



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Stavebná fakulta

Katedra betónových konštrukcií a mostov

Meno a priezvisko:

**Ing. Ján Pecka**

Autoreferát dizertačnej práce:

**Zosilňovanie štíhlych stĺpov CFRP lamelami so zohľadnením  
histórie zaťaženia**

<b>Na získanie akademického titulu:</b>	„doktor“ („philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“)
<b>V doktorandskom študijnom programe:</b>	11187, Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb
<b>V študijnom odbore:</b>	3659, Stavebníctvo
<b>Forma štúdia:</b>	denná

**Bratislava 2025**



**Dizertačná práca bola vypracovaná na:**

Katedre betónových konštrukcií a mostov Stavebnej fakulty STU v Bratislave

**Predkladateľ:**     *Ing. Ján Pecka*  
Katedra betónových konštrukcií a mostov  
Stavebná fakulta, STU v Bratislave  
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

**Školiteľ:**         *prof. Ing. Katarína Gajdošová, PhD.*  
Katedra betónových konštrukcií a mostov  
Stavebná fakulta, STU v Bratislave  
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

**Autoreferát bol rozoslaný dňa:**

**Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa .....o:.....h na Katedre  
betónových konštrukcií a mostov (Svf, STU v BA), Radlinského 11, 010 05 Bratislava.**

.....  
Prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.  
Dekan fakulty

## Obsah

Obsah.....	1
1 Úvod .....	3
2 Súčasný stav riešenej problematiky.....	3
2.1 Použitie CFRP pri tlakovom namáhaní.....	4
2.2 Vplyv histórie zaťaženia .....	5
2.3 Motivácia.....	6
3 Ciele a tézy dizertačnej práce.....	7
4 Metódy riešenia dizertačnej práce .....	8
4.1 Experimentálna analýza .....	8
4.1.1 Geometria a vystuženie betónových stĺpov .....	10
4.1.2 Použité materiály.....	10
4.1.3 Skúšobná zostava .....	11
4.1.4 Merané veličiny .....	12
4.1.5 Príprava a zosilňovanie vzoriek .....	13
4.1.6 Výsledky experimentálneho skúšania .....	14
4.2 Teoretická analýza .....	18
4.2.1 Porovnanie výsledkov výpočtových metód s experimentálnou analýzou.....	19
4.2.2 Parametrická štúdia .....	22
5 Diskusia.....	23
5.1 Vplyv zosilnenia .....	23
5.2 Vplyv histórie zaťaženia .....	24
5.3 Pomerné pretvorenia v kritickom priereze .....	25
5.4 Zahnutie účinkov zosilnenia do výpočtov .....	25
5.5 Zohľadnenie CFRP v tlaku.....	26
6 Závery .....	27
6.1 Odporúčania pre prax.....	28
6.2 Odporúčania pre ďalší výskum.....	29
7 Zoznam použitej literatúry .....	30

## ABSTRAKT

V prehľade súčasného stavu riešenej problematiky sa dizertačná práca sústreďuje na analýzu štíhlych železobetónových stĺpov so zohľadnením účinkov druhého rádu. Ďalej sú predstavené metódy zosilňovania stĺpov, pričom najväčší priestor je venovaný metódam využívajúcim CFRP (Carbon Fiber-Reinforced Polymers), s dôrazom kladeným na pozdĺžnu aplikáciu CFRP profilov. Nadväzujú možnosti započítania efektu zosilnenia do výslednej odolnosti stĺpov. Prevedený experimentálny program sa zameriava na zosilnenie stĺpov CFRP lamelami lepenými do drážok v betónovej krycej vrstve (NSMR – Near-Surface Mounted Reinforcement). Hlavným cieľom je preskúmanie vplyvu histórie zaťaženia na efektívnosť zvolenej metódy zosilnenia a tým, priblíženie sa podmienkam v praxi zosilňovaných stĺpov. Jedná sa o prvý takýto experiment prevedený na vzorkách v skutočnej mierke. Nadväzujúce teoretická analýza je prevedená s využitím výpočtových postupov uvedených v EN 1992-1-1 z roku 2004 ako aj v novej generácii EN 1992-1-1 z roku 2023. Experimentálny program preukázal nižší nárast odolnosti v dôsledku histórie zaťaženia. Nárast odolnosti stĺpov bez histórie zaťaženia bol 23%, stĺpov zosilňovaných za pôsobenia zaťaženia len 15%. Vytvorený výpočtový algoritmus umožňuje zohľadniť nielen zosilnenie stĺpa a jeho zlyhanie v dôsledku straty stability, ale aj vplyv realizácie zosilnenia za pôsobenia zaťaženia.

## ABSTRACT

The state-of-the-art overview in this dissertation focuses on the analysis of slender reinforced concrete columns with consideration of second-order effects. Further, methods of column strengthening are presented, with the greatest focus placed on techniques using CFRP (Carbon Fiber-Reinforced Polymers), emphasizing the longitudinal application of CFRP profiles. This is followed by an outline of possibilities for incorporating the strengthening effect into the resulting resistance of columns. The conducted experimental research focuses on the strengthening of columns using CFRP strips bonded into grooves in the concrete cover (NSMR – Near-Surface Mounted Reinforcement). The primary objective is to investigate the influence of loading history on the effectiveness of the selected strengthening method, thereby approximating the conditions of strengthened columns in practice. This is the first such experiment conducted on full-scale specimens. The subsequent theoretical analysis was conducted using the computational procedures specified in EN 1992-1-1 from 2004, as well as in the new generation of EN 1992-1-1 from 2023. The experimental programme demonstrated that, due to the loading history, the increase in resistance achieved by strengthening was noticeably lower. The resistance of the columns without prior loading was increased by 23%, whereas for columns strengthened under sustained loading, the increase was only 15%. The developed computational algorithm made it possible to account not only for the strengthening of the column and its failure due to loss of stability, but also for the effects of strengthening carried out under sustained loading.

## 1 Úvod

Betón, konkrétne vystužený betón je aktuálne najpoužívanejším konštrukčným materiálom pre zhotovovanie nosných konštrukcií stavieb. Všade tam, kde sa požaduje otvorenosť priestoru a univerzálnosť členenia dispozície sa používajú ako vertikálne nosné prvky stĺpy. Typologicky sa jedná najmä o administratívne budovy, parkovacie domy, sklady či výrobné haly, so stĺpmi sa však stretávame takmer pri všetkých typoch budov.

Požiadavka vytvorenia voľných priestorov a ekonomické hľadisko často vedú k snahe o optimalizáciu rozmerov prierezu stĺpov. Architektonické poňatie priestoru môže vyústiť do realizácií štíhlych stĺpov, pričom tie musia zaistiť bezpečný prenos síl.

Často sa možno stretnúť s požiadavkou zvýšenia zaťažiteľnosti stĺpov. Vzhľadom na subtílnosť ich rozmerov a častý návrh na vysoký stupeň využitia ich návrhovej odolnosti, majú existujúce stĺpy zväčša len minimálne rezervy v zvyšovaní zaťažiteľnosti a je potrebné pristúpiť k ich zosilneniu. Požiadavka zvýšenia odolnosti môže vyplývať zo zmeny funkčného využitia spojeného s nárastom zaťaženia, z potreby napraviť chyby návrhu či realizácie stĺpa, často však aj z dôvodu zanedbanej údržby či výskytu mimoriadnej situácie, ktorá viedla k poškodeniu konštrukcie. Požadované zvýšenie odolnosti je možné dosiahnuť zosilnením stĺpa. To je realizované zväčša pridávaním materiálu, v dôsledku čoho dochádza k zväčšeniu prierezu stĺpa. Miera zväčšenia rozmerov prierezu závisí od zvolenej metódy zosilnenia. Voľba vhodnej metódy musí zohľadniť nie len namáhanie stĺpa, ale aj priestorové možnosti, prípadné agresívne pôsobenie okolitého prostredia a technologickú realizovateľnosť či nadväznosť na iné konštrukcie.

Predkladaná práca sa zameriava na zosilňovanie štíhlych stĺpov aplikáciou polymérov vystužených uhlíkovými vláknami vo forme lamiel lepených do drážok v betónovej krycej vrstve. Táto metóda zosilnenia umožňuje zvýšenie odolnosti stĺpa pri zachovaní pôvodných rozmerov prierezu. Realizácia je v porovnaní s klasickým obetónovaním jednoduchšia, čistejšia a zároveň rýchlejšia, vyžaduje si však dôkladné prevedenie, pretože kvalita prevedenia výrazne ovplyvňuje výsledný efekt.

Experimentálny program je zameraný na zohľadnenie vplyvu histórie zaťaženia na efektívnosť realizovaného zosilnenia. Podľa rešerše dostupnej literatúry sa jedná o prvý experiment zohľadňujúci históriu zaťaženia, najmä aplikáciu zosilnenia za pôsobenia zaťaženia, pri zvolenej metóde zosilnenia na vzorkách v skutočnej mierke.

## 2 Súčasný stav riešenej problematiky

Úvodná časť práce je členená na tri hlavné podkapitoly. Prvou z nich je analýza štíhlych stĺpov so zohľadnením účinkov druhého rádu. Uvedené sú metódy analýzy z aktuálne platnej normy EN 1992-1-1:2004 (ďalej EC2-04 [6], [17]), doplnené o zmeny, ktoré zavádza druhá generácia EN 1992-1-1:2023 (ďalej EC2-23 [7]). Okrem zjednodušených metód analýzy účinkov druhého rádu je popísaný algoritmus výpočtu všeobecnou nelineárnou metódou.

Druhá podkapitola sa zameriava na samotnú problematiku zosilňovania stĺpov, najmä na metódy založené na aplikácií CFRP materiálov. Voľba vhodnej metódy musí

zohľadniť okrem iného namáhanie stĺpa, či štíhlosť. Prostredníctvom prehľadu vývoja poznania v problematike zosilňovania štíhlych stĺpov sú predstavené efektívne metódy s ich výhodami aj nevýhodami.

Tretia časť sa venuje možnostiam započítania efektu zosilnenia k celkovej odolnosti stĺpa. Zameraná je na metódy analýzy, ktoré sú uvedené v EC2-23. Hodnotí ich z pohľadu aplikovateľnosti pre zohľadnenie zosilnenia aplikáciou CFRP materiálov.

Pre účely autoreferátu sú v skrátenej forme uvedené informácie o tlakovom pôsobení CFRP a prehľad realizovaných experimentov zohľadňujúcich vplyv histórie zaťaženia pri zosilňovaní.

## 2.1 Použitie CFRP pri tlakovom namáhaní

Označenie CFRP pochádza z anglického pomenovania Carbon Fiber-Reinforced Polymers (uhlíkovými vláknami vystužené polyméry), patria do skupiny FRP materiálov. Tie sú odolné voči korózii, majú výborný pomer pevnosti k hmotnosti, vysokú osovú pevnosť, obmedzené medzné pretvorenie, výbornú chemickú odolnosť a necitlivosť voči širokému spektru agresívnych médií. Vyznačujú sa elektromagnetickou neutralitou a ďalšími vlastnosťami v závislosti od typu vlákien.

Zatiaľ čo sa CFRP kompozity ukázali byť efektívne pri ťahovom namáhaní, s tlakovým namáhaním je to komplikovanejšie. Samotné uhlíkové vlákna s ohľadom na svoj malý priemer sú náchylné na mikrovzper a zalomenie. Ďalším dôvodom, prečo sa neodporúča uvažovať s tlakovým pôsobením CFRP kompozitov je vzper samotného kompozitu. Z týchto dôvodov normy a príručky odporúčajú zanedbať tlakovú pevnosť CFRP kompozitov. EC2-23 v prílohe J uvádza, že tlaková pevnosť lepenej výstuže (ABR – Adhesively Bonded Reinforcement) má byť zanedbaná, *fib* bulletin 40 [8] neodporúča uvažovať pri FRP s odolnosťou voči tlakovým napätiam. ACI 420.2R-17 [1] uvádza, že príručka platí len pre zosilňovacie systémy používajúce FRP ako dodatočnú ťahanú výstuž. Tieto systémy by sa nemali používať ako tlačaná výstuž.

Avšak pri dostatočnej kvalite kontroly a správnom vyhotovení kompozitu možno znížiť vplyv mikrovzperu. Zabezpečenie kompozitných profilov proti vzperu pri ich tlakovom namáhaní je možné správnou aplikáciou. CFRP profily je možné aplikovať do drážok (NSMR → Near-Surface Mounted Reinforcement), vďaka čomu sa zväčší kontaktná plocha s betónom, teda dochádza k lepšiemu spojeniu a prenosu zaťaženia (napr. [9]). Zároveň okolitý betón zabraňuje vybočeniu CFRP profilov. Pri zosilnení aplikovanom na povrch (EBR → Externally Bonded Reinforcement) je možné profily ovinúť tkaninou v priečnom smere, čím sa bráni ich vybočeniu spôsobom analogickým, ako je to pri tlačenej betonárskej výstuži pomocou strmeňov v stĺpoch (napr.[10]).

Ostáva určiť materiálové vlastnosti CFRP kompozitov, s ktorými možno uvažovať pri analýzach. CFRP materiály vykazujú lineárne elastické vlastnosti až do porušenia v ťahu aj v tlaku [9]. Pri tlakovom namáhaní je tlaková pevnosť ako aj modul pružnosti nižší než pri ťahovom namáhaní. Ďalej sú uvedené hodnoty nájdené v literatúre ako % z ťahovej pevnosti a % z modulu pružnosti v ťahu (Tab. 2.1 Vlastnosti CFRP v tlaku uvedené v dostupných zdrojoch).

Tab. 2.1 Vlastnosti CFRP v tlaku uvedené v dostupných zdrojoch

Zdroj :	$f_{fc}$ [%]	$E_{fc}$ [%]
ACI 440.2R-5 (2005) – [16]	78	85
Fib bulletin 40. (2007) – [8]	–	85
Reinforcing Concrete Structures with Fibre-Reinforced Polymers Design Manual No. 3, Version 2 (2006) – [4]	30-50	77-97
D. Mostofinejad, N. Moshiri (2015) – [13]	78	–
M. Chellapandian, S. Prakash, A. Rajagopal (2018) – [15]	49	100
K. Khorramian, P. Sadeghian (2019) – [9]	34	86

Nižšia pevnosť v tlaku je daná najmä menším medzným pomerným pretvorením v tlaku. Pre posledný uvedený zdroj [9] je medzné pomerné pretvorenie CFRP kompozitu v tlaku  $\varepsilon_{fc} = 0,0066$ . Táto hodnota je takmer dvojnásobná oproti medznému pomernému pretvoreniu betónu v tlaku.

## 2.2 Vplyv histórie zaťaženia

Pri zosilňovaní sa FRP materiály aplikujú na konštrukciu dodatočne. Na prenose zaťaženia sa začnú podieľať v súlade s Hookovým zákonom vtedy, keď dôjde k ich pretvoreniu. Preto je dôležité pred samotnou realizáciou zosilnenia čo najviac odľahčiť zosilňovanú konštrukciu, a tým v nej dosiahnuť čo najmenšie pretvorenia. Následne po zosilnení konštrukcie sa budú zmeny pomerných pretvorení týkať aj FRP materiálu aplikovaného v procese zosilnenia a ten bude prispievať k odolnosti konštrukcie.

Aj keď v praxi dochádza k zosilňovaniu konštrukcií, ktoré majú za sebou históriu zaťaženia a počas samotného procesu zosilnenia sú pod zaťažením, v experimentálnych výskumoch sa s históriou zaťaženia väčšinou neuvažuje. Je z dôvodu, že takýto prístup k testovaniu vzoriek je náročnejší nie len časovo, ale aj ohľadom požiadaviek kladených na skúšobnú zostavu, či náročnosť realizácie samotného zosilnenia v zostave za pôsobiaceho zaťaženia.

V dostupnej literatúre podarilo dohľadať len niekoľko výskumných prác berúcich do úvahy históriu zaťaženia pri problematike zosilňovania stĺpov. Ersoy a Tankut (1993) [5] sa venovali zosilňovaniu stĺpov obetónovaním s pridaním betonárskej výstuže. Vplyvu histórie zaťaženia na odolnosť stĺpov zosilňovaných obetónovaním sa venovali aj Krainskyi, Blikharskyi a kol. (2018) [11]. Vzorky zosilňovali pri zaťažení na úrovni 65-70% z odolnosti nezosilneného stĺpa. V oblasti zosilňovania stĺpov CFRP materiálmi sa Perrone, Barros a kol. (2009) [14] venovali zosilňovaniu stĺpov voči účinkom seizmického zaťaženia. Pri zosilnení nezosilnili len neporušené vzorky, ale zosilnili aj vzorky najskôr odskúšané ako referenčné vzorky. Blikharskyi a kol. (2023) [2] sa venovali zohľadneniu histórie zaťaženia aj pri stĺpoch zosilňovaných pozdĺžnymi CFRP lamelami aplikovanými na povrch ako EBR. Zaujímavé sú aj výsledky výskumu autorov Morsy a El-Tony (2012) [12]. Venovali sa zosilňovaniu kruhových vzoriek ovitím CFRP tkaninou pri rôznych úrovniach

predchádzajúceho zaťaženia. Parametre skúšaných vzoriek a vplyv histórie zaťaženia na efektívnosť zosilnenia sú uvedené v Tab. 2.2.

Z uvedených prác vyplýva, že história zaťaženia, najmä v prípade ak sa zosilnenie realizovalo za pôsobiaceho zaťaženia, mala výrazne negatívny a nezanedbateľný vplyv na výslednú odolnosť zosilňovaných stĺpov.

Tab. 2.2 Parametre vzoriek spomínaných experimentálnych výskumov zameraných na zosilňovanie stĺpov so zohľadnením histórie zaťaženia

Autor	Vzorky	Spôsob zosilnenia	Zaťaženie	História zaťaženia	Efektívnosť
Ersoy a Tankut (1993)	130 x 130 x 650 mm	Obetónovanie hr. 25mm	Centrický tlak	Za pôsobenia zaťaženia	50%
				Po predchádzajúcom zaťažení	80-90%
	160 x 160 x 1000 mm	Obetónovanie hr. 35 mm	Tlak a jednoosový ohyb + cyklické namáhanie	Po predchádzajúcom zaťažení	Pokles tuhosti
Krainskyi, Blikharskyi a kol. (2018)	180 x 140 x 2200 mm	Obetónovanie (260 x 200 mm)	Tlak a jednoosový ohyb	Za pôsobiaceho zaťaženia 65-70% odolnosti ref.	85%
Morsy a El-Tony (2012)	φ160, 1000 mm	Ovinutie	Centrický tlak	Po predchádzajúcom zaťažení	60%-100%
		Hybridný spôsob			80%-100%
Perrone, Barros a kol. (2009)	250 x 250 x 1500	Hybridný spôsob (NSMR + Ovinutie)	Konštantná Tlaková sila + cyklické priečne namáhanie	Po predchádzajúcom zaťažení	69%
Blikharskyi a kol. (2023)	180 x 140 x 2200	EBR	Tlak + jednoosový ohyb	Za pôsobiaceho zaťaženia 30, 50 a 70% z odolnosti ref	84%, 64% 47%

## 2.3 Motivácia

Zo súhrnu aktuálneho stavu poznania vyplýva, že problematika zosilňovania štíhlych stĺpov aplikáciou CFRP profilov nie je ešte dostatočne preskúmaná a k dispozícii je stále len obmedzené množstvo experimentálnych dát. Najväčšie medzery sú v oblasti vplyvu histórie zaťaženia na efektívnosť zosilnenia. Druhou dostatočne neprebádanou oblasťou je tlakové pôsobenie CFRP profilov aplikovaných v procese zosilnenia. Z týchto dôvodov bol zrealizovaný experimentálny výskum zameraný na zosilnenie štíhlych stĺpov aplikáciou CFRP lamiel NSMR metódou, teda do drážok v betónovej krycej vrstve. Skúšané boli nielen vzorky zosilnené bez predchádzajúceho zaťaženia, ale aj vzorky zosilnené po predchádzajúcom zaťažení a vzorky zosilňované priamo počas pôsobenia zaťaženia. Okrem experimentálneho overenia je pozornosť sústredená aj na možnosti započítania účinkov zosilnenia k výslednej odolnosti stĺpa.

### 3 Ciele a tézy dizertačnej práce

Požiadavka zvýšenia odolnosti stĺpov je v projekčnej praxi pomerne bežná, pričom môže vyplynúť z rôznych dôvodov. Pri riešení tejto požiadavky je na výber z viacerých metód založených zväčša na aplikácii prídavného materiálu. Či sa na zosilnenie použije betón, oceľ, CFRP alebo iný materiál, v dôsledku existujúceho stavu pomerných pretvorení v momente realizácie zosilnenia bude stav pomerných pretvorení v pôvodných a novo aplikovaných materiáloch odlišný.

Cieľom tejto práce je rozšíriť poznanie v problematike zosilňovania štíhlych stĺpov aplikáciou CFRP lamiel vo forme NSMR. Dôraz je kladený na vplyv histórie zaťaženia na efektívnosť zosilnenia stĺpov touto metódou. Súčasťou je experimentálna analýza na vzorkách stĺpov v skutočnej mierke. Súčasne sa práca venuje metodike započítania efektu zosilnenia k celkovej odolnosti stĺpa.

Pre rozšírenie poznatkov v problematike zosilňovania štíhlych stĺpov aplikáciou CFRP materiálov boli zadefinované nasledujúce ciele:

1. Doplnenie databázy experimentálnych výsledkov v oblasti zosilňovania štíhlych stĺpov aplikáciou CFRP lamiel vo forme NSMR o experimentálne výsledky zohľadňujúce históriu zaťaženia na vzorkách v skutočnej mierke, keďže takéto výsledky zatiaľ nie sú k dispozícii.
2. Vyhodnotenie vplyvu predchádzajúceho zaťaženia na efektívnosť aplikovaného zosilnenia, porovnanie odozvy stĺpov zosilňovaných bez predchádzajúceho zaťaženia, po predchádzajúcom zaťažení alebo počas pôsobenia zaťaženia.
3. Overenie aplikovateľnosti normových návrhových postupov odvodených pre nové konštrukcie na už existujúcich konštrukciách zosilnených dodatočne.
4. Teoretické a experimentálne overenie možnosti započítania účinku zosilnenia k výslednej odolnosti stĺpa so zohľadnením histórie zaťaženia.
5. Stanovenie odporúčaní ohľadom zosilňovania štíhlych stĺpov CFRP lamelami pre projekčnú prax.

## 4 Metódy riešenia dizertačnej práce

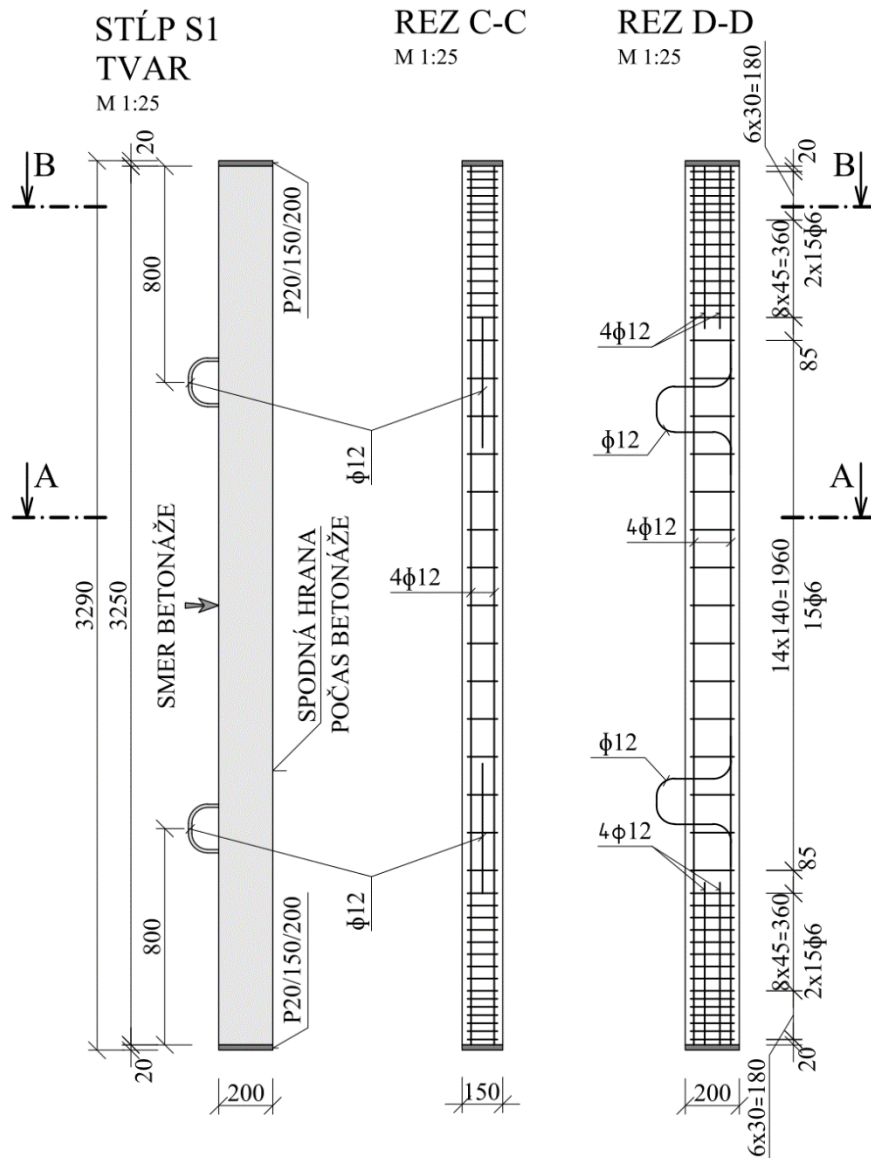
Pre dosiahnutie cieľov dizertačnej práce boli použité dve metódy riešenia - experimentálna a teoretická analýza.

### 4.1 Experimentálna analýza

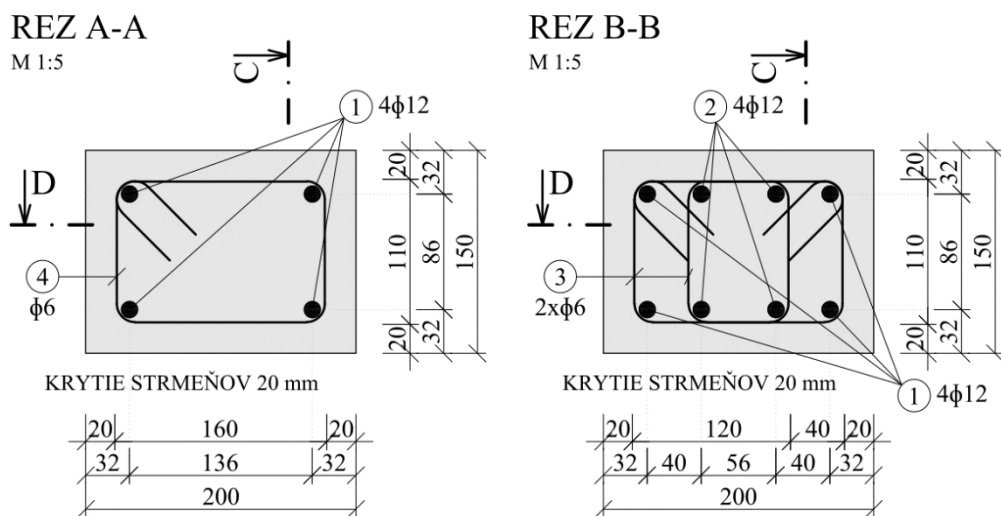
Realizácia experimentálnej analýzy pozostávala z niekoľkých na seba nadväzujúcich krokov. Prvým bol návrh experimentálnych vzoriek. Navrhnuté boli železobetónové stĺpy s obdĺžnikovým prierezom so štíhlosťou  $\lambda = 76$  (Obr. 4.1 a Obr. 4.2). Stĺpy boli navrhnuté tak, aby zlyhali stratou stability, vybočením v smere osi menšej tuhosti. Skúšobná zostava a umiestnenie stĺpov v zostave boli navrhnuté tak, aby zaťaženie stĺpov bolo kombináciou tlakovej sily a jednoosového ohybového momentu pôsobiaceho okolo osi menšej tuhosti prierezu stĺpa. Experimentálne skúšanie bolo rozdelené do dvoch fáz. Prvá sa realizovala počas februára 2024 a druhá fáza počas októbra 2024. V Tab. 4.1 sú uvedené charakteristiky jednotlivých skúšobných vzoriek. Označenie vzoriek pozostáva z písmena a dvoch respektíve jedného čísla  $Sx.y$ , význam je nasledovný:  $S$  je označenie stĺpa, prvé číslo  $x$  označuje sériu stĺpov, potom  $S1$  – referenčný,  $S2$  – séria zosilnených stĺpov skúšaných vo februári,  $S3$  – séria zosilnených stĺpov skúšaných v októbri. Série 2 a 3 obsahujú trojicu stĺpov, kde  $Sx.0$  sú stĺpy zosilnené bez predchádzajúceho zaťaženia.  $Sx.1$  stĺpy zaťažené na približne 50% odolnosti referenčného stĺpa, odľahčené a zosilnené (po predchádzajúcom zaťažení).  $Sx.2$  stĺpy zaťažené na približne 50% odolnosti referenčného stĺpa, následne zosilnené za pôsobiaco zaťaženia v zostave.

Tab. 4.1 Experimentálny program

Fáza	Stĺp	Popis	Dátum zosilnenia	Dátum hlavnej skúšky
1. Fáza február 2024	$S1$	Referenčný nezosilnený stĺp	-	5. 2. 2024
	$S2.0$	Stĺp zosilnený bez predchádzajúceho zaťaženia	12. 2. 2024	20. 2. 2024
	$S2.1$	Stĺp zaťažený na cca 50% odolnosti $S1$ , odľahčený a zosilnený	13. 2. 2024	20. 2. 2024
	$S2.2$	Stĺp zaťažený na cca 50% odolnosti $S1$ , zosilnený za pôsobenia zaťaženia	13. 2. 2024	20. 2. 2024
2. Fáza október 2024	$S3.0$	Stĺp zosilnený bez predchádzajúceho zaťaženia	15. 10. 2024	22. 10. 2024
	$S3.1$	Stĺp zaťažený na cca 50% odolnosti $S1$ , odľahčený a zosilnený	15. 10. 2024	22. 10. 2024
	$S3.2$	Stĺp zaťažený na cca 50% odolnosti $S1$ , zosilnený za pôsobenia zaťaženia	15. 10. 2024	22. 10. 2024



Obr. 4.1 Schéma tvaru a výstuže nezosilnených vzoriek stĺpov



Obr. 4.2 Schémy tvaru priečných rezov a výstuženía nezosilnených vzoriek stĺpov

## 4.1.1 Geometria a vystuženie betónových stĺpov

Geometria a vystuženie nezosilnených stĺpov sú znázornené na Obr. 4.1 a Obr. 4.2. Celková dĺžka stĺpov bola 3290 mm. Zhotovené boli s konštantným obdĺžnikovým prierezom s rozmermi 150 x 200 mm. Pozdĺžna výstuž stĺpa bola tvorená štyrmi prútmi priemeru  $\varnothing 12$  mm. Čo zodpovedá stupňu vystuženia 1,5 %. Pozdĺžna výstuž bola v koncových oblastiach doplnená štyrmi prídavnými prútmi dĺžky 600 mm s priemerom  $\varnothing 12$  mm. Pričná výstuž stĺpa bola navrhnutá z prútov priemeru  $\varnothing 6$  mm. V koncových oblastiach boli navrhnuté štvor-strižné strmene. Mimo koncové oblasti stĺpa boli navrhnuté dvoj-strižné strmene.

Výroba experimentálnych vzoriek štíhlych stĺpov bola realizovaná v dňoch 12.-13.4.2023 vo výrobní hale STRABAG – Prefa - závod Sereď. Stĺpy boli betónované v horizontálnej polohe, uložené na užšej hrane prierezu, tým sa zabezpečila rovnaká kvalita betónu po dĺžke stĺpa. Dôkladné zhutnenie a spracovanie čerstvej betónovej zmesi bolo zabezpečené prostredníctvom ponorného vibrátora.

## 4.1.2 Použité materiály

Na výrobu vzoriek štíhlych stĺpov bol predpísaný betón pevnostnej triedy C25/30 a betonárska výstuž triedy B500B. Na zosilnenie stĺpov boli použité uhlíkové lamely, ktoré sa lepili do drážok použitím epoxidového lepidla. Použitý bol systém od firmy MAPEI SK, s.r.o, pozostávajúci z CFRP lamiel Carboplate E250/50/1.4 a epoxidového lepidla ADESILEX PG1. CFRP lamely a epoxidové lepidlo boli poskytnuté firmou Mapei s.r.o v rámci spolupráce s Katedrou betónových konštrukcií a mostov SvF STU v Bratislave.

### *Betón vzoriek*

Celkovo bolo spotrebovaných 0,85 m<sup>3</sup> čerstvého betónu z toho 0,7 m<sup>3</sup> na betonáž stĺpov a 0,15 m<sup>3</sup> na betonáž vzoriek na stanovenie materiálových charakteristík. Pri betonáži bola použitá bádia s objemom 1,0 m<sup>3</sup>. Vďaka čomu sa všetky vzorky vybetónovali z jednej várky, teda z jednej zámesi betónu.

Pevnosť betónu bola stanovená v čase skúšania vzoriek stĺpov. Hodnoty získané počas skúšania prvej a druhej fázy sa od seba líšili len minimálne, preto boli pre teoretickú analýzu použité priemerné hodnoty materiálových charakteristík stanovené zo všetkých odskúšaných vzoriek (Tab. 4.2).

*Tab. 4.2 Priemerné materiálové charakteristiky betónu určené zo všetkých vzoriek*

Charakteristika	Kocky	Valce	Hranoly
Priemerná pevnosť v tlaku $f_c$ [MPa]	32,87	25,46	24,45
Priemerná pevnosť v ťahu za ohybu $f_{ctm,fl}$ [MPa]	-	-	4,33
Priemerný modul pružnosti $E_c$ [GPa]	-	-	30,44

## Betonárska výstuž

Výstuž stĺpov bola navrhnutá z betonárskej rebierkovej výstuže triedy B500B. Pozdĺžna výstuž s priemerom Ø12 mm a strmene s priemerom Ø6 mm. Skúškami zistené materiálové vlastnosti sú uvedené v Tab. 4.3.

Tab. 4.3 Mechanické vlastnosti betonárskej výstuže

Charakteristika	Ø6 mm	Ø12 mm
Medza klzu [MPa]	543	545
Medza pevnosti [MPa]	605	705
Modul pružnosti [GPa]	210	212
Ťažnosť [%]	3,76	9,90
Zatriedenie	B500A	B500C

## Systém zosilnenia CFRP lamelami

Použitý bol systém zosilnenia od firmy Mapei s.r.o pozostávajúci z CFRP lamiel a epoxidového lepidla. Použité boli lamely Carboplate E250/50/1.4 s vysokým modulom pružnosti a dvojzložkové epoxidové lepidlo Adesilex PG1. CFRP lamela šírky 50 mm s hrúbkou 1.4 mm a dĺžkou 25 m bola rozrezaná najskôr na pásy dĺžky približne 3,1 m. Tie boli následne po dĺžke rozdelené na približne 1 cm široké pásiky, ktoré sa vkladali do drážok pri zosilňovaní stĺpov. Vlastnosti CFRP lamiel boli overované ťahovými skúškami na vzorkách šírky 1 cm, aby sa zohľadnili prípadné porušenia spôsobené rezaním lamiel. Získané vlastnosti sú uvedené spolu s vlastnosťami uvádzanými výrobcom v Tab. 4.4.

Tab. 4.4 Mechanické vlastnosti CFRP lamiel

Charakteristika	Narezané vzorky	Výrobca
Ťahová pevnosť [MPa]	2280	2500
Modul pružnosti [GPa]	244	250
Medzné pomerné pretvorenie [%]	0,934	1,0

### 4.1.3 Skúšobná zostava

Pre účely zohľadnenia vplyvu histórie zaťaženia na efektívnosť zosilnenia štíhlych stĺpov CFRP lamelami bolo potrebné použiť vhodnú skúšobnú zostavu.

Navrhovaná zostava musela vyhovovať nasledovným kritériám:

- možnosť ponechať skúšobné vzorky zaťažené aspoň po dobu jedného týždňa,
- jednoduché osadenie stĺpa do zostavy a jednoduché vybratie stĺpa po skúške,
- dobrá prístupnosť ku stĺpu osadenému v zostave, aby bolo možné jeho zosilnenie,
- možnosť osadenia snímačov pre meranie zvolených veličín,
- vytvorenie kĺbových uložení na oboch koncoch stĺpa,
- pevný rám zostavy umožňujúci bezpečné zaťažovanie stĺpov až do ich porušenia.

Pri návrhu sa zvolila horizontálna zostava a teda horizontálna poloha stĺpov počas skúšky, najmä s ohľadom na prístupnosť stĺpov pre proces zosilňovania. Základný rám zostavy je navrhnutý z oceľových PIŽMO prvkov. V rámci systému PIŽMO prvkov, zapožičaného od spoločnosti Doprastav a.s., boli pri tvorbe skúšobnej zostavy použité roštové nosníky, stĺpiky a spojovací materiál. Skúšobná zostava je zobrazená na Obr. 4.3 so základným popisom jednotlivých častí.

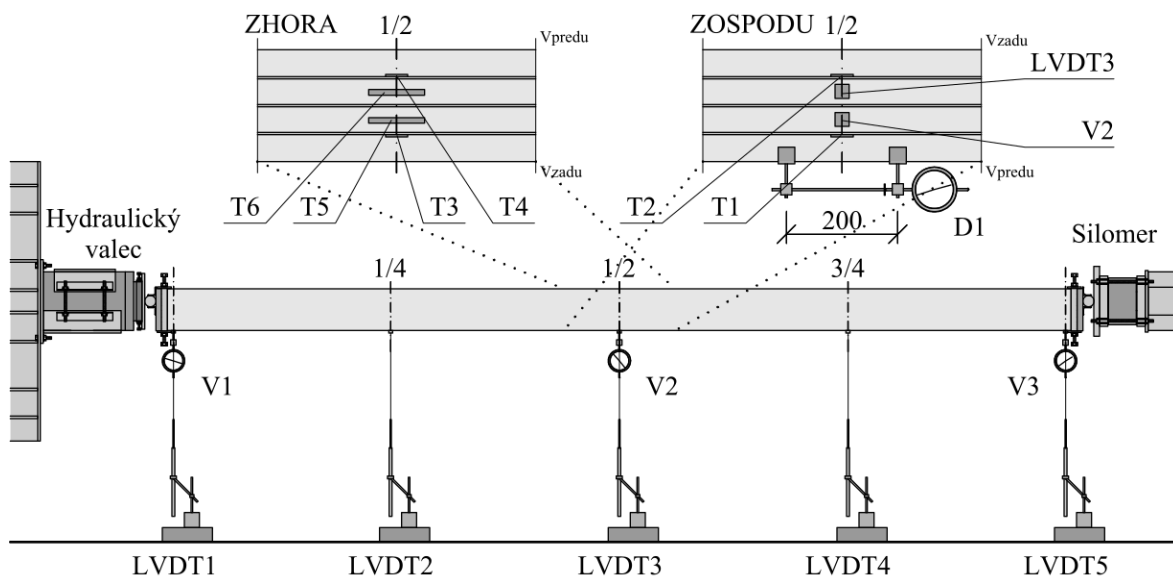


1 - stĺp, 2 - koncové nosníky zostavy vytvorené z PIŽMO nosníkov, 3 - oceľové PIŽMO stĺpiky, 4 - predpínacie tyče spájajúce koncové nosníky, 5 - kotvenie predpínacích tyčí, 6 - kotvenie zostavy k podlahe, 7 - roznášacie nosníky, 8 - hydraulický valec, 9 - silomer, 10 - kĺbové uloženie stĺpa, 11 - zbernica dát.

*Obr. 4.3 Pohľad na kúšobnú zostavu*

#### 4.1.4 Merané veličiny

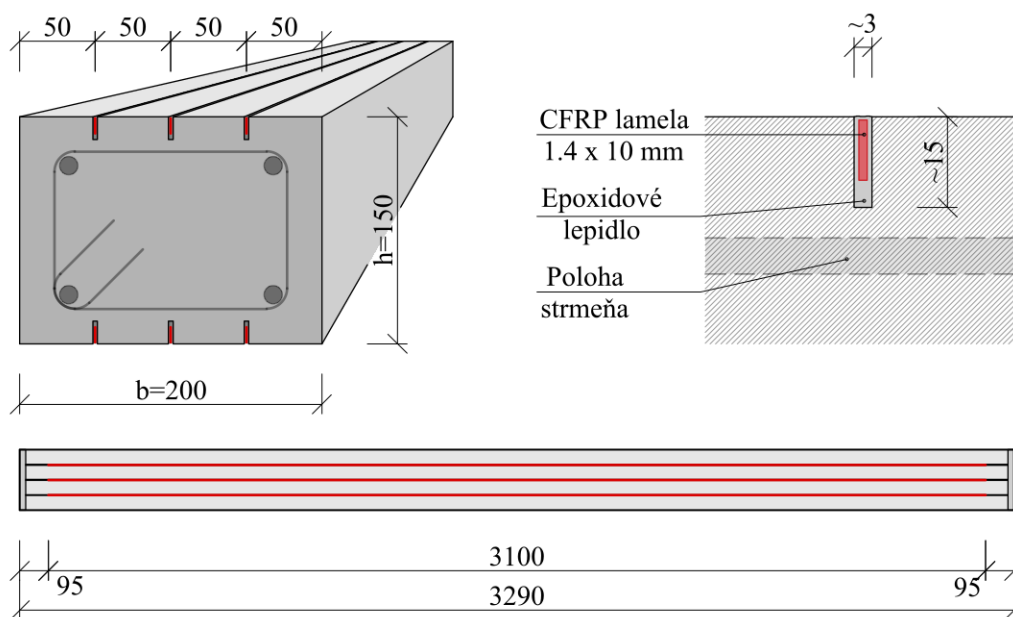
Počas experimentálneho skúšania boli na stĺpoch osadené snímače zaznamenávajúce odozvu stĺpov pri postupne narastajúcom zaťažení až do ich porušenia. Veľkosť tlakovej sily pôsobiacej na stĺp sa merala silomerom HBM C6B s kapacitou 2 MN. Priehyb stĺpa po dĺžke bol meraný nezávisle dvoma metódami. V piatich bodoch (pri koncoch, v štvrtinách dĺžky a v strede dĺžky stĺpa) boli osadené LVDT snímače (Linear Variable Displacement Transducer) s označením LVDT1 až LVDT5. Na koncoch stĺpa a v strede stĺpa boli osadené výchylkomery (V1-V3), slúžiace ako kontrolné meranie prihybu. Pozdĺžne pomerné pretvorenie betónu na ťahanej strane stĺpa sa merala pomocou deformetra (D1) na základni 200 mm. Zvyšné pomerné pretvorenia boli merané prostredníctvom tenzometrických pásov. Všetky pomerné pretvorenia boli merané v strede dĺžky stĺpa v jeho kritickom priereze. Pomerné pretvorenia na betonárskej výstuži neboli merané. Tenzometrické pásy na CFRP lamelách na ťahanej strane prierezu dostali označenie T1 a T2. Na tlačenej strane prierezu T3 a T4. Pomerné pretvorenia tlačeneho betónu zaznamenávala dvojica tenzometrických pásov T5-T6 (Obr. 4.4).



Obr. 4.4 Označenie snímačov a ich rozmiestnenie počas skúšok

#### 4.1.5 Príprava a zosilňovanie vzoriek

Z pripravených stĺpov bol jeden odskúšaný ako referenčný, zostávajúcich 6 stĺpov bolo zosilnených. Konfigurácia zosilnenia bola pri všetkých 6 stĺpoch rovnaká. Zosilňovanie sa realizovalo 6 CFRP lamelami aplikovanými NSMR metódou. Drážky boli vyhotovené na oboch dlhších stranách prierezu po tri na jednej strane. Hĺbka drážok bola približne 15 mm a ich šírka 3 mm, vyhotovili sa priebežne po celej dĺžke stĺpa. Osová vzdialenosť drážok od okraja prierezu, ako aj ich vzájomná vzdialenosť boli približne 50 mm. Vkladané lamely mali rozmer prierezu 1,4 x 10 mm, dĺžku 3100 mm. Realizované zosilnenie je schematicky znázornené na Obr. 4.5.



Obr. 4.5 Schematické znázornenie realizovaného zosilnenia CFRP lamelami NSMR metódou

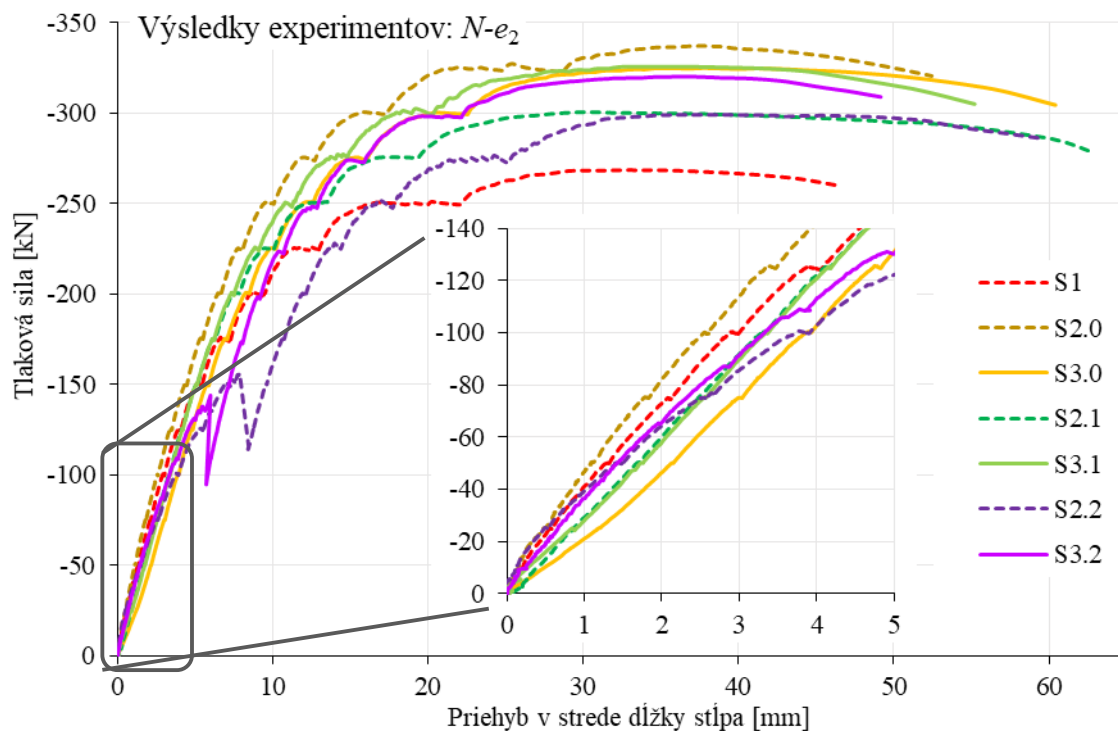
#### 4.1.6 Výsledky experimentálneho skúšania

Skúšanie prebiehalo v horizontálnej polohe s excentricitou zaťaženia 30 mm nad ťažiskom prierezu. Zaťažovalo sa v jednotlivých zaťažovacích krokoch s nárastom zaťaženia 25 kN.

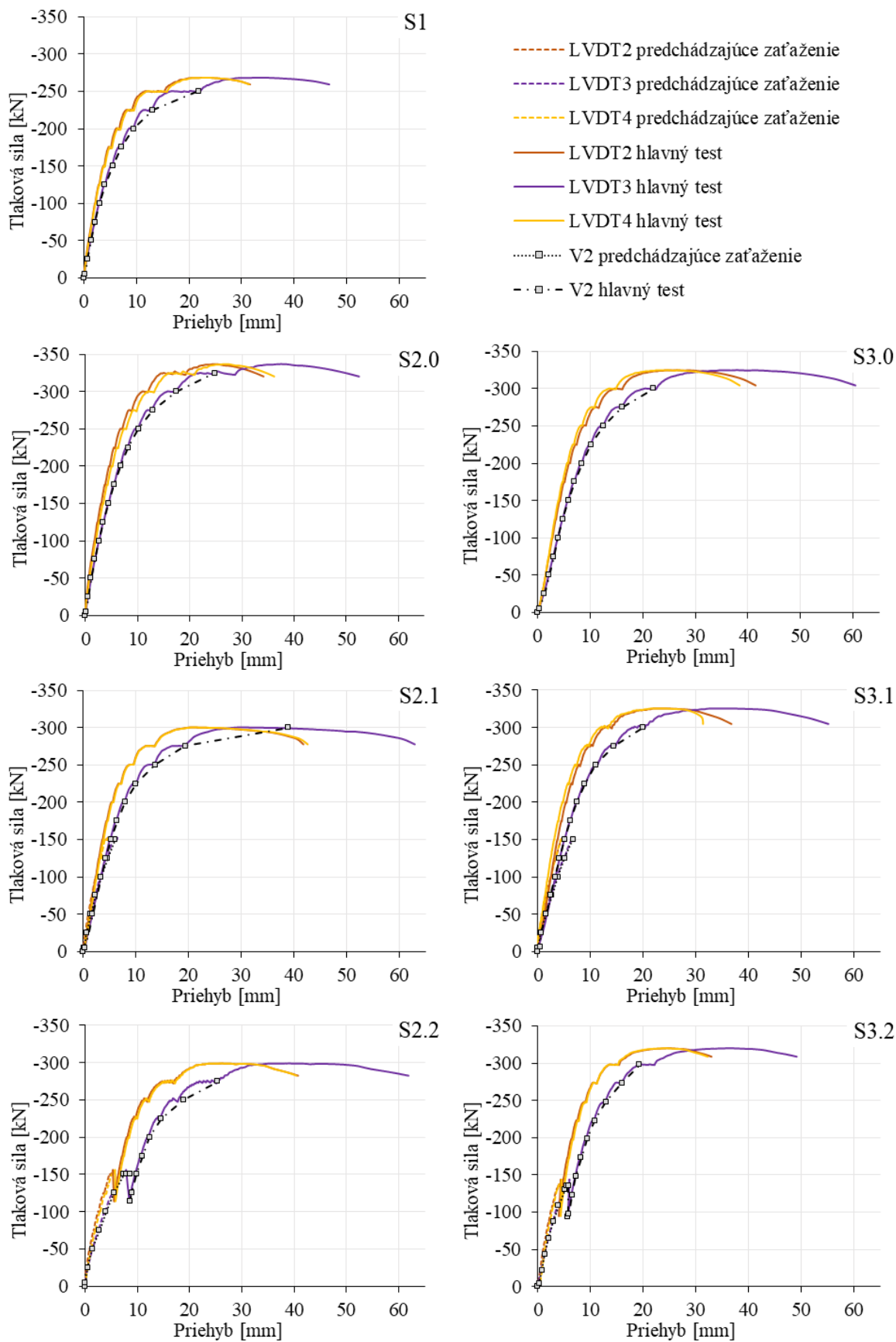
Referenčný stĺp, rovnako tak aj stĺpy zosilnené CFRP lamelami, zlyhali v dôsledku straty stability (vzperu) a následného porušenia kritického prierezu drvením betónu približne v strede dĺžky stĺpa. V Tab. 4.5 sú uvedené výsledky experimentálnych skúšok spolu s vyčísleným nárastom odolnosti v dôsledku aplikovaného zosilnenia. Súhrnný záznam priehybov v strede dĺžky testovaných stĺpov je znázornený na Obr. 4.6. Pri stĺpe S3.0 je možné si všimnúť že priehyb má iný priebeh než priehyby ostatných stĺpov.

Tab. 4.5 Experimentálne namerané odolnosti stĺpov

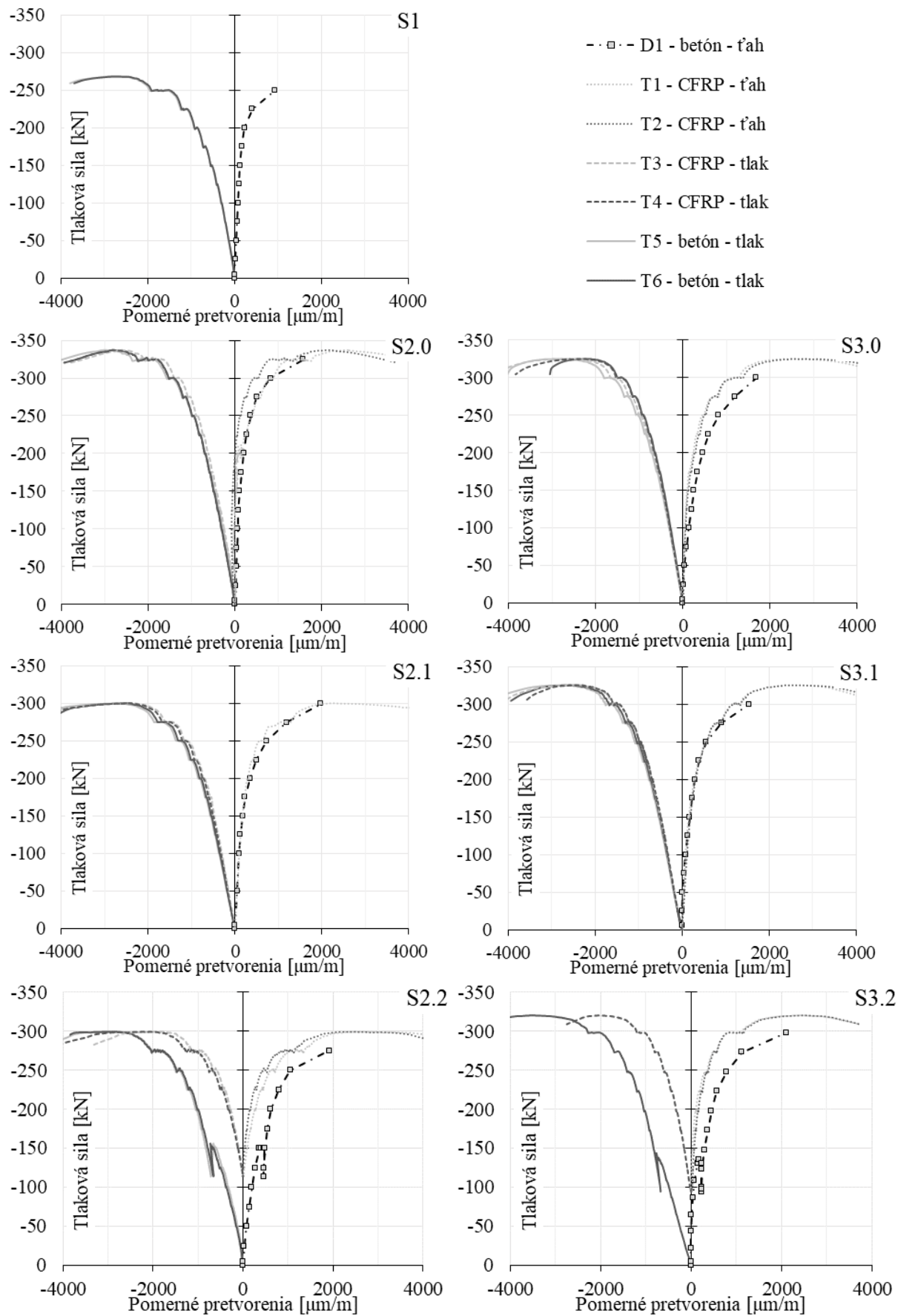
Stĺp	História zaťažovania	Kritická sila $N_{max}$ [kN]	Priehyb pri $N_{max}$ [mm]	Nárast odolnosti [%]	Odolnosť pri porušení prierezu [kN]	Celkový priehyb [mm]
S1	-	-268,4	34,4	-	259,5	46,7
S2.0	-	-337,1	37,6	25,6	320,5	52,5
S3.0		-324,8	37,8	21,0	304,4	60,4
S2.1	Zaťažené, odľahčené a zosilnené	-299,7	35,6	11,7	277,7	63,0
S3.1		-325,1	39,4	21,1	304,9	55,2
S2.2	Zaťažené a zosilnené	-299,0	39,0	11,4	282,7	61,9
S3.2		-320,1	36,3	19,3	312,8	49,2



Obr. 4.6 Priehyb v strede dĺžky testovaných stĺpov



Obr. 4.7 Priehyby skúšaných stĺpov, porovnanie priehybu v strede dĺžky stĺpa nameraného použitím LVDT a výhytkomera



Obr. 4.8 Experimentálne zaznamenané pomerné pretvorenia

V jednotlivých grafoch Obr. 4.7 sú znázornené priehyby merané v štvrtinách LVDT 2, LVDT 4 a v strede dĺžky stĺpa LVDT3 (viď Obr. 4.4). Pri stĺpoch s predchádzajúcim zaťažením je priehyb nameraný počas predchádzajúceho zaťaženia zobrazený čiarkovanou čiarou, priehyb nameraný počas skúšania až do porušenia plnou čiarou. Bodkočiarkovanou čiarou sú znázornené hodnoty priehybu namerané výchylkomermi v strede dĺžky stĺpa. Všetky pomerné pretvorenia boli merané v kritickom priereze v strede dĺžky stĺpa. Výsledky sú znázornené na Obr. 4.8. Pri všetkých testovaných stĺpoch je možné pozorovať, že strata stability v dôsledku vzperu nastala pri pomernej deformácii tlačeneho betónu približne 2800 až 3000  $\mu\text{m}/\text{m}$  (2,8 až 3,0 ‰).

V Tab. 4.6 sú prehľadne uvedené pomerné pretvorenia tlačeneho betónu a tlačných ako aj ťahaných lamiel v momente stabilného zlyhania stĺpov. Pri lamelách je uvedené aj dopočítané napätie. Pre stĺpy *Sx.0* a *Sx.1* boli namerané podobné hodnoty, čo indikuje, že predchádzajúce zaťaženie v prípade, že zosilnenie prebiehalo po úplnom odľahčení sa na následnej aktivácii materiálu neprejavilo. Pri stĺpoch *Sx.2* je zreteľný pokles pretvorení v tlačných CFRP lamelách. Tento pokles je na úrovni 20-25%.

Tab. 4.6 Pomerné pretvorenia a napätia v momente stabilného zlyhania stĺpov

Stĺp	Kritická sila $N_{\max}$ [kN]	Tlačený betón $\varepsilon_{c,c} (N_{\max})$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	Tlačené CFRP		Ťahané CFRP	
			$\varepsilon_{f,c} (N_{\max})$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	Napätie [MPa]	$\varepsilon_{f,t} (N_{\max})$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	Napätie [MPa]
<i>S1</i>	-268,4	2810	-	-	-	-
<i>S2.0</i>	-337,1	2990	-2720	-560	2610	640
<i>S3.0</i>	-324,8	2890	-2570	-530	2650	650
<i>S2.1</i>	-299,7	2940	-2750	-570	2670	650
<i>S3.1</i>	-325,1	2940	-2730	-570	2920	710
<i>S2.2</i>	-299,0	3020	-2110	-440	2740	670
<i>S3.2</i>	-320,1	2890	-2260	-470	2440	600

Napätie v ťahaných lamelách bolo počítané s modulom pružnosti CFRP v ťahu 244 GPa, pre výpočet napätí v tlačnom CFRP bol použitý model pružnosti na úrovni 85% z ťahového.

## 4.2 Teoretická analýza

Odolnosť štíhlych stĺpov je vyjadrená interakčným diagramom prierezu v kombinácii s  $N$ - $M$  zaťažovacou krivkou stĺpa. Na stanovenie účinkov druhého rádu boli použité metódy analýzy podľa EC2-04 a EC2-23.

Vlastná tiaž je zohľadnená cez zvýšenie počiatočnej excentricity o hodnotu priehybu v strede dĺžky vodorovne uloženého stĺpa. Okrem toho je pripočítavaný ohybový moment od zaťaženia vlastnou tiažou.

### *Metóda založená na nominálnej tuhosti EC2-04*

Pre zohľadnenie príspevku zosilnenia CFRP lamelami k ohybovej tuhosti, bola zavedená obdobná úprava ako zaviedli Sadeghian, Richardson a Fam (2013) [15] do metódy zväčšenia ohybového momentu z ACI 318. CFRP výstuž sa zohľadní analogicky ako betonárska výstuž (4.1).

$$EI = K_c \cdot E_{cm} \cdot I_c + K_s \cdot E_s \cdot I_s \rightarrow EI = K_c \cdot E_{cm} \cdot I_c + K_s \cdot E_s \cdot I_s + K_f \cdot E_f \cdot I_f \quad 4.1$$

### *Metóda založená na nominálnej krivosti podľa EC2-04 a EC2-23*

Jedná sa o zjednodušenú metódu, rozdiel medzi verziou z EC2-04 a EC2-23 je vo výpočte základnej krivosti. EC2-04 umožňovala aj približný výpočet základnej krivosti, EC2-23 uvádza už len vzťah vychádzajúci z presnej geometrie prierezu. Pri experimentálnych stĺpoch s ohľadom na malú výšku prierezu vedie použitie presného ako aj približného výpočtu základnej krivosti k nereálnemu stavu pomerných pretvorení prierezu. Na tlačenej strane prierezu je uvažované väčšie pomerné pretvorenie než je hodnota medzného pomerného pretvorenia betónu v tlaku. Z toho dôvodu bola zavedená úprava, v ktorej je uvažované s krivosťou zodpovedajúcou dosiahnutiu medzného pomerného pretvorenia tlačenej betónu.

Zohľadnenie zosilnenia CFRP lamelami bolo zapracované do korekčného súčiniteľa  $K_r$  cez mechanický stupeň vystuženia  $\omega$ . CFRP lamely boli zahrnuté analogicky ako betonárska výstuž.

### *Všeobecná nelineárna metóda*

Zápis výpočtového algoritmu bol zrealizovaný v Exceli v programovacom jazyku VBA (Visual Basic for Applications). Výpočtový algoritmus vychádza z práce Čuháka (2013) [3], pre potreby práce v ňom boli spravené určité úpravy. Najväčšie zmeny sa týkajú zohľadnenia histórie zaťaženia a následného zjednodušenia výpočtového algoritmu na analýzu stĺpov zaťažených tlakovou silou a jednoosovým ohybovým momentom namiesto dvojosového ohybového momentu. V dizertačnej práci sú podrobne uvedené jednotlivé úpravy. Použité boli výpočtové metódy A a C.

#### 4.2.1 Porovnanie výsledkov výpočtových metód s experimentálnou analýzou

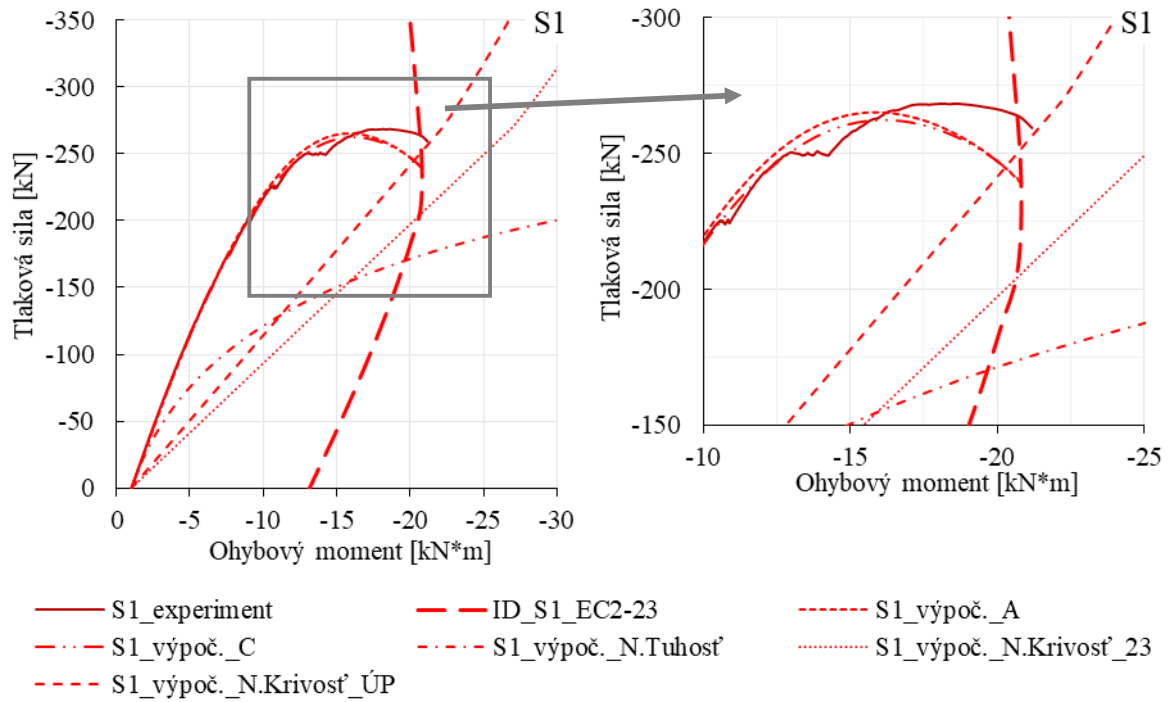
Pre porovnanie výsledkov teoretických výpočtov s experimentálne získanými hodnotami sú v dizertačnej práci spracované porovnania závislosti priehybu v strede dĺžky stĺpa a tlakovej sily, tiež závislosť ohybového momentu a tlakovej sily. Porovnané sú aj pomerné pretvorenia, ktoré je možné získať z použitých výpočtových metód len pri všeobecnej výpočtovej metóde. Číselné porovnanie výsledkov získaných jednotlivými metódami je uvedené v Tab. 4.7. Pre referenčný stĺp *S1* (červená) rovnako tak pre stĺpy zosilnené bez predchádzajúceho zaťaženia *Sx.0* (žltá) bolo možné použiť všetky výpočtové metódy. Pre stĺpy zosilňované za pôsobiaceho zaťaženia *Sx.2* (fialová) však bola použiteľná len všeobecná výpočtová metóda zohľadňujúca zaťaženie pôsobiace v momente zosilňovania. Pri stĺpoch *Sx.1* (zelená) a *Sx.2* (fialová) sú orientačne uvedené aj výsledky vypočítané pre stĺpy bez predchádzajúceho zaťaženia *Sx.0* (žltá).

Tab. 4.7 Porovnanie odolností experimentálne testovaných stĺpov s vypočítanými odolnosťami

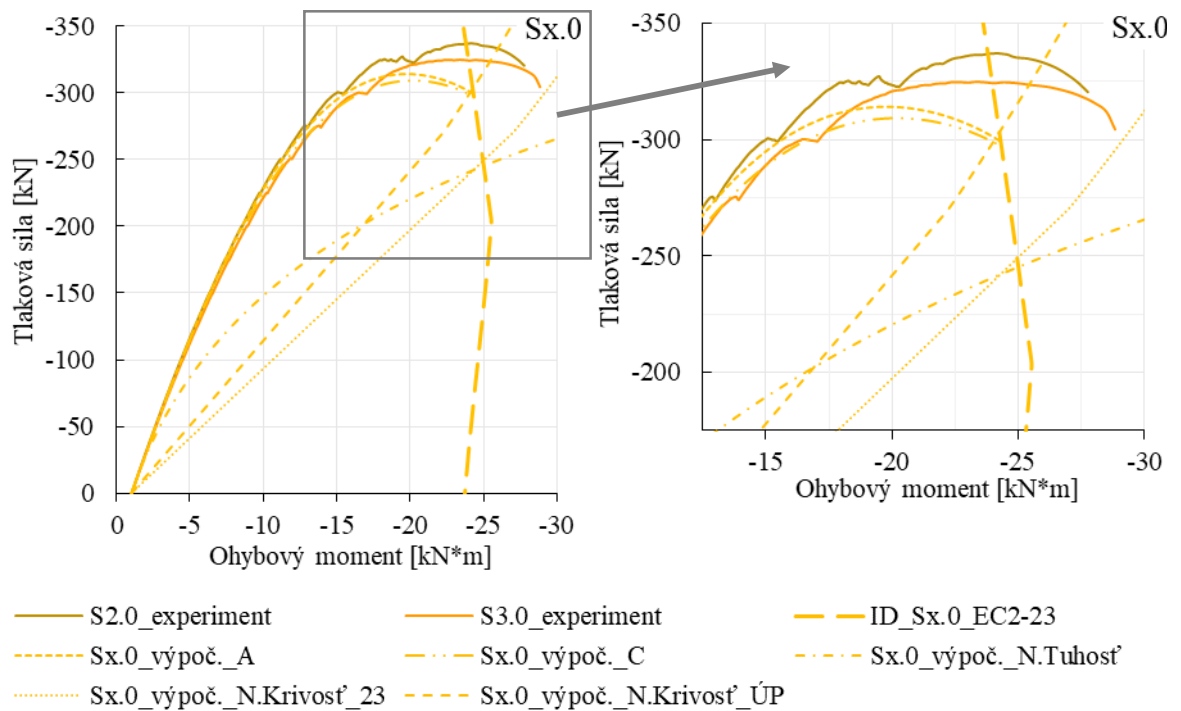
Stĺpy	Výsledky	$N_{max}$ [kN]	$e_2$ [mm]	$M$ pri $N_{max}$ [kN.m]	$\Delta N_{max}$ [%]	$\Delta e_2$ [%]	$\Delta M$ [%]	Spoľahlivosť ( $N_{max}$ )
<i>S1</i>	S1 – exp.	-268,4	34,4	-18,5	-	-	-	-
	Vš. A	-265,2	25,5	-15,8	-1,2	-25,9	-14,6	1,01
	Vš. C	-262,4	27,3	-16,1	-2,2	-20,6	-13,0	1,02
	N. T*	-170,0	79,0	-19,6	-36,7	129,7	5,9	1,58
	N. K-23*	-205,0	-65,8	-20,7	-23,6	-291,3	11,9	1,31
	N. K-ÚP*	-250,0	48,2	-20,7	-6,9	40,1	11,9	1,07
<i>Sx.0</i>	S2.0 – exp.	-337,1	37,6	-24,0	1,9	-0,3	1,7	-
	S3.0 – exp.	-324,8	37,8	-23,3	-1,8	0,3	-1,3	-
	Sx.0 – exp.	-330,9	37,7	-23,6	-	-	-	-
	Vš. A	-314,1	29,2	-19,7	-5,1	-22,5	-16,5	1,05
	Vš. C	-309,3	31,5	-20,1	-6,5	-16,4	-14,8	1,07
	N. T*	-225,0	57,7	-20,8	-32,0	53,1	-11,9	1,47
	N. K-23*	-260,0	65,8	-26,0	-21,4	74,5	10,2	1,27
	N. K-ÚP*	-325,0	45,0	-25,5	-1,8	19,4	8,1	1,02
<i>Sx.1</i>	S2.1 – exp.	-299,7	35,6	-20,9	-4,1	-5,1	-6,3	-
	S3.1 – exp.	-325,1	39,4	-23,8	4,1	5,1	6,7	-
	Sx.1 – exp.	-312,4	37,5	-22,3	-	-	-	-
<i>Sx.2</i>	S2.2 – exp.	-299,0	39,0	-21,9	-3,4	3,7	-1,4	-
	S3.2 – exp.	-320,1	36,3	-22,4	3,4	-3,5	0,9	-
	Sx.2 – exp.	-309,6	37,6	-22,2	-	-	-	-
	Vš. A	-307,7	30,5	-19,7	-0,6	-19,0	-11,1	1,01
	Vš. C	-302,9	32,8	-20,1	-2,2	-12,9	-9,3	1,02

\* Označené výpočtové metódy neumožňujú zohľadnenie zlyhania stĺpa stratou stability.

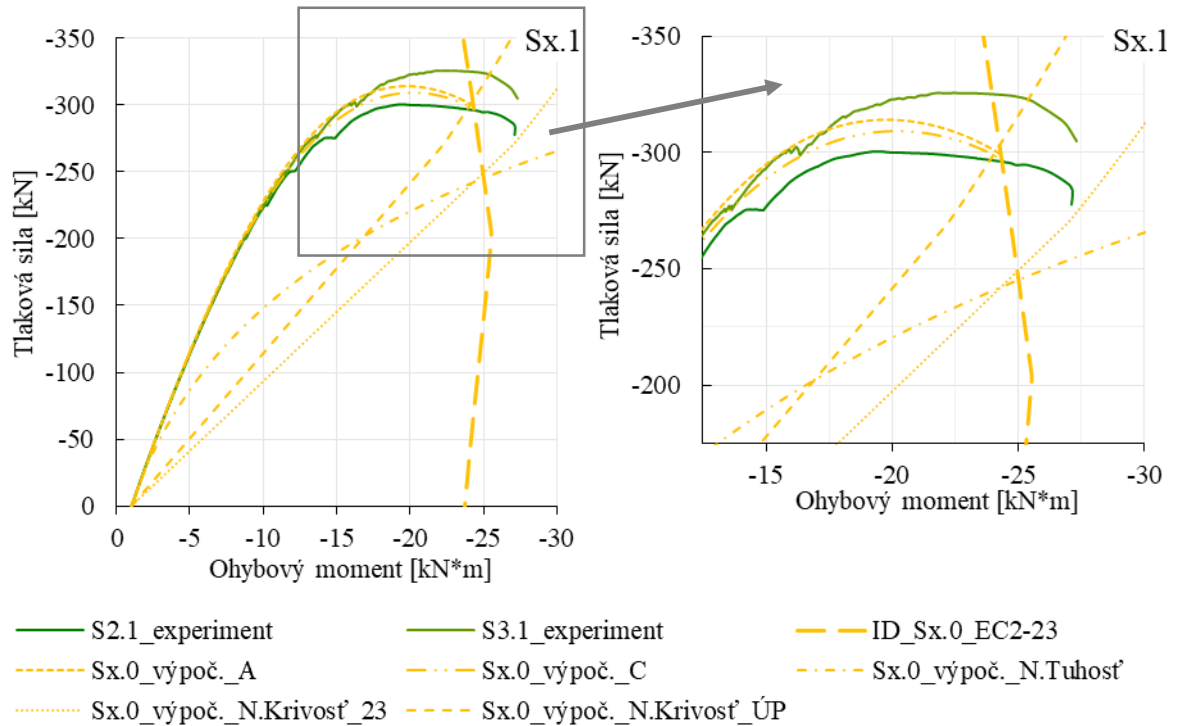
Sx.y – exp. – výsledky experimentu, Vš. A – všeobecná nelineárna výpočtová metóda, metóda A, Vš. C – všeobecná nelineárna výpočtová metóda, metóda C, N. T – metóda založená na nominálnej tuhosti, N. K-23 – metóda založená na nominálnej krivosti v súlade s EC2-23, N. K-ÚP – metóda založená na nominálnej krivosti v súlade s EC2-23 s upravenou základnou krivosťou s ohľadom na  $\epsilon_{cu}$ , Sx.0 – exp., Sx.1 – exp. Sx.2 – exp. – priemerné hodnoty z výsledkov dvojíc stĺpov.



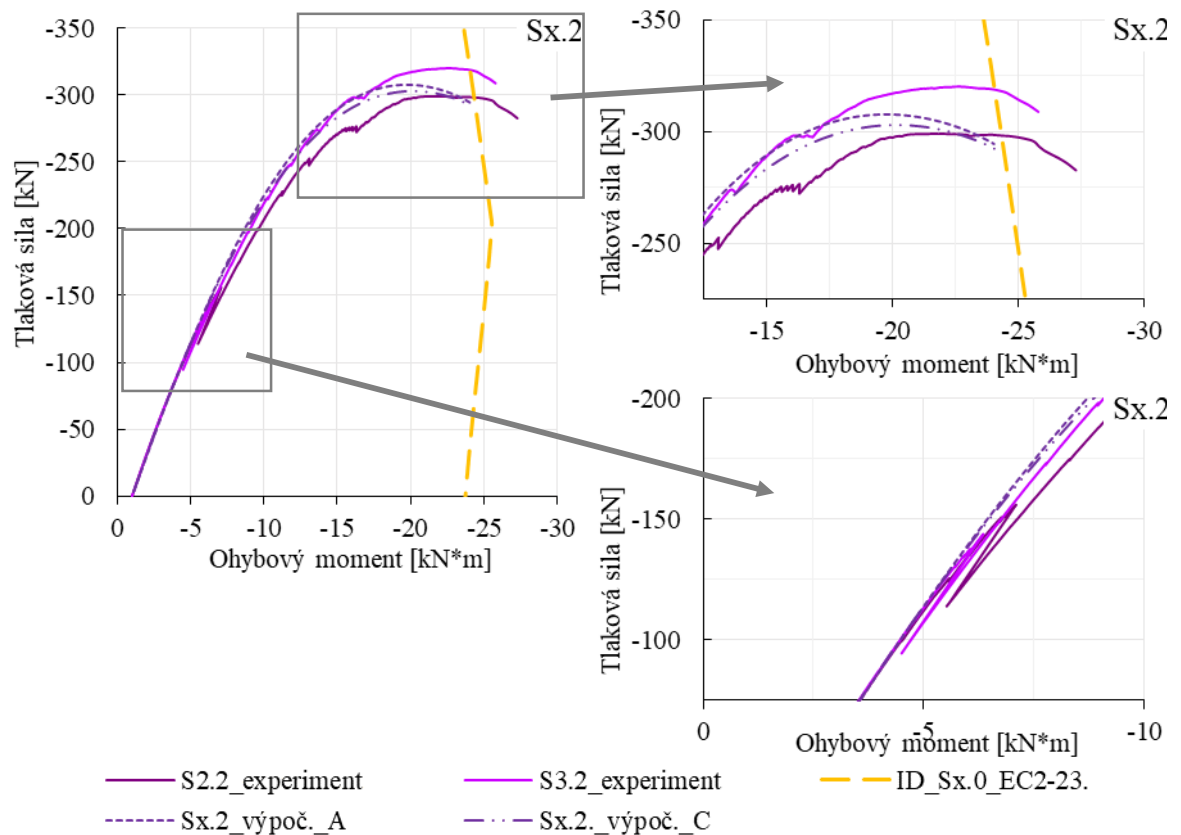
Obr. 4.9 Porovnanie ohybových momentov stanovených výpočtom a experimentom pre referenčný stĺp – S1



Obr. 4.10 Porovnanie ohybových momentov stanovených výpočtom a experimentom pre stĺpy zosilnené bez predchádzajúceho zaťaženia – Sx.0



Obr. 4.11 Porovnanie ohybových momentov stanovených výpočtom a experimentom pre stĺpy zosilnené po predchádzajúcom zaťažení – Sx.1

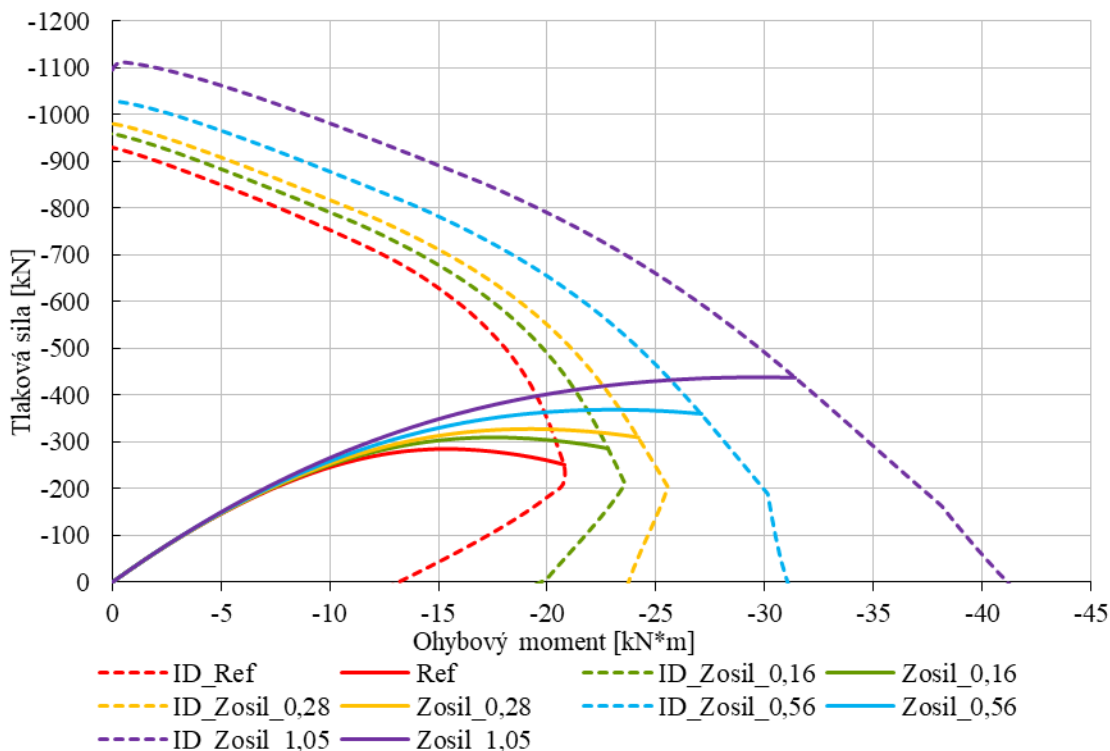


Obr. 4.12 Porovnanie ohybových momentov stanovených výpočtom a experimentom pre stĺpy zosilnené počas zaťažovania – Sx.2

Všeobecná výpočtová metóda ako jediná umožňuje zohľadniť zlyhanie stĺpov stratou stability. Pri zjednodušených metódach výpočtu dochádza k zlyhaniu stĺpov v dôsledku drvenia betónu v momente, keď  $N$ - $M$  zaťažovací krivka pretína ID prierezu. Výsledky závislosti ohybového momentu v strede dĺžky stĺpa od tlakovej sily sú graficky prezentované na Obr. 4.9 až Obr. 4.12.

#### 4.2.2 Parametrická štúdia

Verifikovaný výpočtový algoritmus všeobecnej nelineárnej metódy bol použitý v parametrickej štúdii zameranej na vplyv zmeny zvolených parametrov. Zvolená bola výpočtová metóda C. Parametrická štúdia je zameraná na sledovanie vplyvu nasledovných parametrov: štíhlosť stĺpa, stupeň vystuženia pozdĺžnym CFRP zosilnením, stupeň vystuženia pôvodnou betonárskou výstužou, pevnosť betónu stĺpa a rôzne úrovne pôsobiaceho zaťaženia v momente aplikácie zosilnenia. Parametrická štúdia vychádza z materiálových charakteristík a geometrie experimentálne skúšaných stĺpov. Výpočty sú zrealizované pre stĺpy vo zvislej polohe, na rozdiel od experimentu a predošlých výpočtov zohľadňujúcich horizontálnu polohu stĺpov. V autoreferáte sú uvedené len grafické výsledky pre rôzne stupne vystuženia pozdĺžnymi CFRP profilmi aplikovanými ako zosilnenie (Obr. 4.13). Experimentálne skúšané stĺpy boli zosilnené 6 lamelami s prierezom 10 x 1,4 mm, čo zodpovedá stupňu vystuženia 0,28% plochy prierezu stĺpa. Pre porovnanie bolo uvažované s aplikáciou 4 kusov lamiel s prierezom 10 x 1,2 mm (stupeň vystuženia 0,16%). Ďalej s aplikáciou dvojčiek lamiel, teda 12 kusov s prierezom 10 x 1,4 mm (stupeň vystuženia 0,56%). A ako posledný stupeň vystuženia bol zvolený 1,05%, ktorý zodpovedá aplikácií 4 prútov CFRP výstuže priemeru Ø10 mm.



Obr. 4.13 Závislosť  $M - N$  pre stĺpy s rôznym stupňom vystuženia aplikovaného CFRP

Parametrická štúdia ukázala, že s rastúcou štíhlosťou stĺpa je zosilnenie CFRP lamelami v drážkach efektívnejšie. Zvýšenie účinku zosilnenia zabezpečí aj zväčšenie plochy pridávaného materiálu zosilnenia. Pri zdvojnásobení plochy CFRP profilov došlo približne k dvojnásobnému zväčšeniu prírastku odolnosti. Naopak v prípade zvyšujúceho sa stupňa vystuženia pôvodného stĺpa betonárskou výstužou bol efekt zosilnenia nižší, zníženie efektu zosilnenia bolo dosiahnuté aj v prípade zvyšujúcej sa pevnosti betónu. Pokles efektu zosilnenia s narastajúcou hodnotou zaťaženia pôsobiaceho v momente aplikácie zosilnenia bol preukázaný už v experimente.

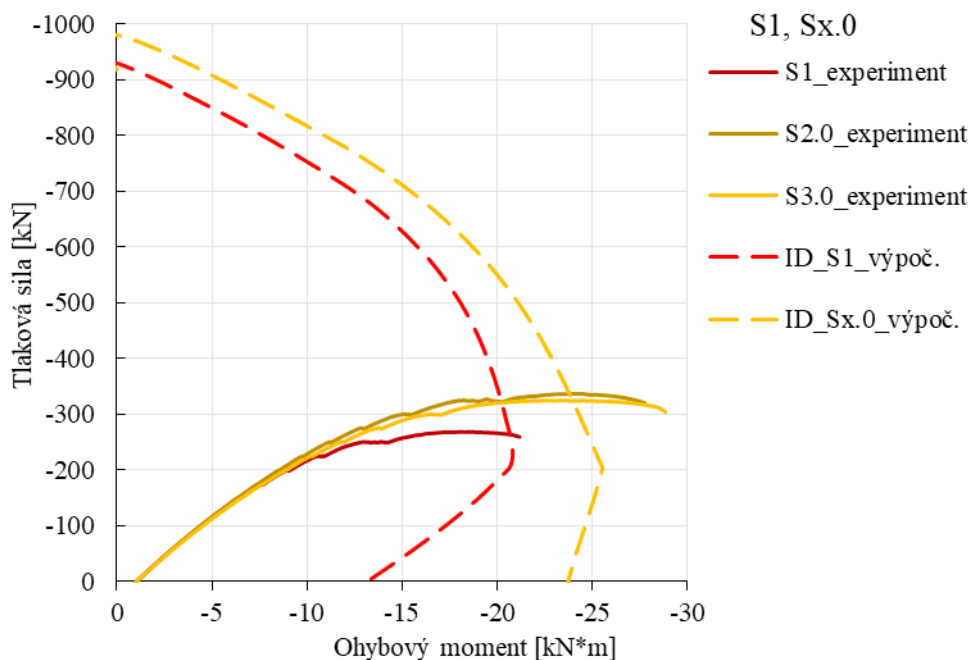
## 5 Diskusia

Experimentálny program demonštruje možnosť zosilnenia štíhlych stĺpov aplikáciou CFRP lamiel vo forme NSMR. Zohľadnením histórie zaťaženia sa experimentálny program približuje podmienkam v praxi zosilňovaných stĺpov. Teoretická analýza bola zameraná na možnosti započítania účinkov zosilnenia na výslednú odolnosť zosilnených stĺpov. Ďalej sú diskutované najvýznamnejšie výsledky získané experimentálnou a teoretickou analýzou.

### 5.1 Vplyv zosilnenia

Aplikácia CFRP lamiel vo forme NSMR viedla k zvýšeniu odolnosti experimentálne testovaných štíhlych stĺpov ( $\lambda=76$ ). Zosilnenie prispieva k odolnosti dvoma spôsobmi:

Prvým spôsobom je zvýšenie odolnosti kritického prierezu stĺpa. Príspevok lamiel k odolnosti prierezu stĺpa je zrejмый z porovnania ID referenčného stĺpa *S1* a zosilneného stĺpa *Sx.0* na Obr. 5.1.



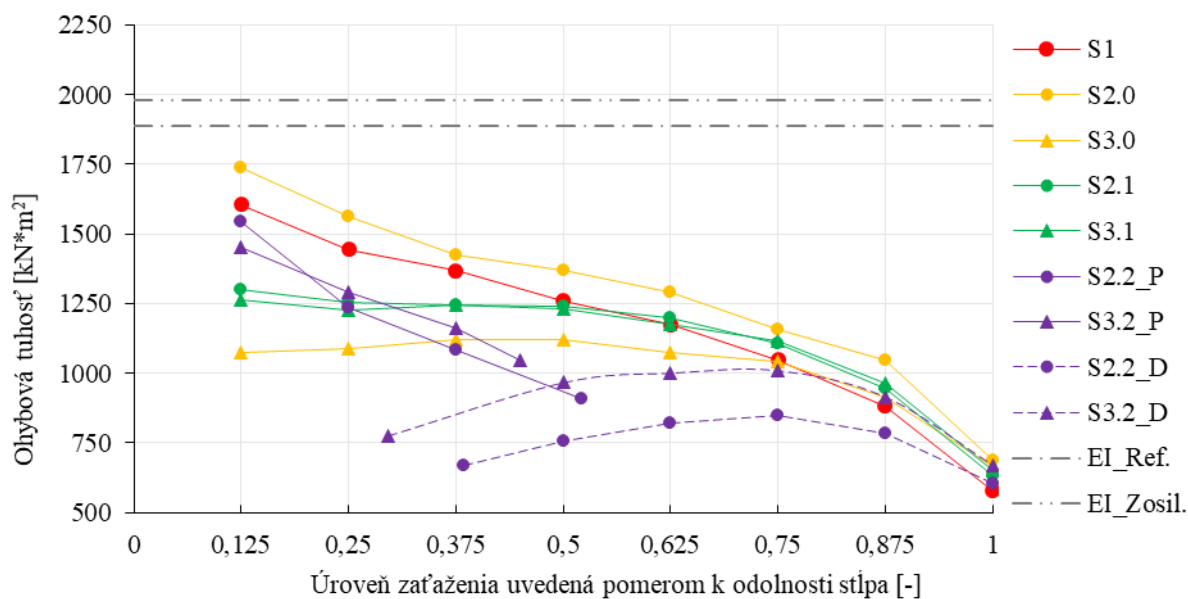
Obr. 5.1 Porovnanie odolnosti referenčného stĺpa *S1* a stĺpov *Sx.0* zosilnených bez predchádzajúceho zaťaženia

Druhý mechanizmus zosilnenia vyplýva zo zvýšenia ohybovej tuhosti stĺpa. CFRP lamely aplikované do drážok v krycej vrstve betónu vďaka svojej polohe v blízkosti povrchu stĺpa a vysokému modulu pružnosti účinne prispievajú k tuhosti stĺpa.

## 5.2 Vplyv histórie zaťaženia

Aplikácia CFRP lamiel sa prejavila pri všetkých zosilnených stĺpoch nárastom odolnosti v porovnaní s odolnosťou referenčného stĺpa (Tab. 4.5). História zaťaženia ovplyvnila výslednú odolnosť jednotlivých skupín stĺpov. Priemerné hodnoty odolnosti stĺpov s rovnakými parametrami histórie zaťaženia ukazujú, že v prípade stĺpov zosilnených bez predchádzajúceho zaťaženia *Sx.0* bol nárast odolnosti o 23%. Stĺpy *Sx.1* zosilnené po predchádzajúcom zaťažení, v dôsledku zosilnenia dosiahli prírastok odolnosti 16%. Stĺpy *Sx.2* zosilňované v zostave za pôsobenia zaťaženia dosiahli zosilnením nárast odolnosti o 15%. História zaťaženia spôsobujú zníženie tuhosti samotného stĺpa, existujúci stav pomerných pretvorení v momente aplikácie zosilnenia vedie k menšej aktivácii aplikovaného materiálu do momentu porušenia.

Na Obr. 5.2 sú znázornené ohybové tuhosti vypočítané na základe nameraných priehybov. Sivé horizontálne čiary zobrazujú ohybovú tuhosť prierezov referenčného a zosilneného stĺpa vypočítané na základe geometrie prierezu a materiálových charakteristík. S rastúcou tlakovou silou narastajú ohybové momenty a súčasne klesajú ohybové tuhosti. Najvyššie hodnoty ohybových tuhostí má stĺp *S2.0* zosilnený bez predchádzajúceho zaťaženia, *S3.0* vykazuje atypicky nižšiu tuhosť. Nasleduje referenčný stĺp *S1*, nižšie ohybové tuhosti majú stĺpy zosilnené po predchádzajúcom zaťažení *Sx.1* a najnižšiu stĺpy zosilňované za pôsobenia zaťaženia *Sx.2*. Všetky stĺpy zlyhali stratou stability pri podobných hodnotách ohybovej tuhosti v rozmedzí 580 až 690 kN\*m<sup>2</sup>.



EI\_Ref. – vypočítaná ohybová tuhosť prierezu referenčného stĺpa

EI\_Zosil. – vypočítaná ohybová tuhosť prierezu zosilneného CFRP lamelami

Obr. 5.2 Vypočítané ohybové tuhosti experimentálne skúšaných stĺpov

Z uvedeného porovnania ohybových tuhostí je jednoznačný pokles ohybovej tuhosti v dôsledku histórie zaťaženia. V Tab. 5.1 sú uvedené hodnoty pomerných pretvorení na ťahanej ako aj tlačenej strane prierezu stĺpov pred ich zosilnením pri dosiahnutí zadefinovanej hodnoty zaťaženia (cca 150 kN). Pre pomerné pretvorenia tlačeneho modelu boli dopočítané zodpovedajúce napätia a dané do pomeru s tlakovou pevnosťou použitého betónu. Z uvedeného pomeru vyplýva že zaťaženie nezosilnených stĺpov za účelom zohľadnenia histórie zaťaženia vyvolalo tlakové napätia, pri ktorých sú v betóne rozvinuté mikrotrhliny na stiku cementového tmelu s kamenivom. Tieto mikrotrhliny spolu s ťahovými trhlinami na ťahanej strane prierezu vedú k poklesu ohybovej tuhosti stĺpov s históriou zaťaženia.

Tab. 5.1 Pomerné pretvorenia na tlačennom a ťahanom povrchu kritického prierezu pri zaťažovaní nezosilnených stĺpov na úroveň približne 150 kN

Stĺp	Tlačený povrch $\epsilon_c$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	Pomer $\sigma_c / f_{cm}$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	Predpoklad mikrotrhlín	Ťahaný povrch $\epsilon_t$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	$\epsilon_{cr}$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	Predpoklad ťahovej trhliny
S2.1	-710	0,64	áno	105	100	áno
S3.1	-600	0,57	áno	370		áno
S2.2	-660	0,61	áno	365	100	áno
S3.2	-770	0,68	áno	180		áno

Napätie v tlačennom betóne bolo vypočítané na základe zistených materiálových charakteristík a parabolickému diagramu  $\sigma$ - $\epsilon$  betónu popísaného v Prílohe 1.

### 5.3 Pomerné pretvorenia v kritickom priereze

Vplyv histórie zaťaženia na odolnosť zosilnených stĺpov možno demonštrovať prostredníctvom porovnania pomerných pretvorení v CFRP lamelách. V stĺpoch  $Sx.0$  a  $Sx.1$  zosilňovaných v stave bez pôsobiaceho zaťaženia prispieva CFRP k odolnosti od samého začiatku zvyšovania zaťaženia (Obr. 4.8). Pomerné pretvorenia CFRP lamiel kopírujú priebeh pomerných pretvorení v betóne s mierne nižšími hodnotami vyplývajúcimi z polohy lamiel v priereze. V stĺpoch  $Sx.2$  zosilnených za pôsobenia zaťaženia sú od začiatku zaťažovania zaznamenané pomerné pretvorenia betónu po hodnotu zadefinovaného zaťaženia, pri ktorom došlo k aplikácii zosilnenia. Pomerné pretvorenia CFRP lamiel začínajú narastať až od zvyšovania zaťaženia po zosilnení stĺpov. Kopírujú priebeh pomerných pretvorení v betóne, avšak s výraznejším odsadením v porovnaní so stĺpmi  $Sx.0$  a  $Sx.1$ . Možno predpokladať, že s nárastom hodnoty zaťaženia pôsobiaceho v okamihu aplikácie zosilnenia bude dosiahnuté pomerné pretvorenie v CFRP lamelách klesať. Tento predpoklad bol dokázaný výpočtovo v rámci parametrickej štúdie.

### 5.4 Zahrnutie účinkov zosilnenia do výpočtov

Teoretická analýza bola venovaná zohľadneniu aplikovaného zosilnenia pri výpočte odolnosti stĺpov. Pri štíhlych stĺpoch pozostáva z analýzy prierezu a z analýzy účinkov druhého rádu, ktoré boli zohľadnené metódami uvedenými v EC2-04 a EC2-23 s výnimkou pružnostnej metódy druhého rádu z EC2-23.

Zjednodušené metódy sú navrhnuté tak, aby boli konzervatívne, neumožňujú zohľadnenie zlyhania stĺpa stratou stability, čo bol mechanizmus zlyhania experimentálne skúšaných stĺpov. Ako jediná dokáže tento spôsob zlyhania stĺpa zohľadniť všeobecná nelineárna výpočtová metóda riešená v dvoch výpočtových metódach (A a C). Tá umožnila rozdelenie výpočtu na dva intervaly a tým zohľadnenie pôsobiaceho zaťaženia v momente aplikácie zosilnenia na odolnosť stĺpov. V prvom intervale po zadefinovanú hodnotu zaťaženia je uvažované s prierezovými charakteristikami nezosilneného stĺpa. Následne v druhom intervale sa počíta s prierezovými charakteristikami zosilneného stĺpa, pričom pomerné pretvorenie v lamelách je znižované o stav pomerných pretvorení na konci prvého intervalu výpočtu.

### 5.5 Zohľadnenie CFRP v tlaku

Normy a návrhové príručky zamerané na problematiku zosilňovania betónových konštrukcií aplikáciou CFRP materiálov odporúčajú zanedbať pôsobenie CFRP v tlaku. Rešerš dostupnej literatúry naznačil, že sa jedná o konzervatívny prístup. Schopnosť CFRP lamiel aplikovaných vo forme NSMR prenášať tlakové zaťaženie bola potvrdená aj realizovaným experimentálnym programom.

V súlade s údajmi dohľadanými v dostupnej literatúre bolo v teoretickej analýze uvažované s diagramom  $\sigma-\varepsilon$  CFRP s modulom pružnosti v tlaku redukovaným na 85% modulu pružnosti v ťahu. V Tab. 5.2 sú uvedené výsledky výpočtov všeobecnou metódou A a C pre zanedbanie pôsobenia CFRP v tlaku spolu s výsledkami predošlých analýz pre stĺpy bez histórie zaťaženia  $Sx.0$ .

Tab. 5.2 Porovnanie vypočítaných odolností experimentálne testovaných stĺpov  $Sx.0$  s a bez pôsobenia CFRP lamiel v tlaku

Stĺpy	Výsledky	Pôsobenie CFRP	$N_{max}$ [kN]	$e_2$ [mm]	$M$ [kN.m]	$\Delta N_{max}$ [%]	$\Delta e_2$ [%]
Sx.0	Sx.0-exp.	?	-330,9	37,7	-23,6	-	-
	Vš. A	Tlak a ťah	-314,1	29,2	-19,7	-5,1	-22,5
	Vš. C	Tlak a ťah	-309,3	31,5	-20,1	-6,5	-16,4
	N. T	Ťah	-293,0	28,4	-18,2	-11,5	-24,7
	Vš. C	Ťah	-288,9	30,6	-18,6	-12,7	-18,8

V prípade zanedbania pôsobenia CFRP lamiel v tlaku dochádza k poklesu vypočítanej odolnosti. Rozdiel medzi výpočtom stanovenou odolnosťou a experimentom je cca 12%. Ak sú CFRP lamely v tlaku započítané, výsledky výpočtov sú bližšie experimentu, rozdiel cca 6%. Pokles je pozorovateľný aj na odolnosti prierezu stĺpa. S ohľadom na experimentálne výsledky, ako aj porovnania s teoretickou analýzou možno vysloviť záver, že v prípade experimentálnych stĺpov CFRP pôsobiace v tlaku nezanedbateľne prispieva k odolnosti zosilnených stĺpov.

## 6 Závěry

V rámci predkladanej dizertačnej práce bol zrealizovaný experimentálny program zameraný na zosilňovanie štíhlych stĺpov CFRP lamelami aplikovanými vo forme NSMR. Hlavnou premennou bola história zaťaženia zosilňovaných stĺpov. Podľa rešerše dostupnej literatúry sa jedná o prvý takýto experiment uskutočnený na vzorkách v skutočnej mierke. Experimentálne namerané hodnoty boli použité pri teoretickej analýze zameranej na započítanie efektu zosilnenia použitím výpočtových metód uvedených v EC2-04 a EC-23. Na základe zrealizovaných analýz a získaných výsledkov možno vyvodit' nasledovné závery:

- CFRP lamely s vysokým modulom pružnosti (250 GPa) aplikované NSMR metódou je možné účinne využiť na zosilnenie štíhlych stĺpov. Použitie CFRP lamiel s prierezovou plochou zodpovedajúcou iba 0,3% prierezu stĺpa bol dosiahnutý nárast odolnosti o 23% pri štíhlych stĺpoch bez predchádzajúceho zaťaženia ( $Sx.0$ ,  $\lambda=76$ ) so stupňom vystuženia 1,5%, pričom zostali zachované pôvodné rozmery prierezu stĺpa.
- Na zvýšenie odolnosti stĺpa zosilnením CFRP lamelami má výrazný vplyv história zaťaženia. Stĺpy zosilnené po predchádzajúcom zaťažení ( $Sx.1$ ) a stĺpy zosilnené za pôsobiaceho zaťaženia na úrovni približne 50% z odolnosti nezosilneného stĺpa ( $Sx.2$ ) vykázali nárast odolnosti len o 16%, resp. 15% v porovnaní s nárastom o 23% pre stĺpy bez predchádzajúceho zaťaženia ( $Sx.0$ ).
- V dôsledku predchádzajúceho zaťaženia (stĺpy  $Sx.1$ ) sa ohybová tuhosť stĺpov znižuje (Obr. 5.2). Preto, ak sa zosilnenie stĺpa realizuje až po takomto znížení jeho ohybovej tuhosti, ďalšie zaťaženie vedie k rýchlejšiemu nárastu deformácií a následnému porušeniu pri nižšej tlakovej sile.
- Najvýraznejšie sa efekt histórie zaťaženia prejavil pri stĺpoch zosilňovaných za pôsobiaceho zaťaženia. Keďže CFRP lamely boli aplikované pri najväčších deformáciách v porovnaní s ostatnými stĺpmi, do porušenia stĺpa v nich nebolo možné dosiahnuť rovnaké pomerné pretvorenia ako v lamelách aplikovaných pred akýmkoľvek zaťažením stĺpa. To má za následok menšie využitie CFRP lamiel, a teda menší príspevok k odolnosti stĺpa.
- Pri výpočte odolnosti zosilnených stĺpov metódou založenou na nominálnej krivosti dáva výpočet v súlade s EC2-23 konzervatívne hodnoty odolnosti (cca 20% spoľahlivosť). Avšak základnej krivosti zodpovedá nereálny stav pomerných pretvorení prierezu z dôvodu malej výšky  $h$ . Zavedená úprava znižuje základnú krivosť a vedie k menej konzervatívnym výsledkom. Súčasne táto metóda neumožňuje zohľadnenie nárastu ohybovej tuhosti v dôsledku zosilnenia CFRP lamelami pri analýze účinkov druhého rádu. Pri jej použití je zosilnenie možné zohľadniť len pri výpočte odolnosti prierezu.
- Pri metóde nominálnej tuhosti so zavedením zmeny modelu umožňujúcej zohľadnenie príspevku CFRP lamiel k ohybovej tuhosti stĺpa pri analýze účinkov

druhého rádu bola dosiahnutá najkonzervatívnejšia výpočtová odolnosť (37% nezosilnený stĺp resp. 32% stĺpy zosilnené bez predchádzajúceho zaťaženia).

- Najlepšia zhoda s experimentálnymi výsledkami bola dosiahnutá pri použití všeobecnej nelineárnej výpočtovej metódy. Tá umožňuje adekvátne zohľadnenie použitých materiálov a zvolenej metódy zosilnenia ako aj mechanizmu zlyhania stĺpa v dôsledku straty stability. Priblížené boli dve metódy, A a C. Pri metóde A sa rozdiely medzi teoretickými výpočtami tlakovej odolnosti a experimentálnymi výsledkami pohybovali v rozsahu 1 až 5%, pri metóde C to bolo v rozsahu 2 až 7%. Zároveň jedine všeobecná nelineárna metóda umožňuje zohľadnenie aplikácie zosilnenia za pôsobiaceho zaťaženia.
- Na základe získaných výsledkov možno konštatovať efektívny príspevok CFRP lamíel pôsobiacich v tlaku k celkovej odolnosti stĺpa. Aplikácia CFRP lamíel v drážkach bránila ich vybočeniu a tlakovému porušeniu. Pri experimentálnych skúškach došlo k porušeniu tlačných CFRP lamíel až v momente drvenia betónu v okolí lamíel. Pri teoretickej analýze bola výpočtová odolnosť stĺpa so zanedbaním pôsobenia CFRP lamíel v tlaku nižšia o cca. 12% zatiaľ čo pri uvážení ich pôsobenia v tlaku bola nižšia len o cca. 6%.
- Parametrická štúdia ukázala, že efektívnosť zosilnenia NSMR metódou aplikácie CFRP profilov s narastajúcou štihlosťou narastá. Pri zvyšovaní stupňa vystuženia pozdĺžnym CFRP možno pozorovať priamu úmeru v náraste odolnosti. Pri zdvojnásobení plochy CFRP, je prírastok odolnosti približne dvojnásobný.
- Na základe výsledkov parametrickej štúdie je výsledný efekt zosilnenia negatívne ovplyvňovaný zvyšujúcim sa stupňom vystuženia pôvodnou výstužou. Mierne negatívne pôsobí zvyšovanie pevnosti betónu stĺpa. To znamená, že efekt zosilnenia sa prejaví výraznejšie pri menších pevnostiach betónu, najčastejšie sa vyskytujúcich v starších konštrukciách, ktoré sú najčastejšie zosilňované.

## 6.1 Odporúčania pre prax

Na základe výsledkov dizertačnej práce a formulovaných záverov je možné stanoviť nasledujúce odporúčania pre prax:

- Zosilnenie CFRP lamelami aplikovanými do drážok v betónovej krycej vrstve je vhodný spôsob zosilnenia štíhlych stĺpov, keď je požadované len mierne zvýšenie ich odolnosti za súčasného zachovania pôvodných subtílnych rozmerov prierezu stĺpa.
- Pri návrhu a posúdení účinku zosilnenia je nevyhnutné brať do úvahy históriu zaťaženia zosilňovaného stĺpa a jej negatívny vplyv na výsledný účinok zosilnenia.
- Pre dosiahnutie čo najväčšieho možného využitia CFRP lamíel v zosilňovanom priereze je potrebné maximálne možné odľahčenie konštrukcie pred zosilňovaním

tak, aby boli lamely aplikované pri čo najnižších pomerných pretvoreniach pôvodných prierezov.

- Na zosilňovanie sa odporúča použiť CFRP materiál s vyšším modulom pružnosti (viac než 200 GPa), ktorý dokáže efektívnejšie prispieť k ohybovej tuhosti stĺpa a aj pri dosiahnutí menších pomerných pretvorení CFRP zabezpečiť dostatočné silové pôsobenie.
- Pri započítaní účinku zosilnenia sú možné dva prístupy. Konzervatívnejší, pri ktorom sa účinok zosilnenia započíta len do odolnosti prierezu, analýza účinkov druhého rádu sa zrealizuje s parametrami nezosilneného stĺpa. Presnejší prístup, pri ktorom sa účinok zosilnenia zohľadní pri výpočte odolnosti zosilneného prierezu ako aj pri analýze účinkov druhého rádu.

## 6.2 Odporúčania pre ďalší výskum

Pri spracovávaní výsledkov experimentálnej a teoretickej analýzy predkladanej dizertačnej práce vyplynuli nasledujúce odporúčania a námety pre ďalší výskum, ktoré by doplnili poznanie v tejto oblasti:

- Rozšíriť databázu experimentálne testovaných štíhlych stĺpov zosilňovaných CFRP lamelami o rôzne úrovne zaťaženia pôsobiaceho počas realizácie zosilnenia, ale najmä rôzne úrovne predchádzajúceho zaťaženia s nasledovným úplným či čiastočným odľahčením pred aplikáciou zosilnenia.
- Podrobný výskum zameraný na sledovanie pomerných pretvorení v priebehu všetkých fáz zaťažovania, odľahčovania a zosilňovania pre stanovenie zostatkových plastických pretvorení.
- Overiť možnosť použitia iných prierezov CFRP materiálov (výstužné prúty namiesto lamiel) na zosilňovanie aplikáciou do drážok so zameraním sa na ich využitie aj v tlakovej oblasti namáhania.

## 7 Zoznam použitej literatúry

- [1] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures* (ACI 440.2R-17). Farmington Hills (MI): American Concrete Institute, May 2017. 440 s. ISBN 978-1-945487-59-0.
- [2] BLIKHARSKYY, Y. et al. Strengthening RC eccentrically loaded columns by CFRP at different levels of initial load. *Engineering Structures*, 2023, Vol. 280, no. 1, art. no. 115694. ISSN 0141-0296.
- [3] ČUHÁK, M. *Nelineárna analýza betónových konštrukcií. Dvojosový ohyb s osovou silou v tlačených štíhlych prvkoch*: dizertačná práca. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2013. 110 s.
- [4] *Design Manual No. 3: Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers*. Winnipeg: ISIS Canada, 2007. ISBN 0-9689006-6-6.
- [5] ERSOY, U., TANKUT, A.T., SULEIMAN, R. Behavior of jacketed columns. *ACI Structural Journal*, 1993, Vol. 90, no. 3 (May-June), s. 288–293. ISSN 0889-3241.
- [6] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Brussels, 2004.
- [7] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). *EUROPEAN STANDARD EN 1992-1-1:2023 — General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures*. Brussels: CEN, 2023, s. 1–402.
- [8] FIB BULLETIN 40. *FRP reinforcement in RC structures*. Lausanne: Fédération internationale du béton (fib), 2007. ISBN 9782883940802.
- [9] KHORRAMIAN, K. – SADEGHIAN, P. Performance of high-modulus near-surface-mounted FRP laminates for strengthening of concrete columns. *Composites Part B: Engineering*, 2019, vol. 164, s. 90–102. ISSN 1359-8368.
- [10] KHORRAMIAN, K. – SADEGHIAN, P. Slender RC columns strengthened with a novel hybrid strengthening system of external longitudinal and transverse FRPs. In *Journal of Structural Engineering* [online]. 2021, Vol. 147, no. 10, s. 1–16.
- [11] KRAINSKYI, P. et al. Influence of loading level on the bearing capacity of RC columns strengthened by jacketing. In VATULIA, G. et al., eds. *MATEC Web of Conferences* [online]. 2018. Vol. 230, no. January, s. 02013.
- [12] MORSY, A.M. – EL-TONY, M. Repair of pre-loaded RC columns using external CFRP sheets and embedded longitudinal steel reinforcement. In *14th International Conference Structural Faults and Repair*, Edinburgh, Scotland, UK, 2012.
- [13] MOSTOFINEJAD, D. - MOSHIRI, N. Compressive strength of CFRP composites used for strengthening of RC columns: comparative evaluation of EBR and grooving methods. In *Journal of Composites for Construction*. 2015. Vol. 19, no. 5, s. 04014079.
- [14] PERRONE, M. et al. CFRP-Based Strengthening Technique to Increase the Flexural and Energy Dissipation Capacities of RC Columns. In *Journal of Composites for Construction*. 2009. Vol. 13, no. 5, s. 372–383.
- [15] SADEGHIAN, P. et al. Design-oriented analysis of slender RC columns strengthened with longitudinal high modulus CFRP Laminates. In *28th Annual Technical Conference of the American Society for Composites 2013, ASC 2013*. 2013
- [16] SOUDKI, K. - ALKHRDAJI, T. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-02). In *Structures Congress 2005*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2005, s. 1–8.
- [17] STN EN 1992-1-1+A1 *Eurokód 2: Navrhovanie betónových konštrukcií. Časť 1-1: Všeobecné pravidlá a pravidlá pre budovy*. Brussels: CEN-CENELEC, 2015. ISBN ISC 91.010.30; 91.080.40.