

Primljen / Received: 27.3.2020.

Ispravljen / Corrected: 7.8.2020.

Prihvaćen / Accepted: 10.8.2020.

Dostupno online / Available online: 10.4.2021.

# Demontažne spregnute međukatne konstrukcije od čelika i betona: pregled najnovijih izvedbi

## Autori:

Mr.sc. **Isidora Jakovljević**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Beogradu, Srbija

Građevinski fakultet

[isidora@imk.grf.bg.ac.rs](mailto:isidora@imk.grf.bg.ac.rs)

Autor za korespondenciju

Doc.dr.sc. **Milan Spremić**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Beogradu, Srbija

Građevinski fakultet

[spremic@imk.grf.bg.ac.rs](mailto:spremic@imk.grf.bg.ac.rs)Prof.dr.sc. **Zlatko Marković**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Beogradu, Srbija

Građevinski fakultet

[zlatko@imk.grf.bg.ac.rs](mailto:zlatko@imk.grf.bg.ac.rs)

Pregledni rad

**Isidora Jakovljević, Milan Spremić, Zlatko Marković**

## Demontažne spregnute međukatne konstrukcije od čelika i betona: pregled najnovijih izvedbi

U skladu sa zahtjevima za održivi razvoj u svim segmentima industrije, brojna su istraživanja u području spregnutih čelično-betonskih konstrukcija usmjerena na razvoj demontažnih sredstava za sprezanje. Proteklih godina predlagana su različita demontažna sredstva za sprezanje koja su različitim mehanizmima prenosila posmičnu silu između čeličnog profila i betonske ili spregnute ploče. U ovom radu prikazana su najnovija dostignuća na tu temu dajući sažetke eksperimentalnih i numeričkih rezultata istraživanja vezano uz potisna (push-out) ispitivanja i ispitivanja na nosačima.

### Ključne riječi:

demontažna sredstva za sprezanje, vijci za tarne spojeve, moždanici s glavom i navojem, slijepi vijci, ugrađene matice vijka, sustav sa spojnicom, sredstva za sprezanje sa stezaljkom

Subject review

**Isidora Jakovljević, Milan Spremić, Zlatko Marković**

## Demountable composite steel-concrete floors: A state-of-the-art review

In keeping with current demands for sustainable development in all segments of the industry, numerous research in the field of steel-concrete composite structures has been focused on developing demountable shear connectors. In the past years, various demountable shear connectors have been suggested, with various mechanisms for transferring shear force between a steel profile and a concrete or composite slab. In this paper, a state of the art on the topic is given, and experimental and numerical research results of push-out and beam tests are summarized.

### Key words:

demountable shear connectors, friction-grip bolts, threaded headed studs, blind bolts, embedded nuts, coupler system, clamping connector

Übersichtsarbeit

**Isidora Jakovljević, Milan Spremić, Zlatko Marković**

## Demontage-Verbunddeckenkonstruktionen aus Stahl und Beton: Übersicht der neuesten Ausführungen

In Übereinstimmung mit den Forderungen nach der nachhaltigen Entwicklung in allen Industriesegmenten sind zahlreiche Forschungen auf dem Gebiet von Verbund-Stahlbetonkonstruktionen auf die Entwicklung von Verbund-Demontagemitteln ausgerichtet. In den vergangenen Jahren wurden verschiedene Demontage-Verbundmittel vorgeschlagen, welche mit den verschiedenen Mechanismen die Scherkraft zwischen dem Stahlprofil, sowie der Beton- oder Verbundplatte übertragen haben. In dieser Arbeit wurden die neusten Errungenschaften zu diesem Thema dargestellt, indem die Zusammenfassungen von experimentalen und numerischen Forschungsergebnissen dargestellt wurden, im Zusammenhang mit den Schiebepfahrungen (push-out-Prüfungen), sowie den Prüfungen auf den Trägern.

### Schlüsselwörter:

Demontage-Verbundmittel, Schrauben für die Reibungsverbindungen, Dübel mit dem Kopf und Sturz, Blindschrauben, eingebaute Mutter, System mit der Verbindungsfuge, Verbundmittel mit der Klemme

## 1. Uvod

Primjena čelično-betonskih spregnutih konstrukcija u građevinskoj industriji u porastu je od sredine 20. stoljeća. Postoji nekoliko prednosti prilikom primjene tih konstrukcijskih sustava kao što su smanjenje vlastite težine i povećana brzina izgradnje. Najuočljiviji spregnuti čelično-betonski sustav je spregnuti nosač od čeličnog profila na koji se postavlja betonska ploča i oni se međusobno povezuju pomoću zavarenih moždanika s glavom. Betonska ploča se često izvodi u profiliranim metalnim limovima tvoreći tako spregnutu ploču.

Prošlih desetljeća provedena su mnoga istraživanja u području spregnutih čelično-betonskih konstrukcija u svrhu premošćivanja većih raspona, smanjivanja vlastite težine i dubine međukatnih konstrukcija. Razvijeni su sustavi kao što su spregnuti nosači s tankim međukatnim konstrukcijama (*slim-floor* sustavi), delta-nosači i spregnuti nosači s iznimno plitkim međukatnim konstrukcijama (*ultra-shallow floor* sustavi) [1]. Da bi se postiglo najpovoljnije izvedbe, preporučena su alternativna sredstva za sprezanje iglama i vijcima [2].

S druge pak strane, u središtu su pozornosti pitanja zaštite okoliša implicirajući održivi razvoj u svim segmentima industrije. Drugim riječima, zahtijevana je reciklaža građevnog materijala i ponovna uporaba konstrukcijskih elemenata. Stoga su provedena mnoga istraživanja o izvedbi demontažnih spregnutih čelično-betonskih konstrukcija s naglaskom na sredstva za sprezanje između čelične pojasnice i betonske ploče koja su u

takvim sustavima primjenjiva. Nedavna studija o prednostima za okoliš različitih spregnutih međukatnih konstrukcija pokazala je da demontažni čelično-betonski sustavi dovode do najvećih smanjenja u emisiji štetnih plinova i ušteda u materijalu u većini analiziranih kategorija od utjecaja [3].

Iako se kao sredstva za sprezanje zavareni moždanici s glavom još uvijek najčešće koriste, nisu primjenjivi u svojem originalnom obliku u slučaju demontaže konstrukcije, za vrijeme rastavljanja ili modificiranja građevine i njenih popravaka. Različita demontažna sredstva za sprezanje predlagali su, eksperimentalno ispitivali i numerički analizirali brojni autori i skupine istraživača, često u suradnji s partnerima u industriji. Glavnu ulogu u rastavljanju spregnutih konstrukcija imaju vijčana sredstva za sprezanje koja različitim mehanizmima prenose posmičnu silu između čeličnog profila i betonske ili spregnute ploče.

Kako bi se dao jasan pregled svih rješenja za provedbu rastavljanja spregnutih čelično-betonskih međukatnih konstrukcija koja su do danas predložena, u ovom je radu prikazano sadašnje stanje o tome. Dani su prikazi, usporedbe i rasprave glavnih rezultata eksperimentalnih i numeričkih istraživanja što se odnose na potisna ispitivanja kao i ispitivanja na nosačima. Kako bi se dobio bolji pregled teme, sredstva za sprezanje su klasificirana prema svojoj geometriji i mehanizmu prijenosa opterećenja, a svaka vrsta je ukratko prikazana u zasebnom odjeljku. Uz to, objavljena istraživanja provedena na demontažnim sredstvima za sprezanje prikazana su u sažetom obliku i kronološki su razvrstana u tablici 1.

Tablica 1. Sažeti prikaz istraživanja provedenih na sredstvima za sprezanje na demontažnim spregnutim međukatnim konstrukcijama izvedenim od čelika i betona

Ref.	Godina	Autori	Vrste analiziranih sredstava za sprezanje	Ispitivanje potiskom (P), Ispitivanje na nosaču (B)	Eksperiment (E), Numeričko istraživanje (N)	Puna ploča (S), Ploča s profiliranim limom (M), Šuplja ploča (H)
[4]	1968.	Dallam	vijci za tarne spojeve	P	E	S
[5]	1968.	Dallam, Harpster	vijci za tarne spojeve	B	E	S
[6]	1971.	Marshall, Nelson, Banerjee	vijci za tarne spojeve	P, B	E	S
[7]	1984.	Dedic, Klaiber	vijci s ugrađenim maticama, vijci s epoksidnom smolom	P	E	S
[8]	1987.	Hawkins	vijci bez ugrađenih matica	P	E	S
[9]	2003.	Sedlecek, Hoffmeister, et al.	vijci sa ugrađenim maticama	P	E	S
[10]	2010.	Kwon, Engelhardt, Klingner	vijci za tarne spojeve, vijci s ugrađenim maticama, ulijepljena sidra	P	E	S
[11]	2011.	Kwon, Engelhardt, Klingner	vijci za tarne spojeve, vijci s ugrađenim maticama, ulijepljena sidra	B	E	S

Ref.	Godina	Autori	Vrste analiziranih sredstava za sprezanje	Ispitivanje potiskom (P), Ispitivanje na nosaču (B)	Eksperiment (E), Numeričko istraživanje (N)	Puna ploča (S), Ploča s profiliranim limom (M), Šuplja ploča (H)
[12]	2012.	Kwon, Engelhardt, Klingner	vijci za tarne spojeve, vijci s ugrađenim maticama, ulijepljena sidra	B	N	S
[13]	2013.	Pavlović, Marković, Veljković, Buđevac	vijci s ugrađenim maticama	P	E, N	S
[14]	2014.	Chen, Zhao, West, Walbridge	vijci za tarne spojeve, zavareni moždanici s glavom	P, B	E (potisak), N (greda)	S
[15]	2014.	Moynihan, Allwood	vijci s ugrađenim maticama	B	E	M
[16]	2015.	Liu, Bradford, Lee	vijci za tarne spojeve	P	E, N	S
[17]	2015.	Dai, Lam, Saveri	moždanici s glavom i navojem, zavareni moždanici s glavom	P	E, N	S
[18]	2015.	Henderson, Zhu, Uy, Mirza	slijepi vijak, zavareni moždanici s glavom	P	E	S
[19]	2015.	Henderson, Zhu, Uy, Mirza	slijepi vijci, zavareni moždanici s glavom	P	N	S
[20]	2015.	Ban, Uy, Pathirana, Henderson, Mirza, Zhu	slijepi vijci, zavareni moždanici s glavom	B	E	S
[21]	2015.	Pathirana, Uy, Mirza, Zhu	slijepi vijci, zavareni moždanici s glavom	P, B	E (potisak, greda), N (greda)	S
[22]	2016.	Liu, Bradford, Chen, Ban	vijci za tarne spojeve	B	N	S
[23]	2016.	Ataei, Bradford, Liu	vijci za tarne spojeve, vijci s ugrađenim maticama	B	E	S
[24]	2016.	Rehman, Lam, Dai, Ashour	moždanici s glavom i navojem	P	E	M
[25]	2016.	Pathirana, Uy, Mirza, Zhu	slijepi vijci, zavareni moždanici s glavom	B	E, N	S
[26]	2016.	Pathirana, Uy, Mirza, Zhu	slijepi vijci, zavareni moždanici s glavom	P	E, N	S
[27]	2017.	Liu, Bradford, Ataei	vijci za tarne spojeve	B	N	S
[28]	2017.	Wang, Guo, Jia, Chen, Dong	nazupčani moždanici s glavom	P	E	S
[29]	2017.	Suwaed, Karavasilis	sredstvo za sprezanje s konusnom maticom	P	E	S
[30]	2018.	Rehman, Lam, Dai, Ashour	moždanici s glavom i navojem, zavareni moždanici s glavom	B	E	M
[31]	2018.	Yang, Lam, Dai, Sheehan	moždanici s glavom i navojem	P	E	M
[32]	2018.	Dai, Lam, Sheehan, Yang, Zhou	vijci s ugrađenim maticama	P	E, N	M

Ref.	Godina	Autori	Vrste analiziranih sredstava za sprezanje	Ispitivanje potiskom (P), Ispitivanje na nosaču (B)	Eksperiment (E), Numeričko istraživanje (N)	Puna ploča (S), Ploča s profiliranim limom (M), Šuplja ploča (H)
[33]	2018.	Yang, Liu, Jiang, Xin	vijci sa sustavom spojnica, zavareni moždanici s glavom	P	E	S
[34]	2018.	Suwaed, Karavasilis	posmična sredstva na osnovi trenja	P	E	S
[35]	2019.	Balkos, Sjaarda, West, Walbridge	vijci za tarne spojeve	B	E	S
[36]	2019.	Kozma, Odenbreit, Braun, Veljkovic, Nijgh	vijci za tarne spojeve, vijci sa sustavom spojnica s injektiranom smolom i bez nje	P	E	S, M
[37]	2019.	Odenbreit, Kozma	vijci za tarne spojeve, vijci sa sustavom spojnica sa injektiranom smolom	B	E, N	M
[38]	2019.	Sencu, Wang, Yang, Lam	zavareni moždanici s glavom	P	E	M
[39]	2019.	Ataei, Zeynalian, Yazdi	vijci s ugrađenim maticama	P	E	S
[40]	2019.	Nijgh, Girbacea, Veljkovic	vijci sa sustavom spojnica s injektiranom smolom	B	E, N	S
[41]	2019.	Feidaki, Vasdravellis, He, Wang	popustljiva demontažna čelična sredstva za sprezanje	P	E, N	H
[42]	2019.	Wang, Webster, Hajjar	sredstva za sprezanje sa stezaljkom	P	E	S

## 2. Vijci za tarne spojeve

Vijci za tarne spojeve su najviše istraživana i analizirana demontažna sredstva za sprezanje. Ti vijci su prednapeti, te se posmična sila u spregnutom spoju prenosi trenjem između betonske ploče i gornje pojasnice čeličnog nosača. U stručnoj literaturi obično se nazivaju visokovrijednim vijcima za tarne spojeve.

Prve publikacije o eksperimentalnim ispitivanjima na nosačima i potisnim ispitivanjima vijaka za tarne spojeve pojavila su se u kasnim 60-im godinama 20. stoljeća [4-6]. Eksperimentalna istraživanja pokrivala su različite parametre kao što je čvrstoća betona, raspon nosača, način opterećenja, promjer vijka, korištenje predgotovljenih betonskih ploča ili onih izvedenih *in situ*. Glavni zaključci doneseni su promatranjem potpune interakcije između betonske ploče i čeličnog nosača u području uporabnog opterećenja.

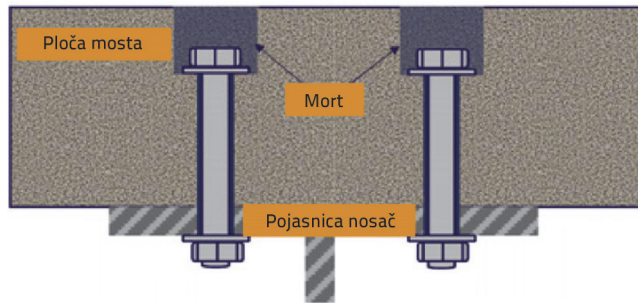
Nekoliko godina kasnije neki od rezultata istraživanja uključeni su u britanske norme za projektiranje mostova [43]. Navedenom normom zahtijeva se zadovoljenje sljedećeg uvjeta pri projektiranju mostova kod kojih se primjenjuju vijcima za tarne spojeve: uzdužna posmična otpornost nastala trenjem treba biti

veća od uzdužne posmične sile koja se javlja pri graničnom stanju uporabivosti. Izraz za određivanje posmične otpornosti glasi:

$$F_u = \mu \cdot F_{pc} / 1,2 \quad (1)$$

pri čemu je  $F_{pc}$  sila predapinjanja, a  $\mu$  je faktor klizanja koji se uzima kao 0,45. Norma upućuje na gubitak sile prednapona u vijcima kao posljedicu puzanja i skupljanja betona, ali ne definira metodu kojom bi se ti učinci uzeli u obzir.

Prethodnih su godina istraživanja o vijcima koji osiguravaju trenje ponovno došla u središte pozornosti. Tri različite vrste posmičnih sredstava, uključujući vijke za tarne spojeve ispitana su radi stvaranja spregnutog djelovanja kod postojećih nespregnutih mostova naknadnom ugradnjom vijaka poslije same izvedbe konstrukcije mosta [10-12]. Istraživanja su uključivala posmična ispitivanja pojedinih vijaka pri statičkom opterećenju i opterećenju na zamor, zatim eksperimentalna ispitivanja nosača u stvarnoj veličini kao i numeričke simulacije ispitivanja nosača korištenjem konačnih elemenata. Vijci su bili umetnuti u prethodno izbušene rupe u betonskoj ploči, zatim su prednapeti, te je rupa ispunjena mortom visoke čvrstoće, kako je prikazano na slici 1.



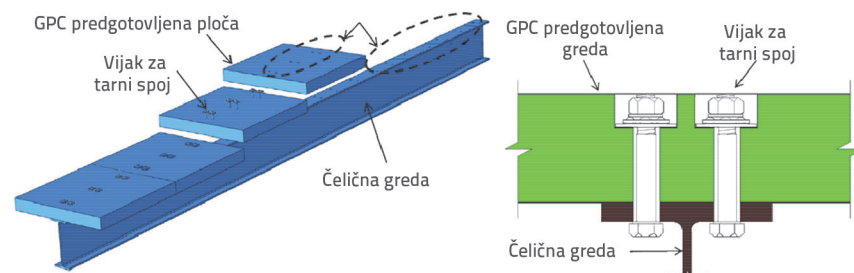
Slika 1. Spregnuta veza ostvarena vijcima za tarne spojeve prilikom radova na obnovi mosta [10]

Rezultati su pokazali da su visokovrijedni vijci za tarne spojeve pokazali znatno veću čvrstoću na zamor od uobičajenih zavarenih moždanika s glavama, kao rezultat nepostojanja vara između pojasnice i sredstva za sprezanje, što ima važnu prednost pri projektiranju spregnutih mostova. Uzorci nosača s naknadno ugrađenim posmičnim sredstvima pokazali su povećanje krutosti i čvrstoće do 50 % u usporedbi s nespregnutim nosačima, iako su bili projektirani sa samo 30-postotnom posmičnom vezom. Autori [12] predložili su da se za izračun statičke čvrstoće naknadno ugrađenih sredstava za sprezanje koristi izraz (2):

$$F_u = 0,6 A_s \cdot f_u \quad (2)$$

pri čemu je  $A_s$  efektivna posmična površina sredstva za sprezanje, a  $f_u$  je vlačna čvrstoća materijala od kojeg je izrađeno sredstvo za sprezanje.

Sljedeći doprinos ovom području ispitivanja postignut je korištenjem vijaka za tarne spojeve u montažnim geopolimernim betonskim pločama [16, 22, 23, 27]. Ispitivanja potiskom i na nosačima su provedena, te su razvijeni odgovarajući numerički modeli prema rasporedu prikazanom na slici 2. Nosači s naknadno ugrađenim vijcima za tarne spojeve u predgotovljenim pločama pokazali su manju krajnju otpornost, no veću duktilnost od nosača s vijcima ugrađenim unutar monolitne ploče koja je također bila ispitana. Općenita slabost analiziranog sustava pripisuje se razmacima između predgotovljenih betonskih ploča, što dovodi do značajnog smanjenja početne krutosti. Kako bi se prikazala demontaža sustava, za vrijeme ispitivanja potiskom i ispitivanja na nosačima, nakon opterećenja unutar područja

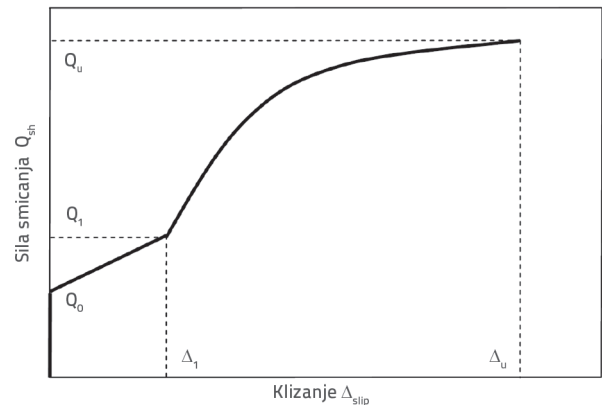


Slika 2. Primjena vijaka za tarne spojeve u predgotovljenim pločama [23]

uporabivosti, neki od uzoraka bili su ponovno sastavljeni te opterećeni sve do otkazivanja, pokazujući pritom slično ponašanje kao i uzorci koji nisu bili rastavljeni. Mala modifikacija izraza (3) za posmičnu čvrstoću vijaka za tarne spojeve u geopolimernim betonskim pločama predložena je [16]:

$$F_u = 0,66 A_s \cdot f_u \quad (3)$$

Prijedlog pojednostavljenog odnosa između opterećenja i pomaka tipičan za vijke za tarne spojeve, koji uključuje linearne i nelinearne dijelove, prikazan je na slici 3. [16]. Mogu se razaznati tri područja ponašanja sredstava za sprezanje. U prvom području pomak je gotovo zanemariv zbog primijenjene sile prednapona. Zatim, nakon što se premaši sila trenja na kontaktu između čelika i betona koja je posljedica prednapinjanja vijaka, dolazi do određenog pomaka kao posljedice postojanja tolerancije između promjera predgotovljenih rupa i promjera samih vijaka. Pomak gotovo odgovara sumi tolerancija između promjera rupe u čeličnoj pojasnici i promjera vijka te toleranciji između promjera rupe u betonskoj ploči i promjera vijka. U trećem području, nakon što se navedeni pomak premaši, javlja se nelinearni odnos između opterećenja i pomaka. Predložen je analitički izraz za dimenzioniranje posmične veze u spregnutim nosačima koji koriste prednapete vijke, koji ujedno uključuje navedene tri faze ponašanja vijka [44].



Slika 3. Preporučeno proračunsko ponašanje odnosa između opterećenja i pomaka za vijke za tarne spojeve [16]

U daljnjem eksperimentalnom radu, preporučena su neka dodatno razrađena rješenja u svrhu poboljšanja ponašanja na deformaciju i smanjenja maksimalne vrijednosti klizanja. Predloženo je korištenje tzv. prolaznih vijaka kod predgotovljenih spregnutih čelično-betonskih mostova [14, 35]. Rupe za vijke oblikovane su korištenjem PVC cijevi koje su se postavljale na određena mjesta u betonskim pločama tako da je prostor unutar cijevi ostao neispunjen nakon betoniranja, kako je prikazano na slici 4.a. Istraživanje je obuhvatilo ispitivanja na

Tablica 2. Eksperimentalni rezultati ispitivanja na potisak provedeno na vijcima za tarne spojeve u punim betonskim pločama

Ref.	Promjer vijka [mm]	Promjer rupe u ploči ili promjer cilindra [mm]	Promjer rupe u čeličnoj pojasnici [mm]	Kvaliteta vijka	Vlačna čvrstoća vijka, $f_u$ [MPa]	Čvrstoća betona [MPa]	Krajnje opterećenje po spojnom sredstvu [kN]	Najveći pomak [mm]	Opaska
[14]	19,05	25	-	ASTM A325*	-	49,65 (cilindar)	128,1	11,1	vijci umetnuti u PVC cilindre
	15,88	25	-	ASTM A325*	-	49,65 (cilindar)	82,5	11,7	
	12,70	25	-	ASTM A325*	-	49,65 (cilindar)	53,8	11,1	
[16]	20,00	24	24	8,8	1020	47,00 (cilindar)	219,5	24,8	geopolimerne betonske ploče
	20,00	28	24	8,8	1020	47,00 (cilindar)	216,0	27,5	
	16,00	24	24	8,8	1020	47,00 (cilindar)	153,0	29,5	
[36]	20,00	-	24	8,8	-	59,40 (kocka)	141,0	9,7	vijci umetnuti u čelične cilindre

\*najmanja granica popuštanja čelika  $f_y = 660$  MPa, najmanja vlačna čvrstoća  $f_u = 830$  MPa

potisak i ispitivanja na nosačima, proučavajući pritom nekoliko parametara koji utječu na ponašanje posmične veze: kontaktnu površinu, promjer vijka i razinu sile prednapona.

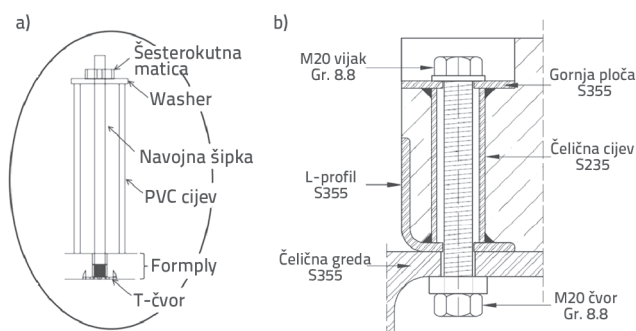
Predloženo je i dodatno rješenje primjenjivo u građevinarstvu koje uključuje vijke za tarne spojeve a koji su umetnuti u čelične cilindre koji su zavareni na gornju ploču te na L-profil, kako je prikazano na slici 4.b [36, 37]. Predložena sredstva za sprezanje ispitana su na potisak u punoj betonskoj ploči i u spregnutoj ploči u čeličnom profiliranom limu, a ispitivanje na nosačima bilo je izvedeno samo sa spregnutom pločom. Uspoređeni su galvanizirani i negalvanizirani čelični elementi, dokazujući da galvanizirani konektor mijenja svoje ponašanje nakon ponovne montaže povećanjem klizanja i smanjenjem otpornosti na trenje zbog bljednog sloja omota i smanjenja koeficijenta trenja.

Kao što je vidljivo iz predloženih rezultata, najveća vrijednost pomaka, koja odgovara krajnjoj razini opterećenja, varira od 10 mm do gotovo 30 mm. Najmanji pomak od 9,7 mm uočen je u slučaju vijaka umetnutih u čelične cilindre što se može objasniti krutošću čelične cijevi. U protivnom, rješenje bez bilo kakvih dodatnih cilindara rezultira s do tri puta većim konačnim pomakom.

Iako je vijak koji nosi posmik najviše istraživana vrsta demontažnih sredstava za sprezanje u spregnutim međukatnim konstrukcijama, još uvijek u normi ne postoje potpuna pravila za njihovo dimenzioniranje. Njihovi glavni nedostaci, imajući ujedno na umu i gubitak sile prednapona tijekom vremena, jest i problem trajnosti koji je posljedica trošenja zaštitnog sloja nanesenog na čeličnu pojasnicu [45]. Kao posljedica gubitka sile prednapona tijekom vremena, nakon što se premaši sila trenja, dolazi do određenog pomaka koji utječe na dodatnu deformaciju nosača.

### 3. Vijčana sredstva za sprezanje bez ugrađenih matica i moždanici s glavom i navojem

U usporedbi s vijcima za tarne spojeve, vijčana sredstva za sprezanje bez ugrađenih matica ne zahtijevaju prethodno prednapinjanje, pa se time skraćuje vrijeme montaže i ne pojavljuje se gubitak sile prednapona tijekom vremena. Posmična sila se potpuno prenosi na mjestu navoja vijka te betona oko vijka. No, zbog pomaka vijka u rupi, očekuje se manja početna krutost, što utječe na progib nosača i može dovesti do problema njegove uporabivosti. Prva istraživanja vijčanih sredstava za sprezanje bez ugrađenih matica koja su se provodila 80-ih godina 20. stoljeća pokazala su da je krutost analiziranih vijčanih sredstava za sprezanje iznosila samo 15 % krutosti zavarenih moždanika



Slika 4. a) Prolazni vijak [35], b) Vijak za tarne spojeve umetnut u čelični cilindar [36]

Baza podataka s eksperimentalnim rezultatima ispitivanja na potisak koja su provedena s vijcima za tarne spojeve i uz primjenu pune sile prednapinjanja prikazana je u tablici 2.



s glavom, a posmična otpornost oko 80 % posmične otpornosti zavarenih sredstava za sprezanje [8].

Još jedan pristup koji bi omogućio demontažu čelično-betonskih spojnih sredstava jest proizvodnja sredstava za sprezanje s navojem na tijelu moždanika s glavom, kako je prikazano na slici 5. Na taj način dobiva se konačni proizvod čiji geometrijski oblik je sličan prethodno opisanim vijčanim posmičnim sredstvima bez ugrađenih matica. Posljednjih godina proveden je čitav niz ispitivanja i numeričkih simulacija na takvim sredstvima za sprezanje u punim betonskim pločama i spregnutim pločama s čeličnim profiliranim limovima [17, 24, 30, 31, 38]. U tim su istraživanjima razmatrane varijacije u duljini dijela s navojem i dijela bez navoja, kao i čvrstoća betona, raspored armature u ispitivanjima na potisak, visina sredstva za sprezanje te utjecaj temperature za vrijeme opterećenja. U usporedbi sa zavarenim moždanicima, ponašanje spojeva ostvarenih primjenom moždanika s navojem pokazalo je znatnu razliku u početnoj krutosti kao rezultat slobodnog prostora između moždanika i rupe, iako je konačna posmična otpornost za oba spojna sredstva bila gotovo ista. Ispitivanja spregnutih nosača u punoj veličini pokazala su da se krajnja otpornost na savijanje demontažnih nosača može dobro predvidjeti primjenom teorije plastičnosti [30].



Slika 5. Moždanci s glavom i navojem [17]

Nadalje, kako su provedena ispitivanja na potisak s moždanicima s navojem u spregnutim pločama s kontinuiranim i diskontinuiranim čeličnim profiliranim limovima, dokazano je da spojna sredstva u kontinuiranim pločama imaju manju krajnju otpornost ali veću otpornost pri pomaku od 6 mm u odnosu na diskontinuirane ploče [31]. Važno je imati na umu da visina moždanika u betonu značajno utječe na način otkazivanja u profiliranim spregnutim pločama unatoč činjenici da je visina oba ispitana moždanika unutar zahtjeva propisanih Eurokodom 4 [46]. Naime, prema toj normi visina zavarenih moždanika s glavom mora iznositi najmanje  $2d$  iznad čeličnog profiliranog lima, pri čemu je  $d$  promjer tijela moždanika.

Treba također spomenuti i istraživanje s demontažnim moždanicima s glavom i navojem u betonu iznimno visoke čvrstoće s ravnomjerno umetnutim čeličnim vlaknima [28]. Kako bi se povećala sposobnost deformacije spregnute posmične veze ostvarene ovom vrstom betona, zavareni moždanici se zamjenjuju moždanicima s navojem. No, iako su ispitivanja na potisak pokazala veću duktilnost, pomak je ipak bio manji od 6

mm, što se zahtijeva Eurokodom 4 [46] kako bi se sredstvo za sprezanje moglo smatrati duktilnim.

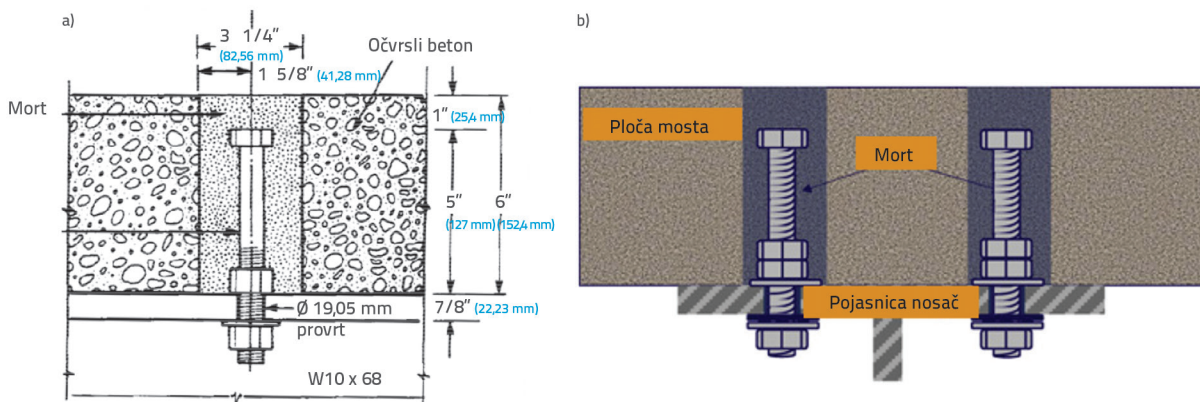
#### 4. Vijčana sredstva za sprezanje s ugrađenim maticama

Ideja o primjeni vijčanih sredstava za sprezanje s maticama na kraju, ugrađenim u betonsku ploču, pojavila se s ciljem kontroliranja rotacije vijka i njegovog pomaka za vrijeme opterećivanja. Na taj način, u usporedbi s vijcima bez ugrađenih matica, očekuje se povećanje krutosti. Još jedna važna prednost ovih spojnih sredstava odnosi se na lakši postupak montaže u odnosu na za vijke bez ugrađenih matica koje se teško drži u vertikalnom položaju prije i za vrijeme lijevanja betona. Ipak, kod sprezanja izvedenog primjenom vijaka s ugrađenim maticama uočava se određeni pomak vijka unutar rupe, što je posljedica potrebne tolerancije pri izvedbi, te utječe na dodatne progibe čeličnog nosača u fazi izvedbe [47]. Različite dispozicije spojnih sredstava su ispitane pri ispitivanjima na potisak kao i ispitivanjima na nosačima, uključujući jednu ili dvije ugrađene matice, iako su pokazale slično ponašanje.

U 80-im godinama prošlog stoljeća, prvi koraci u ispitivanju provedeni su u svrhu implementacije ove vrste posmičnih sredstava pri rekonstrukciji postojećih mostova [7]. Vijci s jednom ugrađenom maticom montirani su na prethodno izbušene rupe koje su kasnije zapunjene punilom kako je prikazano na slici 6.a. Autori su komentirali usporedivo ponašanje između dobivenog odnosa sile i pomaka s ponašanjem posmičnih veza izvedenih s vijcima i zavarenim moždanicima.

Na samom početku 21. stoljeća dani su rezultati nekoliko statičkih ispitivanja i ispitivanja na umor primjenom potiska s punim betonskim pločama i vijcima s dvije ugrađene matice, uključujući teoretski model za proračun otpornosti betona na drobljenje i posmične otpornost vijka [9]. No, otkriveno je da eksperimentalni rezultati značajno variraju od izračunane otpornosti, zaključujući da su za donošenje općenitih preporuka za projektiranje potrebna daljnja istraživanja.

Nedavno, u sklopu studije o istraživanju, koja je uključivala prethodno opisane vijke za tarne spojeve, provedena su ispitivanja na vijcima s dvostrukim maticama u svrhu njihove primjene pri rekonstrukciji mostova [10–12]. Prikaz spregnute veze između čelika i betona korištenjem vijaka s dvije ugrađene matice iznad čelične pojasnice dan je na slici 6.b. Nakon zapunjivanja otvora punilom visoke čvrstoće, potpuna sila prednapinjanja primijenjena je na vijke s dvije matice osiguravajući sličan odnos između sile i pomaka kao i kod vijaka za tarne spojeve ali sa znatno nižim pomakom pri otkazivanju. Ostala eksperimentalna istraživanja su pokazala da su u usporedbi sa zavarenim moždanicima s glavom, posmični spojevi s vijcima s jednom ugrađenom maticom pokazali čak 50 % manju krutost za uporabna opterećenja [13]. Uzrokom tog fenomena smatra se pomak između vijka i rupe, postojanje navoja u betonskom otvoru te veći doprinos posmične sile pri otkazivanju. Nadalje, numerička istraživanja su pomogla



Slika 6. Izvedba spregnutih spojeva pri sanaciji mosta: a) vijak s jednom maticom [7]; b) vijci s dvostrukom maticom [10]

u formulaciji modela otkazivanja vijaka, uključujući složeno djelovanje zbog uzdužne i posmične deformacije te deformacije uslijed savijanja.

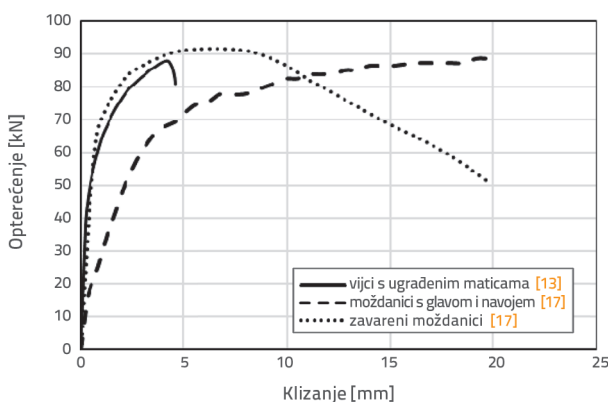
Usporedba ponašanja između sile i pomaka dobivena ispitivanjima na potisak vijaka s jednom ugrađenom maticom [13], moždanika s navojem [17] i zavarenih moždanika s glavom [17], od kojih su sva provedena s punim pločama, prikazana je na slici 7. Iako su sva prikazana spojna sredstva dosegla sličnu krajnju otpornost, oblik krivulja sila-pomak je znatno drugačiji. Kao što je i bilo očekivano, vijci s ugrađenim maticama pokazuju povećanu krutost u usporedbi s moždanicima s navojem te su dobivene vrijednosti mnogo bliže krutosti zavarenih moždanika. No, zbog krstog otkazivanja vijaka kod vijaka, s ugrađenim maticama otkazivanje je nastupilo pri vrlo malom pomaku, a otkazivanje moždanika s navojem i zavarenih moždanika nastupilo je uslijed drobljenja betona.

Eksperimentalnim ispitivanjem triju nosača različitih raspona dobiven je dodatni uvid u svojstva vijaka s ugrađenom maticom [15]. Betonska ploča bila je izvedena u čeličnom profiliranom limu te su provedene usporedbe s prethodnim ispitivanjima na nosačima sa zavarenim moždanicima s glavom. Prema autorima, nosači s vijcima pokazali su usporedivu razinu otpornosti s nosačima koji imaju moždanike s glavom. Najveća razlika u otpornosti na savijanje iznosila je 12 %. Nakon opterećenja do granice uporabivosti, dva su nosača bila rastavljena, ponovno sastavljena te zatim opterećena do otkazivanja, što je dovelo do određenog povećanja pomaka.

No, istraživanja u ovom području se i dalje provode. Ciklično ponašanje spregnutih spojeva izvedenih vijcima s jednom ugrađenom maticom u predgotovljenim betonskim panelima eksperimentalno su proučavana [39]. Nadalje, objavljena su eksperimentalna i numerička istraživanja o ponašanju vijaka s jednom ugrađenom maticom u kontinuiranim i djelomično diskontinuiranim betonskim pločama u čeličnim limovima [32]. Otkriveno je da djelomično i potpuno diskontinuirane ploče imaju veću krajnju posmičnu otpornost i veću duktilnost od kontinuiranih ploča. Takva su saznanja pogodna jer diskontinuirani sustavi također omogućuju lakšu izvedbu, demontažu i sanaciju.

Ref.	Konektor za smicanje		Čvrstoća betonske kocke [MPa]
[13]	vijci s ugrađenim maticama	M16 8.8	40
[17]	moždanici s glavom i navojem	18 mm*	30
[17]	zavareni moždanici	19 mm	30

\*promjer objumice

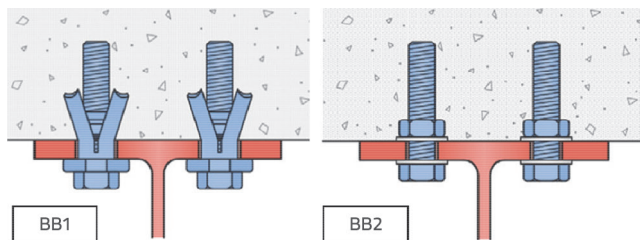


Slika 7. Usporedba ponašanja posmičnih sredstava

### 5. Slijepi vijci

Zahtjev za olakšanjem i ubrzanjem procesa montiranja vijaka doveo je do ideje za korištenjem tzv. slijepih vijaka kao demontažnih sredstava za sprezanje. Slijepi vijci su posebno izrađenaspojna sredstva za čiju je ugradnju dovoljan pristup objektu samo s jedne strane. Provedeno je nekoliko usporednih eksperimentalnih i numeričkih istraživanja [18–21, 25, 26, 48] za dva tipa slijepih vijaka, koji su prikazani na slici 8. Slijepi vijak označen sa BB2 mora se umetnuti u specijalizirane alate koji omogućuju njegovu ugradnju zajedno s brtvenom pločicom i maticom. S druge strane, vijci označeni sa BB1 ne sadrže dijelove koje bi trebalo sastavljati – umjesto toga imaju objumicu koja se širi kako se vijak priteže.



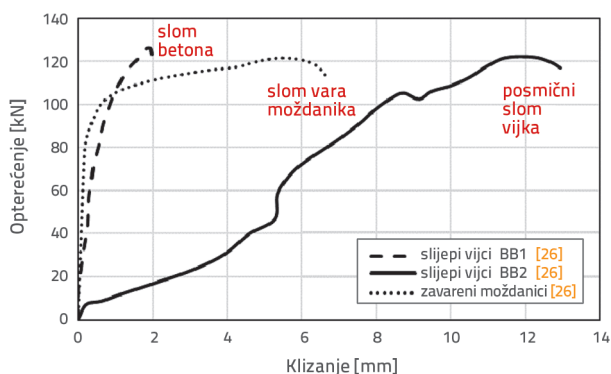


Slika 8. Slijepi vijci [20]

Usporedba krivulja sila–pomak dobivenih za dvije vrste slijepih vijaka i zavarenih moždanika [26] prikazana je na slici 9. Kao rezultat prikazanih ispitivanja na potisak, vijci BB1 imaju veću početnu krutost, no znatno manju duktilnost i nosivost prije otkazivanja u usporedbi sa BB2 vijcima. I dok uzorci s vijcima BB1 otkazuju zbog otkazivanja betona, otkazivanje uzoraka s vijcima BB2 događa se zbog posmičnog otkazivanja samih vijaka. Autori smatraju da proširena obujmica na slijepim vijcima BB1 pruža dodatni otpor pomaku, ali i da je obujmica isto tako uzrokovala oštećenje betonske ploče i krti lom. S druge strane, zbog prevelikih rupa u čeličnoj pojasnici, uzorci sa BB2 vijcima imali su velik početni pomak. Niska duktilnost zavarenih moždanika pripisana je lošoj izvedbi vara i otkazivanju vara. Ispitivanja na nosačima su potvrdila svojstva vijaka s obzirom na duktilnost i krajnju otpornost koja su dobivana ispitivanjem uzoraka na potisak. Rastavljenost je prikazana na uzorcima greda sa slijepim vijcima BB1, dokazujući da ne postoji značajna razlika u ponašanju između sile i pomaka nakon ponovnog sastavljanja.

Ref.	Konektor za smicanje	Promjer [mm]	$f_v/f_u$ [MPa]	Čvrstoća betonske kocke [MPa]
[26]	slijepi vijci BB1	20	860/920	52.5*
[26]	slijepi vijci BB2	20	795/900	52.5*
[26]	zavareni moždanici	20	390/515	52.5*

\*čvrstoća betonskog cilindra pretvara se u čvrstoću betonske kocke množenjem s 1,25



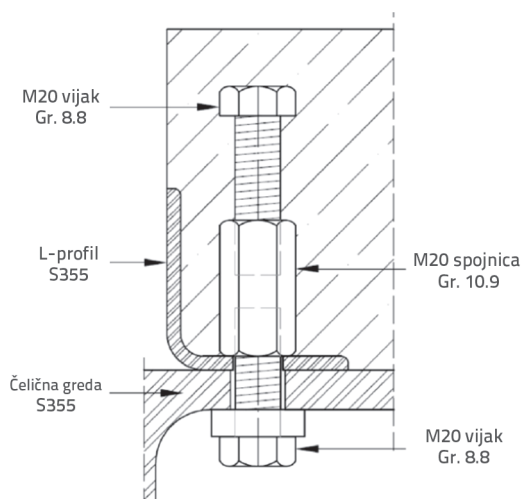
Slika 9. Usporedba ponašanja posmičnih sredstava

Uz istraživanje ponašanja slijepih vijaka s punim pločama pod statičkim opterećenjem koja su provedena ispitivanjima na

potisak i ispitivanjima na nosačima, istraživanje slijepih vijaka obuhvatilo je i njihovo dinamičko ponašanje [18, 19], vremenski ovisno ponašanje [20] i ponašanje pod interakcijom posmičnog i vlačnog naprezanja [48]. Primjena slijepih vijaka predložena je i u slučajevima demontažnih spregnutih nosača [25, 26] kao i u slučajevima sanacije mostova [21, 26], a razlika je samo u procesu montaže. Naime, u slučajevima sanacije mostova, rupe čeličnoj pojasnici izvode se s gornje strane uzorka, nakon čega se vijci učvršćuju, a rupe se u betonskim pločama zapunjavaju. Međutim, primjena drugačijeg postupka instalacije nije znatno utjecala na ponašanje vijaka.

## 6. Vijčana posmična sredstva sa spojnica

Pokušaj pojednostavljenja postupka zamjene vijaka doveo je do primjene vijčanih posmičnih sredstava sa spojnicom u spregnutim međukatnim konstrukcijama izvedenim od čelika i betona. To spojno sredstvo sastoji se od vijka koji je ugrađen u betonsku ploču, vijka koji se može ukloniti, a koji je postavljen s donje strane, te spojnice koja spaja dva vijka, kako je prikazano na slici 10.

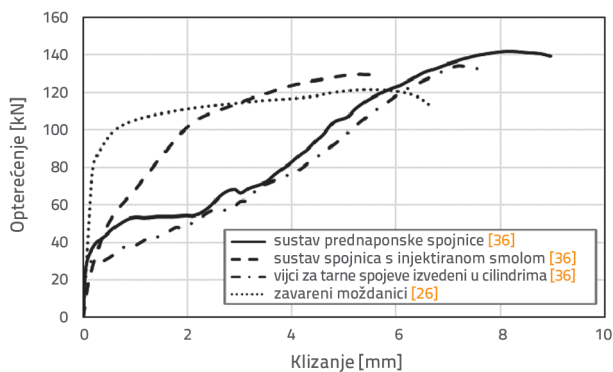


Slika 10. Vijčano posmično sredstvo sa spojnicom [36]

Prve publikacije o ovoj vrsti spojnih sredstava obuhvaćale su geometrijske varijacije vijaka te usporedbu njihovog ponašanja dobivenih ispitivanjima na potisak s ponašanjem zavarenih moždanika s glavom [33]. Uočeno je da vijak otkazuje na posmik i to na mjestu navoja vijka koji se može ukloniti, te ujedno nije uočena nikakva šteta na betonu. Autori su zaključili da na krutost spojnog sredstva uvelike utječe slobodni prostor između vijka i rupe u čeličnoj pojasnici koji postoji zbog tolerancije izvedbe. Nadalje, druga grupa istraživača provela je usporedna istraživanja između vijčanih sredstava za sprezanje sa spojnicom i vijaka za tarne spojeve umetnutih u čelične cilindre [36, 37]. Prednost spojnih sredstava koja koriste spojnice u odnosu na vijke za tarne spojeve jest manja vjerojatnost od oštećenja koje može nastupiti za vrijeme izvedbe ili transporta. S obzirom na to da se kod nosača izvedenih primjenom

posmične veze sa spojnicama, slično kao i u slučajevima primjene vijaka s jednostrukom i dvostrukom maticom kao posljedica pomaka vijka javlja dodatni progib u fazi izvedbe, neki su autori dali svoje prijedloge za rješenje tog problema. Ispitane su dvije vrste posmične veze sa spojnicom: prednapeti vijci i vijci s epoksidnom smolom injektiranom u rupu čelične pojasnice. Injektirana epoksidna smola sprječava smanjenje krutosti i sposobnost nosivosti čak i u slučajevima kada su rupe u čeličnoj pojasnici znatno veće, što je vrlo korisno s gledišta pripreme, izvedbe i demontaže. Za obje vrste, spojnica je bila zavarena na L-profil, a njena je kvaliteta odabrana da bude veća od kvalitete vijka kako bi se osiguralo željeno posmično otkazivanje vijka koji se uklanja na mjestu njegovog navoja, jer se on lako može zamijeniti. Ispitivanja na potisak provedena su s punim pločama koristeći obje vrste spojnih sredstava sa spojnicama, a ispitivanje na nosaču obuhvatilo je vijke s epoksidnom smolom injektiranom u spregnutu ploču s profiliranim čeličnim limom.

Ref.	Konektor za smicanje		Čvrstoća betonske kocke [MPa]
[36]	sustav prednaponske spojnice	M20 8.8	44,3
[36]	sustav spojnica s injektiranom smolom	M20 8.8	44,3
[36]	vijci za tarne spojeve izvedeni u cilindrima	M20 8.8	59,4
[26]	zavareni moždanici	20 mm	52,5



Slika 11. Usporedba ponašanja posmičnih sredstava

Zabilježene krivulje sila-pomak za sustav s prednapetim vijkom i spojnicom te sustav s vijkom i spojnicom s epoksidnom smolom uspoređene su na slici 11. s ponašanjem vijaka za tarne spojeve umetnutima u čelične cilindre koje su ispitali isti autori [36], što je prethodno spomenuto u 2. poglavlju te s ponašanjem zavarenih moždanika istog promjera [26]. Sva prikazana spojna sredstva imaju usporedivu početnu krutost iako je za obje vrste vijaka s prednaponom uočen pad u krutosti nakon što je premašena sila trenja. Sustav sa spojnicama s injektiranom smolom zadržao

je veću krutost no ipak manje od one za zavarene moždanike. Kod svih prikazanih vijčanih spojnih sredstava, dogodilo se krto posmično otkazivanje, no nije uočeno nikakvo drugo oštećenje niti je to utjecalo na epoksidnu smolu. Sustav vijaka sa spojnicama i smolom pokazao je manju duktilnost od sustava s prednapetim vijcima.

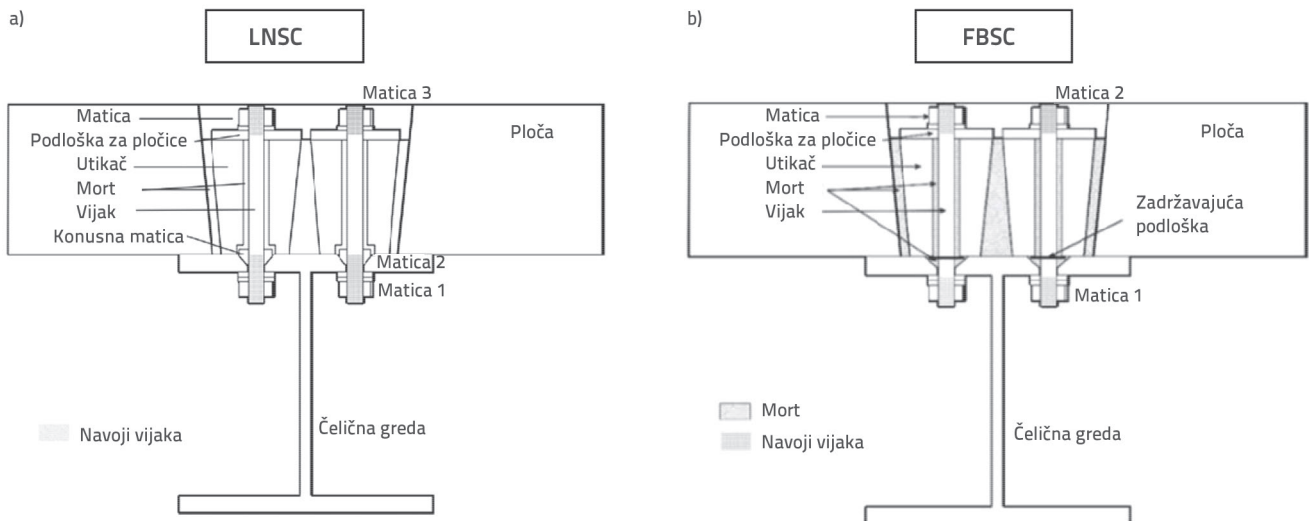
Dodatna ispitivanja u kojima su korištena vijčana posmična sredstva sa spojnicom i s epoksidnom smolom provedena su na spregnutim nosačima promjenjive visine u 90-postotnom stvarnom mjerilu, pri čemu se takvi nosači koriste kao tipična rješenja u višekatnim garažama [40]. Primjenom različitog rasporeda posmičnih sredstava željelo se istražiti može li se smanjenjem broja spojnih sredstava te njihovom koncentracijom uz oslonce ostvariti dostatna otpornost u području njihove uporabivosti. Došlo se do zaključka da se broj posmičnih spojnih sredstava može smanjiti za otprilike 40 do 50 % ako se ostvari odgovarajući raspored spojnih sredstava u području oslonaca.

## 7. Sredstva za sprezanje s konusnom maticom i sredstva za sprezanje na osnovi trenja

Razmatraju se različiti mehanizmi prijenosa posmične sile, tj. dvije vrste demontažnih posmičnih sredstava koje su razvili isti autori i koje karakteriziraju određene geometrijske sličnosti: sredstva za sprezanje s konusnom maticom (eng. *locking nut shear connector* - LNSC) [29] i sredstva za sprezanje na osnovi trenja (eng. *friction-based shear connector* - FBSC) [34]. Dva su sustava razvijena s ciljem uklanjanja nedostataka prethodno navedenih demontažnih posmičnih sredstava, kao npr. početni pomak zbog slobodnog prostora između vijaka i rupe tipičan za moždanike s navojem i vijke koji nisu prednapeti ili iznenadni pomak nakon što se premaši sila trenja u slučaju prednapetih vijaka. Primarno, LNSC i FBSC bili su razvijeni za primjenu u predgotovljenim spregnutim mostovima gdje ih se treba ugraditi unutar prostora u betonskoj ploči, te omogućiti brzo sastavljanje i rastavljanje. No, iako nisu zamišljeni u svrhu ugradnje za međukatne konstrukcije, ta su spojna sredstva uključena u ovaj pregled zbog njihovog originalnog svojstva – sposobnosti demontaže.

Oba sustava sastoje se od visokovrijednih vijaka koji se jednom maticom pričvršćuju na gornju čeličnu pojasnicu, a drugom na gornju površinu betonske ploče, kako je prikazano na slici 12. LNSC ima dodatnu konusnu maticu koja se postavlja na upuštenu rupu na čeličnoj pojasnici čime se sprječava pomak vijka unutar rupe. Dakle, postavljanjem konusne matice u posmičnu ravinu između čelične pojasnice i betonske ploče, sprječava se posmični lom vijka na mjestu navoja. U slučaju FBSC, koristi se podloška za postavljanje vijka u pravu poziciju. Kako bi se spriječio iznenadni pomak vijaka, upuštene rupe se zatim zapunjavaju. U oba sustava vijci su postavljeni u konusne predgotovljene betonske čepove koji su manji od otvora u pločama, kako bi se izbjegli problemi u toleranciji prilikom izvedbe.

Tipično otkazivanje LNSC-a i FBSC-a uočeno u vrijeme eksperimentalnih ispitivanja na potisak bilo je posmično otkazivanje vijka malo iznad konusne matice. Ispitivanja na

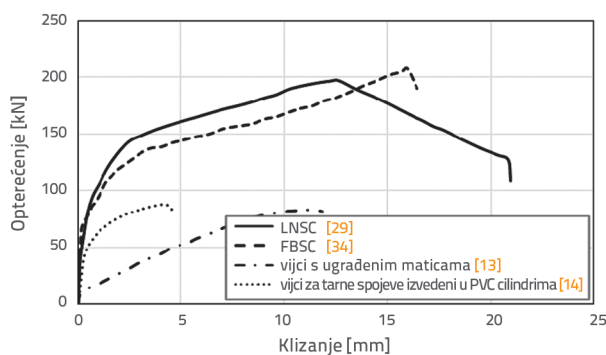


Slika 12. a) Sredstva za sprezanje s konusnom maticom [29], b) Sredstva za sprezanje na osnovi trenja [34]

potisak su pokazala vrlo visoku početnu krutost kod oba sustava kao i veliku duktilnost i krajnju otpornost. Kako bi se stekao uvid u prednosti predloženih sustava, na slici 13. prikazane su krivulje sila-pomak dobivene za LNSC i FBSC u odnosu na krivulje dobivene za vijke s ugrađenim maticama i vijke za tarne spojeve umetnute u PVC cilindre koji su sličnih promjera.

Ref.	Konektor za smicanje	Promjer [mm]	$f_v/f_u$ [MPa]	Čvrstoća betonske kocke [MPa]
[29]	LNSC	16	787/889	42,0
[34]	FBSC	16	787/889	42,0
[13]	vijci s ugrađenim maticama	16	640/800	40,0
[14]	vijci za tarne spojeve izvedeni u PVC cilindrima	15,88	nije specificirano (ASTM A325)	62.1*

\*čvrstoća betonskog cilindra pretvara se u čvrstoću betonske kocke množenjem s 1,25



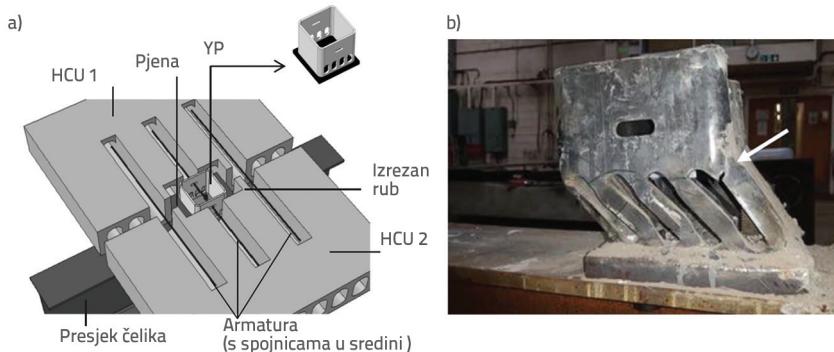
Slika 13. Usporedba ponašanja posmičnih sredstava

Samo povećanje krutosti sustava nije dostatno da opravda kompleksnost tih dvaju novih demontažnih sustava koja proizlazi iz njihove geometrije i zahtijevanog materijala, već i otrprike dvostruko povećanje njihove krajnje otpornosti. Stoga, primjena LNSC-a i FBSC-a na nosačima kod mostova zahtijeva manje otvora u pločama u odnosu na tradicionalne zavarene moždanike s glavom ili vijčana spojna sredstva. Usporedbom ta dva sustava, uočeno je da LNSC pokazuje povećanu duktilnost u području nakon dosezanja krajnje otpornosti.

## 8. Popustljiva demontažna čelična sredstva za sprezanje

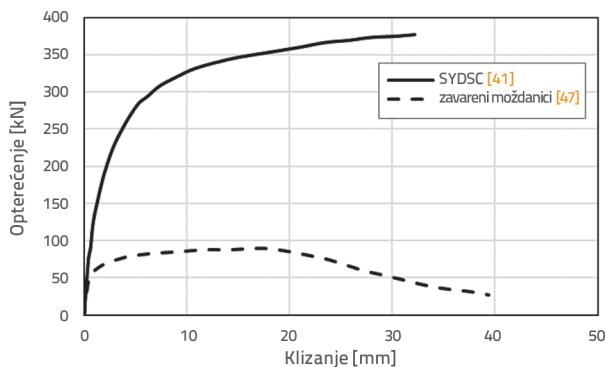
Nedavno je predloženo sofisticirano rješenje koje se odnosi na demontažna sredstva za sprezanje u spregnutim međukatnim konstrukcijama, koje je posebno primjenjivo u predgotovljenim šupljim pločama (HCU) [41]. To rješenje se znatno razlikuje od svih ostalih prethodno opisanih jer ne uključuje vijčana spojna sredstva kao glavne elemente za prijenos posmične sile. U ovaj pregled uključeno je kao jedino demontažno rješenje predloženo za primjenu u šupljim pločama.

Tradicionalno, šuplje ploče su se koristile u kombinaciji s moždanicama i armaturnim šipkama koji su zaliveni u beton nakon montaže, ne puštajući demontažu sustava. Rješenje koje su predložili autori, nazvano popustljiva demontažna čelična sredstva za sprezanje (SYDSC), sastoji se od šuplje kvadratne čelične cijevi koja se s donje strane zavaruje na ploču tvoreći tzv. područje popuštanja kako je prikazano na slici 14.a. Ploča se spaja s gornjom pojasnicom čeličnog nosača koristeći četiri visokovrijedna vijka. Kako bi se postiglo duktilno ponašanje, šuplja cijev ima okomite rupe koje omogućuju deformaciju u području popuštanja pod posmičnim opterećenjem kako je prikazano na slici 14.b. Oko spojnog sredstva se umeće polietilenska pjena kako bi se posmična sila izdignula s dna



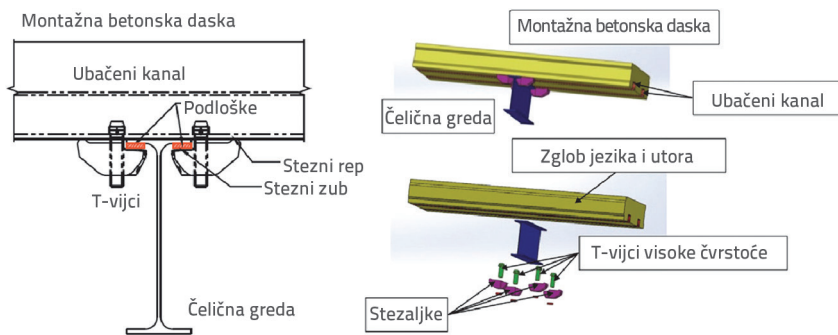
Slika 14. a) Popustljiva demontažna čelična sredstva za sprezanje [41], b) Deformirani izgled SYDSC [41]

područja popuštanja u ravninu okomitih čeličnih traka i rupa te na taj način izbjegao kruti posmični lom vijaka. Iznad pjene, prilikom ugradnje, lijeva se beton kako bi se omogućio prijenos posmične sile između popustljivog spojnog sredstva i betonske ploče. Demontaža je moguća jer spojno sredstvo nije potpuno ugrađeno u beton – sloj betona u području popuštanja kao i armaturne čelične šipke koje prolaze kroz spojno se sredstvo mogu lako izrezati i ukloniti, a vijci trebaju biti odvijeni. Važno je to da opisano rješenje uklanja probleme vezane za toleranciju prilikom izvedbe konstrukcije.



Slika 15. Usporedba ponašanja posmičnih sredstava

Ispitivanja na potisak pokazala su tri načina otkazivanja, koja su naknadno potvrđena numeričkom analizom: plastična deformacija



Slika 16. Spoj postignut sredstvima za sprezanje sa stezaljkama [42]

spojnog sredstva, otkazivanje betona i kombinirani način uključujući i plastičnu deformaciju područja popuštanja i lom betonske ploče. Reprezentativan odnos sila-pomak dobiven iz uzoraka koji su otkazali popuštanjem spojnog sredstva, prikazan je na slici 15., na kojoj je uspoređen s nekima od prethodno objavljenih rezultata ponašanja zavarenih moždanika s glavom u HCU-ima [49]. Kao što se može primijetiti, područja popuštanja pokazuju veliku čvrstoću, početnu krutost i pomak do 30 mm. No, u obzir treba uzeti trošak ovakvog

poboljšanog ponašanja, koji je vidljiv u potrošnji materijala. Uz to, autori su predložili izraze za proračun za popustljiva demontažna čelična sredstva za sprezanje, dodajući da čvrstoća područja tečenja treba biti manja od čvrstoće betona kako bi se postiglo duktilno ponašanje.

### 9. Sredstva za sprezanje sa stezaljkom

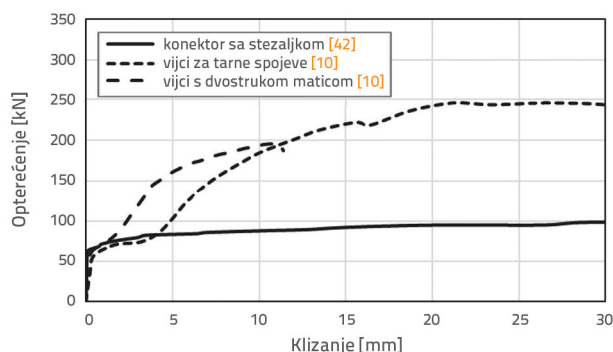
Za prijenos uzdužne posmične sile u demontažnim spregnutim nosačima od čelika i betona razvijen je sustav spojnih sredstava sa stezaljkama [42]. Prema slici 16., sredstva za sprezanje sa stezaljkama i visokovrijednim T-vijcima se montiraju u pripremljene otvore izvedene u predgotovljenim betonskim pločama. T-vijci su prednapeti, tako da se posmična sila prenosi trenjem na kontaktu između betonske ploče i čeličnog nosača. Prednost razvijenog sustava je prilagodljivost bez prethodno definiranih položaja za rupe vijaka te je stoga primjenjiva i onda ako se širina pojasnice nakon demontaže mijenja. Također, ako se debljina pojasnice mijenja, sredstva za sprezanje sa stezaljkom mogu se ponovno koristiti umetanjem pločica. Provedena ispitivanja na potisak su pokazala veliku početnu krutost, ali i vrlo duktilno ponašanje analiziranih spojnih sredstava, kako je prikazano krivuljama sila-pomak na slici 17. No, za razliku od vijaka za tarne spojeve i prednapetih vijaka s dvostrukim maticama usporedivih promjera i vlačne čvrstoće, posmična sredstva sa stezaljkama postigla su otprilike dvostruko manju čvrstoću pri pomaku od 10 mm. To se može objasniti specifičnim načinom

otkazivanja sredstava za sprezanje sa stezaljkama koji je uzrokovan velikom rotacijom vijaka i lomom glave vijka. Da bi se riješio taj problem i ograničila rotacija vijaka, predložene su daljnje modifikacije vijaka. Štoviše, površinski lomovi zbog trenja uočeni su na betonskim dijelovima, posebice na uzorcima s tri izvedena otvora koje karakteriziraju dublje i šire pukotine nego kod uzoraka s dva otvora. Autori su formuliраli prijedloge vezano uz preporuke za proračun, koje se temelje na razvijenom numeričkom modelu [42].



Ref.	Konektor za smicanje	Promjer [mm]	$f_y/f_u$ [MPa]	Čvrstoća betonske kocke [MPa]
[42]	konektor sa stezaljkom	24	759/940	36.2*
[10]	vijci za tarne spojeve	22	-/1020	30.6*
[10]	vijci s dvostrukom maticom	22	-/1010	26.1*

\*čvrstoća betonskog cilindra pretvara se u čvrstoću betonske kocke množenjem s 1,25



Slika 17. Usporedba ponašanja posmičnih sredstava

## 10. Zaključak

Mnoga od navedenih istraživanja, za gotovo sve vrste demontažnih posmičnih sredstava, još su u tijeku. Činjenica da su dokumenti o LNSC, FBSC, popustljivim demontažnim čeličnim sredstvima za sprezanje i sredstvima za sprezanje sa stezaljkama objavljuvani u posljednje dvije godine, znači da se u budućnosti mogu očekivati mnogi patenti ili nova rješenja.

Razvoj sustava demontažnih posmičnih sredstava započeo je s osnovnim postavkama uključujući vrlo malo komponenti. Kako bi se uklonile određene slabosti, uspostavljeno je više složenih

modela. No, konstantna ravnoteža treba biti postignuta između odgovarajućeg odgovora, brze i jednostavne izvedbe i ekonomskog aspekta.

Specifične procedure u propisima za projektiranje za demontažne spregnute sustave od čelika i betona tek trebaju biti formulirane i zakonski odobrene. Kao prvo, važno je odrediti posmičnu otpornost korištenih sredstava za sprezanje primjenom općenitih analitičkih izraza. Bez sumnje, u slučaju primjene vijčanih sredstava za sprezanje, korištenje izraza za posmičnu otpornost vijka kako je navedeno u Eurokodu 3 [50] nisu primjenjivi zbog dodatne otpornosti koja se postiže trenjem između matice i pojasnice te efekta lančanice u vijcima [13].

Kao drugo, kako bi se omogućila ponovna uporaba konstrukcije, pri njenom projektiranju nužno je ograničiti deformaciju spojnih sredstava te izbjeći plastični odgovor nosača. Neke upute vezano uz to dane su za analizirana vijčana spojna sredstva s ugrađenim maticama koje se mogu naći u istraživanju optimalnog omjera između raspona i dubine demontažnih spregnutih nosača od čelika i betona [51].

Ostali autori [36] naglašavaju da za određena demontažna sredstva za sprezanje prijedlozi navedeni u Eurokodu 4 [46], za eksperimentalno utvrđivanje duktilnosti sredstava za sprezanje, nisu primjenjivi. Naime, neka vijčana sredstva za sprezanje imaju različit odgovor između sile i pomaka od zavarenih moždanika s glavama, jer pokazuju veće pomake prije dostizanja krajnje otpornosti, a zavareni moždanici imaju velike pomake nakon postizanja krajnje otpornosti. Kao posljedica toga, utvrđivanje granične vrijednosti pomaka za karakterizaciju ponašanja spojnog sredstva navedene u Aneksu B Eurokoda 4, koja odgovara 90-postotnoj vrijednosti krajnje otpornosti u području nakon dostizanja krajnje otpornosti, nije primjenjivo. S obzirom na to da duktilnost sredstva za sprezanje izravno utječe na proračun nosača s djelomičnom posmičnom vezom, u obzir treba uzeti modifikacije u pravilima za projektiranje.

## LITERATURA

- [1] Ahmed, I.M., Tsavdaridis, K.D.: The evolution of composite flooring systems: applications, testing, modelling and eurocode design approaches. *Journal of Constructional Steel Research*, 155 (2019) 1, pp. 286–300, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.01.007>
- [2] Gluhović, N.: Behaviour of shear connections realised by connectors fastened with cartridge fired pins. 2019.
- [3] Brambilla, G., Lavagna, M., Vasdravellis, G., Castiglioni, C.A.: Environmental benefits arising from demountable steel-concrete composite floor systems in buildings. *Resources, Conservation and Recycling*, 141 (2019) 1, pp. 133–142, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.014>
- [4] Dallam, L.N.: Pushout tests with high strength bolt shear connectors. Missouri State Highway Department, 1968.
- [5] Dallam, L.N., Harpster, J.L.: Composite beam tests with high-strength bolt shear connectors. Missouri State Highway Department, 1968.
- [6] Marshall, W., Nelson, H., Banerjee, H.: An Experimental Study of the Use of High-Strength Friction Grip Bolts as Shear Connectors In Composite Beams. *Structural Engineer*, 49 (1971) 4, pp. 171–178
- [7] Dedic, D.J., Klaiber, F.W.: High-strength bolts as shear connectors in rehabilitation work. *Concrete international*, 6 (1984) 7, pp. 41–46
- [8] Hawkins, N.M.: Strength in Shear and Tension of Cast-in-Place Anchor Bolts. *Special Publication*, 103 (1987) 1, pp. 233–256, <https://doi.org/10.14359/1677>
- [9] Sedlecek, G., Hoffmeister, B., Trumpf, H., Kühn, B.: EUR 20583 - Steel structures: Composite bridge design for small and medium spans. Luxembourg, 2003.
- [10] Kwon, G., Engelhardt, M.D., Klingner, R.E.: Behavior of post-installed shear connectors under static and fatigue loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 66 (2010) 4, pp. 532–541, <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2009.09.012>



- [11] Kwon, G., Engelhardt, M.D., Klingner, R.E.: Experimental Behavior of Bridge Beams Retrofitted with Postinstalled Shear Connectors. *Journal of Bridge Engineering*, 16 (2011) 4, pp. 536–545, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000184](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000184)
- [12] Kwon, G., Engelhardt, M.D., Klingner, R.E.: Parametric Studies and Preliminary Design Recommendations on the Use of Postinstalled Shear Connectors for Strengthening Noncomposite Steel Bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 17 (2012) 2, pp. 310–317, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000261](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000261)
- [13] Pavlović, M., Marković, Z., Veljković, M., Buđevac, D.: Bolted shear connectors vs. headed studs behaviour in push-out tests. *Journal of Constructional Steel Research*, 88 (2013) 1, pp. 134–149, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.05.003>
- [14] Chen, Y.T., Zhao, Y., West, J.S., Walbridge, S.: Behaviour of steel–precast composite girders with through-bolt shear connectors under static loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 103 (2014) 1, pp. 168–178, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.09.001>
- [15] Moynihan, M.C., Allwood, J.M.: Viability and performance of demountable composite connectors. *Journal of Constructional Steel Research*, 99 (2014) 1, pp. 47–56, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.03.008>
- [16] Liu, X., Bradford, M.A., Lee, M.S.S.: Behavior of High-Strength Friction-Grip Bolted Shear Connectors in Sustainable Composite Beams. *Journal of Structural Engineering*, 141 (2015) 6, pp. 04014149, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001090](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001090)
- [17] Dai, X.H., Lam, D., Saveri, E.: Effect of Concrete Strength and Stud Collar Size to Shear Capacity of Demountable Shear Connectors. *Journal of Structural Engineering*, 141 (2015) 11, pp. 04015025, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0001267](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0001267)
- [18] Henderson, I.E.J., Zhu, X.Q., Uy, B., Mirza, O.: Dynamic behaviour of steel-concrete composite beams with different types of shear connectors. Part I: Experimental study. *Engineering Structures*, 103 (2015) 1, pp. 298–307, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.08.035>
- [19] Henderson, I.E.J., Zhu, X.Q., Uy, B., Mirza, O.: Dynamic behaviour of steel-concrete composite beams with different types of shear connectors. Part II: Modelling and comparison. *Engineering Structures*, 103 (2015) 1, pp. 308–317, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.08.033>
- [20] Ban, H., Uy, B., Pathirana, S.W., Henderson, I., Mirza, O., Zhu, X.: Time-dependent behaviour of composite beams with blind bolts under sustained loads. *Journal of Constructional Steel Research*, 112 (2015) 1, pp. 196–207, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.05.004>
- [21] Pathirana, S.W., Uy, B., Mirza, O., Zhu, X.: Strengthening of existing composite steel-concrete beams utilising bolted shear connectors and welded studs. *Journal of Constructional Steel Research*, 114 (2015) 1, pp. 417–430, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.09.006>
- [22] Liu, X., Bradford, M.A., Chen, Q.J., Ban, H.: Finite element modelling of steel–concrete composite beams with high-strength friction-grip bolt shear connectors. *Finite Elements in Analysis and Design*, 108 (2016) 1, pp. 54–65, <https://doi.org/10.1016/j.finel.2015.09.004>
- [23] Ataei, A., Bradford, M.A., Liu, X.: Experimental study of composite beams having a precast geopolymer concrete slab and deconstructable bolted shear connectors. *Engineering Structures*, 114 (2016) 1, pp. 1–13, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.10.041>
- [24] Rehman, N., Lam, D., Dai, X., Ashour, A.F.: Experimental study on demountable shear connectors in composite slabs with profiled decking. *Journal of Constructional Steel Research*, 122 (2016) 1, pp. 178–189, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.03.021>
- [25] Pathirana, S.W., Uy, B., Mirza, O., Zhu, X.: Flexural behaviour of composite steel-concrete beams utilising blind bolt shear connectors. *Engineering Structures*, 114 (2016) 1, pp. 181–194, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.01.057>
- [26] Pathirana, S.W., Uy, B., Mirza, O., Zhu, X.: Bolted and welded connectors for the rehabilitation of composite beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 125 (2016) 1, pp. 61–73, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.06.003>
- [27] Liu, X., Bradford, M.A., Ataei, A.: Flexural performance of innovative sustainable composite steel-concrete beams. *Engineering Structures*, 130 (2017) 1, pp. 282–296, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.10.009>
- [28] Wang, J.Y., Guo, J.Y., Jia, L.J., Chen, S.M., Dong, Y.: Push-out tests of demountable headed stud shear connectors in steel-UHPC composite structures. *Composite Structures*, 170 (2017) 1, pp. 69–79, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.03.004>
- [29] Suwaed, A.S.H., Karavasilis, T.L.: Novel Demountable Shear Connector for Accelerated Disassembly, Repair, or Replacement of Precast Steel-Concrete Composite Bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 22 (2017) 9, pp. 04017052, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001080](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001080)
- [30] Rehman, N., Lam, D., Dai, X., Ashour, A.: Testing of composite beam with demountable shear connectors. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 171 (2018) 1, pp. 3–16, <https://doi.org/10.1680/jstbu.16.00172>
- [31] Yang, J., Lam, D., Dai, X., Sheehan, T.: Experimental study on demountable shear connectors in profiled composite slabs. *Proceedings 12th international conference on Advances in Steel-Concrete Composite Structures - ASCCS 2018*, Valencia: Universitat Politècnica València, pp. 115–121, 2018.
- [32] Dai, X., Lam, D., Sheehan, T., Yang, J., Zhou, K.: Use of bolted shear connectors in composite construction. *Proceedings 12th international conference on Advances in Steel-Concrete Composite Structures - ASCCS 2018*, Valencia: Universitat Politècnica València, pp. 475–482, 2018.
- [33] Yang, F., Liu, Y., Jiang, Z., Xin, H.: Shear performance of a novel demountable steel-concrete bolted connector under static push-out tests. *Engineering Structures*, 160 (2018) August 2017, pp. 133–146, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.01.005>
- [34] Suwaed, A.S.H., Karavasilis, T.L.: Removable shear connector for steel-concrete composite bridges. *Steel and Composite Structures*, 29 (2018) 1, pp. 107–123, <https://doi.org/10.12989/scs.2018.29.1.107>
- [35] Balkos, K.D., Sjaarda, M., West, J.S., Walbridge, S.: Static and Fatigue Tests of Steel-Precast Composite Beam Specimens with Through-Bolt Shear Connectors. *Journal of Bridge Engineering*, 24 (2019) 5, pp. 04019036, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001382](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001382)
- [36] Kozma, A., Odenbreit, C., Braun, M.V., Veljkovic, M., Nijgh, M.P.: Push-out tests on demountable shear connectors of steel-concrete composite structures. *Structures*, 21 (2019) April, pp. 0–1, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.05.011>
- [37] Odenbreit, C., Kozma, A.: Dismountable Flooring Systems for Multiple Use. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol 225 IOP Publishing, pp. 012028, 2019.

- [38] Sencu, R.M., Wang, Y.C., Yang, J., Lam, D.: Performance evaluation of demountable shear connectors with collar step at ambient and elevated temperatures. *Engineering Structures*, 194 (2019) May, pp. 94–105, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.05.059>
- [39] Ataei, A., Zeynalian, M., Yazdi, Y.: Cyclic behaviour of bolted shear connectors in steel-concrete composite beams. *Engineering Structures*, 198 (2019) November 2018, pp. 109455, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109455>
- [40] Nijgh, M.P., Gîrbacea, I.A., Veljkovic, M.: Elastic behaviour of a tapered steel-concrete composite beam optimized for reuse. *Engineering Structures*, 183 (2019) 1, pp. 366–374, <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2019.01.022>
- [41] Feidaki, E., Vasdravellis, G., He, J., Wang, S.: Steel-Yielding Demountable Shear Connector for Composite Floors with Precast Hollow-Core Slab Units. *Journal of Structural Engineering*, 145 (2019) 8, pp. 04019076, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002356](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002356)
- [42] Wang, L., Webster, M.D., Hajjar, J.F.: Pushout tests on deconstructable steel-concrete shear connections in sustainable composite beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 153 (2019) 1, pp. 618–637, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.10.020>
- [43] BS5400-5.: Steel, concrete and composite bridges Part 5: Code of practice for the design of composite bridges. London: BSI, 1979.
- [44] Rowe, M., Bradford, M.A.: Partial Shear Interaction in Deconstructable Steel-Concrete Composite Beams with Bolted Shear Connectors. *Design, Fabrication and Economy of Metal Structures - International Conference Proceedings, Miskolc*, pp. 585–590, 2013.
- [45] Fric, N.: Theoretical and experimental research of losses of pretension force in high strength bolts. 2015.
- [46] EN1994-1-1.: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: CEN, 2004.
- [47] Todorović, M., Kovačević, S., Pavlović, M., Spremić, M., Marković, Z.: Behaviour of prefabricated steel-concrete composite bridge decks with grouped headed studs and bolted shear connectors. *Proceedings of Eurosteel 2014, Naples*, pp. 1–6, 2014.
- [48] Tan, E.L., Varsani, H., Liao, F.: Experimental study on demountable steel-concrete connectors subjected to combined shear and tension. *Engineering Structures*, 183 (2019) 1, pp. 110–123, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.088>
- [49] Lam, D., Elliott, K.S., Nethercot, D.A.: Push-off Tests on Shear Studs with Hollow-cored Floor Slabs. *The Structural Engineer*, 76 (1998) 9, pp. 167–174
- [50] EN1993-1-1.: Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: CEN, 2005.
- [51] Girão Coelho, A.M., Lawson, R.M., Aggelopoulos, E.S.: Optimum use of composite structures for demountable construction. *Structures*, 20 (2019) 1, pp. 116–133, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.03.005>