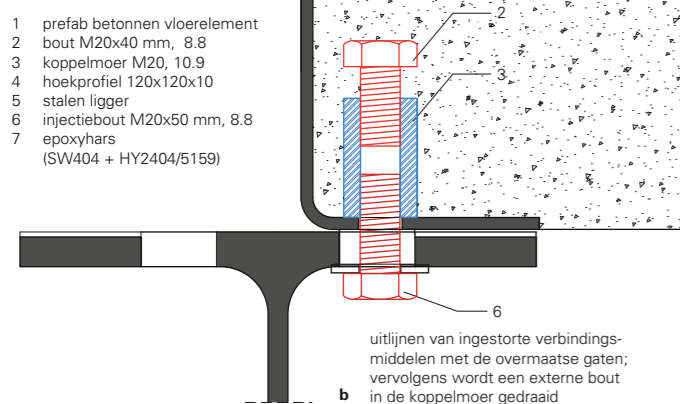
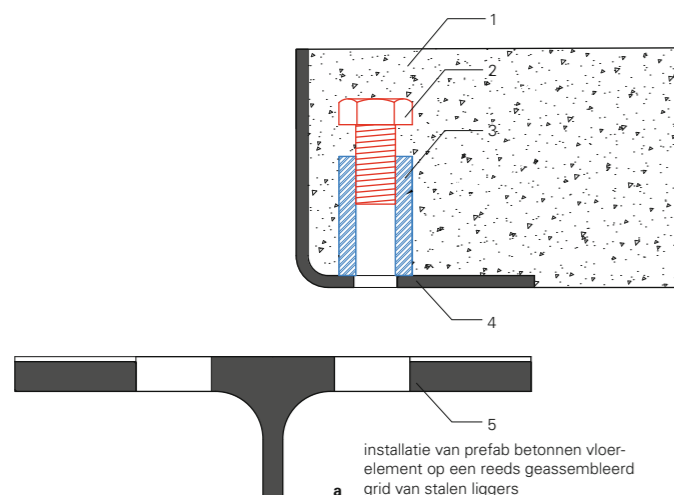
De opstelling bestaat uit drie gelaste taps toelopende stalen liggers ($L = 14,4$ m) en vier massieve prefab betonnen vloerelementen ($7,2 \times 2,6 \times 0,12$ m) (afb. 1). De hoogte van de balken varieert lineair van 590 mm bij de opleggingen tot 725 mm in het midden van de overspanning. Beide flenzen zijn 300 mm breed. De diktes van de boven- en onderflens zijn respectievelijk 12 en 10 mm. In de balken zijn boutgaten geponst met een nominale gatspeling van 12 mm op een nominale hart-op-hart afstand van 300 mm.

Het demontabele afschuifverbindingmiddel bestaat uit een in het vloerelement gestorte koppelmoer (M20, 10.9) met bout (M20, 8.8), zie afbeelding 4a, op een hart-op-hart afstand van 300 mm. Het risico op beschadiging van het vloerelement tijdens transport en assemblage is minimaal, omdat er geen delen van het verbindingmiddel buiten het vloerelement uit steken. Hoekprofielen ($120 \times 120 \times 10$ mm) vormen de omtrek van de vloerelementen en dienen ter bescherming van de randen (afb. 5a). De verwachting, op basis van de opgedane ervaring, is dat in de praktijk kleinere, goedkopere hoekprofielen deze functie net zo goed kunnen vervullen.



2. Voorbeelden geometrische afwijkingen (boven-aanzicht) die het uitlijnen van de prefab betonnen vloerelementen beïnvloeden.

3. Injectiebout in een dubbelsnedige staal-op-staal verbinding^[2].



4. Uitvoeringsfasen van een demontabele en herbruikbare staal-beton ligger.

ligger		vloerelement	
dikte bovenflens	12 mm	breedte	2.700 mm
dikte onderflens	12 mm	lengte	8.000 mm
dikte lijf	5 mm	hoogte	150 mm
hoogte bij opleggingen	590 mm		
hoogte in het midden van de overspanning	740 mm		
overspanning	16.000 mm		
nominale gatspeling	16 mm		
initiële stijfheid verbindingmiddel	55 kN/mm		
verdeling verbindingmiddelen	tussen opleggingen en L/10	200 mm h.o.h.	
	tussen L/10 en L/2	800 mm h.o.h.	
	totaal aantal	64 stuks (32 paar) per stramien	

Tabel 1. Gegevens staal-beton ligger voor een parkeergarage-ontwerp.



5a. Detail demontabele afschuifverbindingmiddelen in de prefab betonnen vloerelementen voorafgaand aan het storten.



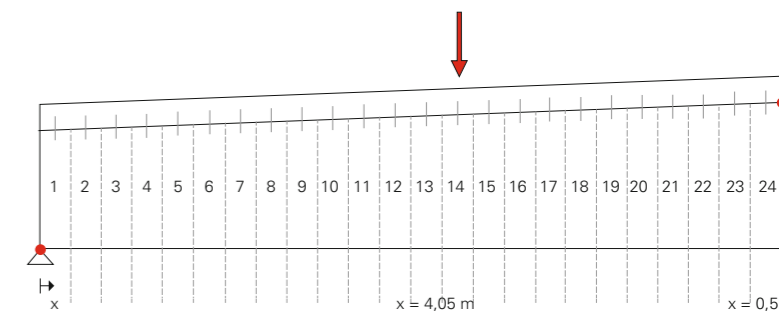
5b. Testopstelling met twee taps toelopende stalen liggers, twee prefab betonnen vloerelementen en demontabele afschuifverbindingmiddelen. Een tweetal puntlasten F wordt symmetrisch aangebracht op 4,05 m vanaf de opleggingen.

Uitvoerbaarheid

De vloerelementen worden met een kraan en hijsbalk opgehesen en uitgelijnd ten opzichte van de overmaatse boutgaten in de onderliggende stalen balken (afb. 4a). Dit proces duurt ongeveer 4-6 minuten per element. Vervolgens wordt de verbinding tussen ligger en vloerelement tot stand gebracht door het installeren van een injectiebout (M20, 8.8, afb. 4b). De injectiebout heeft een lagere sterkteklasse (8.8) dan de koppelmoer (10.9) opdat eventuele plasticiteit (met name) in de (vervangbare) injectiebout optreedt. De resterende ruimte in het boutgat wordt hierna opgevuld met een epoxyhars RenGel SW404 + HY2404/5159 (afb. 4c). Gemiddeld duurt het injecteren 30 seconden per boutgat, inclusief de voorbereidende werkzaamheden. Een ontluchtingskanaal dient ter preventie van luchtinsluitingen in de epoxyhars en ter verificatie van het voltooiën van het injectieproces. De epoxyhars hardt binnen een periode van 24 uur uit, waarna een constructieve samenwerking tussen beide elementen is ontstaan. De staal-beton liggers zijn tweemaal succesvol geassembleerd en vervolgens even succesvol gedemonteerd, waarbij de vloerelementen in beide gevallen op verschillende posities zijn geplaatst. De nominale gatspeling van 12 mm was precies voldoende om de afwijkingen in geometrie en maatvoering van de constructieve elementen mee op te vangen.

Constructieve werking

Naast de technische uitvoerbaarheid, is ook de constructieve werking van het vloersysteem in kaart gebracht. Hiertoe is de testopstelling teruggebracht naar één stramien, bestaand uit twee stalen liggers met hierop twee prefab betonnen vloerelementen (afb. 5b). Het vloersysteem is vervolgens met puntlasten op 4,05 m vanaf beide opleggingen belast. De relatie tussen last en zakking is bepaald voor vijf verschillende configuraties van de afschuifverbindingmiddelen (afb. 6). De afschuifverbindingmiddelen zijn ofwel uniform over de lengte van de ligger verdeeld (U-24/U-12/U-6) ofwel geconcentreerd in de opleggingszone (C-12/C-6). In de aanduidingen geeft het getal het aantal paar verbindingmiddelen per halve overspanning aan.



configuratie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
U - 24																									
C - 12																									
C - 6																									
U - 12																									
U - 6																									
U - 0																									

6. Configuraties van afschuifverbindingmiddelen. De ligger is symmetrisch in het vlak, $x = 0,5L$. Blauw geeft een paar (twee) geïnjecteerde afschuifverbindingmiddelen aan; grijs is niet-geïnjecteerd en dient uitsluitend ter preventie van verticale separatie.

Het doel is om de stijfheid van de ligger te maximaliseren en het aantal afschuifverbindingmiddelen te minimaliseren. In een aantal gevallen is de hart-op-hart afstand tussen de verbindingmiddelen groter dan toegestaan door de Eurocode^[6]; met kipsteunen werd instabiliteit van de ligger voorkomen. De resultaten van de buigproeven worden geëvalueerd in termen van een equivalente veerstijfheid.

$$k_{b,eff} = \frac{\Delta F}{\Delta W(x = L/2)}$$

Daarin is:

ΔF de toename in kracht;
 $\Delta W(x = L/2)$ de zakking in het midden van de overspanning.

De testresultaten zijn weergegeven in afbeelding 7 en geven aan dat slechts zes paar afschuifverbindingmiddelen reeds leidt tot toename van de equivalente veerstijfheid met 42-51% in vergelijking met de situatie zonder verbindingmiddelen. Het concentreren van een gelijk aantal verbindingmiddelen in de zone bij de oplegging leidt tot een hogere weerstand tegen vervorming vergeleken met een uniforme verdeling van de verbindingmiddelen over de lengte van de staal-beton ligger. Dit geeft aan dat, bij eenzelfde func-

tionele eis, het aantal verbindingmiddelen geminimaliseerd kan worden ten gunste van de uitvoeringssnelheid en kosten.

In tabel 1 is op hoofdlijnen een ontwerp opgenomen voor een vrij opgelegde, taps toelopende demontabele staal-beton ligger met een overspanning van 16 m die toegepast kan worden in een parkeergarage. Hierbij is uitgegaan van een uniform verdeelde belasting van 3 kN/m² en het eigengewicht van de prefab vloerelementen en de stalen ligger. Het ontwerp is gebaseerd op afbeelding 1, waarbij een kipsteun in het midden van de overspanning ter stabilisatie van de ligger en ter correctie van de geometrische afwijkingen dient. Voor het gegeven ontwerp is tijdens de levensduur de bruikbaarheidsgrenstoestand maatgevend. De mogelijke tijdsafhankelijke reductie van de initiële stijfheid van het verbindingmiddel (55 kN/mm) is niet meegenomen in het ontwerp en is onderwerp van toekomstig onderzoek. De achtergrond van het model dat gebruikt is bij het ontwerp, is te vinden in [7].

Andere potentiële toepassingen epoxyhars

De succesvolle toepassing van epoxyhars bij staal-beton liggers laat zien dat het materiaal geschikt is om geometrische afwijkingen op te vangen. Zo kunnen bijvoorbeeld de oneffenheden in de oppervlakken van brug-

opleggingen en -dekken worden gecorrigeerd door het injecteren van epoxyhars tussen de contactvlakken. Deze toepassing speelt tot op heden met name op de Duitse markt, omdat hier een aanbieder actief is die voor een speciaal ontwikkelde epoxyhars een *allgemeine bauaufsichtliche Zulassung* heeft. Daarnaast kan epoxyhars bijvoorbeeld worden toegepast in de verbinding tussen stalen kolommen en fundering. Het gebruik van overmaatse gaten leidt in dit geval tot het voordeel dat de kolom-fundering verbinding altijd kan worden gerealiseerd. Door het injecteren van de verbinding kan in krachtsoverdracht in dwarsrichting plaatsvinden zonder dat hierbij grote verplaatsingen optreden. In beide toepassingen biedt de epoxyhars de mogelijkheid tot hergebruik van de constructieve componenten, doordat met het materiaal eventuele verschillen in maatvoering in de nieuwe levenscyclus kan worden opvangen.

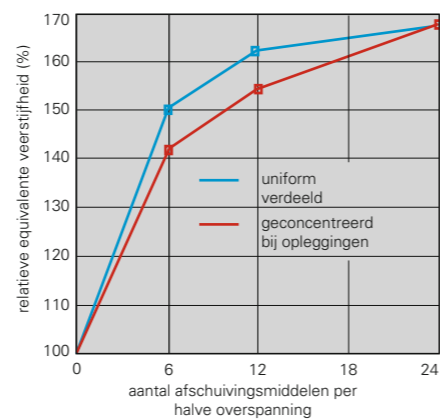
Staal-versterkte epoxyhars

Epoxyharsen hebben een relatief lage elasticiteitsmodulus (1-6 GPa) en zijn gevoelig voor kruip. De effectieve stijfheid van de tot stand gebrachte verbinding is een functie van de vervormbaarheid van de epoxyhars. De materiaaleigenschappen van epoxyhars kunnen worden verbeterd door hierin stalen kogeltjes, zoals gebruikt bij staalstralen, te verwerken^{[8][9]}. Dit nieuw ontwikkelde materiaal bestaat, wat betreft volume, voor 60% uit stalen kogeltjes en voor 40% uit epoxyhars. Dit materiaal (*afb. 8*) staat bekend onder als *steel-reinforced resin* (SSR), of in het Nederlands als staal-versterkte epoxyhars. De stalen kogeltjes worden voorafgaand aan het injecteren van de epoxyhars in de verbinding gebracht. De diameter van de stalen kogeltjes is afhankelijk van de toepassing, maar ligt in ordegrrootte van 1 mm. De quasi-statische materiaaleigenschappen van epoxyhars RenGel SW404 + HY2404/5159 en de staal-versterkte variant zijn bepaald met uni-axiale drukproeven. Het spanning-rek diagram van beide materialen is weergegeven in *afbeelding 9*. De elasticiteitsmodulus van de SRR-variant (15,7 GPa) is significant hoger (2,8x) vergeleken met de epoxyhars zelf (5,6 GPa). De sterkte van beide materialen is vergelijkbaar en bedraagt ongeveer 120 MPa. Het bezwijkmechanisme van de staal-versterkte

epoxyhars wordt gekarakteriseerd door desintegratie van het materiaal door beperkte adhesie van de kogeltjes en de epoxyhars (*afb. 10*) bij een relatief kleine rek. Dit bezwijkmechanisme kan echter niet optreden in de voorziene toepassingen, omdat het materiaal in dat geval zijdelings wordt gesteund door het boutgat of door de wrijving tussen twee contactvlakken. De epoxyhars kent een verhardingstraject, waarbij de maximale spanning oploopt tot 170 MPa bij 20% rek.

Verbindingen met staal-versterkte epoxyhars

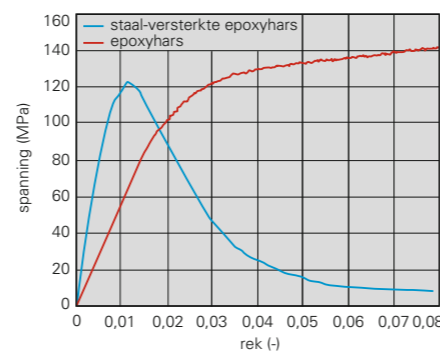
Het inbrengen van de stalen kogeltjes in een volume kan eenvoudig, met zwaartekracht. Dit vereist toegang tot het volume van bovenaf, zoals het geval is bij kolom-fundering verbindingen en bij opleggingen. Het inbrengen van stalen kogeltjes in boutgaten is minder eenvoudig en vereist ontwikkeling van speciale apparatuur. Echter, om een beeld te geven van de voordelen van de staal-versterkte epoxyhars, zijn een aantal boutverbindingen daarmee geïnjecteerd onder laboratoriumomstandigheden voorbereid en beproefd. De resultaten worden vergeleken met de resultaten verkregen met de traditionele (onversterkte) epoxyhars. Een aantal proeven met dubbelsnedige verbindingen conform EN 1090-2 Annex G is uitgevoerd om de quasi-statische respons van een geïnjecteerde verbinding met M20-bouten te bepalen. De boutgaten in de middenplaat zijn hierbij overmaats uitgevoerd. De zijplaten hebben een normale gatspeling van 2 mm. De positie van de bout ten opzichte van het boutgat is dusdanig dat deze tegen de zijplaten aanligt: de invloed van het injectiemateriaal in de zijplaten is in dit geval nihil. Voor de staal-versterkte epoxyhars zijn geen proeven met normale gatspeling uitgevoerd, omdat het inbrengen van de stalen kogeltjes niet mogelijk is door de beperkte ruimte in het proefstuk. De resultaten voor deze geometrie zijn geëxtrapoleerd op basis van de experimenten met gatspelingen van 6, 12 en 16 mm. *Afbeelding 11* geeft de stijfheid van de verbinding in de range 0,10-0,20 mm relatieve verschuiving (slip) tussen de zij- en middenplaten weer. De verbindingen met SRR hebben een significant hogere stijfheid vergeleken met



7. Relatieve equivalente veerstijfheid als functie van het aantal afschuifverbindingen en locatie.



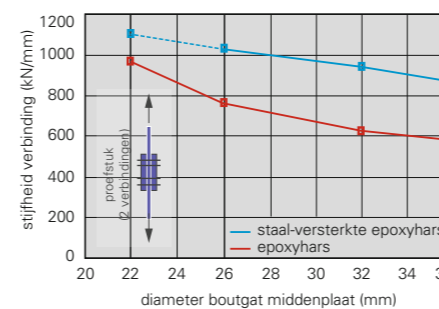
8. Doorsnede staal-versterkte epoxyhars.



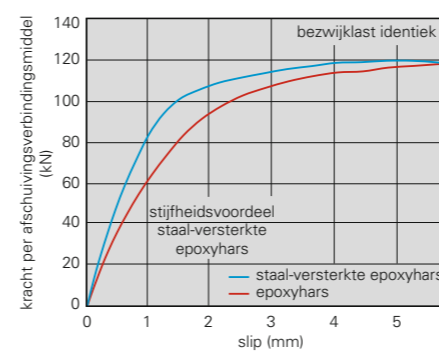
9. Spanning-rek diagram voor de (staal-versterkte) epoxyhars RenGel SW404 + HY2404/5159.



10. Bezwijkmechanismen voor de epoxyhars (links, 20% rek) en de staal-versterkte epoxyhars (rechts, 1-2% rek).



11. Verbindingsstijfheid van een dubbelsnedige verbinding als functie van de diameter van het boutgat in de middenplaat en het injectiemateriaal.



12. Numerieke resultaten push-tests voor het demontabele afschuifverbindingmiddel weergegeven in afbeelding 4.

de epoxyhars zelf. De resultaten laten zien dat, bij een voorgeschreven stijfheid, de gatspeling zonder problemen kan worden vergroot door het toepassen van de staal-versterkte variant. De quasi-statische respons van het afschuifverbindingmiddel (*afb. 4c*) gebruikt in de proeven met de staal-beton liggers wordt bepaald

met *push tests* ofwel afschuifproeven^[6].

De proefstukken bestaan uit vier betonnen elementen, die met het afschuifverbindingmiddel worden bevestigd aan een HEA 260-profiel met \varnothing 32 mm gaten (12 mm gatspeling). Tot dusver zijn voorspellingen gedaan ten aanzien van de kracht-vervormingsrelatie van het afschuifverbindingmiddel met eindige-elementenanalyse in ABAQUS/Explicit. De resultaten in *afbeelding 12* geven hierbij aan dat ook in dit geval de staal-versterkte variant van de epoxyhars tot een hogere stijfheid (83 kN/mm) van het verbindingmiddel leidt dan in geval van de epoxyhars zelf (59 kN/mm). De bezwijklast is in beide gevallen identiek doordat afschuiving van de bout maatgevend is. Ten tijde van het schrijven van dit artikel (juni 2019) worden de proeven in het Stevin II-lab uitgevoerd; de eerste resultaten bevestigen het voorspelde gedrag. Hierna volgt een serie proeven die cyclisch belast worden, om de geschiktheid van de demontabele verbinding in bijvoorbeeld bruggen te bepalen.

Samenvatting

De technische uitvoerbaarheid van demontabele en herbruikbare staal-beton liggers is aangetoond onder laboratoriumomstandigheden. Door het toepassen van grote gatspelingen (overmaatse gaten) in combinatie met injectiebouten wordt aan de eisen in de uitvoeringsfase (snelheid, uitlijnen) en de levensfase (constructieve samenwerking) voldaan. Het gebruik van epoxyhars biedt ook mogelijkheden binnen andere toepassingen, bijvoorbeeld kolom-fundering verbindingen, waarbij geometrische afwijkingen een rol spelen. Het kunnen opvangen van afwijkingen in maatvoering draagt bij aan de geschiktheid van constructieve componenten ten aanzien van demontabel en herbruikbaar bouwen. Ter verbetering van de bestaande epoxyharssystemen is een nieuw materiaal, staal-versterkte epoxyhars, ontwikkeld met een significant hogere elasticiteitsmodulus (280%) vergeleken met de epoxyhars zelf. Experimenten met staal-op-staal verbindingen en staal-op-beton verbindingen tonen de potentie van de staal-versterkte epoxyhars, en laten zien dat bij eenzelfde functionele vervormingseis grotere gatspelingen kunnen worden toegepast in vergelijking met de epoxyhars zelf. •

Literatuur

1. A. van den Dobbelsteen, *The Sustainable Office - An exploration of the potential for factor 20 environmental improvement of office accommodation*, TU Delft 2004.
2. *NEN-EN 1090-2* (Execution of steel structures and aluminium structures – Part 2: technical requirements for steel structures), 2008.
3. *NEN-EN 1993-1-8* (Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-8: Design of Joints), 2005.
4. M.P. Nijgh, I.A. Gircabea en M. Veljkovic, 'Elastic behaviour of tapered composite beam optimized for reuse', *Engineering Structures* vol. 183 (2019), p. 366-374.
5. *Car Parks in Steel*, ArcelorMittal, Esch-sur-Alzette (LU) 2014.
6. *NEN-EN 1994-1-1* (Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings), 2005.
7. M.P. Nijgh en M. Veljkovic, 'Static and free vibration analysis of tapered composite beams optimized for reuse', *International Journal of Mechanical Sciences* vol. 159C (2019), p. 398-405.
8. M.P. Nijgh, *New materials for injected bolted connections - A feasibility study for demountable connections*, TU Delft 2017.
9. M.P. Nijgh, H. Xin en M. Veljkovic, 'Non-linear hybrid homogenization method for steel-reinforced resin', *Construction and Building Materials* vol. 182 (2018), p. 324-333.