

# CHOVÁNÍ OTEVÍRAVÝCH RÁMOVÝCH STYČNÍKŮ VYZTUŽENÝCH FRP VÝZTUŽÍ

## BEHAVIOR OF OPENING CONCRETE FRAME CORNERS REINFORCED WITH FRP

**TEXT** Petr Štěpánek, František Girgle, Martin Zlámal, Ondřej Januš,  
Denisa Bártová, Juraj Lagiň, Pavlína Prekopová, Ďorđe Čairović

Oblasti diskontinuit v betonových konstrukcích mohou obecně představovat kritickou oblast, jejíž únosnost a chování může být rozhodující pro celou konstrukci. Představený experimentální výzkum se proto zaměřuje na ověření chování subtilních rámových rohů/styčniců vyztužených kompozitní výztuží na bázi skleněných vláken. Hlavním cílem je porovnání chování této části konstrukce při vyztužení kompozitní a klasickou betonářskou výztuží při namáhání kladným ohybovým momentem (otevřavý styčník). Výzkum navazuje na poznatky získané při řešení předchozích projektů zaměřených na navrhování betonových konstrukcí vyztužených vnitřní nekovovou výztuží, a to nejen s ohledem na krátkodobé [1], ale i dlouhodobé chování [2].

Discontinuity areas in concrete structures can be critical elements whose load-bearing capacity and behaviour can be decisive for the entire structure. This presented experimental research focuses therefore on verifying of the behaviour of subtle frame corners/joints reinforced with glass-fibre composite reinforcement (GFRP). The main aim was to compare the behaviour of this part of the structure reinforced with composite and classical reinforcement when subjected to the positive bending moment (opening frame corners). The research builds on the knowledge gained from previous projects which were focused on the design of concrete structures reinforced with internal non-metallic reinforcement with regard to not only short-term [1], but also long-term behaviour [2].

Z hlediska zajištění bezpečného přenosu sil mezi navazujícími částmi konstrukce ve styčnicích je důležité, aby styčnice kromě potřebné únosnosti vykazovaly také dostatečné duktilní chování, tj. aby lokální porušení nevedlo k úplnému selhání konstrukce. V ideálním případě by měla být odolnost styčnic (tj. schopnost bezpečně přenést působící vnitřní síly) shodná či vyšší, nežli je únosnost navazujících prvků v průřezech u styčnic, které jsou v tomto styčnicích propojeny, a zároveň by jeho konstrukční řešení mělo zajišťovat duktilní chování v mezním stavu. Nilsson [3] shrnuje požadavky na styčnic (rámový roh) namáhaný ohybovým momentem následovně:

- styčnic musí být schopen odolat ohybovému momentu alespoň o stejné velikosti jako navazující části konstrukce,
- u styčnic, které nesplňují toto konstrukční kritérium, musí být zajištěna dostatečná duktilita z důvodu

zabránění křehkého selhání tak, aby byla možná redistribuce vnitřních sil v konstrukci,

- šířky trhlin ve styčnicích při provozním zatížením musí být omezeny na přijatelnou mez,
- výztuž musí být snadno vyrobitelná a umístitelná; riziko nesprávného provedení takového detailu je výrazně sníženo při použití jednoduššího provedení detailu.

Cílem tohoto článku je popsat a porovnat chování rámových styčnic vyztužených kompozitní výztuží na bázi skla (dále jen GFRP – glass-fiber reinforced polymer) a styčnic vyztužených běžnou betonářskou výztuží, a to i v souvislosti s výše uvedenými požadavky.

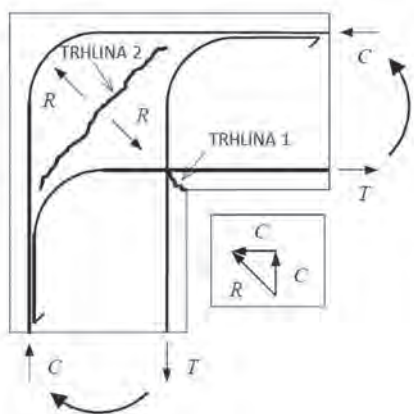
Příspěvek se zabývá otevřavými styčnic namáhanými kladným ohybovým momentem, které jsou, v porovnání s rámovými rohy vystavenými záporným momentem (zavřavý styčnic), z hlediska chování a návrhu cit-

livější a při běžném způsobu vyztužování dosahují, zejména u subtilních konstrukcí, výrazně nižší účinnosti. Zároveň, pokud je autorům známo, se jedná o jednu z prvních podobných experimentů v představené oblasti využití kompozitních výztuží.

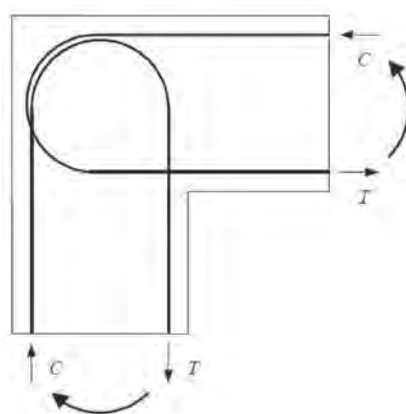
Obdobné výsledky experimentů byly prezentovány pouze pro styčnic zatížené záporným ohybovým momentem [4], [5].

### Chování a účinnost rámového styčnicu

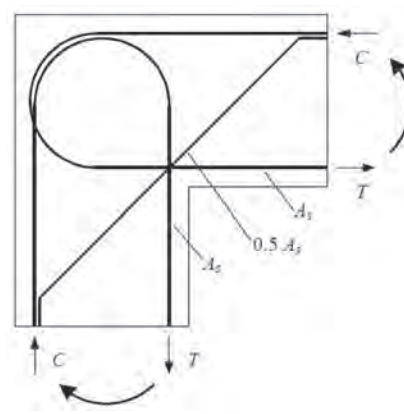
Odolnost rámového styčnicu by měla být v ideálním případě alespoň tak velká, jako je odolnost jeho navazujících prvků. Do jaké míry je tento požadavek splněn, je možné vyjádřit účinností (efektivitou) rámového styčnicu, která je definována jako poměr mezi únosností samotného styčnicu a ohybovou únosností nejslabšího prvku tvořícího rámový roh. V rámci experimentální studie se pak jedná o po-



1a



1b



1c

měr mezi hodnotou získanou z experimentů (při dosažení porušení styčnicku) a teoreticky stanovenou ohybovou únosností přímé navazující části.

Při posouzení účinnosti rámových rohů v různých variantách vyztužení je dále obvyklé využít pro jejich porovnání funkci stupně vyztužení  $\rho$ . Nicméně stejně důležité jsou i materiálové charakteristiky betonu a výztuže, které výrazně ovlivňují výslednou únosnost. Z toho důvodu je vhodnější účinnost rámového styčnicku vyjádřit i jako funkci poměru mechanických vlastností jednotlivých materiálů [4], tj. tzv. mechanickým stupněm vyztužení  $\omega_s$ :

$$\omega_s = \rho \frac{f_{sy}}{f_c} = \frac{A_s \cdot f_{sy}}{b \cdot d \cdot f_c}, \quad (1)$$

kde  $f_c$  je pevnost betonu v tlaku [MPa] a  $f_{sy}$  mez kluzu výztuže [MPa].

Při použití různých druhů výztuže je tento vztah nutno dále modifikovat tak, aby bylo možno odlišné varianty vzájemně porovnat. Proto byl navržen tzv. efektivní mechanický stupeň vyztužení  $\omega_{\text{eff}}$ :

$$\omega_{\text{eff}} = \rho \frac{f_t}{f_c} \frac{E_t}{E_s} = \frac{A_s \cdot f_t}{b \cdot d \cdot f_c} \frac{E_t}{200}, \quad (2)$$

kde  $f_t$  je maximální přípustné napětí ve výztuži (včetně vlivu kotvení) [MPa],  $E_t$  modul pružnosti použité výztuže [MPa] a  $E_s$  modul pružnosti oceli [GPa].

Na základě znalostí o chování rámových styčnicků je zřejmé, že se uvnitř rámového rohu při namáhání kladným ohybovým momentem (otevřavý styčnick) vytvoří první šikmá trhлина. Nicméně však již není tak zřejmé, že existuje nebezpečí vzniku druhé nakloněné trhliny uvnitř rámového rohu, která musí být rovněž brána v úvahu při popisu chování a návrhu vyztužení a především při sta-

novení mezní únosnosti detailu. Běžné typy vyztužování rámového styčnicku jsou znázorněny na obr. 1 (typ 1, typ 2 a typ 3).

V prvním případě (typ 1) není navržena žádná výztuž, která by zachytila diagonální sílu v rámovém styčnicku (obr. 1a), a únosnost tlačené betonové vzpěry je proto negativně ovlivněna vznikajícím příčným namáháním/tahem. Je zřejmé, že únosnost tohoto rámového rohu bez jakékoliv diagonální výztuže závisí pouze na odolnosti betonu v tahu, který působí proti tahové síle  $R$ ; z toho dále vyplývá, že použití většího množství výztuže ať už na tažené, nebo tlačené straně průřezu nemá zásadní vliv na výslednou únosnost styčnicku. Podobné chování lze očekávat i v případě použití výztuží typu 2, tj. ve tvaru písmene U (obr. 1b), ovšem s tím rozdílem, že dochází k sevření betonu uvnitř smyček a částečnému nárůstu únosnosti a účinnosti styčnicku. Tento nárůst je dán i skutečností, že se namísto vytvoření hlavní úhlopříčné trhliny uvnitř rámového rohu formují trhliny sledující tvar smyček z vnější strany styčnicku, dokud nedosahují až k tlačené výztuži, kdy opět dochází k porušení betonu příčným tahem mimo výztuž styčnicku. Ovšem úplné účinnosti při namáhání kladným ohybovým momentem se nedosahuje ani při dovyztužení styčnicku dle typu 3 (obr. 1c).

Po rozsáhlém experimentálním testování Nilsson [3] dospěl k závěru, že je-li vyztužení styčnicku typu 2 doplněno šikmými výztužemi umístěnými na vnitřní straně rámového rohu, tak je přirozené strukturální chování tohoto upraveného typu vyztužení (typ 3) stále velmi podobné jako u typu 2. Šikmé výztuže pouze zpožďují rozvoj první trhliny uvnitř rámo-

1 Vyztužení rámového styčnicku – běžné typy vyztužování: a) typ 1, b) typ 2, c) typ 3 1 Concrete frame corner reinforcement – common types of reinforcement: a) type 1, b) type 2, c) type 3

vého rohu, a tím také zpožďují šíření trhliny mimo tlačené výztuže na vnější straně styčnicku. Nilsson pak experimentálně stanovil, že plocha šikmých výztuží by měla odpovídat alespoň polovině plochy hlavní tažené výztuže. Zároveň při porovnávání účinnosti (efektivnosti) vyztužení rámových styčnicků ve variantách typ 1 a typ 3 vystavených kladným a záporným ohybovým momentům ověřil, že rámové rohy vystavené kladným momentům (otevření styčnicku) jsou podstatně citlivější než rámové rohy vystavené záporným momentům (zavírání styčnicku). Způsob vyztužení typu 3 poskytuje podstatně větší podobnost v chování při namáhání kladným nebo záporným momentem, přesto je dosažený rozdíl v účinnosti styčnicku stále patrný.

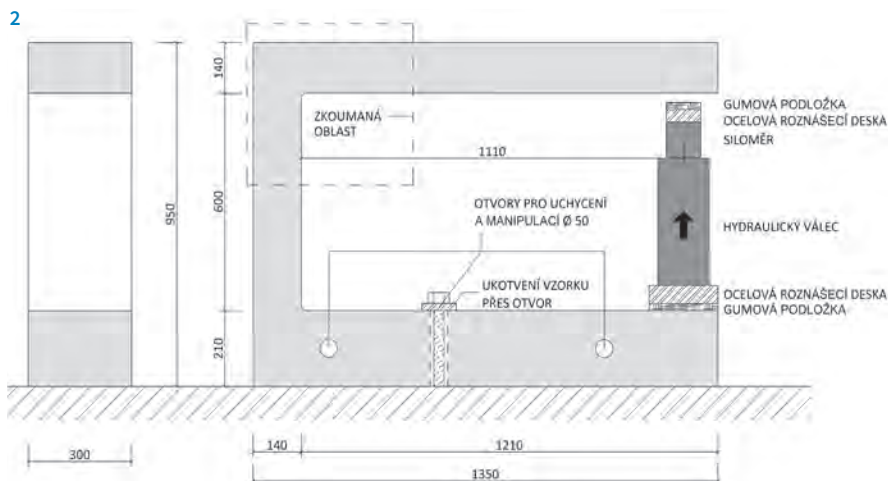
### Experimentální zkoušky rámových rohů zatížených kladným ohybovým momentem – tah ve vnitřních vláknech

Cílem experimentů realizovaných v laboratořích Fakulty stavební VUT v Brně bylo ověření chování rámového styčnicku zatíženého kladným ohybovým momentem, kdy vnitřní výztuž styčnicku je namáhána tahem. Tohoto namáhání bylo dosaženo u horního styčnicku a navazujících částí segmentu ve tvaru písmene U (obr. 2). Byla použita kompozitní výztuž na bázi skleněných

vláken (GFRP) výrobce Prefa Kompozity. Pevnost výztuže dosahuje 750 MPa s modulem pružnosti 47 GPa. S ohledem na sortiment výrobků v aplikačních oblastech s využitím GFRP výztuže (např. prefabrikované žlaby, opěrné stěny apod.) a na předpokládaný vliv duktility průřezu na chování rámového styčníku byla záměrně zvolena relativně malá tloušťka testované části segmentu 140 mm s šířkou 300 mm. Spodní část segmentu tvaru písmene U sloužila pro ukotvení při zkoušce a byla navržena tak, aby nelimitovala/nesnižovala mezní zatížitelnost zkušební vzorku, tj. aby ve výztuži nedocházelo k překročení meze kluzu a nedošlo k drčení betonu.

Pro porovnání chování styčníků vyztužených kompozitní GFRP výztuží a běžnou betonářskou výztuží byly zvoleny dva stupně vyztužení. Návrh výztuže vycházel z návrhu únosnosti navazujících částí průřezů na základě balančního stupně vyztužení GFRP výztuží (současné porušení betonu v tlaku a výztuže v tahu), což pro průřez daných rozměrů a třídu betonu C50/60 odpovídá cca 1% stupni vyztužení. Pro variantu A (předpokládáno porušení výztuže) byl zvolen stupeň vyztužení  $\rho = 0,44\%$ , čemuž odpovídá vyztužení 3 Ø8 a pro variantu B (porušení betonu v tlaku) byl zvolen stupeň vyztužení  $\rho = 1,54\%$ , což odpovídá vyztužení 3 Ø14 (tab. 1). Pro porovnání byly zkoušeny prvky s betonářskou výztuží B500B vyztuženy identicky (stejný počet a průměr výztuže) a zároveň bylo zvoleno i stejné krytí tažené výztuže. Vyztužení styčníku se lišilo tvarem výztuže s ohledem na možnosti dnešních technologií výroby. V případě betonářské výztuže byla ve styčníku použita výztuž ve tvaru písmene U (obr. 3b). U GFRP výztuže byly použity jednotlivé přímé výztužné pruty, které byly v případě tažené výztuže opatřeny na koncích kotevními kompozitními válečky délky 30 mm (obr. 3a). Rámový styčník byl dále vyztužen šikmou výztuží, jejíž plocha odpovídala vyztužení v podélném směru. V případě GFRP výztuží byly šikmé pruty opět opatřeny kotevními válečky na obou koncích.

Jak bylo uvedeno výše, hlavní funkcí šikmé výztuže není navýšení únosnosti styčníku, ale zvýšení duktility konstrukce, zpoždění šíření první trhliny (obr. 1a)



Tab. 1 Základní parametry zkušebních vzorků a výsledky experimentů  
Tab. 1 Basic parameters of the test specimens and experiment results

Souhrn	Výztuž	Krytí [mm]	Stupeň vyztužení [%]	Efektivní mech. stupeň vyztužení	$F_{MAX}$ [kN]	$M_{MAX}$ [kNm]	Účinnost [%]
<b>A-STEEL</b>							
ohybová únosnost	B500B 3 Ø8	35	0,44	0,046	-9,8	-11,3	97
Atena					-10,2	-11,7	-
<b>A-FRP (průměr)</b>							
ohybová únosnost	GFRP 3 Ø8	35	0,44	0,015	-5,8	-6,7	55
Atena					-10,5	-12,1	-
<b>B-STEEL</b>							
ohybová únosnost	B500B 3 Ø14	35	1,54	0,163	-11,4	-13,1	56
Atena					-20,4	-23,5	-
<b>B-FRP (průměr)</b>							
ohybová únosnost	GFRP 3 Ø14	35	1,54	0,047	-8,5	-9,8	32
Atena					-26,5	-30,5	-
<b>B-FRP (průměr)</b>							
ohybová únosnost	GFRP 3 Ø14	35	1,54	0,047	-8,6	-9,9	-

a následně přesunutí porušení konstrukce mimo styčník do navazující části prvku a dosažení maximální účinnosti. Vzhledem k tomu, že osová tuhost prutu hraje při namáhání kladným ohybovým momentem významnou roli, je při použití GFRP výztuže nutné tento předpoklad ověřit.

Experimentálně bylo ověřeno, že ohybová únosnost navazujících částí mimo styčník není vždy rozhodující a o výsledné únosnosti ve většině případů testovaných vzorků rozhodovala zejména únosnost vlastního styčníku při porušení betonu v příčném tahu (obr. 4). Tyto výsledky potvrzují i teoretické předpoklady o chování styčníku namáhaného kladným ohybovým momentem a je zřejmé, že přidáním tažené výztuže v navazujících částech konstrukce nelze dále zvyšovat ohybovou únosnost styčníku a že od určitého stupně vyztužení již únosnost styčníku závisí převážně na pevnosti betonu

v tahu. Řešením by tedy mělo být vhodnější uspořádání výztuže ve styčníku.

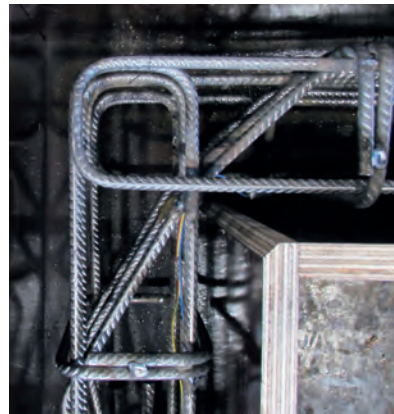
Z experimentů a srovnání s výsledky z literatury [7] až [10] vyplývá, že stupeň vyztužení betonářskou výztuží by neměl překročit 1%. Tento předpoklad je splněn u varianty A, kde účinnost styčníku při použití betonářské výztuže dosahuje až 100%, tj. dochází k porušení ohybem navazující části konstrukce. V případě varianty B (stupeň vyztužení cca 1,5%) již nebylo možno výztuž maximálně využít z důvodu selhání betonu vlastního styčníku v příčném tahu. Tím je zároveň dán i malý rozdíl v únosnosti mezi variantou A (9,8 kN) a variantou B (11,4 kN) při použití betonářské výztuže (obr. 5 a 6). Výsledky plně potvrdily předpoklad vlivu množství podélné výztuže na celkovou únosnost (obr. 7).

U prvků vyztužených GFRP výztuží lze sledovat, zejména v případě menšího

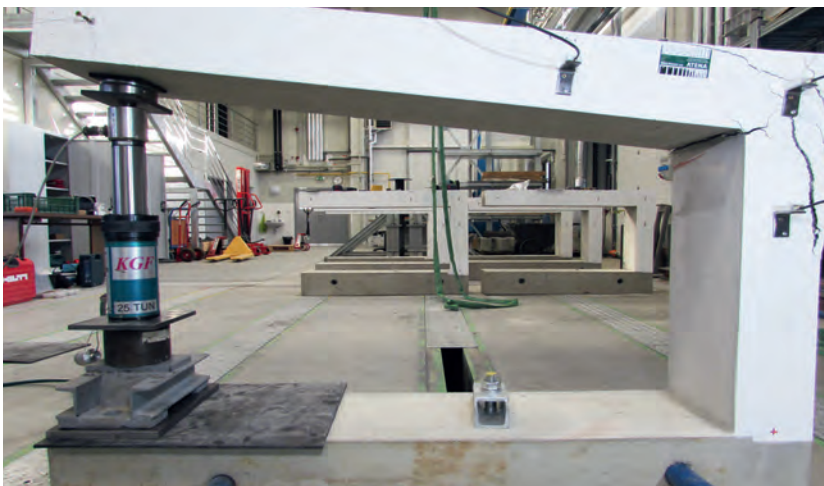




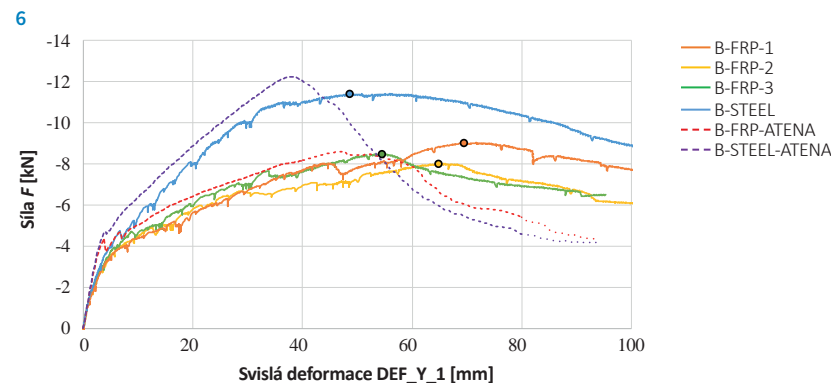
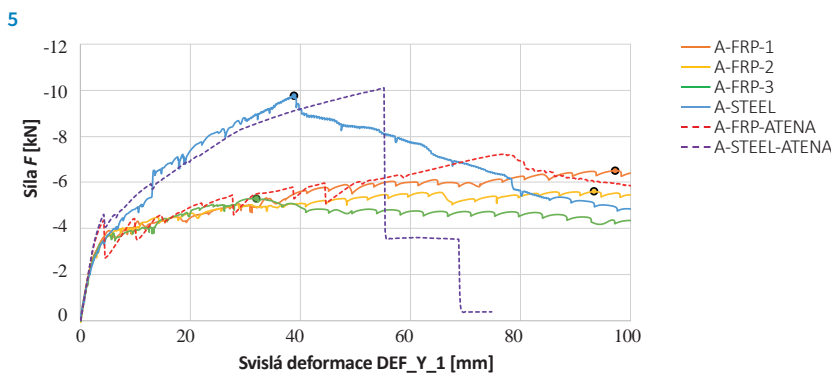
3a



3b



4



stupně vyztužení, odlišný trend. S ohledem na nižší ohybovou tuhost styčnicku, resp. nižší osovou tuhost výtzuže, dochází k porušení styčnicku již při variantě vyztužení A, kdy již nedochází k přetržení výtzuže (zejména z důvodu její vyšší pevnosti v tahu), ale pouze k selhání styčnicku v příčném tahu (při průměrné síle 5,8 kN, obr. 5 a tab. 1). Ve variantě B je selhání obdobné, ovšem z důvodu větší ohybové tuhosti je dosaženo i vyšší průměrné únosnosti 8,5 kN (obr. 6 a tab. 1).

V případě GFRP výtzuží je zřejmé, že stupeň vyztužení má vliv na další zvyšování únosnosti styčnicku zejména s ohledem na zvýšení tuhosti prvku (obr. 7). Ovšem celková účinnost styčnicku vyztuženého GFRP výtzuží při porušení prvku dále klesá, což je dáno zejména poměrně vysokou únosností v ohybu průřezu v přímé části prvku (např. pro vzorek B-FRP je vypočtená únosnost v ohybu 30,5 kNm, což je o 30 % více ve srovnání s 23,5 kNm pro ohybovou únosnost vzorku B-STEEL, tab. 1).

V případě srovnání únosnosti vzorků na základě efektivního mechanického stupně vyztužení  $\omega_{eff}$  (obr. 7) je zřejmý trend potvrzující výše uvedené předpoklad. Únosnost styčnicku od určitého stupně vyztužení navazujících částí již dále nenarůstá, resp. nárůst únosnosti se zpomaluje, a začíná převažovat porušení betonu příčným tahem v rámovém rohu.

## Vliv kotvení výtzuže

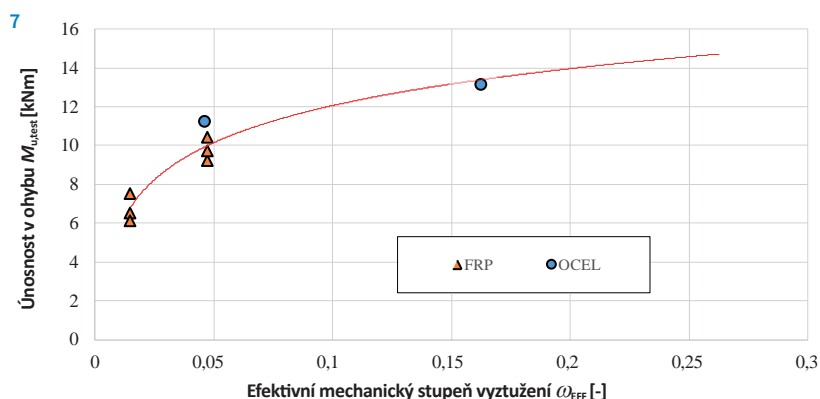
Nižší osová tuhost testované GFRP výtzuže ovšem není jediným jevem ovlivňujícím výslednou únosnost styčnicku. Jak již bylo zmíněno, jedním z hlavních rozdílů ve vyztužení vzorků s GFRP výtzuží

2 Schéma zatěžovací zkoušky 3 Detaily vyztužení styčnicku: a) GFRP, b) betonářská výtzuž 4 Porušení styčnicku příčným tahem – vzorek B-FRP 5 Závislost svislých deformací na velikosti vnášené síly: varianta A 6 Závislost svislých deformací na velikosti vnášené síly: varianta B

2 Load test scheme 3 Concrete frame corner reinforcement details: a) GFRP, b) steel reinforcement 4 Transverse tensile failure of the concrete frame joint – B-FRP sample 5 Dependence of vertical deformations on the applied force: option A 6 Dependence of vertical deformations on the applied force: option B

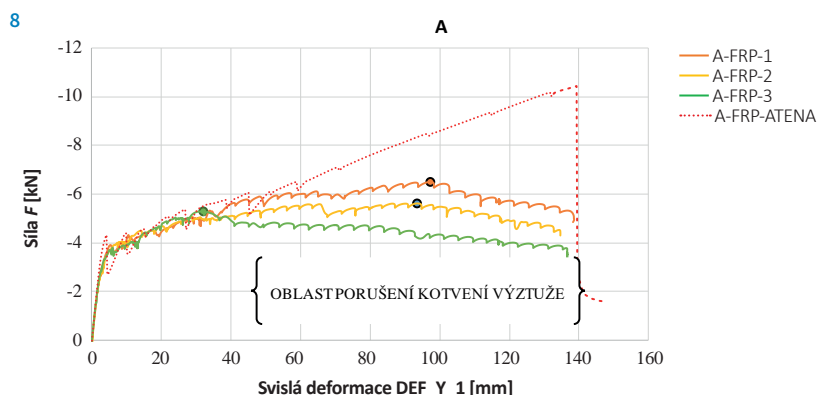
7 Vliv efektivního mechanického stupně vyztužení na únosnost styčnicku v ohybu  $M_{u,TEST}$  8 Porovnání experimentu a numerického modelu s plnou soudržností výtuzže 9 Experiment a srovnání s matematickým modelem – vzorek B-FRP

7 Influence of the effective mechanical degree of reinforcement on the bending bearing capacity of the concrete frame corner  $M_{u,TEST}$  8 Comparison of the experiment and numerical model with full reinforcement cohesion 9 Experiment and comparison with mathematical model – B-FRP sample



Literatura:

- [1] GIRGLE, F., JANUŠ, O., MATUŠÍKOVÁ, A., ŠTĚPÁNEK, P. Navrhování betonových prvků vyztužených kompozitní výtuzží – návrh na ohyb. *Beton TKS*. 2017, roč. 17, č. 3, s. 54–59. ISSN 1213-3116.
- [2] GIRGLE, F., JANUŠ, O., KOSTIHA, V., BODNÁROVÁ, L., ŠTĚPÁNEK, P., ZLÁMAL, M., ČAIROVIČ, D., MANSOUR, M. Dlouhodobé vlastnosti kompozitní výtuzže při aplikaci v betonových konstrukcích. *Beton TKS*. 2019, roč. 2019, č. 2, s. 38–45. ISSN 1213-3116.
- [3] NILSSON, I. H. E., LOSBERG, A. Reinforced Concrete Corners and Joints Subjected to Bending Moment. *ASCE Journal of the Structural Division*. 1976, Vol. 102, No. 6, pp. 1229–1254.
- [4] SLEIMAN, N. *Tests on GFRP Reinforced Concrete Knee-Joints Subjected to Negative Moments*. Waterloo, Ontario, Canada, 2017. Master Thesis. University of Waterloo.
- [5] SLEIMAN, N., POLAK, M. A. Tests on GFRP reinforced concrete closing joints. In: *9th International Conference on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering (CICE 2018)*. Paris, France, July 2018. pp. 896–904.
- [6] JOHANSSON, M. *Structural Behaviour in Concrete Frame Corners of Civil Defence Shelters Nonlinear Finite Element Analyses and Experiments*. Göteborg, Sweden, 2000. Ph.D. Thesis. Chalmers University of Technology. 242 p.
- [7] KORDINA, K. Bewehrungsführung in Ecken und Rahmenknoten (Reinforcement Design of Corners and Joints in Reinforced Concrete Frame Structures. In German). *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*. 1984, Heft 354, pp. 5–93.
- [8] ABDUL-WAHAB, H. M. S., ALI, W. A. Strength and Behaviour of Reinforced Concrete Obtuse Corners under Opening Bending Moments. *ACI Structural Journal*. 1989, Vol. 86, No. 6, pp. 679–685.
- [9] NOOR, F. A. *Ultimate Strength and Cracking of Wall Corners, Concrete*. London: Global Cement and Concrete Association, July 1977. pp. 31–35.
- [10] SKETTRUP, E., STRABO, J., ANDERSEN, N. H., BRONDUM-NIELSEN, T. Concrete Frame Corners. *ACI Journal*. 1984, Vol. 81, No. 6, pp. 587–593.



je použití kotevních válečků na koncích tažených prutů (obr. 3a), které zvyšují soudržnost a zkracují kotevní délku v oblasti styčnicku. Z průběhu závislosti velikosti zatěžovací síly na svislé deformaci vzorků je zřejmé, že u GFRP výtuzže postupně docházelo i k prokluzu výtuzže v kotevní oblasti a snížení soudržnosti.

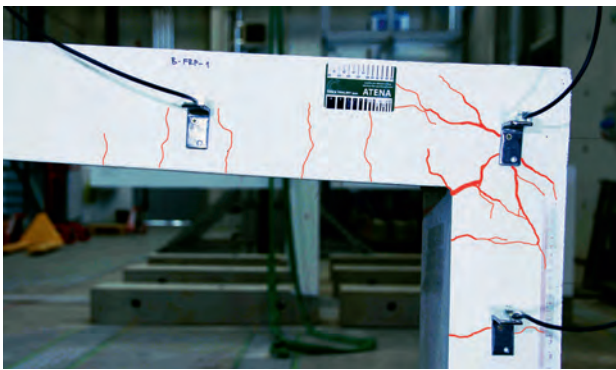
Kombinací těchto dvou vlivů u prvků vyztužených GFRP výtuzží nedocházelo k dalšímu nárůstu únosnosti, ale pouze k nárůstu deformací při přibližně stejné velikosti zatížení (obr. 8). Chování vzorků za předpokladu zajištění plné soudržnosti je zřejmé z porovnání numerického modelu v programu Atena a provedených experimentů (viz graf na obr. 8). Pokud by bylo teoreticky dosaženo optimálního kotvení výtuzže a nedocházelo k porušení kotevní oblasti, pak by byla únosnost varianty A v případě betonářské i GFRP výtuzže srovnatelná.

### Matematický model

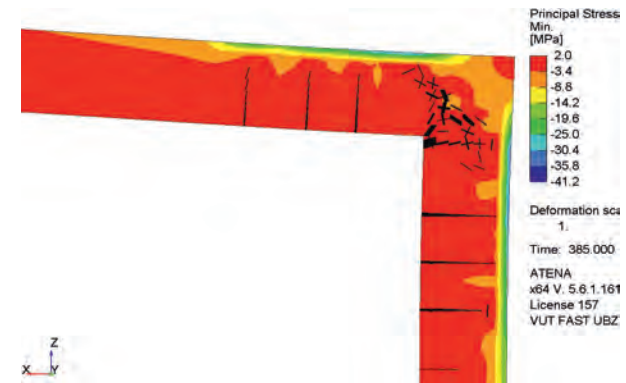
Pro lepší pochopení chování rámových styčnicků, a to nejen při použití GFRP výtuzže, byly výsledky experimentů porovnány s matematickými modely v programu Atena.

Z představených výsledků matematického modelu a srovnání s experimenty (grafy na obr. 5 a 6) je evidentní, že k porušení výtuzže v tahu došlo pouze u varianty A-STEEL. V ostatních případech nebylo dosaženo mezních hodnot pevností výtuzží, resp. meze kluzu. Z trajektorie hlavních tlakových napětí je zřejmé formování tlakové vzpěry ve styčnicku a s tím spojený rozvoj příčných tahů (obr. 9). V důsledku toho dochází ke vzniku hlavní tahové trhliny, která odpovídá trajektorii trhliny z experimentů. V případě varianty B s vyšším stupněm vyztužení je tato trhlinka postupně odsouvána na vnější stranu styčnicku.

Matematické modely byly provedeny pro vyztužení betonářskou i GFRP výtuzží v identických variantách s diskretními výtuzžnými pruty, které odpovídají skutečnému vyztužení jednotlivých variant, včetně skutečné polohy a tvaru výtuzže. Materiálové charakteristiky betonu jsou identické pro všechny varianty modelů a byly generovány na základě střední krychelné pevnosti betonu 60 MPa, která byla určena zkouškami. Na základě zkoušek byl upraven také modul pruž-



9a



9b

nosti betonu (experimentálně stanovena hodnota 31,4 GPa). Rozdílně je pak uvažována pouze soudržnost výztuže a betonu. V případě betonářské ocelové výztuže, která je ve formě smyček, je uvažována standardní soudržnost po délce prutu dle CEB-FIP Model Code 1990. U GFRP výztuže je rovněž definována soudržnost po délce prutu, ovšem na obou koncích přímých prutů je umožněn posun prutu (tj. uvažován volný konec s nulovou soudržností), a to i přesto, že byly tažené výztuže v oblasti styčnicku opatřeny kotevním válečkem. Ten sice zvyšuje soudržnost prutu v kotevní oblasti, ale vzhledem k jeho délce a omezeným rozměrům styčnicku neposkytuje úplné zakotvení výztuže, což odpovídá i dosaženým výsledkům a porovnání s matematickým modelem ve variantě A (obr. 8).

## Závěr

Z dosažených výsledků vyplývá, že pro vyztužování rámových styčnicků je možné využít nejen klasickou betonářskou výztuž, ale i kompozitní výztuž. Získaná data potvrzují funkčnost navrženého řešení. Výsledky dosažené na vzorcích vyztužených betonářskou a FRP výztuží vykazují podobnost v celkovém chování konstrukce a ve způsobu porušení. Při porovnání únosnosti na úrovni efektivního mechanického stupně vyztužení je pak očekávaný trend v chování rámového styčnicku prakticky shodný. Dle očekávání prvky s GFRP výztuží vykazují nižší tuhost a nižší únosnost při porušení z důvodu vyčerpání únosnosti rámového styčnicku. Je nutné upozornit, že ke stejnému jevu dochází i při vyšším stupni vyztužení klasickou betonářskou výztuží, zejména u tenkých konstrukcí.

Je však nutné si uvědomit, že u variant vyztužených betonářskou výztuží by muselo být s ohledem na trvanlivost konstrukce zvoleno vyšší krytí výztuže. Za předpokladu stupně vlivu prostředí XC4, příp. XD, které je v aplikačních oblastech s předpokládaným využitím GFRP výztuže očekáváno, by mělo být krytí ocelové výztuže cca 35 až 40 mm, což v případě tenkých konstrukcí tvoří rozdíl v účinné výšce od 8 do 15 % a bude mít podstatný vliv na výslednou únosnost. Zároveň je třeba zohlednit, že prezentované výsledky porovnávají rozdíly v chování při porušení konstrukce v průběhu krátkodobé zatěžovací zkoušky a jsou tedy vždy uváděny ve středních hodnotách. V návrhovém stavu konstrukce by pak byly rozdíly v účinnosti konstrukce vyztužené betonářskou a GFRP výztuží nižší. V případě návrhu GFRP výztuže je též třeba uvážit její dlouhodobou spolehlivost při expozici v daném prostředí / působícím zatížení [2]. Uvedené výsledky jsou platné pro testovaný typ GFRP výztuže s danou povrchovou úpravou opískováním. Odlišná povrchová a koncová úprava prutů může ovlivnit chování vzorků.

Pro dosažení celkově vyšší účinnosti rámového styčnicku vyztuženého FRP výztuží je třeba dále zdokonalit tento konstrukční detail, a to jak z hlediska kotvení FRP výztuže, tak i s ohledem na rozvoj trhlin a zachycení příčných tahů. Zlepšení chování v kotevní oblasti bude mít vliv nejen na únosnost, ale i na celkovou duktilitu sledovaného konstrukčního detailu. Výrazným pokrokem by pak byla možnost výroby GFRP výztuže ve formě smyček při zachování materiálových vlastností těchto výztuží.

Prezentované výsledky výzkumu byly získány za finanční podpory projektu MPO FV10588 „Nová generace prostorových prefabrikátů z vysokohodnotných betonů se zvýšenou mechanickou odolností a trvanlivostí“ a projektu specifického výzkumu FAST-S-19-5963 „Využití moderních kompozitních materiálů ve vybraných aplikačních oblastech betonových konstrukcí“. Autoři též děkují firmě Prefa Kompozity, a. s., za dodání vzorků kompozitní výztuže.



prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc., dr. h. c.  
stepanek.p@fce.vutbr.cz



Ing. František Girgle, Ph.D.  
girgle.f@fce.vutbr.cz



Ing. Martin Zlámal, Ph.D.  
zlamal.m@fce.vutbr.cz



Ing. Ondřej Januš  
janus.o@fce.vutbr.cz



Bc. Denisa Bártová  
denisa.bartova@vutbr.cz



Bc. Juraj Lagin  
juraj.lagin@vutbr.cz



Bc. Pavlína Prekopová  
pavlina.prekopova@vutbr.cz



Ing. Đorđe Čairović  
cairovic.d@fce.vutbr.cz

všichni: Fakulta stavební VUT v Brně  
Ústav betonových a zděných konstrukcí

Článek byl posouzen odborným lektorem.  
The article was reviewed.