



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ – Fakulta stavební

Ústav betonových a zděných konstrukcí

Veveří 95
602 00 Brno

METODIKA NÁVRHU KONSTRUKČNÍHO DETAILU S OHÝBANOU FRP VÝZTUŽÍ

Verze 1.0

Brno, Prosinec 2023

Vypracovali: Ing. František Girgle, Ph.D.
Ing. Vojtěch Kostiha, Ph.D.
Ing. Juraj Lagiň
Ing. Jan Prokeš, Ph.D.
prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc., dr.h.c.

Název výsledku: **Metodika návrhu konstrukčního detailu s ohýbanou FRP výztuží**

Řešitel dílčí části: prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc., dr.h.c.

Vypracovali: Ing. František Girgale, Ph.D.

Ing. Vojtěch Kostihá, Ph.D.

Ing. Juraj Lagiň

Ing. Jan Prokeš, Ph.D.

Datum: 20. 12. 2023

"Metodika stanovení únavových vlastností FRP výztuží" byla vytvořena s finanční podporou TA ČR, projekt č. FW01010520 – *Vývoj ohýbané kompozitní výztuže pro environmentálně exponované betonové konstrukce.*

T A
Č R

1. OBSAH

1. Obsah.....	3
2. Úvod.....	4
3. Cíl metodiky.....	6
4. Základní vlastnosti FRP vnitřních výztuží	7
4.1. Materiálové složení a využití FRP výztuže	7
4.2. Základní mechanické charakteristiky přímé FRP výztuže	8
4.3. Tahová pevnost nepřímé výztuže.....	9
5. Oblast využití metodiky	11
6. Vlastní popis metodiky – stanovení únosnosti rámového rohu.....	12
6.1. Způsob stanovení vnitřních sil	13
6.2. Stanovení únosnosti SaT modelu.....	15
7. Popis uplatnění metodiky	17
8. Literatura.....	18
Příloha A – Stanovení únosnosti rámového rohu vyztuženého FRP výztuží a jeho následné experimentální ověření	
1. Úvod.....	20
2. Použité symboly	20
3. Stanovení teoretické únosnosti detailu	21
4. Experimentální ověření.....	24
5. Porovnání experimentu a návrhového přístupu.....	25
6. Závěr	27

2. ÚVOD

Běžné železobetonové konstrukce velmi často z důvodu koroze ocelové výztuže vyžadují sanaci, která však často znamená značné investiční náklady, případně dokonce vyloučení provozu a náhradu předmětné konstrukce. Degradace ocelové výztuže je významně urychlena působením vlhkosti, chloridů, a zmrazovacích cyklů, vůči kterým je kompozitní výztuž rezistentní. V aplikačních oblastech, kde je běžná výztuž exponována právě těmito typům agresivních činitelů, se proto FRP výztuž jeví jako vhodná alternativa k ocelové výztuži. Příkladem typických konstrukcí vhodných pro aplikaci FRP výztuže může být opěrná stěna situovaná např. u liniových staveb, jež je vystavena vysoce agresivnímu prostředí s vysokými nároky na odolnost a životnost využitých materiálů.

Při návrhu konstrukce, bez rozdílu jejího typu, musí projektant vždy vycházet z relevantních údajů a ověřeného návrhového podkladu. Za kritické místo konstrukce opěrné zdi lze považovat rámový roh, jehož chování/odolnost je silně závislá na návrhu a využitých konstrukčních materiálech. Je třeba uvážit nejen posouzení odolnosti průřezu, ale i geotechnické posouzení konstrukce.

Pro stanovení únosnosti rámového rohu vyztuženého formou FRP výztuže je nutné definovat její mechanické charakteristiky, především tahovou pevnost a modul pružnosti. Pro vyztužení styčnicku – rámového rohu – je však nezbytné využít i nepřímou (ohýbanou) FRP výztuž, tj. projektant musí znát také mechanické vlastnosti nepřímé výztuže. Ty jsou v místě ohybu redukovány. Kompozitní výztuž zároveň v čase, v závislosti na typu využití výztuže, degraduje a v důsledku redukuje mezní tahovou pevnost. Pro účely návrhu je tedy nutno znát mechanické vlastnosti jak krátkodobé (okamžité), tak i dlouhodobé.

Pro stanovení dlouhodobé tahové pevnosti výztuže (přímé i nepřímé) je možno využít stávajících návrhových přístupů, např. [1], [2], [3]. Je však nutno podotknout, že odezva kompozitní výztuže na působení prostředí, ve kterém se vyskytuje, je silně závislá na jejím typu [4] a pro konstrukční návrh je nutné znát deklarovanou krátkodobou a dlouhodobou pevnost výztuže od výrobce či distributora daného produktu.

V běžné praxi s využitím ocelové výztuže se k výpočtu únosnosti opěrné zdi často přistupuje zjednodušeně, na základě výpočtu pro jednoduchý rovinný průřez namáhaný ohybovým momentem. Tento přístup nepředpokládá možné porušení v místě rámového rohu. Ve styčnicku (rámovém rohu) však nelze předpokládat rozdělení napětí dle Bernoulli-Navierovy hypotézy, a tedy i k jeho návrhu je nutné přistupovat odlišně. V případě ocelové výztuže bylo prokázáno, že v případě jednoduchého rámového styčnicku a správně zvoleného detailu vyztužení je zjednodušený přístup postačující. Pro prvky vyztužené kompozitní výztuží však v důsledku vysoké tahové pevnosti FRP výztuže a jejího nižšího modulu pružnosti nelze tyto předpoklady uplatnit. Betonové prvky vyztužené FRP výztuží se vyznačují nižší tuhostí, a v důsledku i vyššími deformacemi v porovnání s běžnými železobetonovými prvky.

S ohledem na odlišnost v chování kompozitních výztuží oproti běžným kovovým výztužným vložkám je zřejmé, že pro zabezpečení bezpečného návrhu rámových styčnicku s využitím FRP výztuže je nezbytné upravit běžně používanou metodiku návrhu. **Text předkládané metodiky se z tohoto důvodu zabývá definicí základních bodů návrhu klíčového detailu - rámového rohu vyztuženého FRP výztuží, který je namáhan otevíravým ohybovým momentem a posouvající silou.**

V oblasti stanovení únosnosti pro detailu styčnicku namáhaných otevíravým ohybovým momentem byly čerpány znalosti z odborné literatury [5], [6], [7], [8], které jsou doplněny zkušenostmi autorů této metodiky z dlouholetého vývoje a testování tohoto moderního materiálu.

3. CÍL METODIKY

S ohledem na specifické vlastnosti FRP výztuže je při stanovení únosnosti detailu rámového styčnicku možné očekávat odlišné chování než u styčnicku vyztuženého betonářskou výztuží. Cílem této metodiky je proto poskytnout projektantům a odborné veřejnosti základní podklad pro stanovení únosnosti detailu kompozitně vyztuženého rámové styčnicku namáhaného otevíravým ohybovým momentem.

Metodika si v první části klade za cíl popsat způsob stanovení návrhových charakteristik výztuže. Cílem je popsat způsob návrhu výpočtovým přístupem dle odborné literatury, ale zároveň i aplikovat poznatky z průběhu řešení projektu „*FW01010520 - Vývoj ohýbané kompozitní výztuže pro environmentálně exponované betonové konstrukce*“, které rozšiřují toto poznání o redukci tahové pevnosti výztuže v místě ohybu.

V další části je pozornost zaměřena na řešení samotného rámového rohu namáhaného otevíravým ohybovým momentem a posouvající silou. Je popsán způsob stanovení vnitřních sil a zjistit vzájemnou závislosti jednotlivých proměnných, jako například geometrie modelů a podobně. Zjištění jsou následně využita pro vypracování parametrické studie s cílem stanovení vnitřních sil bez nutnosti vypracovávat složité výpočtové modely. V souladu s předpoklady uvedenými v odborné literatuře měly být zavedené vztahy pro výpočet únosnosti rámových rohů, namáhané ohybovými a posouvající síly v různých poměrech. Zjednodušeně lze tvrdit, že poměr ohybového momentu a posouvající síly představuje také výšku prvku.

Pro ověření funkčnosti zavedených vztahů byly navrženy a vyrobeny zkušební vzorky řešeného detailu, jejichž odezva na vnášené zatížení byla ověřena experimentálně. Tato je podrobně popsána v příloze A.

4. ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI FRP VNITŘNÍCH VÝZTUŽÍ

4.1. Materiálové složení a využití FRP výztuže

Kompozitní FRP výztuž je materiál tvořený dvěma základními složkami – nosnou složkou ve formě jednosměrně orientovaných dlouhých vláken a pojivovou složkou tvořenou polymerní matricí. Výsledné vlastnosti kompozitu jsou dány především typem¹ a vzájemným poměrem obou složek, přičemž mechanické charakteristiky FRP výztuží silně závisí na výrobním postupu a využitých surovinách a jsou proto odlišné u každého (komerčně dostupného) produktu [9].

Nejběžnějšími typy používaných vláken jsou vlákna skelná, uhlíková, čedičová a aramidová. Typem použitého nosného vlákna je dáno značení produktu - GFRP (výztuž tvořena skelnými vlákny), CFRP (uhlíková výztuž), AFRP (aramidová výztuž) a BFRP (čedičová) výztuž, přičemž v jednom průřezu lze kombinovat více typů vláken (příklad viz Obr. 1). Jako termosetové matrice se nejčastěji využívají epoxidové pryskyřice, nenasycené polyesterové pryskyřice² nebo vynilesterové pryskyřice [10].

Kompozitní výztuže mají oproti ocelovým výztužím především podstatně vyšší odolnost vůči agresivním vlivům (kyseliny, chloridy apod.). Jsou korozivzdorné, velmi lehké, nevodivé a netečné k působení magnetického pole (neslíní radiový signál, netečné vůči bludným proudům apod.). FRP výztuže mohou mít (s ohledem na zvolené složení) výrazně vyšší tahové pevnosti než klasické ocelové výztužné vložky.

Mezi nevýhody patří především citlivost GFRP výztuží na vysoké pH okolního prostředí, které se pohybuje u nových betonů v rozsahu 12,4 až 13,7, což v dlouhodobém horizontu způsobuje nevratné změny materiálu (křehnutí vláken). Matrice kompozitních výztuží je navržena tak, aby ochránila vlákna před působením těchto látek, ale hydrolyzou, plastifikací a bobtnáním může dojít k degradaci matrice samotné. Podstatnou nevýhodou může být u některých FRP výztuží i nízký modul pružnosti (např. u GFRP a BFRP výztuží v porovnání s ocelí). FRP výztuže mají také nižší odolnost vůči působení vysokých teplot.



Obr. 1 Průřez vybranými typy FRP výztuží (zleva GFRP, C-GFRP a CFRP)

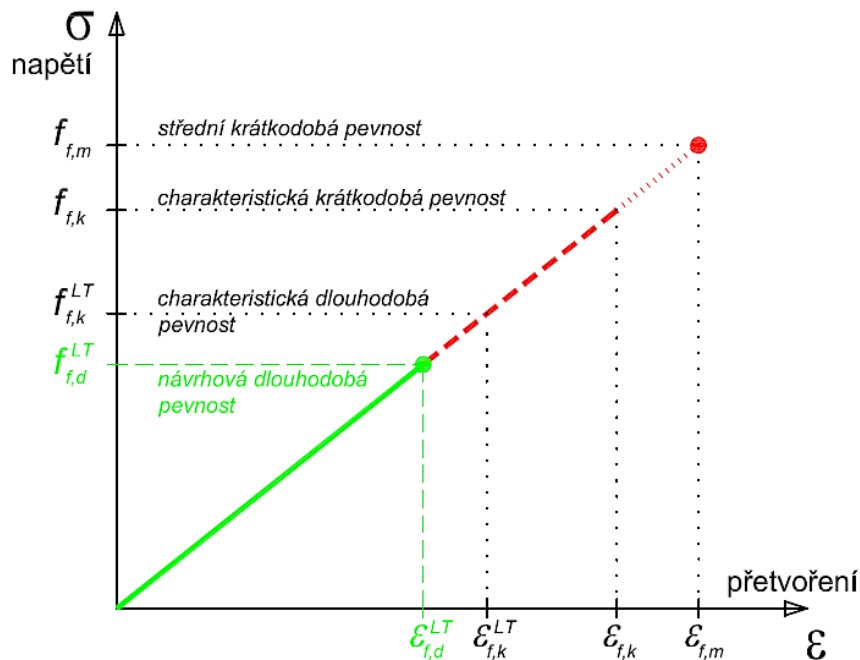
¹ Různé typy výztuží mohou mít rozdílné fyzikálně mechanické charakteristiky jednotlivých složek i vlastnosti popisující jejich vzájemné spolupůsobení při mechanickém namáhání.

² Nenasycené polyesterové pryskyřice nejsou díky svým vlastnostem vhodné pro výrobu GFRP výztuží s požadavky na dlouhodobou životnost. Lze je využít pouze pro dočasné aplikace.

4.2. Základní mechanické charakteristiky přímé FRP výztuže

Přímá FRP výztuž vyráběná pultruzí vždy vykazuje ortotropní chování – tj. vykazuje odlišné hodnoty materiálových charakteristik ve směru vláken a ve směru kolmém na směr vláken. V podélném směru jsou materiálové charakteristiky převážně určovány vlastnostmi vláken, naproti tomu vlastnosti kompozitu v příčném směru vždy určují vlastnosti matrice. Výsledné mechanické parametry ve směru vláken dosahují násobně (10x až 100x) lepších hodnot než ve směru kolmém na vlákna.

Nosná vlákna kompozitu jsou elastická, ale zároveň při dosažení mezní pevnosti v tahu křehce lámavá. Z tohoto důvodu se kompozitní výztuže při namáhání ve směru vláken chovají pružně s křehkým porušením při dosažení mezního napětí. Pracovní diagram má vždy lineární průběh až do porušení a v celém jeho rozsahu platí Hookův zákon. Idealizovaný návrhový diagram FRP výztuže v tahu může být uvážen dle Obr. 2.



Obr. 2 Idealizovaný návrhový diagram FRP výztuže [11]

V oblasti tlakového namáhání je díky anizotropním vlastnostem FRP výztuže nutno předpokládat odlišné chování, než je tomu v případě tahového namáhání. V tlaku FRP výztuž vykazuje obecně nižší modul pružnosti i mezní pevnost. Závislost napětí na přetvoření již není v celé oblasti lineární a nemůže být popsána Hookovým zákonem. V současnosti užívané podklady [12], [13] nebo např. [9] nedoporučují uvažovat při návrhu betonového průřezu vyztuženého FRP výztuží s jejich únosností v tlaku.

4.3. Tahová pevnost nepřímé výztuže

Při návrhu celokompozitního provedení betonových prvků je nezbytné vždy využít také nepřímou FRP výztuž. Běžná FRP výztuž s využitím ve stavební praxi je vyráběna z termosetické matrice, kdy její tvarování a vytvrzení probíhá vždy během výrobního procesu. Ohýbání, resp. úprava výztuže do požadovaného tvaru je tedy definována již ve výrobě a její tvar následně nelze bez porušení výztuže zásadně měnit. Ohýbacím procesem však dochází ke změnám ve struktuře výztuže, které způsobuje redukci tahové pevnosti v místě ohybu [14]. Změny struktury zároveň způsobují snížení odolnosti výztuže vůči agresivnímu prostředí [15] a tedy i snižují dlouhodobou tahovou pevnost výztuže.

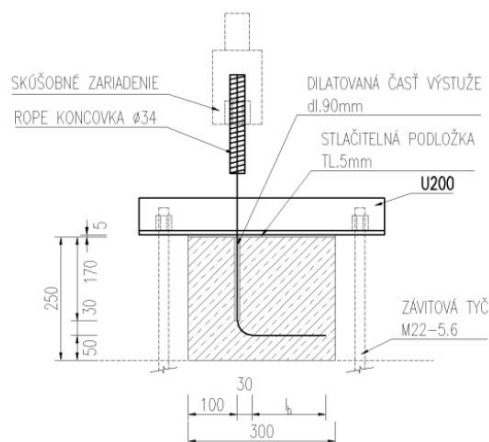
V současné době není pro Českou republiku jasně definován vztah pro návrh FRP ohýbané výztuže. Inspiraci lze čerpat z postupů uvedených v normách a směrnicích zahraničních států, jako například japonská JSCE [16], americká ACI 440.3R-04 [17], kanadská CSA S806-12 [18], nebo fib Bulletin no.40 [1], [3].

Dle fib Bulletinu je doporučeno na základě předešlých studií uvažovat redukci tahové pevnosti mezi 40 % až 50 %. Dle japonské JSCE z 1997 je zaveden vztah, kdy hodnotu tahové pevnosti FRP výztuže v místě ohybu je možno stanovit dle vztahu

$$f_{fb} = \left(0,05 \frac{R}{d_b} + 0,3\right) f_{fu} \leq f_{fu}; \quad (1)$$

kde R je poloměr zakřivení, d_b průměr prutu a f_{fu} mezní tahová pevnost přímé části prutu. Konstanta 0,05 představuje pravděpodobnost odchylky. Tuto hodnotu je možno navýšit až na 0,092, což však sebou nese vysoké riziko nadhodnocení výsledků. Proto byla konzervativně zvolena hodnota 0,05.

Pro testování nepřímé výztuže lze využít konfiguraci zatěžovací zkoušky s názvem B.5 dle kanadské normy ACI 440.3R-04 [17]. Na základě zkušeností autorů a doposud obdržených experimentálních výsledků v průběhu řešení projektu „FW01010520 - Vývoj ohýbané kompozitní výztuže pro environmentálně exponované betonové konstrukce“ byla navržena vlastní zkušební metoda [20]. Schéma je zřejmé z Obr. 3:



Obr. 3 Schéma zatěžovací zkoušky pro stanovení tahové pevnosti FRP výztuže v místě ohybu

Pro návrh únosnosti betonového prvku s využitím FRP výztuže je zcela nezbytné definovat také návrhovou tahovou pevnost výztuže. Pro stanovení návrhové pevnosti FRP výztuže lze využít vztahů dle směrnice fib Bulletin no. 40 [1]:

$$f_{fd} = \min \left(f_{test}, \frac{f_{fk,res}}{\gamma_f} \right); \quad (2)$$

kde f_{test} představuje experimentálně definována hodnota tahové pevnosti při statickém zatížení pro danou životnost, $f_{fk,res}$ je experimentálně stanovená residuální tahová pevnost výztuže vystavené agresivnímu prostředí a γ_f je součinitel bezpečnosti. V případě že nejsou tyto hodnoty stanoveny, lze k výpočtu návrhové únosnosti výztuže přistupovat za pomoci vztahu:

$$f_{fd} = f_{fk0} / (\eta_{env,t} \cdot \gamma_f); \quad (3)$$

$$\eta_{env,t} = f_{fk,1000h} / f_{fk0} / ((100 - R_{10})/100)^n; \quad (4)$$

kde f_{fk0} představuje krátkodobou tahovou pevnost, η_{env} součinitel vlivu prostředí a γ_f součinitel bezpečnosti. Součinitel vlivu prostředí lze stanovit za pomoci znalosti redukce pevnosti za jednu dekádu R_{10} , a pevnosti výztuže stanovenou v čase 1000 hodin.

Uvedené vztahy (2) – (4) lze aplikovat i pro stanovení návrhové pevnosti nepřímé výztuže, současná literatura však tento předpoklad nijak nepotvrzuje ani nevyvrací. S ohledem na velmi omezenou databázi dat je doporučeno pro návrh zakřivené výztuže tento postup neaplikovat a vycházet vždy z certifikovaných údajů výrobce. Názorný vzorek přímé a nepřímé výztuže je vyobrazen na Obr. 4:

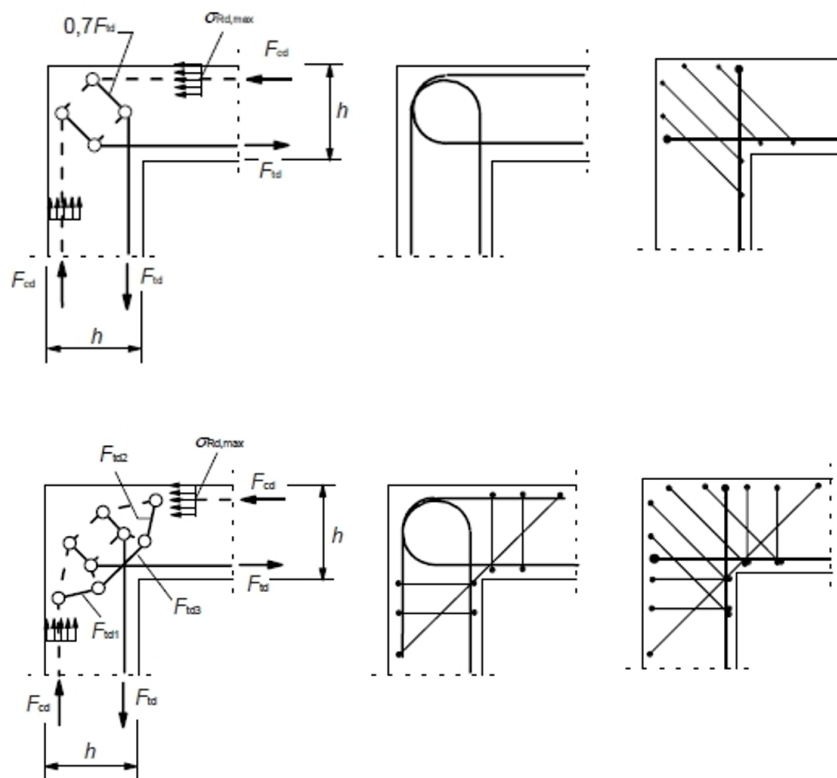


Obr. 4 Kompozitní FRP výztuž v provedení přímé a nepřímé výztuže

5. OBLAST VYUŽITÍ METODIKY

Metodika je zaměřena do oblasti návrhu detailu – rámového rohu vyztuženého FRP výztuží, který je namáhán otevíravým ohybovým momentem a posouvající silou.

Postup pro stanovení únosnosti rámového rohu s využitím FRP výztuže není v současné době žádným způsobem předepsán. Na národní úrovni lze pracovat pouze se vztahy zavedenými dle ČSN EN 1992-1-1 [21], konkrétně přílohu J.2, která se zabývá rámovými rohy vyztuženými běžnou ocelovou výztuží. Na Obr. 5 jsou uvedeny modely Strut and Tie z EC2 [21] pro návrh vyztužení rámových rohů namáhaných otevíravým ohybovým momentem.



Obr. 5 Modely Strut and Tie pro návrh vyztužení dle EC2 [21]

Pro prvky vyztužené ocelovou výztuží je problematika relativně obsírně popsána, jako například v [5], [6], [7] i [21]. Pro kompozitní výztuž však tato problematika není na národní úrovni žádným podrobným způsobem popsána.

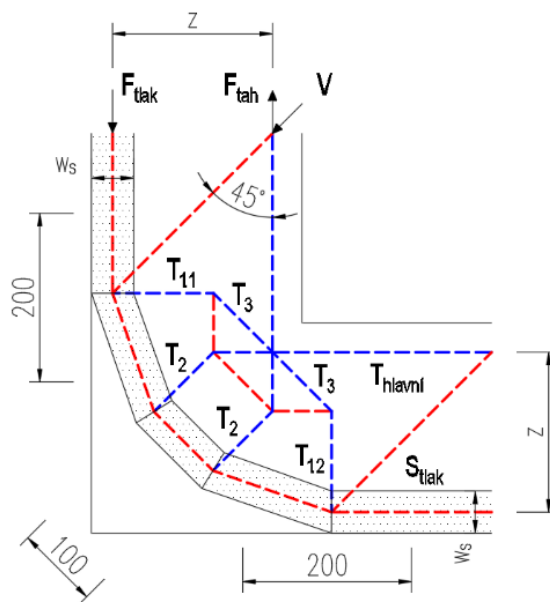
Metodika si tedy klade za cíl sumarizovat dostupné poznatky v oblasti návrhu rámových rohů/styčniců vyztužených FRP výztuží. Problematika je zaměřena zejména na prvky namáhané otevíravým ohybovým momentem. Tyto detaily lze využít zejména pro vyztužování opěrných zdí, avšak řešení lze aplikovat na celou škálu konstrukcí namáhaných v místě styčniců otevíravým ohybovým momentem.

Metodika je s ohledem na své zaměření určena především pro odbornou veřejnost zabývající se navrhováním a projektováním betonových konstrukcí s využitím kompozitní výztuže, či výzkumem a vývojem v oblasti nekovových výztužných materiálů pro betonové konstrukce vyztužené vnitřními FRP výztužemi.

6. VLASTNÍ POPIS METODIKY – STANOVENÍ ÚNOSNOSTI RÁMOVÉHO ROHU

K návrhu únosnosti rámového styčnicku je v současné době, při využití běžné ocelové výztuže, přistupováno zjednodušeně na základě metody mezní rovnováhy (dále jenom „MMR“). V případě kompozitní výztuže, vzhledem k lineární závislosti napětí na přetvoření (lineárně pružný pracovní diagram), je však nutno použít metodu mezního přetvoření (dále jenom „MMP“). Tyto metody však platí jenom v místě platnosti Bernouli-Navierovy hypotézy (dále jenom „BN“) a proto v případě, kdy lze předpokládat porušení ve styčnicku betonového prvku, se tyto metody stávají neplatnými. Zejména pro prvky vyztužené kompozitní výztuží nelze s jistotou tvrdit, že únosnost prvku nebude limitována únosností ve styčnicku rámového rohu. Pro tato místa lze s výhodou aplikovat metodu Strut and Tie (dále jenom „SaT“), která v podstatě zjednodušuje daný detail na soubor vzpěr a táhel protínajících se ve uzlech. Každý prvek soustavy je následně posuzován samostatně. Únosnost daného detailu je tedy limitována prvkem, ve kterém jako prvním dochází k porušení. Modely SaT lze sestavovat na základě zkušeností (např. kapitola J.2 dle [21]), nebo numerické analýzy, která definuje toky napětí v řešeném detailu.

Pro sestavení modelu byl využit model SaT dle Obr. 6, který je typický pro styčnicku namáhané otevíravým ohybovým momentem. Táhlá T_1 až T_3 představují hlavní toky tahových napětí ve styčnicku. $T_{hlavní}$ a S_{tlak} představují táhlo, resp. vzpěru v místě za styčnickem. Tato místa byla na základě analýzy modelu určena jako kritická pro jeho únosnost.



Obr. 6 Model Strut and Tie pro výpočet únosnosti styčnicku

Uvedený model však nelze zjednodušeně použít jako univerzální. Jeho geometrie se totiž v důsledku různých materiálových složení (typu třídy betonu) a navrženého vyztužení mění. Jako základní vstupní parametr pro definování modelu lze uvažovat rameno vnitřních sil (na Obr. 6 značeno „z“), definované na základě výšky tlačené oblasti a navrženého krytí výztuže. Rameno vnitřních sil lze vypočítat pomocí metody „MMR“, resp. „MMP“, v místě platnosti „B-N hypotézy“ (ve vzdálenosti přibližně dvou násobku

účinné výšky od líce prvku). Projektant tak k návrhu v prvním kroku přistoupí za pomoci běžného návrhu, ze kterého lze následně stanovit „okrajové podmínky“ a únosnost samotného styčnicku.

6.1. Způsob stanovení vnitřních sil

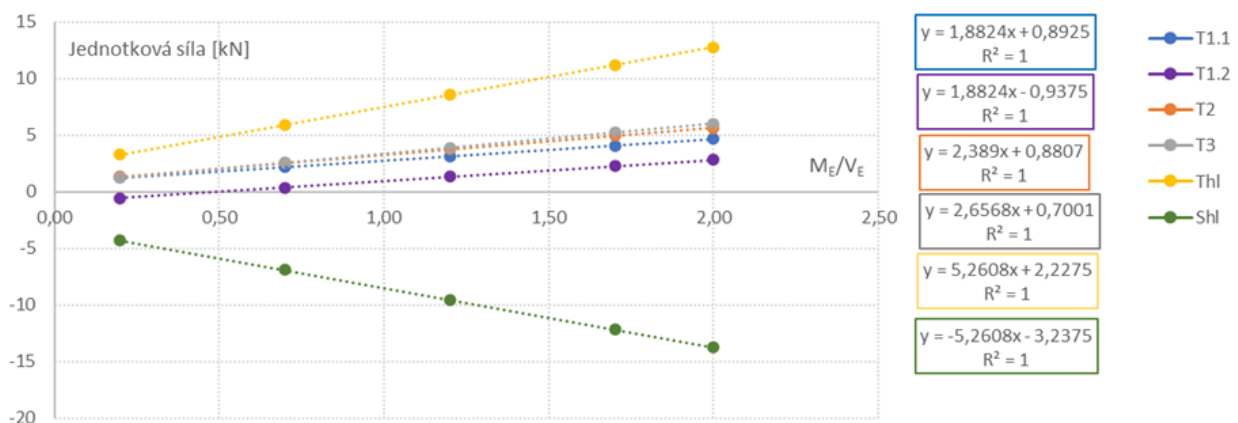
Síly působící na styčnick jsou v případě opěrné zdi závislé na její navržené výšce. S narůstající výškou prvku současně narůstá rameno působícího zatížení, na kterém síla působí a narůstá tak vliv ohybového momentu; vliv působící síly klesá. Síly F_{tlak} , F_{tah} a V , které vnášejí do modelu zatížení tak lze interpretovat na základě poměru M_E/V_E (ohybového momentu a posouvající síly). Za předpokladu, že posouvající síla působí pod úhlem 45° , lze síly dopočítat jako (viz Obr. 6):

$$F_{tlak} = \frac{M_E}{z} - \frac{V_E}{2 \cdot \arctg(45^\circ)}; \tag{5}$$

$$F_{tlak} = \frac{-M_E}{z} - \frac{V_E}{2 \cdot \arctg(45^\circ)}; \tag{6}$$

$$V = V_E \cdot \sin(45^\circ); \tag{7}$$

Z rovnic (5) a (6) je patrné, že vstupní síly jsou opět závislé na rameni vnitřních sil, resp. poměru ohybového momentu a posouvající síly. Z tohoto důvodu proto byla provedena parametrická studie, kde tyto veličiny byly uvažovány jako proměnné. Pro rameno vnitřních sil bylo uvažováno rozpětí 0,76 až 0,92 násobek tloušťky prvku. Pro prvek tloušťky 250 mm tedy výšky 190 mm až 230 mm, vždy po 10 mm. Poměr ohybového momentu a posouvající síly byl uvažován v rozsahu 0,20 až 2,00, které při uvážení trojúhelníkového rozložení spojitě síly představuje výšku opěrné zdi 0,60 až 6,00m. V prvním kroku byla provedena studie pro rameno vnitřních sil 190 mm, kde proměnnými byly ohybový moment a posouvající síla v pěti různých poměrech. Geometrie SaT modelu byla tedy pevně definována a proměnnými byly vstupní síly (Obr. 7 na ose x).



Obr. 7 Parametrická studie modelu SaT pro rameno vnitřních sil 190 mm

Na Obr. 7 jsou vyobrazeny hodnoty v jednotlivých táhlech a vzpěrách SaT modelu v závislosti na jednotkové síle pro různé poměry M_E/V_E . Cílem parametrické studie bylo definovat závislosti mezi jednotlivými poměry ohybového momentu a posouvající síly. Na základě dosažených výsledků lze tvrdit,

že v případě konstantně definovaného ramene vnitřních sil jsou jednotlivé závislosti mezi různými poměry ohybového momentu a posouvající síly lineární a lze mezi nimi lineárně interpolovat. Totéž však neplatí při uvážení jiného ramene vnitřních sil, a proto bylo pro každé rameno nutno definovat vlastní závislost, resp. vlastní sadu SaT modelů. Celkem tak bylo vypočteno pět sad SaT modelů, z nichž každý sestával z pěti SaT modelů. Celkem tedy bylo ve studii provedeno 25 SaT modelů.

Díky možnosti lineární interpolace lze dopočítávat vnitřní síly pro jednotlivé modely (lišící se v ramenu vnitřních sil) a stanovit tak únosnost prvku pro každý poměr ohybového momentu a posouvající síly. Výsledky parametrické studie, resp. vztahy pro výpočet vnitřních sil na modelu v závislosti na vnitřním ramenu jsou sumarizovány v Tab. 1.

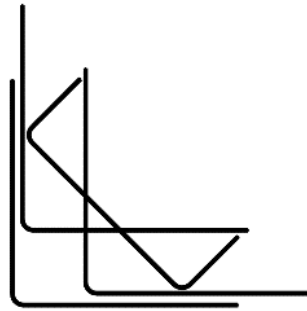
Tab. 1 Vztahy pro stanovení vnitřních sil SaT modelu v závislosti na ramenu vnitřních sil

Model	A	B	C	D	E
z : h_{prvku}	0,76	0,80	0,84	0,88	0,92
Pro průřez tl. 0,250 m	0,190	0,200	0,210	0,220	0,230
Prvek SaT	Vztah pro výpočet jednotkové síly, $x = M_E/V_E$				
T _{1.1} [kN]	1,878x + 1,595	2,139x + 1,712	2,378x + 1,825	2,595x + 1,937	2,795x + 2,047
T _{1.2} [kN]	1,878x - 1,145	2,143x - 0,994	2,382x - 0,847	2,600x - 0,700	2,795x - 0,552
T ₂ [kN]	2,439x + 1,246	2,026x + 1,171	1,676x + 1,069	1,373x + 0,932	1,135x + 0,786
T ₃ [kN]	2,656x + 1,394	3,028x + 1,553	3,364x + 1,673	2,891x + 2,375	3,465x + 2,200
T _{hlavní} [kN]	5,267x + 3,575	5,000x + 3,520	4,760x + 3,477	4,545x + 3,429	4,345x + 3,389
S _{tlak} [kN]	-5,260x - 4,597	-4,992x - 4,545	-4,763x - 4,486	-4,547x - 4,442	-4,350x - 4,401

Pro projektanta je tedy vstupním údajem návrhu poměr ohybového momentu M_E a posouvající síly V_E (v Tab. 1 představuje proměnnou x) a rameno vnitřních sil z vypočítané na základě metody mezní rovnováhy. Tyto hodnoty umožní volbu správného vztahu a výpočet vnitřních sil ve vzpěrách a táhlech bez nutnosti vytvářet model SaT.

6.2. Stanovení únosnosti SaT modelu

Pro vyztužení rámového rohu FRP výztuží bylo předpokládáno uspořádání výztuže dle Obr. 8. Toto uspořádání je pro v této metodice popsany způsob stanovení únosnosti závazné. V případě jiného uspořádání výztuže je nutno tyto změny zahrnout také do výpočtu únosnosti jednotlivých vzpěr a táhel modelu.



Obr. 8 Schéma uspořádání výztuže pro kompozitní řešení detailu

Jelikož v místě táhel $T_{1.1}$, $T_{1.2}$ a T_2 (viz Obr. 6) není navržena žádná výztuž, lze tvrdit že únosnost v daném místě je limitována tahovou pevností betonu, spočtenou jako:

$$F_{R,ctm} = f_{ctm} \cdot w_i; \quad (8)$$

kde f_{ctm} značí střední tahovou pevnost betonu a w_i šířku oblasti vzdorující tahovým silám. V místech táhla $T_{hlavní}$ se nachází výztuž přebírající tahové síly. Platí však, že až do vzniku prvních trhlin tahové síly přebírá samotný beton ($F_{R,ctm,hl}$) a tahové napětí ve výztuži ($F_{R,s}$) narůstá až od tohoto momentu. Lze proto oba příspěvky uvažovat jako sumu sil.

$$F_{R,T,hl} = F_{R,ctm,hl} + F_{R,s}; \quad (9)$$

V místě hlavní výztuže lze tvrdit, že platí „hypotéza B-N“, která umožňuje napětí na povrchu taženého betonu vyjádřit dle vztahu

$$\frac{M_E}{W_c} + \frac{N_E}{A_c} = \sigma; \quad (10)$$

kde M_E představuje působící moment, N_E působící normálovou sílu, W_c průřezový modul a A_c plochu průřezu. Jestliže platí, že moment je působící síla na rameni, která již byla interpretována jako poměr ohybového momentu M_E a působící síly V_E , lze po dosazení do rovnice příspěvek k únosnosti táhla $T_{hlavní}$ od pevnosti betonu v tahu vypočítat dle rovnice (11).

$$F_{R,ctm,hl} = \frac{f_{ctm}}{\frac{\tau}{W+A}}; \quad (11)$$

kde r představuje rameno působící síly, resp. poměr ohybového momentu a posouvající síly. Únosnost výztuže je definována plochou navržené výztuže A_s , limitním napětím f_y pro ocelovou výztuž a f_u pro kompozitní výztuž a redukčním součinitelem k_{red} , který vyjadřuje redukci tahové pevnosti (sníženou únosnosti v místě ohybu výztuže).

$$F_{R,s} = A_s \cdot f_y \cdot k_{red}; \quad (12)$$

$$F_{R,s} = A_s \cdot f_u \cdot k_{red}; \quad (13)$$

Obdobný způsob lze použít pro diagonální výztuž styčnicku. Výztuž začíná působit až v momentě vzniku trhliny, která je dána pevností betonu f_{ctm} v tahu na výšce w_i . Pro výpočet únosnosti v místě T_3 tedy platí:

$$F_{R,T3} = A_s \cdot f_y \cdot k_{red} + f_{ctm} \cdot w_i; \quad (14)$$

Únosnost vzpěry S_{tlak} je limitována pevností betonu v tlaku definovanou vztahem

$$F_{R,Stlak} = w_s \cdot f_c \cdot k_s; \quad (15)$$

kde w_s značí velikost tlačené oblasti, f_c pevnost betonu v tlaku a k_s redukční součinitel definovaný na základě místa, ve kterém je vzpěra umístěna a možné míry rozvoje trhlin v daném místě.

7. POPIS UPLATNĚNÍ METODIKY

Uplatnění metodiky pro návrh rámových rohů s využitím FRP výztuže je předpokládáno zejména v oblasti návrhu kritických detailů v konstrukcích betonových staveb vyztužených tímto moderním materiálem a vystavených agresivnímu prostředí. Jedná se např. o konstrukce opěrných zdí, pro které lze předpokládat výskyt vysoce agresivního prostředí (vysoká vlhkost, chloridy, časté opakování rozmrazovacích cyklů), kolektory, kanalizační šachty a podobně.

S ohledem na rozdílnost materiálových a mechanických vlastností běžné ocelové výztuže a kompozitní výztuže je nutno k návrhu těchto detailů přistupovat obezřetně. Jelikož současně platné návrhové vztahy neřeší vyztužení daných detailů FRP výztuží, slouží předkládaná metodika především jako podklad pro projektanty a odbornou veřejnost, kterým poskytuje jednoduchý (a experimentálně ověřený) nástroj pro stanovení návrhové únosnosti detailu rámového rohu, a to bez nutnosti vytvářet vlastní Strut and Tie modely.

Závěry zde uvedené jsou též plně využitelné pro vědecké, akademické a technické pracovníky v oblasti vývoje, výroby a návrhu kompozitních materiálů či jejich certifikaci. Metodika může být též vhodným doplňkem pro studenty konstrukčních oborů na vysokých školách např. při tvorbě jejich kvalifikačních prací.

8. LITERATURA

- [1] fib, International Federation for Structural Concrete. FIB Bulletin No.40: FRP reinforcement in RC structures. 2007. 978-288394-080-2
- [2] Association, Canadian Standards. CSA S806-12: Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers. 2012
- [3] (fib), International Federation for Structural Concrete. FIB model code for concrete structures 2010. 2010. 978-3-433-03061-5
- [4] GIRGLE, F.; JANUŠ, O.; KOSTIHA, V.; BODNÁROVÁ, L.; ŠTĚPÁNEK, P.; ZLÁMAL, M.; ČAIROVIĆ, D.; MANSOUR, M., a další. Dlouhodobé vlastnosti kompozitní výztuže při aplikaci v betonových konstrukcích. místo neznámé : Beton TKS, s. 38-45, 2019. 1213-3116
- [5] JOHANSSON, MORGAN. Structural Behaviour in Concrete Frame Corners. Goteborg : autor neznámý, 2000. 91-7197-889-5
- [6] Marina L. Moretti, Theodosios P. Tassios. Detailing of corner joints under opening moment. Prague, 2011
- [7] Michał Szczecina, Andrzej Winnicki. Rational Choice of Reinforcement of Reinforced Concrete. 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14123438>
- [8] ZLÁMAL, M.; ŠTĚPÁNEK, P.; GIRGLE, F.; JANUŠ, O.; BÁRTOVÁ, D.; LAGIŇ, J.; PREKOPOVÁ, P.; ČAIROVIĆ, D., a další. Chování otevíravých rámových styčníků vyztužených FRP výztuží, Beton TKS, roč. 20, č. 1, s. 62-67, 2020. 1213-3116
- [9] FRP reinforcement in RC structures: technical report prepared by a working party of Task Group 9.3, FRP (Fibre Reinforced Polymer) reinforcement for concrete structures. 1st pub. Lausanne : International Federation for Structural Concrete, 2007
- [10] Bank, Lawrence Colin. Composites for construction: structural design with FRP materials. Hoboken : Wiley, 2007
- [11] Benko, Vladimír, a další. SKSI: MANUÁL na navrhovanie GFRP výstuže do betónových konštrukcií. 1 místo neznámé : Slovenská komora stavebných inžinierov, 2015
- [12] CSA S806-12 - Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers
- [13] ACI 440.1R-15: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. Farmington Hills : ACI Committee 440, 2015
- [14] J., Lagiň; Prokeš J., Girgle F.; Kostiha V., Vašátko D.; O., Bezděk; O., Sedláček; P., Štěpánek. The effect of the bent of FRP rebar on its short-term mechanical properties. 2023. DOI:10.1088/1742-6596/2568/1/012006
- [15] J., Lagiň; F., Girgle; Kostiha V., Rozsypalová I.; P., Štěpánek. Effect of alkaline environment on mechanical properties of molded composite reinforcement. 2022. <https://doi.org/10.4028/p-mcz763>
- [16] Materials, JSCE: Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures using Continuous Fiber Reinforcing. JSCE: Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures using Continuous Fiber Reinforcing Materials. 1997
- [17] 440, ACI Commtee. ACI 440.1R-03 Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars. 2003
- [18] CSA S807-19: Specification for fibre-reinforced polymers. Ontario, Kanada : Canadian Standards Association, 2019
- [19] prEN 1992-1-1(2023-02): Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures. 455 p

- [20] J., Lagiň. Tahová pevnost kompozitní výztuže v místě ohybu. [Článek na konferenci - Juniorstav 2021] Brno : autor neznámý, 2021
- [21] ČSN EN 1992-1-1 (731201): Eurokód: Navrhování betonových konstrukcí - část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. 2006

Příloha A – Stanovení únosnosti rámového rohu vyztuženého FRP výztuží a jeho následné experimentální ověření

verze 1.0, prosinec 2023

1. ÚVOD

Uvedený postup má za cíl aplikovat postupy metodiky uvedené v kapitole 5 při návrhu konkrétního detailu a následně teoreticky stanovené hodnoty porovnat s experimentálně zjištěnými výsledky zatěžovací zkoušky rámového rohu vyztuženého FRP výztuží namáhaného otevíravým ohybovým momentem a posouvající sílou.

2. POUŽITÉ SYMBOLY

- f_{fd} – návrhová tahová pevnost FRP výztuže;
- R – poloměr zakřivení nepřímé výztuže;
- d_b – průměr výztuže;
- f_{fd} – návrhová tahová pevnost FRP výztuže;
- f_{Test} – testem stanovená tahová pevnost výztuže;
- $f_{k,res}$ – residuální tahová pevnost výztuže v agresivním prostředí;
- η_{env} – součinitel vyjadřující vliv prostředí;
- R_{10} – redukční součinitel na základě procentuální redukce za jednu dekádu;
- $G1$ – zkušební vzorek průřezu 250x500 mm vyztužený hlavní výztuží 5Ø12;
- $G2$ – zkušební vzorek průřezu 250x500 mm vyztužený hlavní výztuží 3Ø12;
- $T_{1.1}$ – táhlo Strut and Tie modelu dle Obr. 6;
- $T_{1.2}$ – táhlo Strut and Tie modelu dle Obr. 6;
- T_2 – táhlo Strut and Tie modelu dle Obr. 6;
- T_3 – táhlo Strut and Tie modelu dle Obr. 6;
- $T_{hlavní}$ – táhlo Strut and Tie modelu dle Obr. 6;
- S_{tlak} – vzpěra Strut and Tie modelu dle Obr. 6;
- f_{ctm} – střední tahová pevnost betonu;
- f_c – pevnost betonu v tlaku;
- f_u – mezí tahová pevnost FRP výztuže;
- f_y – mez kluzu betonářské výztuže;
- k_{red} – redukční součinitel pro redukci tahové pevnosti v místě ohybu;
- k_s – redukční součinitel pro pevnost betonu v tlaku;
- w_i – velikost (šířka nebo výška) oblasti vzpěry nebo táhla.

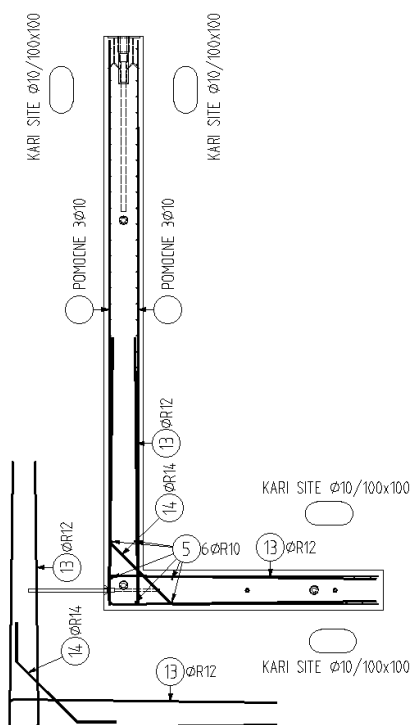
3. STANOVENÍ TEORETICKÉ ÚNOSNOSTI DETAILU

Popsanou metodiku lze aplikovat na návrh opěrné zdi, resp. návrhu detailu rámového styčnicků opěrné zdi, namáhaného otevíravým ohybovým momentem. V případě řešení projektu „FW01010520 - Vývoj ohýbané kompozitní výztuže pro environmentálně exponované betonové konstrukce“ byl jako ilustrativní vybrán prvek opěrné zdi pro kamenivo, s pracovním názvem „Boxy na kamenivo“.

Při návrhu opěrné zdi s využitím FRP výztuže projektant, podobně jako v případě ocelové výztuže, přistoupí v prvním kroku k definování zatížení na daném prvku a definuje tak vnitřní síly působící v místě vetknutí stěny, resp. v místě rámového rohu. Následně přistoupí k návrhu výztuže na základě metody mezního přetvoření, tedy stanovení únosnosti pro běžný, ohybovým momentem namáhaný průřez. V běžné praxi byl takto navržený prvek měl splňovat požadavky z hlediska mezního stavu únosnosti (dále jen „MSÚ“) a mezního stavu použitelnosti (dále jen „MSP“).

Ověření detailu rámového styčnicku je však v praxi často zanedbáno, přičemž tento detail může být kritickým místem konstrukce. Jak již bylo popsáno, odlišné chování FRP výztuže navíc může oproti běžné ocelové výztuži tento fakt ještě umocnit. Při návrhu rámového rohu formou FRP výztuže je proto doporučeno ověření rámového rohu i pomocí doplňujících modelů jako jsou Strut-and-Tie modely, nebo jiné složitější MKP programy. Na základě těchto vědomostí byly vypracována parametrická studie Strut-and-Tie modelů, která projektantovi umožňuje definovat únosnost detailu i bez nutnosti vypracování složitých, časově náročných, modelů.

Návrh detailu rámového rohu opěrné zdi s využitím FRP výztuže lze ilustrovat na již zmíněných prvcích „Boxy na kamenivo“, jejíž dimenze byla v ocelovém provedení ve formě $\emptyset 12/100$ (viz. Obr. 9)



Obr. 9 Vyztužení boxů na kamenivo v ocelovém provedení

V případě kompozitního provedení, které je v případě projektem „FW01010520“ limitováno maximálním rozměrem výrobního zařízení nepřímé GFPR výztuže, lze navrhnout vyztužení detailu rámového rohu dle Obr. 8. Při uvážení návrhových charakteristik jak ocelové, tak FRP výztuže, by tedy měl být detail v prvním kroku dle metody mezní rovnováhy (dále jen „MMR“) resp. metody mezního přetvoření (dále jen „MMP“). Teoretický návrh vyztužení detailu, s uvážením stejné návrhové únosnosti dle „MMR“ a „MMP“ je sumarizováno v Tab. 2.

Tab. 2 Teoretická návrhová únosnost ohýbaného průřezu

Označení	Ocelový prvek	Kompozitní prvek
Uvažovaný průřez	1000x250	
Vyztužení	Ø12/100	Ø12/100
Návrhová pevnost betonu v tlaku [MPa]	33,33	
Modul pružnosti betonu [GPa]	37,0	
Návrhová pevnost výztuže [MPa]	434,8	380
Modul pružnosti výztuže [GPa]	200	48
Rameno vnitřních sil z [mm]	0,211	0,216
Návrhová ohybová únosnost [kNm]	104,1	92,7

Při aplikování teoretických znalostí dle odstavce 6.2 by měly být v dalším kroku vypočítané hodnoty vnitřních sil v rámovém rohu opěrné zdi. Pro prvek výšky 3,60 m platí za předpokladu trojúhelníkového rozložení zatížení, že výslednice sil působí ve vzdálenosti 1,20 m od styčnicku. Platí tedy, že pro výpočet vnitřních sil dle Tab. 1 by měla být za hodnotu „x“ dosazena hodnota 1,20. Únosnost detailu navrhovaného prvku je pro oba typy vyztužení sumarizována v Tab. 3 a Tab. 4.

Tab. 3 Teoretická návrhová únosnost rámového rohu boxu na kamenivo vyztuženého ocelovou výztuží

Označení	Vnitřní síly		Únosnost		
	Vztah „C“ dle Tab. 1	Jednotkové vnitřní síly pro x = 1,20 [kN]	Geometrie SaT modelu	Uvažovaná pevnost prvku	Max. únosnost [kN]
T _{1.1} [kN]	2,378x + 1,825	4,68	w _i = 200 mm	f _{ctm} = 4,10 MPa	175,25
T _{1.2} [kN]	2,382x - 0,847	2,01	w _i = 200 mm	f _{ctm} = 4,10 MPa	407,68
T ₂ [kN]	1,676x + 1,069	3,08	w _i = 80 mm	f _{ctm} = 4,10 MPa	106,46
T ₃ [kN]	3,364x + 1,673	5,71	w _i = 80 mm Ø12/100, k _{red} = 1,00	f _{ctm} = 4,10 MPa f _{yd} = 434,8 MPa	172,04
T _{hlavní} [kN]	4,760x + 3,477	9,19	w _i = 80 mm Ø12/100, k _{red} = 1,00	f _{ctm} = 4,10 MPa f _{yd} = 434,8 MPa	87,80
S _{tlak} [kN]	-4,763x - 4,486	-10,20	w _i = 50 mm	f _{cd} = 33,3 MPa	163,36

Tab. 4 Teoretická návrhová únosnost rámového rohu boxu na kamenivo vyztuženého FRP výztuží

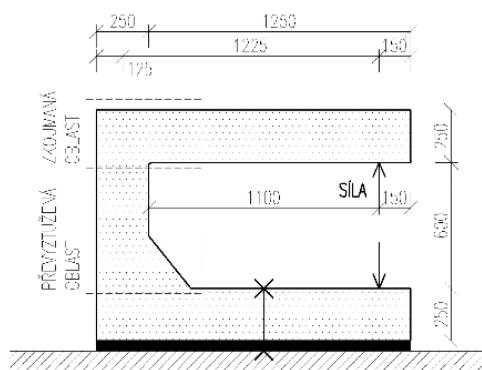
Označení	Vnitřní síly		Únosnost		
	Vztah „D“ dle Tab. 1	Jednotkové vnitřní síly pro $x = 1,20$ [kN]	Geometrie SaT modelu	Uvažovaná pevnost prvku	Max. únosnost [kN]
T _{1.1} [kN]	$2,595x + 1,937$	5,05	$w_i = 200 \text{ mm}$	$f_{ctm} = 4,10 \text{ MPa}$	162,32
T _{1.2} [kN]	$2,600x - 0,700$	2,42	$w_i = 200 \text{ mm}$	$f_{ctm} = 4,10 \text{ MPa}$	338,84
T ₂ [kN]	$1,373x + 0,932$	2,58	$w_i = 80 \text{ mm}$	$f_{ctm} = 4,10 \text{ MPa}$	127,08
T ₃ [kN]	$2,891x + 2,375$	5,79	$w_i = 80 \text{ mm}$ $\varnothing 12/100, k_{red} = 0,60$	$f_{ctm} = 4,10 \text{ MPa}$ $f_u = 230 \text{ MPa}$	101,26
T _{hlavní} [kN]	$4,545x + 3,429$	8,88	$w_i = 80 \text{ mm}$ $\varnothing 12/100, k_{red} = 1,00$	$f_{ctm} = 4,10 \text{ MPa}$ $f_u = 380 \text{ MPa}$	82,77
S _{tlak} [kN]	$-4,547x - 4,442$	-9,90	$w_i = 50 \text{ mm}$ $k_s = 0,60$	$f_{cd} = 33,3 \text{ MPa}$	168,35

Na základě uvedených skutečností lze usuzovat, že únosnost řešených prvků může být, jak v ocelovém tak v kompozitním provedení, limitována únosností rámového rohu. Pro ověření této teorie byl navržen experiment, jehož porovnání s výpočtovým přístupem je probíráno v následující části.

Dále je nutno uvést, že popisovaný návrh se zabývá výhradně řešením prvku z hlediska mezního stavu únosnosti. Prvky by měly být samozřejmě ověřeny také na základě mezní stavu použitelnosti a tomu by mělo být také přizpůsobeno vyztužení prvku.

4. EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ

Zatěžovací schéma pro ověření únosnosti rámového rohu je vyobrazeno na Obr. 10. Šířka vzorku byla 500 mm. Zkušební vzorek byl koncipován z pohledu možností výroby a zkušební haly. Konfigurace však i ve zmenšeném měřítku umožňuje ověření rámového rohu pro poměr ohybového momentu a posouvající síly o hodnotě 1,20.



Obr. 10 Schéma zkušební vzorku pro ověření únosnosti rámového rohu

Pro ověření byly zrealizovány dva typy zkušebních vzorků, v provedení hlavní výztuže jako 5Ø12 (prvek s označení „G1“) a 3Ø12 (prvek s označení „G2“). Jelikož zkušební metoda umožňuje stanovení únosnosti prvku jenom pro okamžitou pevnost materiálů, byl i výpočet únosnosti v prvním kroku realizován na základě krátkodobých mechanických vlastností použitých materiálů (v Tab. 5 experimentálně zjištěné vlastnosti, tedy střední hodnoty) a následně pro návrhové mechanické vlastnosti použitých materiálů (v Tab. 5 označeno jako návrhové hodnoty)

Tab. 5 Mechanické vlastnosti materiálů a zkušebních vzorků

Označení	Střední hodnoty		Návrhové hodnoty	
	G1	G2	G1	G2
Uvažovaný průřez	500x250		500x250	
Vyztužení	5Ø12	3Ø12	5Ø12	3Ø12
Pevnost betonu v tlaku [MPa]	59,9		33,3 (C50/60)	
Modul pružnosti betonu [GPa]	32,7		37,0	
Pevnost výztuže (GFRP) [MPa]	1300		380	
Modul pružnosti výztuže [GPa]	48		48	
Rameno vnitřních sil z [mm]	0,209	0,215	0,216	0,219
Ohybová únosnost [kNm]	155,57	95,51	46,69	28,35
M-N únosnost [kNm ** kN]	142 ** 118,3	87,5 ** 72,9	42,5 ** 35,4	26,0 ** 21,7
Ohyb. tuhost neporušeného pr. [MNm]	21,58	21,46	24,37	24,35
Ohyb. tuhost porušeného pr. [MNm]	1,26	0,78	1,26	0,78

5. POROVNÁNÍ EXPERIMENTU A NÁVRHOVÉHO PŘÍSTUPU

Na základě výpočtu ramena vnitřních sil dle Tab. 5 pro krátkodobé mechanické vlastnosti lze tvrdit, že rameno vnitřních sil z pro prvek „G1“ bylo vypočteno na úrovni 0,209 m. Pro stanovení vnitřních sil lze následně využít vztahy dle Tab. 1 dle poměru $z : h = 0,84$. Únosnost prvku lze dopočítat pomocí vztahů (8) až (15). Výpočet vnitřních sil, použité vztahy, vstupní hodnoty pro výpočet únosnosti a samotná únosnost prvků dle SaT modelu jsou pro okamžitou (krátkodobou) únosnost prvků „G1“ sumarizovány v Tab. 6.

Šířky oblastí w_i byly pro prvek „G1“ stanoveny na základě geometrie SaT modelu. Pro táhlo T_2 je doporučeno oblast redukovat na přibližně 80 % vzdálenosti táhel ve styčnicku. Pro táhlo T_3 byla uvažována redukce tahové pevnosti na úrovni 60 %, která představuje redukci tahové pevnosti v místě ohybu nepřímé výztuže. Pro hlavní výztuž je předpokládáno zapojení zejména v přímé části a lze proto uvažovat plnou tahovou pevnost výztuže.

Tab. 6 Stanovení vnitřních sil a únosností pro prvek „G1“ při uvážení krátkodobých mechanických vlastností materiálů

Označení	Vnitřní síly		Únosnost		
	Vztah „D“ dle Tab. 1	Jednotkové vnitřní síly pro $x = 1,20$ [kN]	Geometrie SaT modelu	Uvažovaná pevnost prvku	Max. únosnost [kN]
$T_{1.1}$ [kN]	$2,595x + 1,937$	5,05	$w_i = 200 \text{ mm}$	$f_{ctm} = 3,11 \text{ MPa}$	61,53
$T_{1.2}$ [kN]	$2,600x - 0,700$	2,42	$w_i = 200 \text{ mm}$	$f_{ctm} = 3,11 \text{ MPa}$	128,44
T_2 [kN]	$1,373x + 0,932$	2,58	$w_i = 80 \text{ mm}$	$f_{ctm} = 3,11 \text{ MPa}$	48,17
T_3 [kN]	$2,891x + 2,375$	5,79	$w_i = 80 \text{ mm}$ $5\emptyset 12, k_{red} = 0,60$	$f_{ctm} = 3,11 \text{ MPa}$ $f_u = 780 \text{ MPa}$	97,73
$T_{hlavní}$ [kN]	$4,545x + 3,429$	8,88	$w_i = 80 \text{ mm}$ $5\emptyset 12, k_{red} = 1,00$	$f_{ctm} = 3,11 \text{ MPa}$ $f_u = 1300 \text{ MPa}$	95,79
S _{tlak} [kN]	$-4,547x - 4,442$	-9,90	$w_i = 50 \text{ mm}$ $k_s = 0,60$	$f_c = 59,9 \text{ MPa}$	151,26

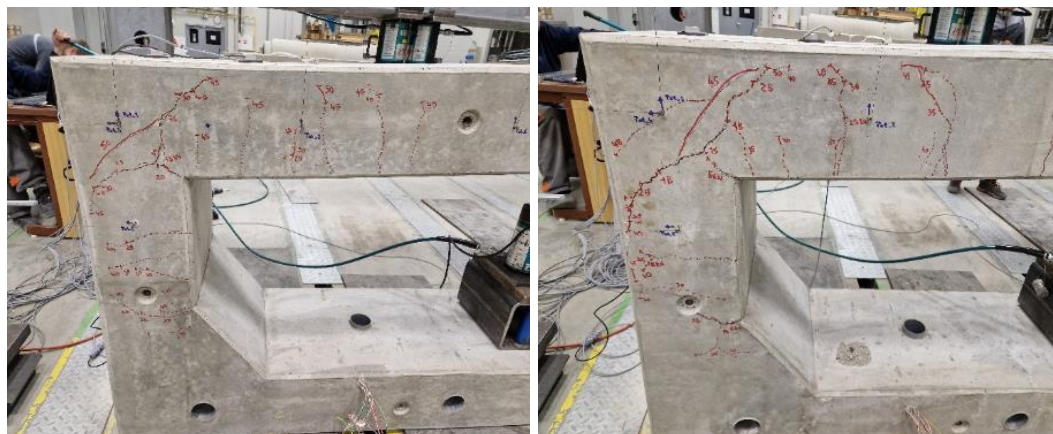
Únosnost prvku „G1“ je dle výpočtu z Tab. 6 limitována tahovou pevností táhla T_2 (v Tab. 6 vyznačeno červeně). Výpočet tedy předpokládá vznik diagonální trhliny v místě styčnicku. Na tyto tahové síly není v řešení styčnicku navržena žádná výztuž, čím je únosnost styčnicku vyčerpána. Tyto závěry byly ověřeny a potvrzeny také experimentálně, kdy také zkušební prvek „G1“ vykazoval porušení vznikem diagonální trhliny ve styčnicku na úrovni zatížení 51,89 kN. Od tohoto okamžiku nadále nebyl schopen přebírat vyšší zatížení a při dalším zatěžování docházelo v zásadě jenom k nárůstu deformace prvku. Způsob porušení experimentálního vzorku „G1“ je vyobrazen na Obr. 11. Podrobný popis experimentu je uveden v závěrečné zprávě projektu.

Stejný postup jako pro prvek G1 byl aplikován také pro prvek G2. V důsledku nižšího stupně vyztužení však lze očekávat také menší tlačnou oblast prvku. Rameno vnitřních sil pro prvek „G2“ bylo vypočteno na úrovni 0,209 m. Pro stanovení vnitřních sil byly využity vztahy dle Tab. 1 pro model „C“, tedy výpočtové vztahy poměru $z : h = 0,88$. Únosnost prvku byla dopočítána pomocí vztahů (8) až (15). Výpočet vnitřních sil, použité vztahy, vstupní hodnoty pro výpočet únosnosti a samotná únosnost prvků dle SaT modelu jsou pro okamžitou (krátkodobou) únosnost prvků „G2“ sumarizovány v Tab. 7.

Tab. 7 Stanovení vnitřních sil a únosností pro prvek „G2“ při uvážení krátkodobých mechanických vlastností materiálů

Označení	Vnitřní síly		Únosnost		
	Vztah „C“ dle Tab. 1	Jednotkové vnitřní síly pro $x = 1,20$ [kN]	Geometrie SaT modelu	Uvažovaná pevnost prvku	Max. únosnost [kN]
T _{1.1} [kN]	2,378x + 1,825	4,68	$w_i = 200$ mm	$f_{ctm} = 3,11$ MPa	66,43
T _{1.2} [kN]	2,382x - 0,847	2,01	$w_i = 200$ mm	$f_{ctm} = 3,11$ MPa	154,54
T ₂ [kN]	1,676x + 1,069	3,08	$w_i = 80$ mm	$f_{ctm} = 3,11$ MPa	40,35
T ₃ [kN]	3,364x + 1,673	5,71	$w_i = 80$ mm 3Ø12, $k_{red} = 0,60$	$f_{ctm} = 3,11$ MPa $f_u = 780$ MPa	68,12
T _{hlavní} [kN]	4,760x + 3,477	9,19	$w_i = 80$ mm 3Ø12, $k_{red} = 1,00$	$f_{ctm} = 3,11$ MPa $f_u = 1300$ MPa	61,03
Stlak [kN]	-4,763x - 4,486	-10,20	$w_i = 50$ mm	$f_c = 59,9$ MPa	146,78

Únosnost prvku „G2“, je podobně jako v předešlém prvku limitována tahovou pevností táhla T_2 (v Tab. 7 vyznačeno červeně). Výpočet tedy předpokládá vznik diagonální trhliny v místě styčnicku. Tento způsob porušení byl také pozorován v případě zkušebních vzorků, a to na úrovni zatížení 46,35 kN. Od tohoto momentu vzorek nebyl schopen přebírat vyšší zatížení a při dalším zatěžování docházelo v zásadě jenom k nárůstu deformace prvku. Způsob porušení experimentálního vzorku „G2“ je vyobrazen na Obr. 11. Podrobný popis experimentu je uveden v závěrečné zprávě projektu.



Obr. 11 Způsob porušení experimentální vzorku „G1“ (vlevo) a „G2“ (vpravo)

6. ZÁVĚR

Metodika se zabývá způsobem návrhu rámového rohu vyztuženého FRP výztuží, namáhaného otevíravým ohybovým momentem. Byly popsány důvody proč nelze pro vybrané detaily využít běžné postupy, platné pro návrh detailů vyztužených běžnou betonářskou výztuží. Metodika popisuje odlišnosti FRP a ocelové výztuže. Pro prvky s FRP výztuží byl definován způsob řešení rámových rohů, uveden postup výpočtu vnitřních sil pomocí Strut and Tie modelů a zavedeny vztahy pro výpočet únosnosti jednotlivých prvků modelu. V příloze byly dále zavedené vztahy aplikovány na konkrétní řešení vyztužení rámového rohu a porovnány s experimentálně stanovenými únosnostmi zkušebních vzorků.

Na základě porovnání výpočtového postupu a experimentů lze prohlásit, že metodika byla pro realizované zkušební prvky v dobré shodě. Způsob porušení a únosnost prvků dle výpočtu a experimentálního vzorku byly v obou případech shodné. Prvky však byly ověřeny jenom ve dvou konfiguracích. V případě změny tloušťky (resp. výšky) průřezu, stupně vyztužení, průměru výztuže a podobně tedy nelze funkčnost metodiky garantovat a před zavedením do praxe je jí nutno ověřit na větším počtu vzorků.