

Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta

Ing. Adam Petrík

Autoreferát dizertačnej práce

Inovatívne spoje moderných konštrukcií z ocele a dreva v kombinácii s betónom

na získanie akademického titulu „philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“

v doktorandskom študijnom programe:

Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb

v študijnom odbore:

stavebníctvo

Forma štúdia:

denná

Miesto a dátum:

Bratislava, máj 2022

Dizertačná práca bola vypracovaná na Stavebnej fakulte Slovenskej technickej univerzity v Bratislave na Katedre kovových a drevených konštrukcií.

Predkladateľ: **Ing. Adam Petřík**
Stavebná fakulta STU
Katedra kovových a drevených konštrukcií
Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovenská republika

Školiteľ: **doc. Ing. Rudolf Ároch, PhD.**
Stavebná fakulta STU
Katedra kovových a drevených konštrukcií
Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovenská republika

Oponenti: **doc. Ing. Magdaléna Štujberová, PhD.**
Stavebná fakulta STU
Katedra kovových a drevených konštrukcií
Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovenská republika

prof. Ing. Vincent Kvočák, PhD.
Stavebná fakulta TUKE
Oddelenie kovových a drevených konštrukcií
Vysokoškolská 4, 042 00 Košice, Slovenská republika

prof. Ing. Jozef Lapos, PhD.

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa 22.8.2022

o 10:30 h na

.....
prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.
Dekan Stavebnej fakulty Slovenskej technickej univerzity v Bratislave

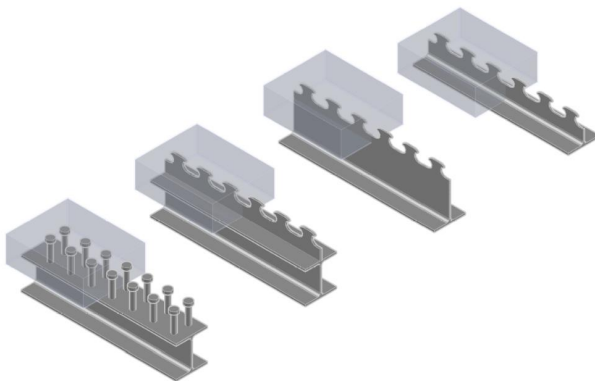
1. Úvod

Spriahnuté konštrukcie predstavujú efektívne riešenie nosných konštrukcií, ktoré vznikli spolupôsobením viacerých materiálov v rámci konštrukčného prvku. Často sa tak dosiahne lepšie využitie jednotlivých materiálov. Práve vďaka týmto faktorom v súčasnosti rastie ich popularita a využitie. Nezávisle na tom sa však zvyšujú nároky architektov na štíhle a estetické konštrukcie, ako aj s ohľadom na možnosť prefabrikácie a zníženia času dopravných obmedzení, na čo spriahnuté konštrukcie dokážu reflektovať, je možné vytvoriť štíhle konštrukcie, ktoré vedia spoľahlivo prenášať zaťaženie počas životnosti stavby.

S rastúcou požiadavkou na pridanú architektonickú hodnotu rastie dopyt po estetických, štíhlych a vysoko-odolných stavebných konštrukciách s maximálnou možnou mierou využitia. Zvýšený záujem o navrhovanie spriahnutých konštrukcií je v súčasnosti spojený s rastom požiadaviek na únosnosť a efektívnosť spriahovacích prostriedkov. Preto sa už takmer 40 rokov výskum v oblasti spriahnutých konštrukcií zaoberá inovatívnymi metódami spriahovania materiálov. V tejto oblasti sa vývoj zameriaval na spriahovacie lišty ako efektívnu a účinnú náhradu trŕňov s hlavou či iných spriahovacích prostriedkov.

Uvedené spriahovacie lišty možno charakterizovať ako kontinuálny pás ocele, v ktorom sú umiestnené otvory požadovaného tvaru v rovnomernom vzájomnom odstupe. Často je táto lišta navarená k hornej pásnici oceľového profilu alebo vytvorená priamo v stene profilu. Táto lišta je zapustená do vystuženej betónovej dosky, pričom prúty betonárskej výstuže často prechádzajú cez otvory lišty. Takto vytvorená konštrukcia je výhodne namáhaná v oboch častiach – oceľová časť ťahom, betónová časť tlakom.

Otvory predmetných spriahovacích lišt sa v priebehu rokov menili vplyvom rôznych požiadaviek. Spočiatku uzatvorené otvory boli nahradené rôznymi tvarmi otvorených typov otvorov, čím sa zjednodušilo kladenie priečnej betonárskej výstuže cez tieto otvory a taktiež sa začalo dbať na použitie takých tvarov otvorov, aby bola možná realizácia lišt rezom plameňa steny oceľového profilu, pričom sa vyrobí dva oceľové polovičné profile so spriahovacou lištou v stene profilu (v prípade niektorých tvarov dokonca jedným rezom).



Obrázok 1: Príklady spriahnutých nosníkov pomocou trŕňov s hlavou a perforovaných lišt

Tieto inovatívne metódy spriahovania je možné využiť aj v prípade drevobetónových konštrukcií. V prípade týchto konštrukcií je možné pozorovať využívanie viacerých druhov spriahovacích prostriedkov v praxi ako sú napr. protichodne umiestené spriahovacie skrutky či lišty HBV®. Napriek malému rozsahu výskumu vo svete existuje možnosť použiť spriahovacie lišty s otvormi ako alternatívu k spriahovacím prostriedkom.

2. Ciele práce

Cieľom tejto práce je v maximálnej možnej miere analyzovať správanie sa jednotlivých šmykových lišt s otvormi pod vplyvom pozdĺžneho šmyku. Konkrétne sa jedná o:

1. Zhrnutie a analýzu už uskutočneného výskumu v oblasti perforovaných šmykových lišt
2. Analýzu vybraných parametrov vybraných typov spriahovacích lišt prostredníctvom numerických simulácií v programe ANSYS
3. Návrh nového, prípadne optimalizácia už existujúceho tvaru šmykovej lišty
4. Verifikáciu vlastností vytvorenej šmykovej lišty pomocou experimentov
5. Analýzu mechanizmov porušenia, hodnôt odolností a ich porovnanie s výsledkami experimentov podobných typov lišt
6. Využitie šmykových lišt ako alternatívu k existujúcim spôsobom spriahovania v drevobetónových konštrukciách

Napriek tomu, že počas takmer štyridsiatich rokov intenzívneho výskumu došlo k vytvoreniu viac než dvadsiatich typov otvorov (či už uzavretých, alebo otvorených), boli z nich vyselektované tvary s vysokou mierou používania v praxi, či s dobrými vlastnosťami voči statickému či cyklickému zaťaženiu pre numerickú analýzu v programe ANSYS.

V prípade numerických simulácií sa kladol dôraz najmä na otázky ohľadom stanovenia hodnoty celkovej odolnosti šmykového spojenia a jej vývoj vzhľadom na rastúcu pozdĺžnu deformáciu, pričom sledované boli všetky napätostné a deformačné parametre modelu. Taktiež by numerické simulácie mali zodpovedať otázku, na koľko je možné aproximovať odolnosť spojenia v prípade modelov s lineárne elastickými vlastnosťami jednotlivých materiálov a či a s akou presnosťou numerické modely vystihujú už zadané modely porušenia spolu s hodnotami únosnosti už skúmaných spriahovacích lišt.

Okrem toho sa v ďalšej fáze výskumu predpokladá overenie vlastností šmykového spojenia so spriahovacou lištou aj experimentálne pre porovnanie výsledkov z numerických simulácií a realizovaných experimentov s cieľom zhodnotiť, na koľko sú jednotlivé prístupy k určovaniu odolnosti šmykového spojenia presné a či je možné pri návrhu miesta komplikovaného nelineárneho modelovania zistiť odolnosť šmykového spojenia jednoduchým lineárnym modelom a takisto aj určiť stupeň neistoty, ktorá sa dosiahne stanovením hodnoty odolnosti v prípade jednotlivých spôsobov.

V prípade nových alebo optimalizovaných tvarov by výskum mal dať odpoveď na otázku, či je vôbec možné efektívne vytvárať a optimalizovať už vzniknuté tvary, prípadne akým spôsobom cielene zlepšiť parametre šmykového spojenia bez zvyšovania nepriaznivých efektov a za zachovania výhodných výrobných parametrov. Taktiež by výskum mal predostrieť odpoveď na to, či optimalizácia konkrétneho tvaru lišty sa dá ideovo využiť aj

v prípade iných typov listů, prípadne, či existujú aj typy listů, pri ktorých nie je možné inžinierskymi metódami dospieť k zlepšeniu odolnosti.

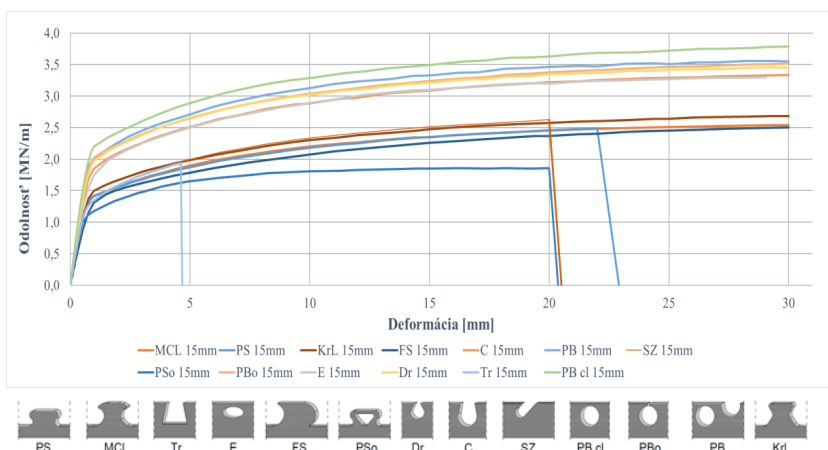
V prípade drevených konštrukcií by práca mala predložiť argumenty, nakoľko je vhodné použitie takýchto listů v prípade drevobetónových konštrukcií, aké bude správanie sa takéhoto konštrukčného prvku vplyvom zaťažovania, nakoľko tuhé bude dané šmykové spojenie a či použitím spriahovacích listů dôjde k zlepšeniu parametrov spojenia drevo-betón.

3. Numerické analýzy šmykového spojenia

3.1. Numerická analýza s lineárnymi parametrami betónu a nelineárnymi parametrami ocele

Ako prvé boli v rámci numerických analýz riešené samotné oceľové spriahovacie listy. Zadefinovanie lineárnych materiálových parametrov oceľovej spriahovacej listy by vo veľkej miere skreslilo výsledky a vyvolalo veľmi vysoký stupeň nepresnosti výsledku v porovnaní s hodnotami získaných pri experimentoch. Zavedenie nelinearít do materiálového modelu ocele nie je náročné a po transformovaní technického pracovného diagramu na skutočný pracovný diagram je tento diagram, prípadne bilineárny pracovný diagram, vhodný ako materiálový vstup ocele pri simuláciách. V prípade betónu je to komplikovanejšie, avšak pri numerických analýzach zameraných na správanie sa a odolnosť oceľovej časti šmykového spojenia, je možné betónovej časti spojenia prísúdiť lineárne parametre.

Na základe predchádzajúceho výskumu realizovaného na viacerých univerzitách bolo vybratých 13 rôznych spriahovacích listů ako vzorka, ktorá by mala objasniť vplyv rôznych geometrií otvorov na celkovú odolnosť spriahovacej listy. V tejto fáze výskumu je možné porovnať nielen ich celkovú odolnosť, ale aj kritické miesta. Porovnanie celkovej odolnosti šmykových spojení z numerických simulácií je možné vidieť na obr. 2.



Obrázok 2: Porovnanie celkovej odolnosti šmykových spojení z numerických simulácií

Z porovnania je možné vidieť, že spriahovacie lišty s viacerými tvarmi otvorov či šmykových konektorov dosiahli celkovú pozdĺžnu deformáciu 30 milimetrov. Niektoré sice túto deformáciu nedosiahli, no ich duktilita je stále akceptovateľná vzhľadom na hodnotu uvedenú v Eurokóde 4 [3]. Z porovnania výsledkov (obr. 2) vyplýva že medzi spriahovacie lišty s najvyššou odolnosťou ocelevej časti patria typy Perfbond.

Taktiež došlo k porovnaniu hodnôt odolností pri zmene hrúbky – sledovalo sa tým potvrdenie hypotézy, že zvyšovaním hrúbky lišty sa zvýši aj jej odolnosť. Numerickou analýzou sa predpoklad potvrdil, a to v prípade každého z typov spriahovacích lišt. Ako príklad sú uvedené dáta pre 4 rôzne typy lišt v tabuľke č.1.

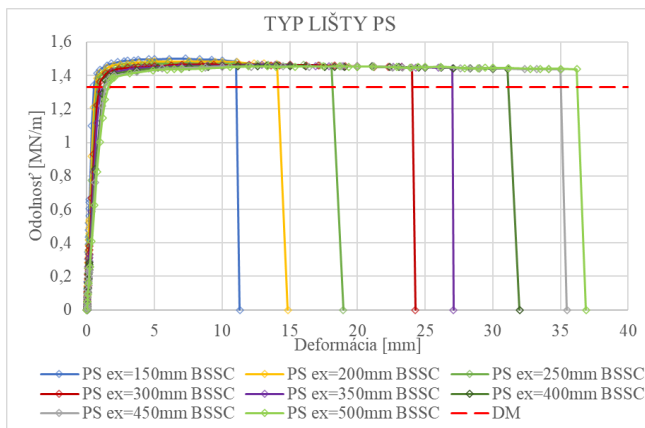
Tabuľka 1: Závislosť celkovej odolnosti od hrúbky spriahovacej lišty

Typ lišty	Hrúbka [mm]	Odolnosť [kN]	Odolnosť [%]	Odolnosť [%]
MCL	10	1 271,48	100	66,7
	15	1 906,08	149,9	100
	20	2 541,80	199,9	133,4
KrL	10	1 342,28	100	66,7
	15	2 013,00	149,9	100
	20	2 686,80	200,1	133,5
PS	10	1 236,26	100	66,3
	15	1 863,86	150,7	100
	20	2 512,60	203,2	134,8
PB	10	1 772,90	100	66,6
	15	2 660,80	150	100
	20	3 555,80	200,5	133,6

Výskum sa následne zamerl na analýzu vplyvu veľkosti šmykových konektorov na odolnosť a duktilitu ocelevej časti šmykového spojenia. Analyzované boli dva typy spriahovacích lišt - MCL (modified clothoidal) a PS (PZ; puzzle-shaped). Výber týchto typov šmykových konektorov je výhodný, nakoľko je možné porovnať dáta zo simulácií s hodnotou odolnosti z návrhového postupu [34]. V prípade konštantnej hrúbky a materiálu existuje predpoklad, že zväčšujúcou sa veľkosťou šmykového konektora sa zvýši jeho odolnosť. Vztiahnutím tejto odolnosti na jednotkovú dĺžku je odolnosť ocelevej časti šmykového spojenia konštantná pre akúkoľvek veľkosť parametra e_x . Taktiež existuje predpoklad zväčšujúcej sa duktility šmykovej lišty vplyvom zvyšujúceho sa parametra e_x .

Zmena parametru e_x pri simuláciách bola nasledovná – rešpektovali sa hraničné hodnoty parametru e_x uvedené v [34], konkrétne hodnota 150 mm a 500 mm. Medzi týmito hodnotami boli analyzované hodnoty parametru e_x ako násobky 50 mm. Vzorky v numerických simuláciách boli zaťažované až do porušenia vzorky.

Ako prvý bol analyzovaný typ spriahovacej lišty PS a to konkrétne s materiálovým vstupom ocele vo forme bilineárneho pracovného diagramu (BSSC – bilinear stress-strain curve). Výsledky je možné vidieť v obr. č.3. Na ňom vidieť krivky pomeru deformácie a odolnosti pre každú hodnotu parametru e_x , ako aj hodnotu odolnosti stanovenú na základe návrhového manuálu [34]. Hodnoty odolností sú pre všetky hodnoty parametru e_x takmer rovnaké, rozdiel je do 3%. Z grafu je možné vidieť, že po dosiahnutí maximálnej hodnoty celkovej odolnosti táto hodnota pozvoľna klesá až do momentu porušenia vzorky.

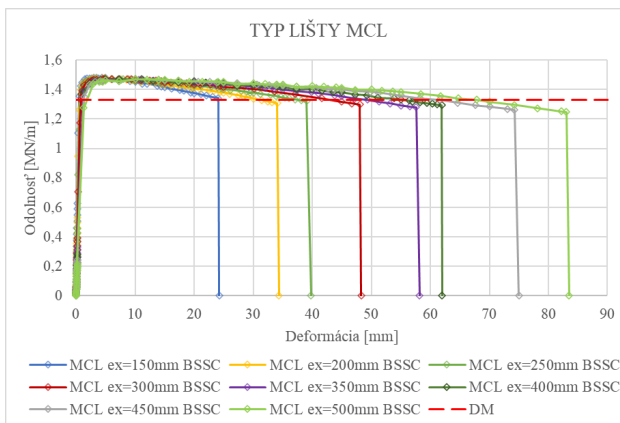


Obrázok 3: Porovnanie odolností sprahovacích lišt typu PS pre rôzne hodnoty e_x

Duktilita je úmerná veľkosti šmykového konektoru – v prípade najnižšej hodnoty sa vzorka porušila pri deformácii 11,3 mm, v prípade najvyššej hodnoty e_x je to 36,9 mm. Aj napriek využitej aproximácii je možné tvrdiť, že oceľová časť spojenia dosahuje priaznivú hodnotu duktility, čím boli splnené podmienky normy EN 1994 [3].

Pri porovnaní hodnôt šmykovej odolnosti s hodnotou stanovenou podľa vzťahu z [34] (1,331 MN/m) je možné si všimnúť, že táto hodnota je nižšia v porovnaní s maximálnymi hodnotami odolností získanými z numerických simulácií (blízko hodnoty 1,45 MN/m) – hodnota celkovej odolnosti šmykového spojenia z numerických simulácií sa pohybuje od 109,24 % po 112,74 % výpočtovej hodnoty odolnosti.

V druhej etape analýzy sa pozornosť zamerala na druhý typ spriahovacej lišty – MCL, taktiež s materiálovým vstupom ocele vo forme bilineárneho pracovného diagramu (BSSC – bilinear stress-strain curve). Výsledky je možné vidieť v obr. 4.



Obrázok 4: Porovnanie odolností sprahovacích lišt typu MCL pre rôzne hodnoty e_x

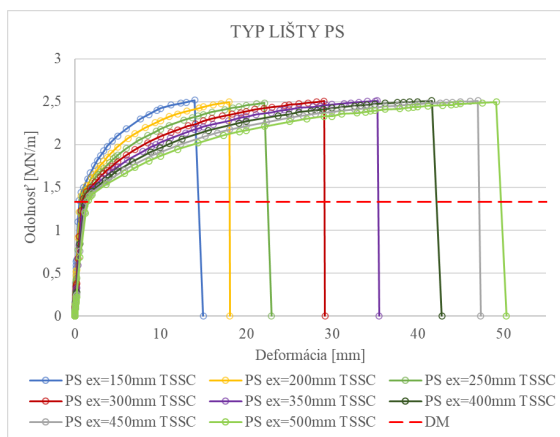
Maximálna hodnota odolnosti získaná zo simulácií je v prípade všetkých veľkostí konektorov takmer rovnaká; rozdiel medzi hodnotami maximálnej odolnosti predstavuje len 1%. Taktiež po dosiahnutí maximálnej odolnosti začne deformačná krivka klesať až po moment porušenia vzorky, tento krát je tento pokles strmší v porovnaní s lištou PS.

Duktilita je úmerná veľkosti šmykových konektorov, pričom v prípade najnižšej hodnoty sa vzorka porušila pri deformácii 24,3 mm, v prípade najvyššej hodnoty e_x je to 83,5 mm – nárast duktility je teda viac ako dvojnásobný. Rovnako je možné konštatovať, že duktilita má dostatočnú hodnotu pre splnenie podmienok normy EN 1994 [3].

Porovnanie hodnôt šmykovej odolnosti získaných zo simulácií a pomocou vzťahu z [34] (1,331 MN/m) je taktiež analyzované - maximálne hodnoty odolnosti sú vyššie (okolo hodnoty 1,45 MN/m) v porovnaní s výpočtovou hodnotou odolnosti ocelevej časti spojenia. V závislosti od veľkosti parametru e_x sa hodnota celkovej odolnosti šmykového spojenia z numerických simulácií pohybuje v podobnej úrovni ako v predchádzajúcej analýze.

V druhej polovici analýzy došlo k zmene materiálovej charakteristiky ocelevej časti spojenia – použil sa skutočný pracovný diagram ocele (TSSC – true stress-strain curve).

Ako prvá analyzovaná lišta typu PS. Výsledky numerických analýz je možné vidieť na obr. 5.



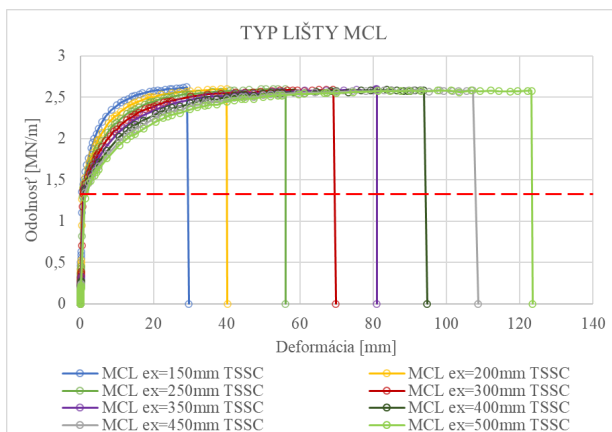
Obrázok 5: Porovnanie odolností sprahovacích lišt typu PS pre rôzne hodnoty e_x

Zaťažovacia krivka rastie až do porušenia vzorky - maximálnu odolnosť šmykového spojenia dosiahne tesne pred porušením. Jej hodnota je približne rovnaká pre všetky veľkosti šmykových konektorov (okolo 2,5 MN/m), v tomto prípade je rozdiel medzi hodnotami maximálnej odolnosti ocelevej časti šmykového spojenia do 1%.

V prípade použitia skutočného pracovného diagramu ocele sa duktilita zvýšila – v prípade najnižšej hodnoty e_x sa vzorka porušila pri deformácii 14,9 mm, v prípade najvyššej hodnoty e_x je to 50,4 mm. V porovnaní s analýzou, pri ktorej bol použitý bilineárny pracovný diagram ocele činí nárast duktility o 32 až 37 %, čím došlo k ďalšiemu zlepšeniu už priaznivých hodnôt z predchádzajúcich simulácií. Stále platí, že duktilita ocelevej časti je úmerná veľkosti šmykového konektora.

V prípade výpočtovej hodnoty (vyrátanej podľa príslušného vzťahu uvedeného v [34]) sa jej veľkosť (1,331 MN/m) nezmenila, nakoľko uvažuje len s hodnotou medze klzu materiálu. Maximálne hodnoty odolností zo simulácií dosahujú hodnoty okolo 2,5 MN/m.

V poslednej časti analýzy bola pozornosť venovaná typu spriahovacej lišty MCL, ktorej materiálový vstup bol zmenený na skutočný pracovný diagram ocele (TSSC – true stress-strain curve). Výsledky uskutočnených analýz je možné vidieť na obr. č.6.



Obrázok 6: Porovnanie odolností spriahovacích lišt typu MCL pre rôzne hodnoty e_x

Zaťažovacie krivky rastú až do momentu porušenia vzorky a maximálnu odolnosť dosiahnu tesne pred porušením ocelevej spriahovacej lišty. Ich hodnoty sú okolo 2,6 MN/m.

Duktilita šmykovej lišty je vyššia ako v prípade použitia bilineárneho pracovného diagramu – v prípade najnižšej hodnoty e_x sa vzorka porušila pri deformácii 29,6 milimetra, v prípade najvyššej hodnoty e_x je to 123,5 milimetra. Oproti analýze s použitím bilineárneho pracovného diagramu ocele činí nárast duktility hodnotu 22 až 48 percent.

Výpočtová hodnota odolnosti je stále rovnaká (1,331 MN/m), maximálne hodnoty odolností z numerických simulácií tentokrát dosahujú hodnoty okolo 2,6 MN/m.

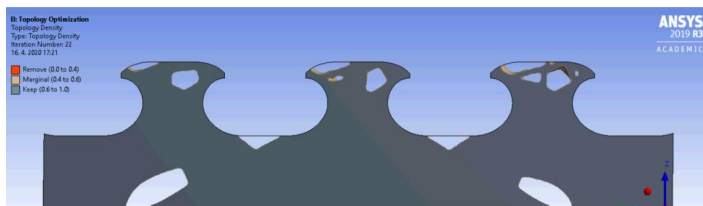
Výsledkom štúdie je pohľad na celkovú odolnosť ocelevej časti šmykového spojenia z pohľadu stanovenia hodnoty odolnosti. V prípade uvažovania výpočtovej hodnoty podľa platného návrhového postupu [34] sa táto hodnota odolnosti javí ako konzervatívna a na základe vykonaných analýz je možné konštatovať, že šmykové lišty ju dosiahnu pri nízkej alebo nulovej plastickej deformácii. V prípade použitia skutočného pracovného diagramu ocele dosahuje hodnota odolnosti ocelevej časti šmykového spojenia takmer dvojnásobnú hodnotu v porovnaní s výpočtovou hodnotou odolnosti podľa [34].

3.2. Optimalizácia tvaru existujúcich šmykových lišt

Za takmer štyridsať rokov výskumu sa skúmalo veľké množstvo spriahovacích lišt. Alternatívna možnosť k vývoju nových typov lišt je optimalizácia tvaru už existujúcich za účelom zlepšiť ich vlastnosti voči statickému či dynamickému zaťaženiu. V súčasnej dobe

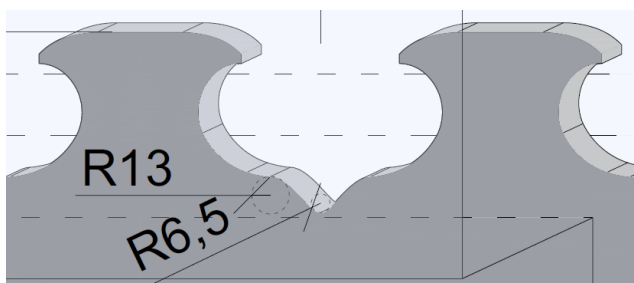
sa možnosť topologickej optimalizácie šmykových listů v prostredí numerických softvérov javí ako veľmi efektívna metóda k zvyšovaniu únosnosti šmykových spojení.

Ako prvým z analyzovaných tvarov bola spriahovacia lišta typu MCL. Jedná sa v súčasnosti o najviac využívaný typ lišty. Cieľom bolo pokúsiť sa úpravou tejto lišty zvýšiť jej odolnosť, ideálne pri zachovaní veľmi dobrých únavových vlastností. Výsledok analýzy je zobrazený na obr. 7.

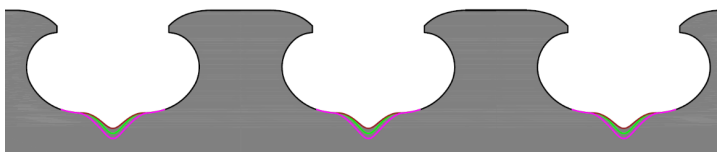


Obrázok 7: Výsledok topologickej optimalizácie spriahovacej lišty typu MCL

Ako prvý bol analyzovaný vplyv úpravy trojuholníkových oblastí medzi šmykovými konektormi. Tie boli upravené tak, aby nedošlo k vzniku vrubov a k zníženiu únavovej odolnosti šmykového spojenia. Vybratie bolo krivkovo zaoblené na základe troch iterácií s rôznou geometriou, pričom finálny variant je nasledovný: zaoblenie dvoma typmi oblúkov o polomere 13 a 6,5 mm (viď obr.8) so stredmi v horizontálnej vzdialenosti 35 mm, pričom hĺbka vybratia činila 25 mm. Porovnanie jednotlivých iterácií je možné vidieť na obr. 9.

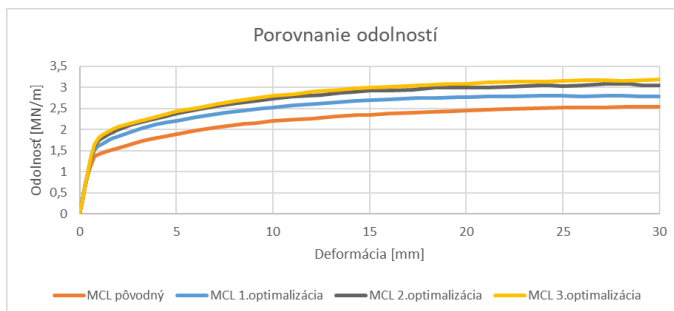


Obrázok 8: Geometria finálneho variantu vybratia medzi šmykovými konektormi



Obrázok 9: Ružovou farbou naznačená konečná verzia vybratia medzi šmykovými

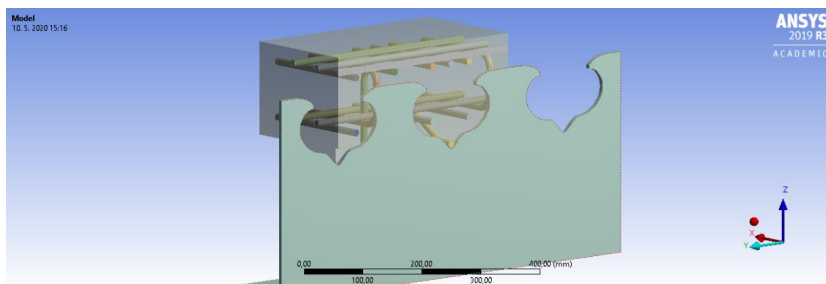
Krivky pomerov odolnosti a deformácie je možné vidieť na obr. 10. Okrem nárastu odolnosti šmykového spojenia nastal aj nárast duktility ocelevej časti šmykového spojenia.



Obrázok 10: Porovnanie odolností šmykovej lišty typu MCL po finálnej optimalizácii

Analyzované boli ešte viaceré iné úpravy geometrie lišty (napr. otvory v šmykovom konektore), no žiadna úprava nepredstavovala tak výhodný nárast odolnosti či zlepšenie iných vlastností v porovnaní s realizovaným vybratím medzi šmykovými konektormi.

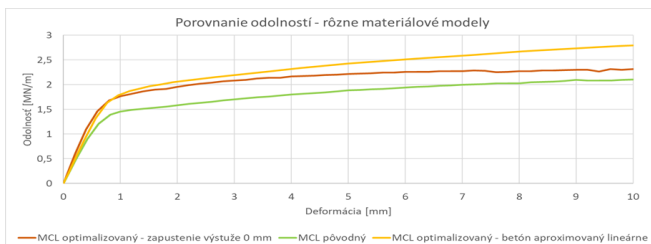
Pre komplexné overenie modifikácii v šmykovom spojení bol vytvorený aj materiálovo plne nelineárny model modifikovanej spriahovacej lišty zapustenej v betóne. Takto na-definovaný model by mal presne popisovať odolnosť a správanie sa takto upravenej lišty v prípade použitia v skutočnej konštrukcii. Do vytvorenej priehlbiny medzi šmykovými konektormi bol vložený extra prút betonárskej výstuže.



Obrázok 11: 3D model v softvéri ANSYS s vybratím medzi šmykovými konektormi a s umiestnením prútu betonárskej výstuže vo vytvorenom vybratí

Nárast odolnosti šmykového spojenia z plne materiálovo nelineárneho modelu bol porovnaný s výsledkami z modelu, kde bola materiálová charakteristika betónu lineárne aproximovaná. Predpokladalo sa, že z dôvodu krehkosti betónu bude v prípade vyšších pozdĺžnych deformácií dochádzať k porušovaniu betónu vo vytvorených priehlbínach a to bude spôsobovať postupné znižovanie celkovej odolnosti. Tento efekt mal pomôcť redukovovať pridaný prút betonárskej výstuže. Z porovnania na obr. 12 je zrejmé, že v prípade nižších deformácií sa tento predpoklad naplňuje a krivky odolnosti šmykového spojenia s upravenou lištou sú s menším rozdielom podobné. Od deformácie o hodnote cca 4 mm však červená krivka výrazne nerastie, čo je spôsobené postupným porušovaním betónovej časti vplyvom sily prenášajúcej sa z ocelevej časti spojenia. V prípade modelu s lineárnou materiálovou

aproximáciou betónu však odolnosť aj po prekročení predmetnej deformácie rasti až do sledovanej deformácie 10 mm približne lineárne. Nárast odolnosti pri 10 mm deformácii teda nedosahuje spomínaných 25%, ale sa znížil na hodnotu viac ako 10%, čo teda predstavuje pokles, no stále dostatočne veľký nárast pri zachovaní veľmi dobrej hodnoty duktility.



Obrázok 12: Porovnanie nárastu odolnosti v závislosti od použitia jednotlivých materiálových modelov v numerických simuláciách

Podarilo preukázať, že úpravou tvaru už existujúcich šmykových lišt je možné vytvoriť modifikovaný tvar lišty s vyššou odolnosťou. Podobnú analýzu je možné aplikovať aj na iné typy spriahovacích lišt (ako napr. typ PZ alebo KrL). Presnú geometriu úpravy je však potrebné podrobne vyšetriť numerickými simuláciami.

Naopak, topologickou optimalizáciou iných tvarov spriahovacích lišt ako napr. C či Dr sa preukázalo, že zvýšenie únosnosti týmto spôsobom nie je možné dosiahnuť u každého z tvaru lišty. V ich prípade sú výsledkom topologickej optimalizácie oblasti, ktorých odstránenie či iná úprava nepredstavuje nárast odolnosti spriahovacej lišty.

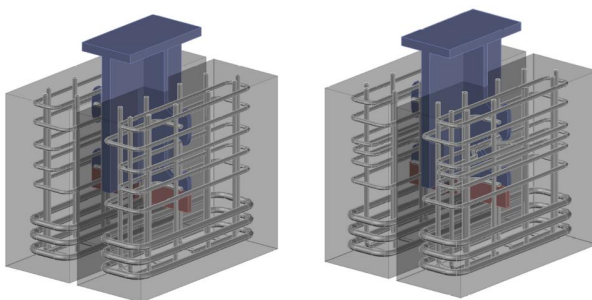
4. Experimentálna analýza šmykového spojenia

4.1. Pretláčacie skúšky skúšobných vzoriek s originálnou a modifikovanou lištou typu MCL

V rámci experimentálnej analýzy šmykového spojenia prostredníctvom spriahovacích lišt boli vykonané pretláčacie push-out testy s rešpektovaním špecifik uvedených v Eurokóde 4 [3]. Ako tvary spriahovacích lišt pre experimentálnu analýzu boli vybraté originálny a modifikovaný tvar lišty MCL. Pre obe platí, že vzdialenosť šmykových konektorov e_x je rovná hodnote 150 mm a ich výška 60 mm.

Na obr. 13 je zobrazený model oboch skúšobných vzoriek pred výrobou. Celý lícný povrch oceľových prvkov v kontakte s betónom bol pred betonážou opatrený vode odpudivou vazelinou pre zníženie trenia v čo najväčšej možnej miere. Pre zamedzenie efektu blokovej zarážky boli v na konci oceľovej časti skúšobnej vzorky umiestnené malé polystyrénové bloky, ktoré pri betonáži zabezpečili daný priestor a zároveň sa pri stláčaní ľahko deformovali.

Na líce lišt osadené tenzometre za účelom merania napätí v oceľovej spriahovacej lište. Tie mali počas zaťažovania merať napätie v lište za účelom ich porovnania s hodnotami z numerických modelov.

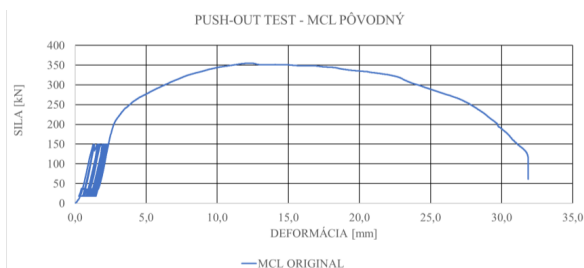


Obrázok 13: Model skúšobných vzoriek pre pretláčacie skúšky - s originálnou MCL lištou (vľavo) a modifikovanou MCL lištou (vpravo)

4.1.1. Skúšobná vzorka s originálnou lištou typu MCL

Ako prvá bola vykonaná pretláčacia skúška vzorky spriahnutej pomocou originálnej spriahovacej lišty typu MCL. Popri získaní referenčných hodnôt sily a deformácie (pre porovnanie s ostatnými experimentami a numerickým modelom) táto vzorka zároveň bola aj overovacou vzorkou pre celú skúšobnú procedúru a zariadenie.

Pred experimentálnou skúškou bolo potrebné stanoviť hodnoty 5% a 40% hodnoty maximálnej hodnoty odolnosti $P_{\max}$ (podľa Eurokódu 4 [3]). Pre určenie týchto hodnôt bol vytvorený numerický plne nelineárny model šmykového spojenia reprezentujúci vzorku pre pretláčaciu skúšku. Maximálna hodnota odolnosti v softvéri ANSYS predstavovala hodnotu 374,4 kN. Z tejto hodnoty boli dopočítané aj hodnoty potrebné pre počiatočnú fázu experimentálnej skúšky – 5% z $P_{\max}$ je rovné 18,7 kN a 40% z $P_{\max}$ je rovné 149,8 kN. Výsledok vo forme závislosti sily od deformácie je možné vidieť na obr. 14.



Obrázok 14: Krivka závislosti sily od deformácie pri push-out teste

Výsledky experimentálnej skúšky potvrdili dáta získané z numerických simulácií. Maximálna odolnosť vzorky bola 354,8 kN pri deformácii 12,35 mm, čo v porovnaní s hodnotou z numerickej simulácie o hodnote 374,4 kN predstavuje dobrú zhodu oboch metód testovania (rozdiel predstavuje 5,2%). Experiment taktiež potvrdil veľmi dobré duktilné správanie spriahovacej lišty a splnil podmienku Eurokódu 4 [3].



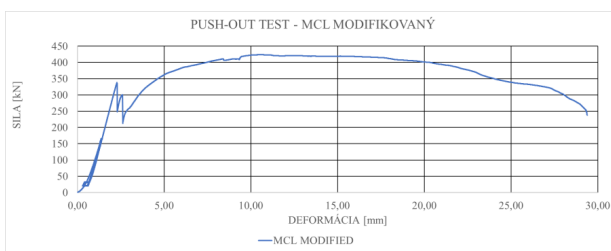
Obrázok 15: Porušenie ocelového šmykového konektora v mieste drieku

Napriek cieľu dosiahnuť kombinované porušenie ocelevej a betónovej časti šmykového spojenia, mechanizmus porušenia vzorky bol stanovený na ocelové porušenie. Na obr. 15 je vidieť vzniknutú trhlinu v drieku šmykového konektora.

4.1.2. Skúšobné vzorky s modifikovanou lištou typu MCL

Pre overenie vlastností modifikovanej lišty typu MCL získaných z numerických simulácií a porovnanie s výsledkami pretláčacej skúšky vzorky s originálnou lištou typu MCL boli vyhotovené aj skúšobné vzorky s touto spriahovacou lištou.

Taktiež bol vytvorený numerický plne nelineárny model šmykového spojenia s rovnakými geometrickými a materiálovými vlastnosťami ako v prípade vzorky pre pretláčaciu skúšku. Maximálna hodnota odolnosti podľa simulácie v softvéri ANSYS predstavovala hodnotu 418,0 kN. Z tejto hodnoty boli dopočítané aj hodnoty potrebné pre počiatočnú fázu pretláčacej skúšky – 5% z P_{max} je rovné 20,9 kN a 40% z P_{max} je rovné 167,2 kN.



Obrázok 16: Krivka závislosti sily od deformácie pri push-out teste

V počiatočnej fáze experimentu dochádzalo len k takmer zanedbateľnému zväčšovaniu deformácie. K vzniku trhlín v betónovej časti došlo až pri dosiahnutí takmer 80% predpokladanej odolnosti skúšobnej vzorky, čo bolo sprevádzané aj skokovitým nárastom deformácie na predpokladanú hodnotu deformácie po opakovanom zaťažovaní. Výsledky experimentu potvrdili nárast odolnosti až na hodnotu 423,7 kN pri deformácii 10,55 mm, pričom sa taktiež jedná o veľmi presnú zhodu v porovnaní s maximálnou hodnotou odolnosti z numerických simulácií o hodnote 418,0 kN (rozdiel medzi hodnotami predstavuje 1,3%). Zaujímavosťou je dosiahnutie konštantnej hodnoty odolnosti od deformácie 10 po 18 mm.

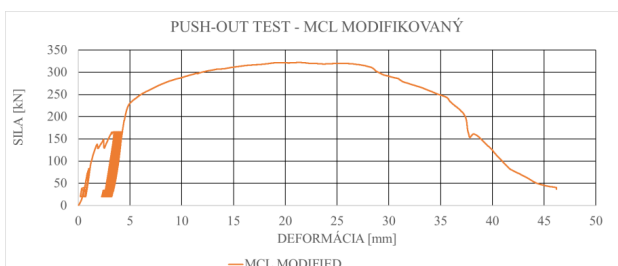
Cieľom bolo znova dosiahnuť kombinované porušenie ocelevej a betónovej časti šmykového spojenia, no mechanizmus porušenia vzorky bol znova stanovený na ocelové porušenie. Z obr. 17 je vidieť porušenie šmykového konektora šmykom v mieste jeho drieku. Taktiež je vidieť značné otláčenie v mieste priehlbiny, čo predpokladá značné zakliesnenie extra prúta betonárskej výstuže v tomto mieste a jeho vplyv na zväčšenie odolnosti.



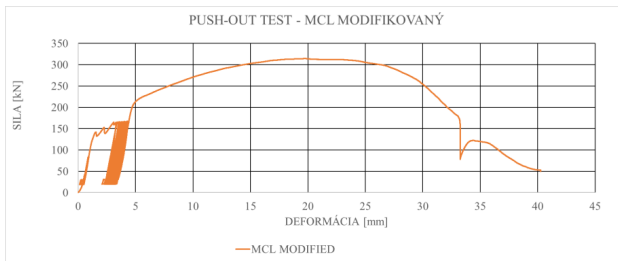
Obrázok 17: Porušenie ocelového šmykového konektora v mieste drieku

Z dôvodu rozšírenia štatistického súboru a potvrdenia správania sa spriahnutej vzorky s modifikovanou lištou typu MCL, boli pripravené ďalšie dve skúšobné vzorky totožné s predchádzajúcou. Skúšobná procedúra bola modifikovaná (rozšírená) vzhľadom na postup uvedený v Eurokóde 4 [3] podľa [37] o 12 cyklov s rozkmitom zaťaženia od 5 % do 10 % z očakávanej hodnoty zaťaženia pri porušení vzorky a 12 cyklov s rozkmitom zaťaženia od 5 % do 20 % z očakávanej hodnoty zaťaženia pri porušení vzorky.

V prípade druhej vzorky sa experimentom dosiahla maximálna odolnosť 322,4 kN pri deformácii 21,37 mm, čo predstavuje pokles hodnoty odolnosti o 24 % v porovnaní s prvou vzorkou. Pokles hodnoty bol spôsobený najmä pevnosťou betónu (pokles pevnosti v tlaku skúšobnej kocky predstavuje 27 %). Preto bol modifikovaný aj numerický model, v ktorom došlo k zohľadneniu zníženia odolnosti betónu. V ňom maximálna hodnota odolnosti predstavovala hodnotu 363,2 kN (rozdiel medzi hodnotami predstavuje 11,1%). V prípade tretej vzorky sa dosiahla maximálna odolnosť o hodnote 314,4 kN pri deformácii 19,77 mm. V porovnaní s hodnotou odolnosti dosiahnutou pri simulácii (363,2 kN) predstavuje rozdiel medzi hodnotami 13,5 %.



Obrázok 18: Krivka závislosti sily od deformácie pri push-out teste – druhá vzorka



Obrázok 19: Krivka závislosti sily od deformácie pri push-out teste – tretia vzorka



Obrázok 20: Porušenie oceleového šmykového konektora v mieste drieku

4.1.3. Závěry experimentálnych pretláčacích testov

Experimentálnymi skúškami sa potvrdili hypotézy získané z numerických modelov o zvýšení odolnosti a zachovaní duktilného správania sa modifikovanej lišty typu po úprave na základe výsledkov topologickej optimalizácie.

Potvrdila sa aj skutočnosť, že kvalitne pripravený a dátovo korektne zadefinovaný numerický model predstavuje dôležitý zdroj údajov, ktoré nie je možné jednoducho získať z experimentov – napätia, pomerné pretvorenia a iné dáta v priebehu zaťažovania.

5. Analýza únavovej odolnosti spriahovacej lišty

Veľkú pozornosť treba venovať najmä samotnej oceleovej spriahovacej lište. Tá má relatívne komplikovanú geometriu, ktorú nie je možné jednoducho pokryť únavovým detailom podľa STN EN 1993-1-9 [44], preto je nutné riešiť tento problém iným spôsobom. Jedným z nich je možnosť analyzovať únavové parametre pomocou faktorov koncentrácie napätí v oceleovej lište. Miesta, kde sa koncentrujú napätia zvyčajne určujú kritické miesta, kde sa začína tvoriť únavová trhlinka a preto je im potrebné venovať pozornosť s cieľom eliminovať negatívne dôsledky a doceliť požadovanú únavovú odolnosť konštrukcie.

5.1. Numerická analýza

Pre stanovenie koeficientov koncentrácie napätí boli pripravené numerické modely v programe ANSYS [83] pre analýzu lokálnych a globálnych účinkov pre originálnu a aj modifikovanú lištu typu MCL.

Ako prvé boli analyzované účinky na originálnu lištu typu MCL. V prípade globálnych účinkov je $\Delta\sigma_G$ rovná 75,29 MPa a hodnota $\Delta\sigma_N$ rovná 50,0 MPa. Koeficient koncentrácie napätí od globálnych účinkov je potom možné vypočítať ako podiel týchto hodnôt a je rovný 1,506. Túto hodnotu je možné porovnať s koeficientom koncentrácie napätia v návrhovom postupe [33] - $k_{f,G,CL} = 1,5$, čo predstavuje veľmi presnú zhodu.

Pre prípad lokálnych účinkov je potrebné rozlišovať hodnotu $\Delta\sigma_G$ pre prípad analýzy koncentračného faktora v oblasti ťahových ($\Delta\sigma_{L,T}$) alebo tlakových napätí ($\Delta\sigma_{L,C}$). Hodnota $\Delta\sigma_{L,T}$ je rovná 93,16 MPa, hodnota $\Delta\sigma_{L,C}$ je rovná 72,39 MPa.

V prípade riešeného v tejto práci je hodnota $\Delta\sigma_{VL}$ rovná 13,33 MPa ($e_x=250\text{mm}$; $t=7,5\text{mm}$ (modelovaná len polovica hrúbky lišty)). Koeficienty koncentrácie napätí od lokálnych účinkov je potom možné vypočítať ako podiel týchto hodnôt - $\frac{1}{k_{L,1,T}}$ je rovný 6,99, $\frac{1}{k_{L,1,C}}$ je rovný 5,43 a samotný koeficient je daný ako maximálna hodnota z týchto parametrov, teda $\frac{1}{k_{L,1}}$ je rovný 6,99. Túto hodnotu je možné porovnať s koeficientom koncentrácie napätia v návrhovom postupe [33] - $k_{f,L,CL} = 7,3$, čo predstavuje konzervatívnejšiu hodnotu oproti hodnote určenej numerickou simuláciou o 4,3%.

Taktiež sú globálne a lokálne účinky analyzované aj pre modifikovanú lištu typu MCL. V prípade globálnych účinkov je $\Delta\sigma_G$ rovná 221,8 MPa a hodnota $\Delta\sigma_N$ rovná 50,0 MPa. Koeficient koncentrácie napätí od globálnych účinkov je rovný 4,436. V porovnaní s koeficientom koncentrácie napätia v návrhovom postupe [33] - $k_{f,G,CL} = 1,5$ je možné vidieť značný nárast hodnoty tohto faktora, daného najmä vplyvom vytvorenej priehlbiny.

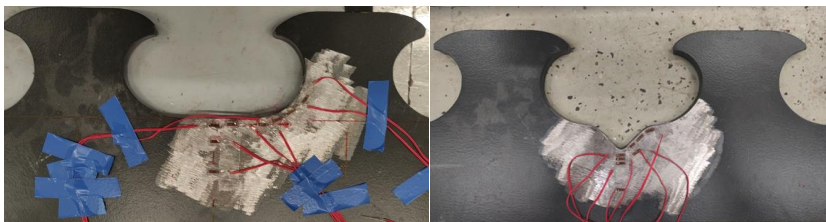
Aj v tomto prípade je potrebné rozlišovať hodnotu $\Delta\sigma_G$ pre prípad analýzy koncentračného faktora v oblasti ťahových ($\Delta\sigma_{L,T}$) alebo tlakových napätí ($\Delta\sigma_{L,C}$). Hodnota $\Delta\sigma_{L,T}$ je rovná 48,1 MPa, hodnota $\Delta\sigma_{L,C}$ je rovná 29,04 MPa a hodnota $\Delta\sigma_{VL}$ je rovná 13,33 MPa. Koeficienty koncentrácie napätí od lokálnych účinkov je potom možné vypočítať ako podiel týchto hodnôt - $\frac{1}{k_{L,1,T}}$ je rovný 3,6, $\frac{1}{k_{L,1,C}}$ je rovný 2,18 a samotný koeficient je daný ako maximálna hodnota z týchto parametrov, teda $\frac{1}{k_{L,1}}$ je rovný 3,6. Túto hodnotu je takisto možné porovnať s koeficientom koncentrácie napätia od lokálnych účinkov v prípade originálnej lišty MCL (či už v návrhovom postupe [33] - $k_{f,L,CL} = 7,3$, alebo hodnote danej numerickou analýzou rovnú 6,99) – hodnota sa značne znížila na približne polovičnú hodnotu.

5.2. Experimentálna analýza

Pre overenie vyššie uvedených výsledkov numerických simulácií a koeficientov koncentrácie napätí prostredníctvom experimentálnych skúšok boli pripravené experimentálne testy spriahovacích lišt. Cieľom skúšok bolo porovnať hodnoty napätí z experimentálnych meraní a z numerických simulácií, podľa ktorých boli vypočítané koeficienty koncentrácie

napätí pre oba typy skúmaných spriahovacích lišt. Sledované boli len koeficienty koncentrácie napätí od globálnych účinkov pre oba typy lišt. Meranie bolo realizované prostredníctvom tenzometrov a merané boli hlavné napätia na líci spriahovacích lišt.

V požadovaných miestach merania boli lišty zbavené náteru a boli nalepené tenzometre. Následne boli lišty umiestnené do skúšobného zariadenia, kde boli zaťažované príslušným napätím v súlade s vykonanými simuláciami. Hodnoty napätí pre originálnu lištu typu MCL v miestach umiestnenia tenzometrov je možné vidieť v tabuľke 2 a pre modifikovanú lištu typu MCL v tabuľke 3.



Obrázok 21: Poloha tenzometrov na lište – originálna lišta typu MCL (vľavo); modifikovaná lišta typu MCL (vpravo)

Tabuľka 2: Hodnoty napätí na originálnej lište typu MCL

Tenzometer	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
σ – experiment [MPa]	-	55,2	54,8	48,3	31,3	20,6	51,4	46,8
σ – num. simulácia [MPa]	55,70	57,16	56,15	49,53	33,32	21,17	52,44	47,18

Tabuľka 3: Hodnoty napätí na modifikovanej lište typu MCL

Tenzometer	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
σ – experiment [MPa]	62,2	52,1	43,8	61,8	52,5	28,8	14,6	33,2
σ – num. simulácia [MPa]	66,23	54,65	46,55	64,7	54,4	30,7	18,68	35,87

Únavová odolnosť sa radí medzi dôležité parametre, najmä pre mostné staviteľstvo. V prípade spriahnutých konštrukcií je v platnom návrhovom postupe [34] uvedené posúdenie únavovej odolnosti ocelevej lišty pomocou koeficientov koncentrácie napätí od lokálnych a globálnych účinkov. Tie sú v návrhovom postupe aj vyjadrené pre lišty typu MCL a PZ.

V prípade vytvorenej modifikovanej lišty typu MCL boli pomocou numerických simulácií hodnoty týchto koeficientov stanovené a verifikované prostredníctvom laboratórnych testov. Tie boli porovnané s koeficientami pre originálnu lištu typu MCL, pričom koeficient koncentrácie napätí od lokálnych účinkov klesol o takmer polovicu, kým koeficient koncentrácie napätí od globálnych účinkov značne vzrástol. Jeho vplyv je však možné vhodným návrhom geometrie konštrukcie redukovať zmenšením ramena medzi ťažiskom priezu a základňou šmykového konektora, resp. najnižším bodom vytvorenej priehlbiny.

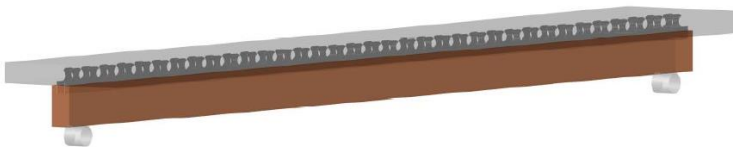
6. Potenciálne využitie spriahovacích lišt v drevobetónových konštrukciách

Použitie spriahovacích lišt v spriahnutých konštrukciách je záležitosťou takmer výlučne len v prípade oceľobetónových nosných prvkov. Avšak napriek tomu je možné nájsť výskumné inštitúcie, ktoré sa venovali analýze spriahovacích lišt v drevobetónových konštrukciách. Je však potrebné poznamenať, že na rozdiel od lišt používaných v oceľobetónových konštrukciách, majú tieto lišty iný tvar a aj kvôli absencii komplexných poznatkov ich použitie zďaleka nedosahuje úroveň iných druhov.

6.1. Numerická analýza

Pre nedostatok poznatkov o správaní sa spriahnutých drevobetónových konštrukcií so spriahovacími lištami, je vhodné využiť numerické simulácie na analýzu napätostných a deformačných parametrov týchto konštrukcií s cieľom získať informácie o správaní sa častí týchto konštrukcií pod vplyvom zvyšujúceho sa zaťaženia a tým vyhodnotiť prípadný potenciál týchto konštrukčných prvkov v budovách, ale aj v ostatných stavebných konštrukciách.

Pre uskutočnenie numerickej analýzy bol vytvorený 3D model proste podopretého drevobetónového nosníka v programe ANSYS 19 (obr. 22). Zaťaženie pôsobilo rovnomerne plošne na betónovú dosku. Ako typ spriahovacej lišty bol vybratý typ MCL [34] o výške šmykového konektora 60 mm. Do dreveného prierezu boli symetricky osadené dve lišty.



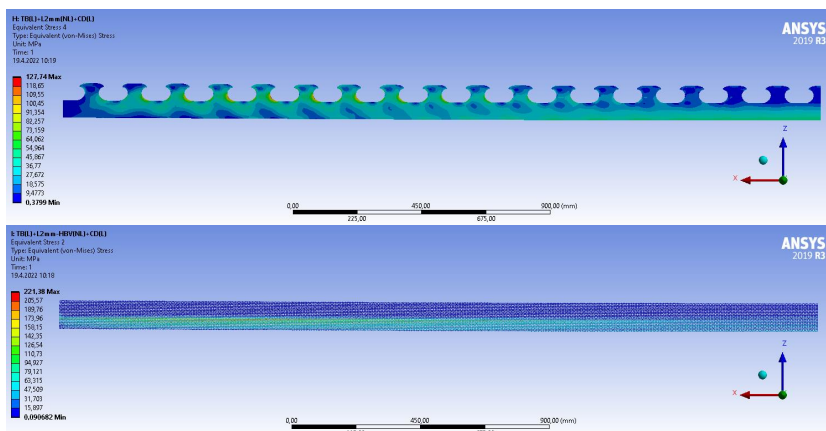
Obrázok 22: 3D model drevobetónového nosníka vstupujúceho do numerickej analýzy

Analýza pozostávala z viacerých častí:

- simulácie drevobetónového prierezu bez spriahovacích lišt pre získanie referenčných výsledkov (napätia a deformácia)
- pridanie spriahovacích lišt typu MCL do spriahnutého nosníka; pre porovnanie bol vyhodnotený aj variant s vplepenou lištou typu HBV®
- zmena materiálového modelu betónu na nelineárny spolu s analýzou efektu porušenia dreveného prierezu na deformáciu a napätia v drevobetónovom nosníku – vytvorením prerušenia dreveného prierezu v strede nosníka
- parametrická štúdia, kde došlo k postupnému zvyšovaniu zaťaženia na limitnú hodnotu ťahových napätí krajných vlákien v drevenej časti prierezu (C14-C50), pričom boli analyzované napätia v lište a betóne a deformácia

Uvedenými numerickými simuláciami sa potvrdil priaznivý vplyv spriahnutia drevenej a betónovej časti prierezu pomocou spriahovacích lišt. Porovnaním s referenčnými vzorkami je jasné, že hodnoty napätí a deformácie sú takmer totožné s referenčným modelom s plným spriahnutím medzi drevenou a betónovou časťou prierezu, čo vypovedá vysokej účinnosti šmykového spojenia so spriahovacou lištou.

V prípade zmenšovania hrúbky spriahovacej lišty nedochádza k výraznému nárastu hodnôt napätí a deformácie nosníka. Prekvapivým záverom je porovnanie vzoriek nosníka so spriahovacou lištou typu MCL hr. 2 mm a lištou HBV® - napätia v drevenej a betónovej časti prierezu, rovnako ako deformácia boli takmer totožné, no v prípade lišty typu HBV® sú napätia v lište výrazne vyššie, avšak vyššie hodnoty napätí sa nachádzajú najmä v časti lišty zapustenej v drevenej časti prierezu.



Obrázok 23: Napätia v spriahovacích lištách (vľavo je miesto podpory, vpravo stred nosníka - spriahovacia lišta typu MCL (hore); spriahovacia lišta HBV® (dole)

Pre spresnenie výsledkov došlo k zmene materiálového modelu betónu na nelineárny, čo sa prejavilo najmä korekciou napätí v betónovej časti prierezu. Aby sa zachytil účinok porušenia drevenej časti, bol drevený prierez v strede nosníka oslabený vynechaním. Došlo k výrazným napätostným zmenám v priereze – hodnota tlakových napätí v betóne sa stonásobila, výrazne sa zvýšilo a čiastočne aj redistribuovalo napätie v oceleovej lište. Maximálne napätie v drevenej časti prierezu sa nachádza približne v tretinách nosníka. Hodnota deformácie sa takmer zdvojnásobila, no stále dosahuje približne 92 percent limitnej hodnoty priehybu, čo je stále akceptovateľná hodnota.

V záverečnej parametrickej štúdii došlo k analýze vplyvu zvyšovania zaťaženia na limitnú hodnotu ťahových napätí v drevenej časti drevobetónového nosníka. Napriek zvyšovaniu napätí v drevenej časti, nárast deformácie bol podstatne nižší, podobne ako nárast napätí vo zvyšnom priereze. Z výsledkov je možné interpretovať skutočnosť, že takmer všetky skúmané vzorky v rámci parametrickej štúdie splnili aj podmienku limitného priehybu (1/250 rozpätia).

Na základe výsledkov numerických analýz je možné konštatovať, že spresnením materiálových modelov došlo k redukcii napätostných parametrov, ako aj deformácie. Vzhľadom na náročnosť plastického modelu dreva sa v tejto analýze uvažovalo len s lineárnym materiálovým modelom. V porovnaní s lištou typu HBV® je lišta typu MCL podstatne menej namáhaná a k jej efektívnemu využitiu dochádza až v momente prípadného porušenia dreveného prierezu.

Záverom je možné konštatovať, že spriahovacie lišty vlepované do dreveného prierezu je možné považovať za bezpečnú a spoľahlivú alternatívu k iným spriahovacím prostriedkom používaným v drevobetónových konštrukciách. Je však potrebný podrobnejší výskum takýchto konštrukcií, ktorý by komplexne pokryl celú problematiku s cieľom vytvoriť spoľahlivý návrhový postup na zhotovovanie takýchto konštrukcií.

7. Záver

Predkladaná dizertačná práca sa zaoberá problematikou spriahnutia oceľobetónových a drevobetónových konštrukcií pomocou spriahovacích lišt. Z dôvodu analýzy rôznych typov spriahovacích lišt bol vytvorený numerický model reprezentujúci fragment šmykového spojenia spriahnutého perforovanými lištami v programe ANSYS s cieľom teoretického stanovenia ich únosnosti, porovnanie ich hodnôt odolnosti a analýza vývoja plastických deformácií vplyvom rastúcej plastickej deformácie.

Vytvorený bol aj materiálovo plne nelineárny numerický model skúšobnej vzorky spriahnutej konštrukcie pomocou spriahovacej lišty pre pretláčaciu skúšku, ktorý vo všetkých smeroch plne zodpovedal už zrealizovaným experimentálnym skúškam. Bol zároveň využitý na analýzu modifikovanej lišty typu MCL s vytvorenými priehlbami. V rámci experimentálnej časti boli pripravené celkovo štyri skúšobné vzorky pre pretláčacie skúšky, jedna s originálnou lištou typu MCL a tri s modifikovanou lištou typu MCL. Cieľom realizovaných experimentov bolo verifikovať vytvorený numerický model v softvéri ANSYS, porovnať dáta z realizovaných pretláčacích skúšok a experimentálne verifikovať hypotézy ohľadom zvýšenia odolnosti. Potvrdil sa nárast hodnoty odolnosti u modifikovanej lišty typu MCL v porovnaní s jej originálnym tvarom, pričom duktilita šmykového spojenia spĺňa predpoklady uvedené v príslušnej norme a je veľmi dobrá. Mechanizmus porušenia každej zo vzoriek predstavoval porušenie oceľovej časti šmykového spojenia. Porovnaním výsledkov z modelu a experimentálnych skúšok je možné konštatovať veľmi dobrú zhodu medzi hodnotami odolnosti šmykového spojenia.

Vytvorený bol aj numerický model pre overenie únavovej odolnosti analyzovaných lišt pre stanovenie koeficientov koncentrácie napätí od lokálnych a globálnych účinkov na spriahovaciu lištu. Na základe výsledkov boli vyjadrené koeficienty koncentrácie napätí, ktoré vstupujú do výpočtu únavovej odolnosti oceľovej spriahovacej lišty a následne boli porovnané s hodnotami uvedenými v návrhovom postupe. Zhoda medzi výslednými koeficientami z návrhového postupu a numerickej simulácie pre originálny tvar lišty MCL bola veľmi dobrá. S týmito dátami boli porovnané aj koeficienty koncentrácie napätí pre modifikovaný tvar lišty MCL, pričom ich hodnota a jej vplyv boli podrobne analyzované a boli

z nich vyvedené odporúčania. Vytvorený numerický model bol verifikovaný aj experimentálnymi skúškami. Napätia na líci spriahovacej lišty boli merané pomocou tenzometrov pre účely ich porovnania s hodnotami z numerického modelu.

Taktiež bola analyzovaná možnosť použitia spriahovacích lišt v drevobetónových konštrukciách ako alternatíva k iným bežne používaným spriahovacím prostriedkom. Bol vytvorený model drevobetónového nosníka, v ktorom bol analyzovaný vplyv geometrie, materiálových charakteristík a pôsobiaceho zaťaženia na napätia v jednotlivých častiach a deformáciu v strede rozpätia.

7.1.Prínos k riešenej problematike

- Vytvorenie numerických modelov oceľobetónových prvkov spriahnutých prostredníctvom 13 rôznych typov spriahovacích lišt a porovnanie ich hodnôt odolností na pozdĺžny šmyk
- Analýza vplyvu materiálových charakteristík vstupujúcich do numerických modelov analyzujúcich šmykové spojenie oceľobetónového prvku spriahnutého pomocou spriahovacej lišty
- Vytvorenie plne nelineárneho modelu, ktorý úplne zodpovedá realizovaným experimentálnym testom, ktorý je možné použiť na analýzu aj iných typov spriahovacích lišt a šmykového spojenia v oceľobetónových konštrukciách
- Využitie topologickej optimalizácie ako jednej z možností úpravy už existujúceho tvaru spriahovacej lišty za účelom zvýšenia jej odolnosti voči pozdĺžnemu šmyku
- Návrh modifikovaného tvaru spriahovacej lišty z už existujúcej lišty typu MCL – vlastnosti modifikovanej lišty boli overované numerickými simuláciami a aj experimentálnymi skúškami
- Vytvorenie numerického modelu spriahnutého drevobetónového nosníka so spriahovacou lištou pre účely analýzy vplyvu geometrických a materiálových charakteristík na napätia a deformáciu konštrukcie

7.2.Možnosti pre ďalší výskum

- Vylepšenie numerických modelov – rozšírenie fragmentu šmykového spojenia, zvolenie jemnejšej siete konečných prvkov, zrýchlenie výpočtov s možnosťou overenia viacerých modifikácií šmykového spojenia
- Analýza originálnej a modifikovanej oceľovej lišty typu MCL, ako aj celého šmykového spojenia prostredníctvom zadania cyklického zaťaženia prostredníctvom numerických modelov a experimentálnych skúšok za účelom zistenia únavových parametrov a analýzy vzniku a šírenia únavových porušení a porovnanie získaných výsledkov
- Vylepšenie numerických modelov drevobetónových spriahnutých nosníkov s použitím spriahovacej lišty (zadefinovanie nelineárneho materiálového modelu dreva)

- Experimentálne overenie odolnosti spriahnutého drevobetónového nosníka prostredníctvom spriahovacej lišty za účelom porovnania dát s hodnotami z numerických modelov a získania ďalších informácií o správaní sa spriahnutej konštrukcie pod vplyvom zaťaženia
- Analýza možnosti využitia spriahovacích lišt ako alternatívy ku konektorom oceľových konštrukcií do betónových monolitických prvkov s cieľom zadenfinovania geometrických a konštrukčných obmedzení či hodnôt odolností pre praktické využitie takýchto prvkov v inžinierskej praxi

Bibliografia

- [1] Kozák, J., Gramblička, Š., Lapos, J.: *Spriahnuté a kombinované oceľobetónové konštrukcie*, Jaga group, 2001. 808890532X
- [2] Pelke, E., Kurrer, K.E.: *Zur Entwicklungsgeschichte des Stahlverbundbaus*, Stahlbau, Vol. 85, No. 11, 2016, pp. 764-780
- [3] European Committee for Standardization, *EN 1994-1-1: Eurokód 4. Navrhovanie spriahnutých oceľobetónových konštrukcií. Časť 1-1: Všeobecné pravidlá a pravidlá pre budovy*, Brussels, 2004
- [4] Andrä, H.-P.: *Economical Shear Connectors with High Fatigue Strength*, IABSE reports, 1990, pp.168-172
- [5] Andrä, H.-P.: *Neuartige Verbundmittel für den Anschluß von Ortbetonplatten an Stahlträger*, Stahlbau, Vol. 80, No. 12, 1985, pp. 325-328
- [6] Deutsches Institut für Bautechnik: *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung der Perfbond-Leiste*, Berlin, 2000, Zulassungsnummer Nr. Z-26.4-38
- [7] Deutsches Institut für Bautechnik: *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung der Kombi-Verdübelung*, Berlin, 2000, Zulassungsnummer Z-26.4-39
- [8] Brendel, I.: *New Types of Composite Beam and Dowel-Bonding System*, [Online] 2001. [Dátum: 12. Február 2020.] http://landhaus-brendel.privat.t-online.de/vortrag/Prolog_e/Part2/body_part2.html.
- [9] Abramski, M., Friedrich, T., Kutz, W., Schnell, J.: *Tragwirkung von Betondübeln für Sandwich-Verbunddecken mit großen Stegöffnungen* *Neuartige*, Stahlbau, Vol. 79, No. 4, 2010, pp. 248-258
- [10] Kraus, D., Wurzer, O.: *Versuche zur Kombiverdübelung mit Lochdurchmessern von 100 mm*, Versuchsbericht, Universität der Bundeswehr, 1994
- [11] Wurzer, O.: *Zur Tragfähigkeit von Betondübeln*, Universität der Bundeswehr München, PhD. Dissertation, 1997
- [12] Zapfe, C.: *Trag- und Verformungsverhalten von Verbundträgern mit Betondübeln zur Übertragung der Längsschubkräfte*, Universität der Bundeswehr München, PhD. Dissertation, 2001
- [13] Schmitt, V., Seidl, G., Hever, M., Zapfe, C.: *Verbundbrücke Pöcking – Innovative VFT-Träger mit Betondübeln*, Stahlbau, Vol. 73, No. 6, 2004, pp. 387-393
- [14] Wagner, R.: *Untersuchungen zum Tragverhalten von Betondübeln in vorwiegend ruhend und nicht ruhend beanspruchten Konstruktionen*, Universität der Bundeswehr München, PhD. Dissertation, 2017
- [15] Reitz, D.: *Grundlagen zur Bemessung der Perfbondleiste als duktiles Verbundmittel*, TU Darmstadt, PhD. Dissertation, 2003

- [16] Gündel, M., Dürr, A., Hauke, J., Hechler, O.: *Zur Bemessung von Lochleisten als duktile Verbundmittel in Verbundträgern aus höherfesten Materialien*, Stahlbau, Vol. 78, No. 12, 2009, pp. 916-924
- [17] Novák, B., Röhm, M. a Weissbach, M.: *New methods of connection for composite girders with corrugated steel webs*, Stuttgart, 2007, 978-3-89821-807-8
- [18] Forschungsgemeinschaft, Deutsche: *SPP 1182: Nachhaltiges Bauen mit Ultra-Hochfestem Beton (UHPC)*, 2005-2012
- [19] Vinh, B.D.: *Behaviour of Steel-Concrete Composite Beams Made of Ultra High Performance Concrete*, Universität Leipzig, PhD. Dissertation, 2010
- [20] Galjaard, H. a Walraven, J.: *Behaviour of shear connector device for lightweight steel-concrete composite structures – results, observations and comparisons of static test*, Second International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete: 18-22 June 2000, Kristiansand, Norway
- [21] Tategami, H., Ebina, T., Uehira, K., Sonoda, K., Kitoh, H.: *Shear connectors in PC box girder bridge with corrugated steel webs*, Composite Construction in Steel and Concrete IV, 2000, pp. 213-224
- [22] Nishido, T., Katashi, F., Takafumi, A.: *Slip Behavior of Perfobond Rib Shear Connectors and Its Treatment in FEM*, Composite Construction in Steel and Concrete IV, 2000, pp. 379-390
- [23] Jurkiewicz, B., Hottier, J.M.: *Static behaviour of a steel-concrete composite beam with an innovative horizontal connection*, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 61, 2005, pp. 1286-1300
- [24] Fink, J., Petraschek, T.: *Tragmodelle zur Bestimmung der Längsschubtragfähigkeit des Kronendübels als neuartiges Verbundmittel im Verbundbau*, Stahlbau, Vol. 76, No. 10, 2004, pp. 761-770
- [25] Steurer, M., Petraschek, T., Fink, J.: *Development of an innovative sandwich plate for trough-type railway bridges*, Steel Construction, Vol. 9, No. 3, 2016, pp. 184-190
- [26] Takács, P., Fink, J.: *Neuartige Sandwichfahrbahnplatte für Eisenbahnbrücken - Experimentelle Untersuchungen zur Ermüdungsfestigkeit der Lochdübelleiste*, Stahlbau, Vol. 88, No. 6, 2019, pp. 586-593
- [27] Studnicka, J., Machacek, J., Krpata, A., Svitakova, M.: *Perforated Connector for Composite Steel and Concrete Beams*, Composite Construction in Steel and Concrete IV, 2000, pp. 367-378
- [28] Verissimo, G.S., Paes, J. L.R., Valente, I., Cruz, P. J.S., Fakury, R. H.: *Design and experimental analysis of a new shear connector for steel and concrete composite structures*, Proceedings of the 3rd International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management - Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Performance and Cost, 2006, pp. 807-809
- [29] Feldmann, M.: *Neue Systeme für Stahlverbundbrücken - Verbundfertigteilträger aus hochfesten Werkstoffen und innovativen Verbundmitteln*, Aachen, 2012
- [30] Mensinger, M., Luo, G., Näßl, M., Feldmann, M., Kopp, M., Seidl, G., Stambuk, M.: *Forschungsbericht P 967 - VFT-WIB - Externe Bewehrungselemente für Brücken in Verbundbauweise*, 2014, München
- [31] Seidl, G., Stambuk, M.; Hoyer, O.; Ungermann, D.; Schneider, S.: *Forschungsvorhaben P757- Stahlleichtverbund- Bauweise. Entwicklung, Optimierung und wirtschaftlicher Einsatz im Bauwesen*, 2013
- [32] European Commission: *Prefabricated Enduring Composite Beams Based On Innovative Shear Transmission (Preco-Beam)*, Brussels, 2013
- [33] *Prefabricated Enduring Composite Beams based on innovative Shear Transmission - design guide*, 2013

- [34] Deutsches Institut für Bautechnik: *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung der Verbunddübelleisten*, Berlin, 2013, Zulassungsnummer Nr. Z-26.4-56
- [35] Seidl, G.: *Behaviour and load bearing capacity of composite dowels in steel-concrete composite girders*, Politechnika Wroclawska, PhD. Dissertation, 2009
- [36] Lorenc, W., Kozuch, M., Seidl, G.: *Zur Grenztragfähigkeit von Verbunddübeln mit Klothoidenform*, Stahlbau, Vol. 82, No. 3, 2013, pp. 196-207
- [37] Kozuch, M., Lorenc, W.: *The behaviour of clothoid-shaped composite dowels: Experimental and numerical investigations*, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 167, 2020
- [38] Kozuch, M., Lorenc, W.: *Stress concentration factors of shear connection by composite dowels with MCL shape*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 19, No. 1, 2019, pp. 32-46
- [39] Lorenc, W.: *Concrete failure of composite dowels under cyclic loading during full-scale tests of beams for the "Wiarna Rzeki" bridge*, Engineering Structures, Vol. 209, 2019
- [40] Hegger, J., Sedlacek, G., Döinghaus, P., Trumpf, H.: *Untersuchungen zur Duktilität der Verbundmittel bei Anwendung von hochfestem Stahl und hochfestem Beton*, Stahlbau, Vol. 70, No. 2, 2001, pp. 436-446
- [41] AiF-Forschungsvorhaben 13867 N: *Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Verbundmitteln in hochfestem Beton unter statischer und dynamischer Belastung*, P621, RWTH Aachen, 2006
- [42] Heinemeyer, S.: *Zum Trag- und Verformungsverhalten von Verbundträgern aus ultrahochfestem Beton mit Verbundleisten*, RWTH Aachen, PhD. Dissertation, 2011
- [43] Gallwoszus, J.: *Zur Ermüdung von Verbundkonstruktionen mit Verbunddübelleisten*, RWTH Aachen, PhD. Dissertation, 2015
- [44] European Committee for Standardization, EN 1993-1-9: Eurokód 3. Navrhovanie oceľových konštrukcií. Časť 1-9: Únava, Brussels, 2007
- [45] Claßen, M.: *Zum Trag- und Verformungsverhalten von Verbundträgern mit Verbunddübelleisten und großen Stegöffnungen*, RWTH Aachen, PhD. Dissertation, 2016
- [46] Christou, G., Ungermann, J., Wolters, K. A., Hegger, J., Claßen, M.: *Ermüdung von Verbunddübelleisten - experimentelle Untersuchungen*, Stahlbau, Vol. 89, No. 4, 2020, pp. 388-398
- [47] Lechner, T.: *Zur Anwendung von Verbunddübelleisten in schlanken Verbundträgern aus ultrahochfestem Beton*, Technischen Universität München, PhD. Dissertation, 2018
- [48] Jäger, B., Németh, G., Kovács, N., Kövesdi, B., Kachichian, M.: *Push-out tests on embedded shear connections for hybrid girders with trapezoidal web*, 12th International Conference on Advances in Steel-Concrete Composite Structures, 2018, pp. 81-86
- [49] Neves, L.C., Velasco, P.C., Valente, I.B.: *Shear Connectors that Use Concrete Dowels* ECCS, 2018, 978-92-9147-142-3
- [50] Cândido-Martins, J.P.S., Costa-Neves, L.F., Vellasco, P.C.G. da S.: *Experimental evaluation of the structural response of Perfbond shear connectors*, Engineering Structures, Vol. 32, No. 8, 2010, pp. 1976-1985
- [51] Valente, M.I.B.: *Experimental Studies on Shear Connection Systems in Steel and Lightweight Concrete Composite Bridges*, University of Minho, PhD. Dissertation, 2007
- [52] Privřelová, V.: *Verification and actual behavior of shear connection of composite steel and concrete structures using pcb-W technology*, International Journal of Mechanics, Vol. 10, 2016, pp. 355-360

- [53] Václavíková, V.: *Innovative shear connection with composite dowels – verification using push-out test*, WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics, 2017
- [54] Václavíková, V., Štrba, M.: *The behavior of composite dowels subjected to four-point bending test*, International Journal of Mechanics, Vol. 13, 2019
- [55] Lacki, P., Kasza, P., Adamus, K.: *Optimization of composite dowels shape in steel-concrete composite floor*, Composite Structures, Vol. 222, No. 4, 2019
- [56] Braun, M., Obiala, R., Schäfer, M., Kuhlmann, U., Reif, F., Odenbreit, Ch.: *Tragverhalten von CoSFB-dübeln*, Stahlbau, Vol. 88, No. 7, 2019, pp. 642-652
- [57] Kuhlmann, U., Lam, D., Zandonini, R., Aggelopoulos, E., Tibolt, m., Sheehan, T., Baldassino, N., Labory, F., Schorr, J.: *Anwendungsregeln für Slim-Floor-Träger unter Berücksichtigung von Sicherheit, Funktionalität und Nachhaltigkeit*, Stahlbau, Vol. 88, No. 7, 2019, pp. 625-632
- [58] Kuhlmann, U., Lam, D., Zandonini, R., Schorr, J., Sheehan, T., Baldassino, N.: *Experimentelle Untersuchungen an Slim-Floor-Trägern*, Stahlbau, Vol. 88, No. 7, 2019, pp. 633-641
- [59] Schaumann, P., Meyer, P., Mensinger, M., Koh, S.K.: *Zum Schubtragverhalten von Verbunddübeln bei erhöhten Temperaturen*, Stahlbau, Vol. 88, No. 9, 2019, pp. 851-858
- [60] Wiese, S.: *Zum Tragverhalten der neuartigen Verbundmittel "Stahlschare" für den filigranen Stahl-Beton-Verbundbau*, Technischen Universität Kaiserslautern, PhD. Dissertation, 2013
- [61] Broschart, Y.M., Gajda, J., Kurz, W.: *Untersuchungen zum Tragverhalten randnaher Verbunddübeln*, Stahlbau, Vol. 87, No. 5, 2018, pp. 438-445
- [62] Broschart, Y.M., Kurz, W.: *Untersuchungen zu Verbundträgern mit randnahen Verbunddübeln*, Stahlbau, Vol. 88, No. 5, 2019, pp. 892-899
- [63] Broschart, Y.M.: *Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten oberflächen-naher Verbunddübeln*, Technischen Universität Kaiserslautern, PhD. Dissertation, 2020
- [64] Dubecký, D.: *Analýza odolnosti doskových mostov so zabetónovanými oceľovými nosníkmi*, Technická univerzita Košice, PhD. Dissertation, 2015
- [65] Vaňová, P., Kvočák, V., Kožlejová, V., Dubecký, D., Kanishchev, R.: *Experimental Analysis of Bridges with Innovative Encased Beams*, Danube Bridges Conference Vienna, 2019
- [66] Suárez-Riestra, F., Estévez-Cimadevila, J., Martín-Gutierrez, E., Otero-Chans, D.: *Perforated shear + reinforcement bar connectors in a timber-concrete composite solution. Analytical and numerical approach*, Composites Part B: Engineering, Vol. 156, 2019, pp. 138-147
- [67] Wang, Y., Liu, Y., Liu, Y.: *Experimental study on shear behavior of notched long-hole perfobond connectors*, Advances in Structural Engineering, Vol. 22, No. 1, 2019, pp. 202-213
- [68] Li, X., Hu, Z., Fan, L., Shah, Y.I.: *Experimental investigation of perfobond hoop shear connector's bearing capacity and slip*, Engineering Structures, Vol. 198, 2019
- [69] Yu, Z., He, S., Mosallam, A.S., Jiang, S., Feng, W.: *Experimental and Numerical Evaluation of Perfobond Rib Shear Connectors Embedded in Recycled Aggregate Concrete*, Advances in Structural Engineering, 2020
- [70] Seidl, G., Mensinger, M., Koch, E., Hugle, F.: *Eisenbahnüberführung Simmerbach – Pilotprojekt in VFT-Rail-Bauweise mit externer Bewehrung*, Stahlbau, Vol. 81, No. 2, 2012, pp. 100-107

- [71] Feldmann, M., Pak, D., Kopp, M., Schillo, N., Wirth, T., Seidl, G., Mensinger, M., Koch, E.: *Eisenbahnüberführung Simmerbach Feldmessungen der Verbunddübel und der Schienenstützpunkte am VFT-Rail®-Trä-*, Stahlbau, Vol. 81, No. 10, 2012, pp. 737-747
- [72] Seidl, G., Danders, A., Gunkel, F., Rademacher, D., Pinger, T.: *Elsterbrücke Osendorf – eine feuerverzinkte Verbundbrücke mit externer Bewehrung*, Stahlbau, Vol. 86, No. 2, 2017, pp. 175-182
- [73] Enzinger, P., Petraschek, T., Seidl, G., Yu, C., Garn, R., Dassler, M.: *Eisenbahnüberführung über die Salzach bei Schwarzach/St. Veit - Erfahrungen beim Bau eines 46 m langen VFT-Rahmens*, Stahlbau, Vol. 86, No. 9, 2017, pp. 772-777
- [74] Lorenc, W., Kolakowski, T., Hukowicz, A., Seidl, G.: *Verbundbrücke bei Elbląg - Weiterentwicklung der VFT-WIB-Bauweise*, Stahlbau, Vol. 86, No. 2, 2017, pp. 167-174
- [75] Petzek, E., Metes, E., Toduti, L., Bancila, R.: *Bridge Solutions Based on Composite Dowels Executed in Romania*, 9th International Conference” Bridges in Danube Basin 2016”, 2016
- [76] Berndorfer, C., Hierl, M., Mensinger, M., Seidl, G., Zinke, T.: *Lebenszyklusorientierte Bewertung von Segmentbrücken in Stahlverbundbauweise*, Stahlbau, Vol. 87, No. 3, 2018, pp. 193-202
- [77] Hettinger, A.L., Birat, J.P., Hechler, O., Braun, M.: *Sustainable bridges – LCA for a composite and a concrete bridge*, 2015
- [78] Sek, R., Pilujski, B., Sobala, D., Lorenc, W.: *New type of composite arch element using composite dowels: application in railway network arch bridge*, 9th International Conference on Composite Construction in Steel and Concrete, 2021
- [79] Sek, R., Szewczyk, K., Pilujski, B., Sobala, D., Lorenc, W., Kozuch, M.: *Bridge over Vistula River in Cracow: The first railway network arch bridge using cold-bent HD sections and composite dowels*, IABSE symposium, 2020
- [80] Hradil, P., Talja, A.: *Ductility limits of high strength steels*, Research output, 2017
- [81] Lorenc, W., Kozuch, M., Rowiński, S.: *The behaviour of puzzle-shaped composite dowels — Part II: Theoretical investigations*, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 101, 2014, pp. 500-518
- [82] DYNARDO: *multiPlas - Elasto-plastic material models for ANSYS - General multi-surface plasticity - User's Manual*, 2013
- [83] ANSYS, Inc.: *ANSYS Online Help*, www.ansyshelp.ansys.com
- [84] Rozvany, G. I. N.: *A critical review of established methods of structural topology optimization*, Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 37, 2019, pp. 217-237
- [85] Lorenc, W.: *Nośność ciągłych łączników otwartych w zespolonych konstrukcjach stalowo-betonowych (The design concept for the steel part of composite dowel shear connection in steel-concrete composite structures)*, Wrocław, 2011
- [86] Lorenc, W.: *The design concept for the steel part of a composite dowel shear connection*, Steel Construct, Vol. 9, No. 2, 2016, pp. 89-97
- [87] TiComTec GmbH.: *Tragwerke in Holz-Beton-Verbundbauweise mit eingeklebten HBV® - Schubverbindern*, 2014
- [88] Deutsches Institut für Bautechnik: *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung - HBV-Schubverbinder aus Streckmetall und vorgefertigte Bauteile mit eingeklebten; HBV-Schubverbindern für ein Holz-Beton-Verbundsystem*, Berlin, 2020, Zulassungsnummer Nr. Z-9.1-557
- [89] KLH Massivholz GmbH: *HOLZ-BETON – VERBUND*, 2017
- [90] European Committee for Standardization, STN EN 338: *Drevo na stavebné nosné konštrukcie*. Triedy pevnosti, Brussels, 2004

Články publikované dizertantom relevantné k práci

PETRÍK, A. Spriahovacie lišty s otvormi ako spoľahlivý spriahovací prostriedok v stavebníctve. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering*. Bratislava: Spektrum STU, 2019, s. 428--433. ISBN 978-80-227-4972-5.

PETRÍK, A. -- ÁROCH, R. Usage of true stress-strain curve for FE simulation and the influencing parameters. In *YS2019 - Young Scientist 2019*. Bristol: IOP Publishing, 2019.

PETRÍK, A. -- ÁROCH, R. Využitie skutočného pracovného diagramu ocele pre konečno-prvkové simulácie. *structures.sk*. Navrhovanie, posudzovanie, realizácia a obnova nosných konštrukcií, 1. s. 29--32.

PETRÍK, A. Komparatívna štúdia odolnosti vybraných typov spriahovacích lišt. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering*. Bratislava: Spektrum STU, 2020, s. 496--502. ISBN 978-80-227-5052-3.

PETRÍK, A. Topologická optimalizácia ako spôsob zlepšovania vlastností šmykového spojenia. *structures.sk*. Navrhovanie, posudzovanie, realizácia a obnova nosných konštrukcií, 2. s. 25--32.

PETRÍK, A. Comparative study regarding the different shapes of the openings related to perforated steel strips. In ŠUHAJDOVÁ, E. -- BIOLEK, V. -- MRŇOVÁ, Z. *Juniorstav 2020*. Brno: ECON publishing, 2020, s. 312--317. ISBN 978-80-86433-73-8.

PETRÍK, A. Experimental verification referring to the new shape of the perforated steel strip. In MĚSÁROŠ, P. -- JOTHIPRAKASH, V. *Young Scientist 2021 (YS21)*. Bristol: IOP Publishing, 2021.

PETRÍK, A. Analysis of potential usage of the new shape of perforated steel strip in timber-concrete structures. *structures.sk*. Navrhovanie, posudzovanie, realizácia a obnova nosných konštrukcií, 3. s. 24--29.

PETRÍK, A. Analýza vplyvu zmeny tvaru spriahovacej lišty na hodnotu únosnosti a jej experimentálna verifikácia. In BISTÁK, A. *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering*. Bratislava: Spektrum STU, 2021, s. 491--497. ISBN 978-80-227-5150-6.

PETRÍK, A. Analýza efektívnosti spriahovacích lišt v drevobetónových konštrukciách. In ŠUHAJDOVÁ, E. -- KURUC, M. -- NOSEK, J. -- KRATOCHVIL, R. -- JEŽEK, J. -- SVOBODA, A. -- BŘEČKA, J. *Juniorstav 2022*. Brno: ECON publishing, 2022, s. 274--279. ISBN 978-80-86433-76-9.

ÁROCH, R. -- PETRÍK, A. Numerická a experimentálna analýza šmykovej odolnosti spriahovacej lišty s modifikovaným tvarom. In 45. aktív pracovníkov odboru oceľových konštrukcií. 2022, s. 253--260. ISBN 978-80-974153-1-0.

PETRÍK, A., ÁROCH, R. Resistance of different perforated steel strip shear connectors according to design guidelines, simulations and experiments, IXth Workshop on Connections in Coimbra, Portugal (v tlači k 31.5.2022)

PETRÍK, A. -- ÁROCH, R. Skutočný pracovný diagram ocele a jeho použitie v konečno-prvkových simuláciách. TZB-info.cz, 2022. (v tlači k 31.5.2022)

PETRÍK, A. -- ÁROCH, R. Topology optimization of perforated steel strip in composite structures. International Review of Civil Engineering (I.RE.C.E.), 2022. (v tlači k 31.5.2022)

Ostatné články publikované dizertantom

ÁROCH, R. -- KLAS, T. -- PETRÍK, A. Vplyv teploty počas opravy zvarov ortotropných oceľových mostoviek - numerická analýza. structures.sk. Navrhovanie, posudzovanie, realizácia a obnova nosných konštrukcií, 3. s. 15--20.

PETRÍK, A. Analýza teplotných polí pri zváraní oceľových konštrukcií. In ŠUHAJDOVÁ, E. -- NOVÁKOVÁ, J. -- VELIKOVSKÁ, K. -- MORAVČÍKOVÁ, S. -- KURUC, M. -- NOSEK, J. Juniorstav 2021. Brno: ECON publishing, 2021, s. 261--266. ISBN 978-80-86433-75-2.

ÁROCH, R. -- VITÁSEK, M. -- KLAS, T. -- PETRÍK, A. Analýza postupu a spôsobu zvárania počas opravy zvarov ortotropných oceľových mostoviek. In 45. aktív pracovníkov odboru oceľových konštrukcií. 2022, s. 49--58. ISBN 978-80-974153-1-0.

ÁROCH, R. -- VITÁSEK, M. -- KLAS, T. -- PETRÍK, A. -- SZABÓ, D. Temperatures during weld repair on orthotropic steel decks. IABSE Symposium Prague 2022 – Challenges for Existing and Oncoming Structures, Prague, 2022