

Odolnosť a pôsobenie spriahnutých nosníkov s otvormi v stenách - Ing. Jakub Bartuš

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Stavebná fakulta
Katedra stavebných konštrukcií a mostov

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

ODOLNOSŤ A PÔSOBENIE SPRIAHNUTÝCH NOSNÍKOV S OTVORMI V STENÁCH

Ing. Jakub Bartuš

Žilina máj 2024

Dizertačná práca bola vypracovaná v rámci denného doktorandského štúdia na Stavebnej fakulte Žilinskej univerzity v Žiline.

Predkladateľ: Ing. Jakub Bartuš

Školiteľ: **doc. Ing. Jaroslav Odrobiňák, PhD.**

Oponenti:

- 1. Ing. Jan Bujňák, PhD.**
- 2. Prof. Dr. habil. Rostislav Chudoba**
- 3. Prof. Ing. Vincent Kvočák, CSc.**

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná: 19. augusta 2024

v zasadačke dekanátu AE 307 na Stavebnej fakulte Žilinskej univerzity v Žiline, Univerzitná 8215/1, pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenou spoločnou odborovou komisiou dňa:

študijný odbor: Stavebníctvo

študijný program: Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb

S dizertačnou prácou sa možno oboznámiť na referáte pre vedu a výskum dekanátu Stavebnej fakulty Žilinskej univerzity v Žiline, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

Predseda odborovej komisie
prof. Ing. Marián Drusa, PhD.

ÚVOD

Vo všeobecnosti sú spriahnuté konštrukcie považované za vysoko efektívne konštrukčné riešenie. Poskytujú ekonomické výhody najmä vďaka rýchlemu procesu výstavby, celkovo nižkej vlastnej hmotnosti a univerzálnemu vnútornému usporiadaniu. Okrem toho spĺňajú požiadavky udržateľnosti, a najmä preto predstavujú efektívne nosné systémy pre moderné komerčné budovy.

Jedným z najpoužívanějších konštrukčných prvkov takýchto konštrukcií sú spriahnuté nosníky. Tie sa zvyčajne skladajú z betónovej dosky, oceľového profilu a spriahovacích prvkov. Každý z uvedených komponentov má určité vlastnosti, ktoré robia toto konštrukčné riešenie jedinečným. Momentálny stav noriem [1, 2] zaoberajúcich sa návrhom spomenutého typu nosných prvkov poskytuje dostatočne výstižný prístup, pokiaľ ide o posúdenie ich celkovej odolnosti.

Ak sa však zavedie jeden alebo viacero otvorov do oceľovej steny takéhoto nosníka, výpočet celkovej odolnosti sa výrazne skomplikuje. Otvory do oceľovej steny sa najčastejšie zavádzajú v dôsledku umožnenia plynulého prechodu technického zariadenia daného objektu. Na druhej strane, existenciu otvorov možno využiť na zníženie celkovej konštrukčnej výšky budovy, a tým znížiť celkové náklady. Okrem toho, ak sú takéto nosné prvky vhodne začlenené do prostredia budovy, ich funkcia môže spĺňať aj architektonický aspekt.

S ohľadom na požiadavku širšieho uplatnenia takýchto nosných prvkov v praxi, bolo vykonaných viacero štúdií zameraných na popis ich celkovej odozvy na zaťaženie. Niektoré z nich, ktoré boli zamerané na pôsobenie šmykových prostriedkov, deklarovali veľký vplyv ich optimálneho rozloženia na celkovú únosnosť iba na základe teoretických poznatkov.

Keďže táto téma nebola doteraz dostatočne podložená relevantnými experimentálnymi dôkazmi, čiastočný rozsah tejto práce bol venovaný práve tejto tematike. Konkrétne sa skúmal vplyv nerovnomerného rozloženia šmykových tíŕov na celkové pôsobenie spriahnutých nosníkov s otvormi v stenách.

Navyše, pri hĺbkovej analýze návrhu takýchto nosných prvkov, boli zistené vážne nedostatky pri overovaní odolnosti voči Vierendeelvomu namáhaniu v prítomnosti vysokých šmykových síl. Konkrétne išlo o prerozdelenie šmyku medzi horným T-prierezom (zostatkový prierez nad otvorom tvorený betónovou doskou, spriahovacími prostriedkami a oceľovým prierezom) a dolným T-prierezom (zostatkový oceľový prierez pod otvorom), ktorý ovplyvňuje do veľkej miery príspevok jednotlivých prierezov do odolnosti.

1 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Na základe uvedeného v predošlej kapitole boli stanovené dva hlavné ciele tejto dizertačnej práce so zameraním na výskum:

- Vplyvu zmeny rozloženia šmykových trŕňov na celkové pôsobenie spriahnutých nosníkov s otvormi v stenách.
- Prerozdelenia šmykovej sily medzi jednotlivými T-prierezmi v spriahnutých nosníkoch s otvormi v stenách.

V snahe naplniť tieto ambície, prvý krok v rámci tohto výskumu tvoril podrobný teoretický rozbor skúmanej problematiky. Následne, pomocou konkrétneho analytického postupu boli navrhnuté experimentálne vzorky. Počas prípravy experimentálneho testovania sa vykonalo niekoľko numerických štúdií. Tie analyzovali širšiu oblasť s cieľom určiť význam viacerých faktorov. Keďže experimentálne získané údaje sú jediným relevantným dôkazom pôsobenia skutočných vzoriek, kľúčová časť následných numerických analýz bola venovaná dôkladnej korelácii údajov medzi spomenutými časťami výskumu. Po úspešnom vykonaní validácie referenčného MKP modelu sa pristúpilo k podrobnej parametrickej MKP analýze, ktorá bola zameraná na uvedené ciele výskumu. Na základe dosiahnutých výsledkov bolo možné:

- určiť vplyv usporiadania šmykových trŕňov na celkové pôsobenie skúmaných nosných prvkov,
- zadefinovať nový prístup spresňujúci doterajší návrhový postup k určeniu odolnosti voči Vierendeelovmu namáhaniu
- uviesť viacero praktických odporúčaní.

Týmto spôsobom sa podarilo naplniť ciele dizertačnej práce.

2 METODOLÓGIA

Nasledovným postupom sa autor snažil splniť požiadavky kladené na kvalitu výskumu, ktorého cieľom bolo dosiahnuť výsledky všeobecne akceptované vedeckou komunitou.

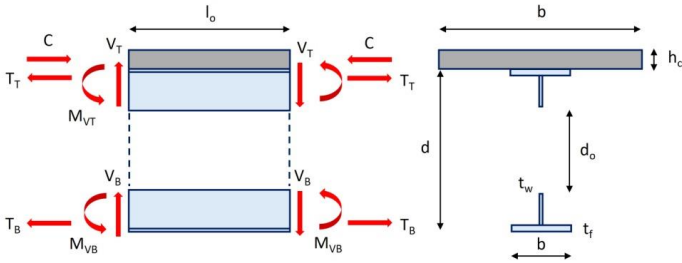
- Podrobná analýza doterajšieho výskumu a návrhových prístupov ku skúmanej tematike.
- Predbežný návrh experimentálne skúmaných vzoriek na základe analyticko-numerických metód.
- Parametrické analyticko-numerické štúdie zamerané na:
 - Strata stability v ohybe spriahnutých nosníkov s nesymetrickým prierezom a otvormi v stene počas štádia výstavby.
 - Priebeh šmykového toku v spriahnutých nosníkoch s otvormi v stene.

- Vplyv prítomnosti otvorov v oceľovej stene na pôsobenie spriahnutých oceľobetónových nosníkov.
- Spriahnuté nosníky s otvormi v oceľovej stene využívajúce alternatívne usporiadanie šmykových prostriedkov.
- Simulácia odozvy betónu v oceľobetónových spriahnutých nosníkoch v prostredí ANSYS.
- Realizácia experimentálneho programu.
- Zadeinovanie algoritmu pre jednoducho definovateľné vstupné parametre pre Microplane model v prostredí ANSYS APDL.
- Vytvorenie a overenie referenčného MKP modelu na základe experimentálne získaných údajov.
- Vykonanie podrobnej parametrickej štúdie na báze MKP so zameraním na:
 - vplyv nerovnomerného usporiadania šmykových trŕnov na celkové pôsobenie spriahnutých nosníkov s otvormi v stene,
 - zadeinovanie korektnejšieho prístupu k určeniu prerozdelenia šmykových síl medzi horným a dolným T-prierezom v spriahnutých nosníkoch s otvormi v stene.
- Zhrnutie výsledkov a súvisiacich odporúčaní.
- Diskusia o a návrh budúcej orientácie výskumu.

3 MOMENTÁLNY STAV SKÚMANEJ PROBLEMATIKY

Najdôležitejšie výskumné práce vo vzťahu k rozsahu tohto výskumu boli publikované významnými osobnosťami ako Granade [3], Todd a Cooper [4], Clawson a Darwin [5] a Redwood [6], ktorí položili základy pre súčasný stav danej problematiky. Toto výskumné úsilie bolo zhrnuté v práci Lawsons [7], pričom jej obsah poslúžil pre návrh našich experimentálnych vzoriek. Ďalšie významné práce pre náš výskum tvorili štúdie orientované na použitie nesymetrického oceľového prierezu [8] a výskumu vplyvu rôznych veľkostí a tvarov otvorov vytvorených v oceľovej stene nosníka [9]. Okrem toho, myšlienky proklamované v [10] a [11] vytvorili živnú pôdu pre definíciu vylepšenia súčasnej návrhovej koncepcie s ohľadom na prerozdelenie šmykových síl medzi horným a dolným T-prierezom.

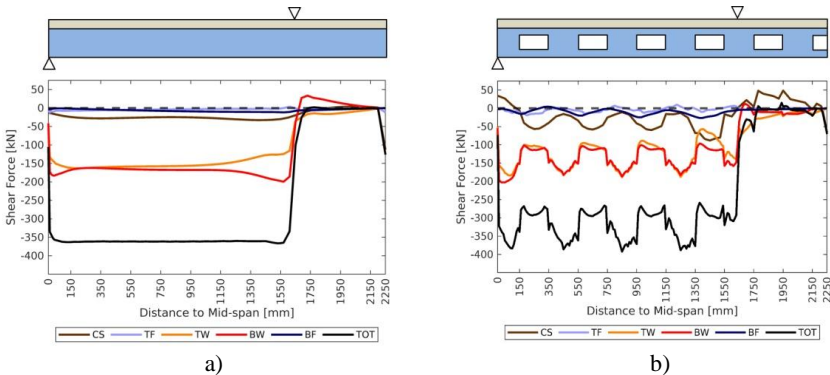
Ak prejdeme priamo k návrhovému prístupu týkajúceho sa Vierendeelovho efektu, bolo by vhodné uviesť najprv jeho presnú definíciu. V najjednoduchšej forme možno Vierendeelovo ohybové namáhanie definovať ako účinok preskupenia šmykových síl kvôli prítomnosti otvoru. V dôsledku toho vertikálny aj horizontálny šmyk pôsobí s určitou excentricitou, ktorá spôsobuje dodatočné namáhanie a následnú koncentráciu napätí prevažne v rohoch otvorov. Z mechanického hľadiska možno tento stav napätia interpretovať na základe jednoducho mechanizmu, v ktorom sú horný a dolný T-prierez vyjadrené ako jednoducho podopreté nosníky zaťažené koncovými ohybovými momentmi (Obrázok 1).



Obrázok 1. Mechanizmus prenosu vnútorných síl v oblasti otvoru.

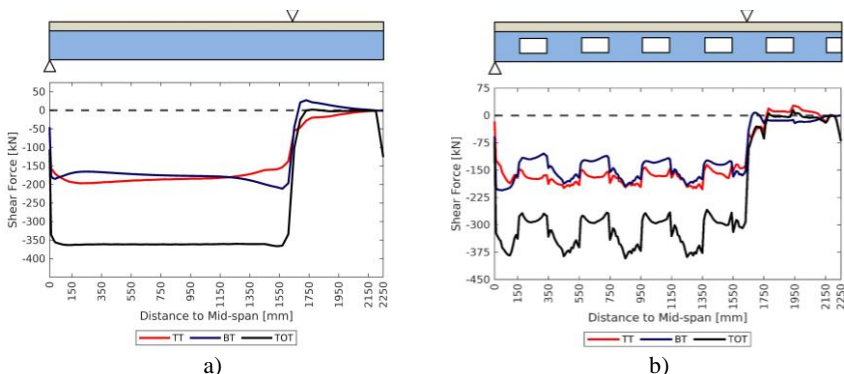
V snahe zmierniť tieto nepriaznivé účinky sa v rámci tohto výskumu aplikovali zistenia z [12], ktoré jednoznačne deklarovali - otvory oválneho tvaru spôsobujú plynulejší nárast lokálnych pretvorení v oblasti otvorov a tým znižujú negatívne účinky Vierendeelovho namáhania. Preto otvory v nami skúmaných vzorkách mali štvorcový tvar so zaoblenými rohmi.

Okrem toho, so zavedením otvorov sa výrazne mení priebeh šmykových síl pozdĺž nosníka. V dôsledku toho sa značná časť namáhania šmykom presúva z ocelového na betónový prvok. Zjednodušené zobrazenie prerozdelenia šmykovej sily pozdĺž vzoriek (a) bez a (b) s otvormi pri 4-bodovej ohybovej skúške je znázornené nižšie (Obrázok 2). Konkrétne je zobrazený priebeh celkovej šmykovej sily (TOT), ktorá je rozložená a priradená k príslušným komponentom nosníkov (CS - betónová doska, TF - horná pásnica, TW - horná stena, BW - dolná stena).



Obrázok 2. Prerozdelenie šmykovej sily medzi jednotlivými časťami spriahnutého nosníka (a) bez a (b) s otvormi v stene.

Navyše, ak je pri posúdení voči Vierendeelovmu namáhaniu podstatné prerozdelenie šmyku medzi horným a dolným T-priezom, je vhodné poznať jeho presnú hodnotu (Obrázok 3).



Obrázok 3. Prerozdelenie šmykovej sily medzi horným a dolným T-priezom spriahnutého nosníka (a) bez a (b) s otvormi v stene.

Z uvedeného je zjavná vzájomná závislosť Vierendeelovej ohybovej odolnosti od prerozdelenia šmykových síl. V snahe vyriešiť túto náročnú úlohu bol v [7] predstavený prístup využívajúci iteračnú procedúru definovanú nasledovne:

- Šmyková odolnosť dolného T-priezezu $V_{b,Rd}$ sa v prvom kroku zanedbá.
- Vyhodnotí sa efektívna hrúbka ocelevej steny horného T-priezezu $t_{w,eff}$.
- Určí sa plastická ohybová odolnosť horného T-priezezu $M_{t,T,NV,Rd}$.
- Stanoví sa plastická ohybová odolnosť pre dolný T-priezez $M_{bT,NV,Rd}$.
- Šmyková sila v dolnom T-priezeze $V_{b,Ed}$ sa určí ako:

$$V_{b,Ed} = 2 * M_{bT,NV,Rd} / l_e \quad (\text{kde } l_e \text{ je polovičná dĺžka otvoru}).$$
- Následne sa šmyková sila v hornom T-priezeze $V_{t,Ed}$ vypočíta ako:
- $V_{t,Ed} = V_{Ed} - V_{b,Ed}$.
- Potom sa overí odolnosť voči Vierendeelovmu namáhaniu.
- Ak overenie nevyhovuje podmienkam, môže sa určiť využitie T-priezezov z vypočítaných hodnôt $V_{t,Ed}$ a $V_{b,Ed}$ a znovu sa overí odolnosť. Jedna iterácia je vo všeobecnosti postačujúca.

Okrem toho existuje aj iný prístup, ktorý pripisuje šmykové pôsobenie len hornému T-priezezu. Hlavným predpokladom pre takýto prístup spočíva v značnom využití dolného T-priezezu v ťahu, čím sa znižuje jeho kapacita pre ostatné namáhania.

Poslednou alternatívou [8] hovoriacou o prerozdelení šmyku prisudzuje oceľovému dolnému T-prierezu podiel v rozsahu od 10 % do 40 % celkovej šmykovej sily.

S ohľadom na uvedené je možné tvrdiť, že aj napriek existencii základných prístupov týkajúcich sa prerozdelenia šmykovej sily medzi jednotlivé T-prierezy, jeho nejasná definícia bráni presnejšiemu určeniu odolnosti voči Vierendeelovmu namáhaniu za prítomnosti vysokých šmykových síl. Preto sa v rámci tohto výskumu vykonala podrobná analýza zameraná na nápravu súčasného stav.

4 ANALYTICKO-NUMERICKÉ ŠTÚDIE

S cieľom prehliť všeobecný pohľad na túto vedeckú oblasť bolo vykonaných niekoľko analyticko-numericke orientovaných štúdií skúmajúcich vplyv viacerých parametrov. Keďže v normách stále chýba konkrétny prístup k návrhu takýchto nosných prvkov, prevažná väčšina analytických výpočtov bola vykonaná podľa poznatkov z doterajšieho výskumu. Pokiaľ ide o numericke časť týchto štúdií, bolo vytvorených viacero modelov na báze metódy konečných prvkov (MKP), v ktorých boli použité prevažne 1D a 2D prvky. Tieto štúdie sú stručne opísané a zhrnuté v dizertačnej práci autora. Ich úplné znenie nájde čitateľ v priložených referenciách. Je nutné dodať, že spomenuté štúdie tvorili hodnotný podklad pre nasledovné experimentálne merania spojené s komplexnou numerickeou analýzou na báze MKP.

5 EXPERIMENT

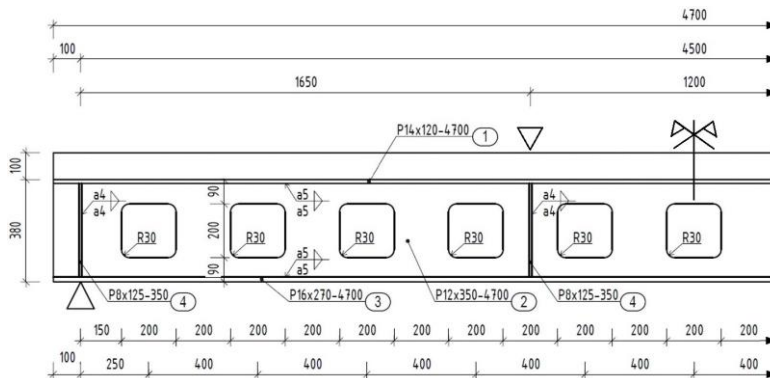
Na základe kombinácie návrhových prístupov uvedených normách [1,2], v literatúre [7] a výsledkov z analyticko-numerickeých štúdií [13] boli navrhnuté experimentálne vzorky.

5.1 Skúšobné vzorky

Vzhľadom na prezentované ciele tohto výskumu musela konfigurácia experimentálnych vzoriek spĺňať určité požiadavky, aby sa mohol stanoviť vplyv nerovnomerného rozmiestnenia šmykových trťov a určilo prerozdelenie šmykovej sily medzi jednotlivé T-prierezy.

Konkrétne, oceľová časť spriahnutého prierezu bola navrhnutá ako nesymetrický I-prierez. Vo všeobecnosti sa táto asymetria zvyčajne charakterizuje ako pomer plochy spodnej a hornej príruby v rozsahu od 3 do 1. V našom prípade bola na úrovni 2,6. Otvory v stene mali tvar štvorca so zaoblenými rohmi. Boli umiestnené v strede vzhľadom na výšku steny.

Medzi-otvorové časti nosníka, mali rovnakú dĺžku ako otvory až na oblasť v blízkosti podpory. Betónová doska bola navrhnutá ako plná s príslušnou výstužou. Konfigurácia jednotlivých vzoriek je znázornená na Obrázku 4.



Obrázok 4. Konfigurácia experimentálnej vzorky.

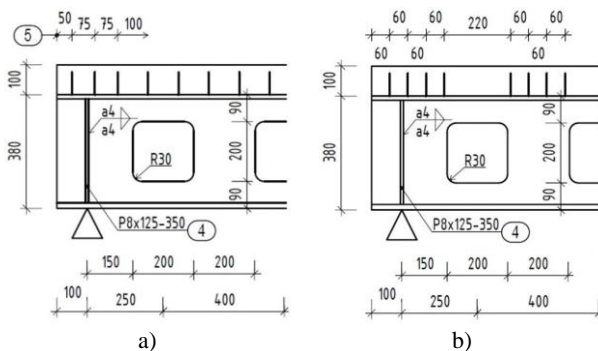
Naviac je prehľad jednotlivých parametrov je uvedený v Tabuľke 1.

Tabuľka 1. Prehľad geometrických parametrov skúmaných vzoriek.

komponent	šírka [mm]	výška [mm]	pevnosť [MPa]	detail prierezu nosníka
betónová doska	800	100	48	
horná pásnica	120	14	280	
stena	12	350	276	
dolná pásnica	270	16	304	
otvor	200	200	-	
šmykový trň	priemer [mm]	výška [mm]	pevnosť [MPa]	
driek	13	67	327	
hlava	25	8		

Spriahnutie bolo navrhnuté vo forme šmykových trňov. Na základe argumentov uvedených v [14] sa skúmal vplyv významu usporiadania šmykových prostriedkov na celkovú odozvu týchto nosných prvkov na zaťaženie. Tento parameter sa skúmal v dvoch alternatívach. V prvej sa použilo rovnomerné rozloženie trňov, zatiaľ čo v druhej sa použilo nerovnomerné rozloženie (Obrázok

5), ktoré bolo charakterizované vynechaním spriahovacích prvky nad otvormi, avšak pri zachovaní rovnakého počtu.



Obrázok 5. Alternatívy usporiadania šmykových trŕnov s použitím a) rovnomerných rozstupov, b) nerovnomerných rozstupov.

Vzhľadom na uloženie nosníka, ako najvhodnejšia možnosť sa ukázala forma štvorbodovej skúšky ohybom z dôvodu zaručenia ohybového namáhania za prítomnosti vysokej hodnoty šmykových síl. Konfigurácia vzoriek je znázornená na obrázku 6.



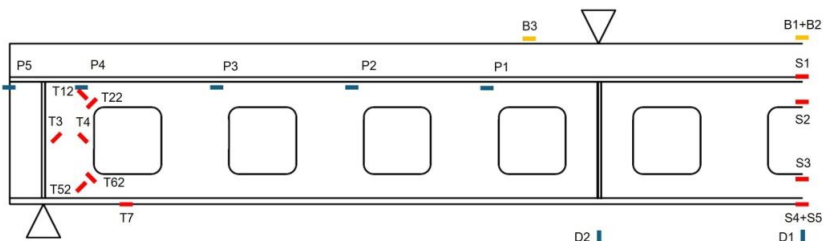
Obrázok 6. Znázornenie testovacej zostavy.

5.2 Meracie zariadenia

V rámci tohto experimentálneho programu sa na zaznamenávanie posunov použila súprava lineárnych diferenciálnych snímačov (LDS). V našom experimentálnom programe bolo ich hlavnou funkciou zaznamenávanie vertikálnej

priehybu a pozdĺžneho preklzu na úrovni spriahnutia. Zatiaľ čo priehyb sa meral v dvoch polohách - v strede rozpätia (D1) a pod pôsobiacou silou (D2), meranie preklzu sa zaznamenávalo v jednotnej vzdialenosti pozdĺž vzoriek (P1 až P5).

Na meranie pretvorení sa použili fóliové tenzometre. Pozície pre tieto zariadenia boli určené tak, aby bolo zaznamenané nielen porušenie vzorky ale aj celková odozva nosníka. Preto sa nachádzali samostatne na betónovej a oceľovej časti a taktiež v blízkosti otvoru a v strede nosníka. Zjednodušené usporiadanie snímačov je znázornené na Obrázku 7.



Obrázok 7. Konfigurácia snímačov.

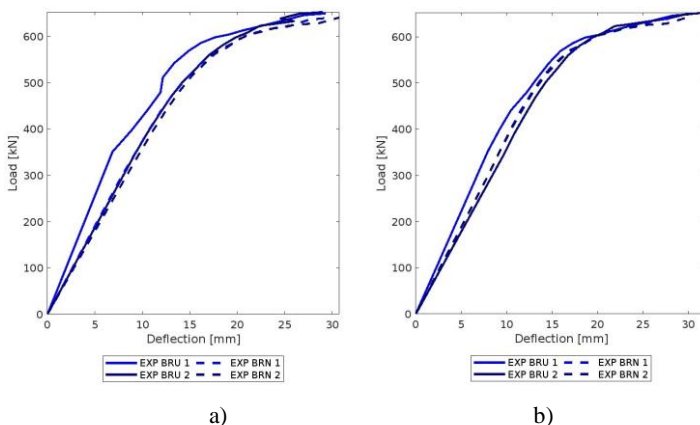
5.3 Pribeh experimentu

Zaťaženie bolo zavedené pomocou riadenej deformácie. Tá sa aplikovala postupným spôsobom, to znamená, že pri určitých úrovniach zaťaženia sa proces zaťažovania prerušil, aby sa zohľadnili účinky relaxácie materiálu.

Konkrétne sa vzorky zaťažovali postupne s prírastkami po 50 kN až do zaznamenania prvého výskytu plastizácie. Podľa meraní sa lineárna únosnosť vyčerpala na úrovni približne 600 kN. V tejto fáze došlo k zachyteniu počiatkovej plastizácie v mieste T12 a T52. Následne sa zaťažovacie prírastky znížili na úroveň 10 kN. Pri zaťažení blížiacom sa k hodnote 637 kN došlo taktiež k plastizácií spodnej oceľovej pásnice v stredu rozpätia (S4, S5). Ďalším zaťažením sa pozoroval proces pokročilej plastizácie bez výraznejšej zmeny. Na základe toho bol experiment vyhodnotený ako ukončený pri priehybe 32 mm. Na Obrázku 8 je znázornený vzťah medzi zaťažením a deformáciou z polohy D1 a D2 bez relaxačných účinkov pre celý priebeh experimentu.

S odkazom na jeden z hlavných cieľov tohto výskumu – určenie vplyvu zmeny rozmiestnenia šmykových trťov na pôsobenie spriahnutých nosníkov s otvormi v stenách, bolo možné podľa obrázku 8 parciálne vyhodnotiť daný vplyv. Ako môžeme pozorovať, že nebola dosiahnutá žiadna zjavná zmena. Naopak, je viditeľná veľmi dobrá zhoda medzi jednotlivými vzorkami. To naznačuje, že význam tohto parametru z globálneho hľadiska nie až tak významný ako sa

predpokladalo. Na druhej strane, jeho lokálny vplyv na úrovni spriahnutia môže byť rozhodujúci.



Obrázok 8. Vzťah sily a deformácie skúmaných vzoriek v mieste a) D1 a b) D2.

Podrobná diskusia o experimentálnych údajoch bude uvedená v nasledujúcej kapitole, ktorá sa zaoberá overením referenčného MKP modelu.

5.4 Materiálové vlastnosti

Pri skúmaní materiálových vlastností ocelevej časti vzoriek sa vykonali série ťahových skúšok v súlade s normou EN ISO 6892-1: 2019. Vzorky boli odobraté z oblastí na úrovni spodnej pásnice a taktiež steny, v ktorých sa predpokladalo minimálne namáhanie. Priemerné hodnoty nameraných veličín sa nachádzajú v Tabuľke 2.

Tabuľka 2. Priemerné hodnoty nameraných veličín pre oceľ.

komponent	výška [mm]	šírka [mm]	medza klzu [MPa]	medza pevnosti [MPa]
stena	12,00	13,65	276,16	423,49
spodná pásnica	15,83	13,40	304,00	424,51

V prípade určenia vlastností betónu, boli vzorky vytvorené pri samotnej betonáži a taktiež odobraté jadrovým vrtním po vykonaní experimentálnych meraní, v oboch prípadoch vo forme valcov štandardizovaných rozmerov. Medzná pevnosť betónu v tlaku bola definovaná na úrovni 46,18 MPa.

Na základe uvedeného bol stanovený súbor vstupných parametrov pre spoľahlivý MKP model.

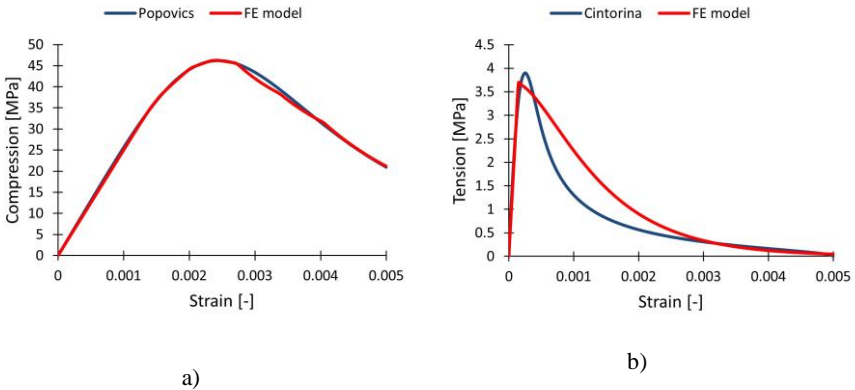
6 REFERENČNÝ KONEČNO-PRVKOVÝ MODEL

V nasledujúcich častiach sa uvedie opis referenčného MKP modelu zahŕňajúci materiálové hľadisko, opis použitých konečných prvkov a koreláciu údajov s experimentálnym meraním.

6.1 Betónová časť

Ako materiálový model pre popis pôsobenia betónu sa použil Microplane model. Napriek jeho mimoriadnej kompetencii, vzniká pri jeho použití mierna komplikácia v súvislosti s definovaním jeho vstupných parametrov. Keďže Microplane model nie je možné definovať typickým vzťahom medzi napätím a pretvorením ako pri klasických konštitučných modeloch, bol vyvinutý kalibračný kód využívajúci parametrický jazyk ANSYS APDL.

Jeho princíp spočíva v prvotnej definícii parametrov na MKP modeli kocky s následným overením vzhľadom na základné vzťahy napätia a pretvorenia pre betón v jednoosovom tlaku [15] a ťahu [16]. Korelácia dát je znázornená na obrázku 9. Prehľad vstupných parametrov pre Microplane model je zhrnutý v tabuľke 3.



Obrázok 9. Korelácia numerických údajov so vzťahmi napätia a deformácie pri a) tlaku a b) ťahu.

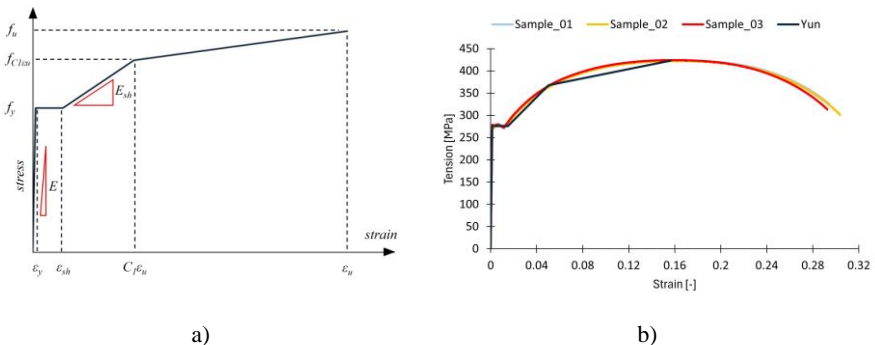
Tabuľka 3. Prehľad vstupných parametrov pre Microplane.

Parameter	Označenie	Hodnota
Modul elasticity	E	31 GPa
Poissonova konštanta	ν	0,18
Jednoosá pevnosť v tlaku	f_{uc}	46,18 MPa
Dvojosá pevnosť v tlaku	f_{bc}	53,11 MPa
Jednoosá pevnosť v ťahu	f_{ut}	3,88 MPa
Intersection between comp. cap and DP yield function	σ_{vc}	-35,41 MPa
Ratio between the major and minor axes of the cap	R	2
Hardening material constant	D	80000
Tension cap hardening constant	R_T	1
Tension damage threshold	γ_{t0}	0
Compression damage threshold	γ_{c0}	1E-4
Tension damage evolution constants	β_t	6000
Compression damage evolution constants	β_c	2000
Charakteristická dĺžka elementu	l	50 mm
Nonlocal interaction range parameter	c	4500 mm ²
Over-nonlocal averaging parameter	m	2

Autor by rád odkázal čitateľa na podrobnejší popis uvedených parametrov v [17].

6.2 Oceľová časť

Pre oceľový nosník sa použili konštitutívne rovnice z [18]. Zjednodušené zobrazenie priebehu napätia a pretvorenia s následným porovnaním s experimentálnymi údajmi je znázornené na obrázku 10.



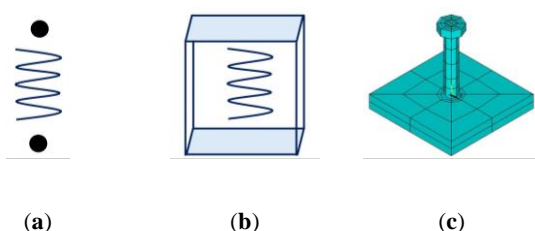
Obrázok 10. Znázornenie a) aplikovaného materiálového zákona pre oceľ b) s porovnaním s experimentálnymi údajmi.

6.3 Spriahnutie

Ako najjednoduchší popis šmykového spoja v MKP modeloch spriahnutých nosníkov sa bežne používa pružinový prvok [19].

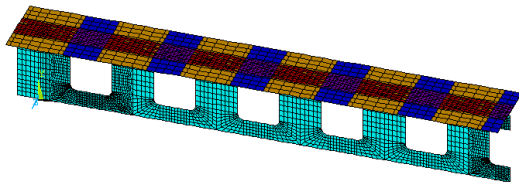
Pri hľadaní vhodnejšej alternatívy sa 3D MKP model šmykového tŕňa javí ako výstižnejší [20]. Avšak kvôli vyššej numerickej náročnosti sa považuje táto metóda za pomerne náročnú.

Alternatívu k obom spomenutým predstavuje 2D MKP kontakt (obrázok 11). Tento model využíva jednoduchosť pružinového modelu a čiastočne zachováva zložitosť 3D MKP modelu.



Obrázok 11. Alternatívy diskretizácie šmykového spoja v modeloch MKP a) pružina, b) 2D MKP kontakt a c) 3D MKP model.

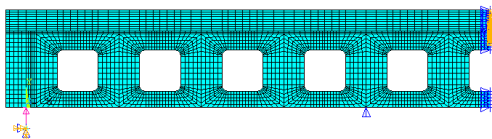
2D MKP kontakt sa deformuje na základe teórie pružných polpriestorov. Nutné je rozlíšiť tuhosť materiálov, ktoré prichádzajú do kontaktu. Vzhľadom na mechanické vlastnosti spriahnutia sa ako najvhodnejší typ 2D kontaktu zvolil model „no-separation“. Pri podrobnom popise správania sa tohto kontaktu sa typická odozva šmykového spoja na zaťaženie riadila vhodnými hodnotami normálovej (FKN) a tangenciálnej (FKT) tuhosti a maximálnym šmykovým napätím (TAUMAX). Jednotlivé hodnoty týchto veličín sa najskôr stanovili pre šmykový tŕň a následne sa aplikovali na príslušnú plochu. Keďže vzorky nosníkov mali dve alternatívy usporiadania šmykových tŕňov, na rozhraní materiálov boli modelované oblasti vyjadrujúce tento parameter Obrázok 12.



Obrázok 12. Znázornenie rozdelenia plochy na rozhraní materiálov pri použití rovnomerného a nerovnomerného usporiadania šmykových spojov.

6.4 Štruktúra MKP modelu

Na diskretizáciu skutočných vzoriek sa použila kombinácia jedno-, dvoj- a trojrozmerných prvkov. Pokiaľ ide o spodný oceľový pás a pásnicu, tie boli modelované pomocou dvojrozmerných prvkov SHELL181. Na druhej strane oceľový horný pás bol diskretizovaný trojrozmernými prvkami SOLID185. Prechod k betónovej doske bol vykonaný pomocou pevných prvkov CPT215. Tu je nevyhnutné poznamenať, že tento prvok má implementované možnosť kombinovať plastickú odozvu s poškodením, okrem toho poskytuje štrukturálnu implicitnú reguláciu gradientu pomocou nelokálneho poľa, čo je jedna z jeho hlavných schopností umožňujúca správnu simuláciu pôsobenia betónu bez akýchkoľvek problémov s konvergenciou. Oceľová výstuž bola opísaná pomocou LINK180 s vhodným prepojením s uzlami prvkov tvoriacich betónový prvok. Ako posledný bolo definované spriahnutie pomocou 2D kontaktu a využitia prvkov TARGE170 a CONTA174. Ilustrácia referenčného modelu MKP je znázornená nižšie (Obrázok 13).



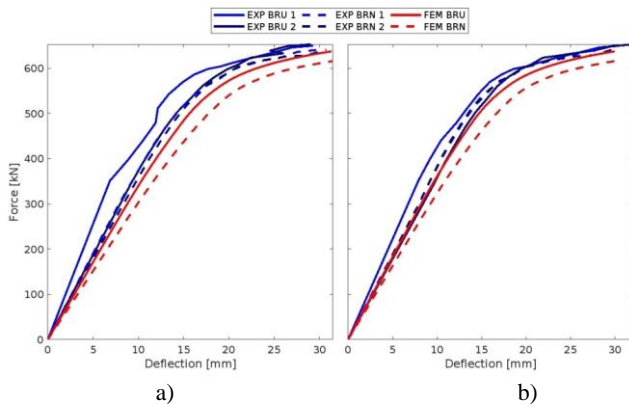
Obrázok 13. Referenčný model konečných prvkov.

6.5 Validácia MKP modelu

V nasledovnom sa uvedú len tie najvýznamnejšie grafy potvrdzujúce dôveryhodnosť referenčného MKP modelu.

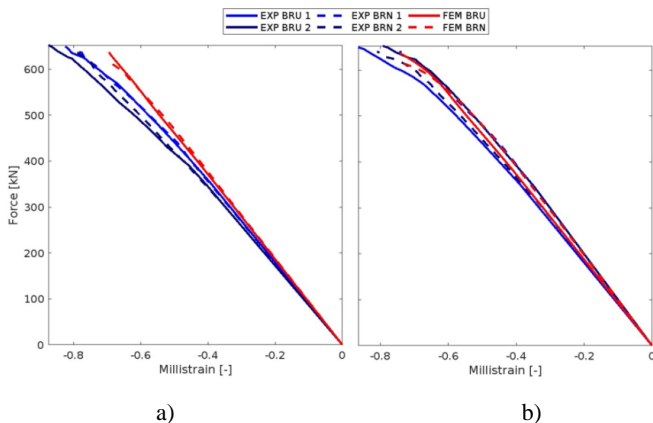
Na obrázku 14 je znázornená závislosť medzi zaťažením a priehybom, ktoré opisujú celkové správanie vzoriek. Štyri experimentálne skúšané vzorky majú modrú farbu a plnú alebo prerušovanú čiaru interpretujúcu rovnomerné (BRU) alebo nerovnomerné (BRN) rozloženie šmykových trŕňov. Pričom referenčné MKP modely pre obe tieto alternatívy majú červenú farbu.

Prezentované údaje boli namerané v polohách D1 a D2. Hoci boli zavedené dve alternatívy usporiadania šmykových trŕňov, vo všetkých štyroch testovaných nosníkoch bolo možné pozorovať takmer rovnakú tendenciu odozvy na zaťaženie. Maximálne zaťaženie rovnajúce sa 637 kN bolo definované pri priehybe približne 32 mm, čo predstavuje približne 1/400 rozpätia nosníkov. Okrem pomerne výbornej zhody medzi experimentálnymi a numerickými dátami, je možné pozorovať mierne väčšiu odozvu v prípade MKP modelov. Hlavná príčina daného javu spočívala v zachovaní určitej rezervy odolnosti voči reálnym vzorkám.



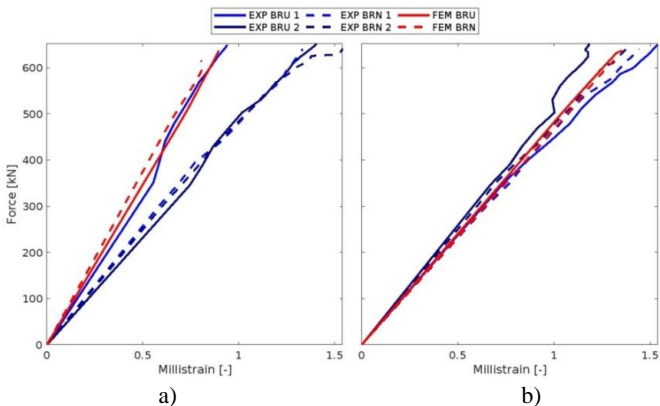
Obrázok 14. Vzťah sily a pretvorenia z pozície a) D1 a b) D2.

Ďalej boli pozorované aj pretvorenia v pozdĺžnom smere na hornej úrovni betónovej dosky (pozícia B1, B3 - Obrázok 15). Treba poznamenať, že tieto merania boli určené výlučne na doplnenie obrazu o komplexnom stave napätia vyskytujúcom sa v skúšaných vzorkách. Keďže betónová doska je pod tlakom, hodnoty sú uvedené so záporným znamienkom.



Obrázok 15. Vzťah medzi silou a pretvorením v mieste a) B1 a b) B3.

Taktiež bolo vykonané meranie pretvorenia na oceľovej časti spriahnutého nosníka uprostred rozpätia (poloha S3, S4), teda v zóne čistého ohybu (Obrázok 16).

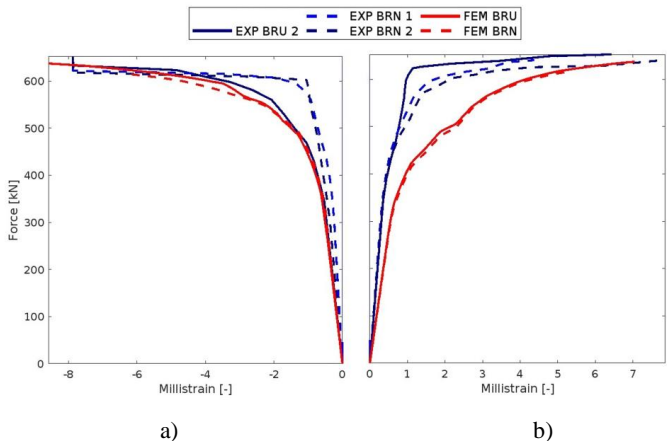


Obrázok 16. Vzťah sily a pretvorenia v mieste a) S3 a b) S4.

Ak sa zameriame na ľavú časť obrázku 16, výsledky bohužiaľ vykazujú mierne rozdiely. Dôvody tohto nepriaznivého stavu možno hľadať vo formulácii MKP modelu, v ktorom boli v blízkosti daných miest aplikované okrajové podmienky symetrie a taktiež sa pre spriahnutie zaviedlo výrazné zjednodušenie vo forme 2D MKP kontaktu. Nutné je však podotknúť, že sa tieto merania uskutočnili v blízkosti hrán otvorov, pre ktoré je typická koncentrácia vysokých napätí v ich blízkosti, čo vo všeobecnosti spôsobuje nie len ťažkosti s presnosťou simulácie ale aj s presnosťou meraní. Napriek uvedenému sa výsledky z Obrázku 16 b) takmer dokonale zhodujú v celom rozsahu pozorovaných pretvorení.

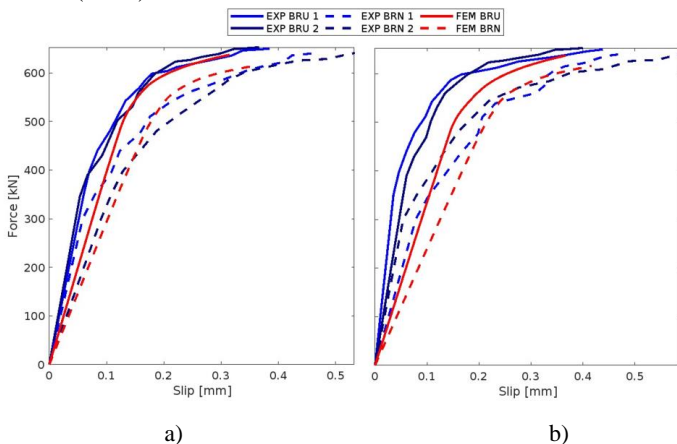
Aby bolo možné zachytiť porušenie vzoriek Vierendeelovým mechanizmom, konfigurácia tenzometrov (T12, T52) v blízkosti krajného otvoru bola usporiadaná tak, aby nasledovala trajektóriu hlavných napätí. Aj vďaka tomu boli na týchto miestach zaznamenané významné pretvorenia. Tieto merania sú znázornené nižšie (Obrázok 17).

Kde je s ohľadom na použitie rozdielneho usporiadania šmykových trňov možné pozorovať takmer identický vývoj pretvorení. Čo iba dokumentuje že zmena tohto usporiadania má vplyv najmä v úrovni spriahnutia, čiže na namáhanie jednotlivých šmykových trňov.



Obrázok 17. Vzťah medzi silou a pretvorením v mieste a) T12 a b) T52.

Navyše, keďže preklz na rozhraní materiálov v spriahnutých nosníkoch nepriamo definuje úroveň spriahnutia a tým aj tuhosť daného prvku, jeho meraním je možné identifikovať zmenu celkovej odozvy nosného prvku na zaťaženie. Ako dokumentuje Obrázok 18, nerovnomerné usporiadanie trňov (BRN) viedlo k mierne mäkšej odozve a väčším hodnotám preklzu v porovnaní s rovnomerným usporiadaním (BRU).



Obrázok 18. Vzťah medzi silou a preklzom na rozhraní materiálov a) P2 a b) P3.

Z už prezentovaných údajov možno zhrnúť:

- Celkový stav namáhania spriahnutých nosníkov bol pomerne presne zdokumentovaný.
- Pozorované odchýlky vzhľadom na referenčné MKP modely boli v prijateľnom rozsahu, čím boli splnené základné požiadavky na vykonanie dôveryhodnej parametrickej MKP analýzy.
- Pri zmene usporiadania šmykových tŕňov sa zaznamenala mierna zmena v odozve spriahnutých nosníkov na zaťaženie, napriek tomu je na základe výsledkov predpokladané, že daný parameter má vplyv najmä v úrovni spriahnutia tzn. pri jednotlivom namáhaní tŕňov.

7 PARAMETRICKÁ KONEČNO-PRVKOVÁ ŠTÚDIA

Aby bolo možné interpretovať rozloženie šmykových síl medzi horným a dolným T-prierezom (ich rozhranie sa nachádza v strede výšky oceľovej steny), boli pozdĺž MKP modelov spriahnutých nosníkov každých 10 mm vytvorené vertikálne rezy na výšku jednotlivých T-prierezov. V mieste rezov sa odčítal priebeh šmykových pretvorení τ_{xz} , ktorý bol následne integrovaný. Týmto spôsobom sa získali hodnoty šmykových síl vzhľadom na horný a dolný T-prierez. Výsledky takéhoto prístupu boli už uvedené skôr na Obrázku 2 a 3.

Keďže posúdenie voči Vierendeelovmu namáhaniu sa vykonáva len na pozícií stredu jednotlivých otvorov, rozdelenie šmykových síl je postačujúce uviesť len v spomenutých miestach.

V snahe identifikovať kľúčový faktor pre redistribúciu šmykových síl, bola vykonaná rozsiahla parametrická MKP štúdia. Skúmané bolo nasledujúce parametre:

- rozmiestnenie šmykových tŕňov,
- pevnosť betónu,
- výška betónovej dosky,
- pevnosť ocele,
- rozmery spodnej pásnice,
- rozmery oceľovej steny,
- rozmery otvoru.

Prezentácia celého rozsahu výsledkov by bola kontraproduktívna, preto sa v Tabuľke 4 uvedie vplyv jednotlivých parametrov v pomere k referenčnému MKP modelu.

Tabuľka 4. Prehľad skúmaných parametrov a ich vplyv.

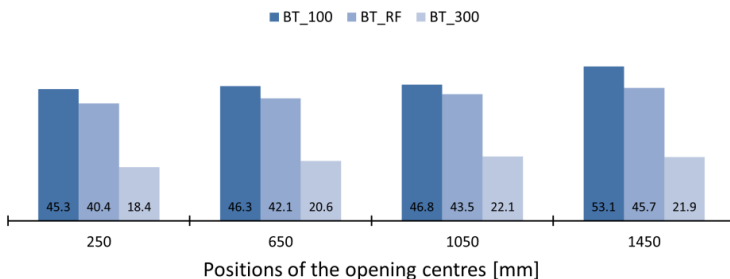
parameter	hodnota parametra			zmena	
	vzorka 1	Referenčná vzorka	vzorka 2	vzorka 1	vzorka 2
výška betónovej dosky	80 mm	100 mm	120 mm	+10,7%	-1,8%
šírka spodnej pásnice	250 mm	270 mm	290 mm	-1,1%	+0,5%
hrúbka steny	10 mm	12 mm	14 mm	-8,6%	+7,9%
výška steny	315 mm	350 mm	385 mm	-1,1%	+0,9%
dĺžka otvoru	100 mm	200 mm	300 mm	+7,3%	-7,7%
výška otvoru	100 mm	200 mm	300 mm	+16,2%	-54,5%

Na základe uvedenej parametrickej štúdie sa zistilo, že veľkosť otvoru, najmä jeho výška, zohráva hlavnú úlohu pri prerozdelení šmykových síl medzi jednotlivými T-prierezmi. Podrobné parametre skúmaných vzoriek sú uvedené v Tabuľke 5.

Tabuľka 5. Geometrické vlastnosti skúmaných MKP vzoriek.

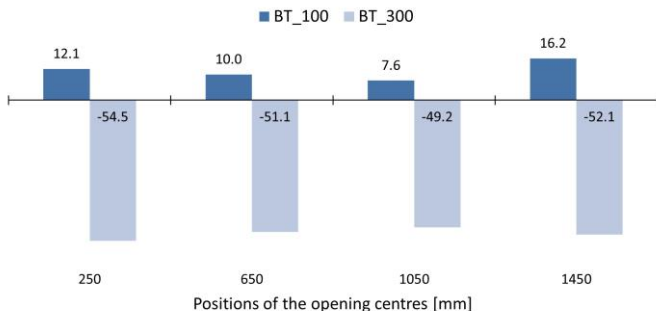
vzorka	BT_100	BT_RF	BT_300
dĺžka otvoru l_0	200	200	200
výška otvoru h_0	100	200	300
pomer l_0/h_0	2,00	1,00	0,67

Výsledky zachytávajúce vplyv prijatých úprav sú znázornené nižšie (Obrázok 19). V porovnaní s referenčnou vzorkou BT_RF, ktorá predstavuje MKP model experimentálnych vzoriek, je možné pozorovať výrazný pokles proporcie šmykovej sily pre dolný T-prierez, až o 23,8 % v prípade vzorky BT_300.



Obrázok 19. Podiel šmykovej sily pre dolný T-prierez.

Táto zmena je zreteľnejšia z Obrázku 20, kde sú uvedené hodnoty opäť v pomere k referenčnej vzorke.



Obrázok 20. Zmena šmykovej sily pre dolný T-prierez v pomere k referenčnej vzorke.

Na základe prezentovaných výsledkov sa vykonali doplňujúce MKP výpočty, čím sa rozšírila použiteľnosť zistení na nosníky s pomerom výšky ocelevej steny k rozpätiu nosníka v rozsahu od 1/11 do 1/15. Geometrické údaje sú uvedené v Tabuľke 6 (rozmery sú v mm).

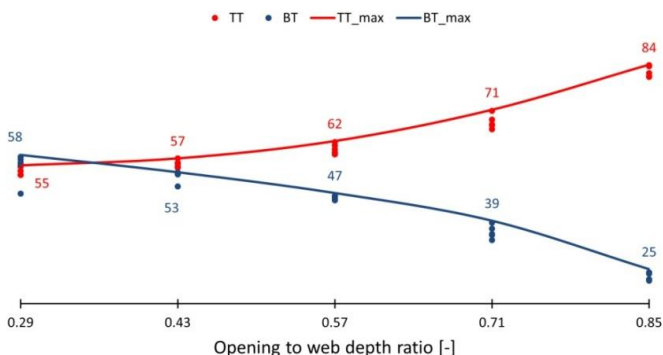
Tabuľka 6. Geometrické charakteristiky popisujúce dodatočné MKP výpočty.

Pomer otvoru k výške steny									
0,29		0,43		0,57		0,71		0,85	
výška									
otvoru	steny	otvoru	steny	otvoru	steny	otvoru	steny	otvoru	steny
87	300	94	300	100	300	109	300	116	300
94	325	140	325	150	325	161	325	172	325
100	350	185	350	200	350	214	350	228	350
109	375	231	375	250	375	266	375	284	375
116	400	276	400	300	400	319	400	340	400

Z odvodených výsledkov sa prevzali len maximálne hodnoty proporcie šmykovej sily pre každú vzorku samostatne pre horný a dolný T-prierez bez ohľadu na polohu otvoru v pozdĺžnom smere. Dôvodom tohto postupu bolo zabezpečenie určitej rezervy odolnosti.

Na základe uvedeného prístupu boli stanovené dve krivky vyjadrujúce maximálne hodnoty proporcie šmykových síl pre horný (TT_max) a dolný (BT_max) T-prierez s ohľadom na pomer výšky otvoru k výške ocelevej steny

(Obrázok 21). Ako je možné vidieť, hodnoty TT_max sa pohybujú od 55% do 84%, zatiaľ čo hodnoty BT_max od 25% do 58%.



Obrázok 21. Prerozdelenie šmykovej sily medzi horným a dolným T-prierezom.

S cieľom poskytnúť všeobecnejšiu formu pre dané zistenia, rovnice definujúce závislosť podielu šmykovej sily pre jednotlivé T-prierezy vychádzajúce z pomeru výšky otvoru k výške ocelevej steny boli zadefinované nasledovne:

$$\text{horný T-prierez} \quad y = 0,55 + \frac{x^3}{2}; \quad (1)$$

$$\text{dolný T-prierez} \quad y = 0,65 - \frac{x^2}{2}; \quad (2)$$

$$\text{obor funkcie} \quad 0,29 \leq x \leq 0,85;$$

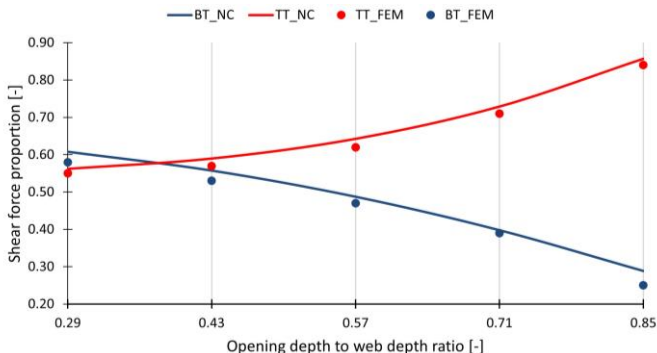
os y vyjadruje pomer šmykovej sily

kde

os x vyjadruje pomer výšky otvoru k výške steny

Na tomto základe bola definovaná nová koncepcia definujúca podiel šmykovej sily pre jednotlivé T-prierezy pri konkrétnom pomere výšky otvoru k výške steny (Obrázok 22).

Vyššie uvedené vzťahy nielen zjednodušujú, ale aj spresňujú súčasný prístup k posúdeniu odolnosti voči Vierendeelovým účinkom v prítomnosti vysokých šmykových pre nosníky s pomerom výšky ocelevej steny k rozpätiu v rozsahu 1/11 až 1/15.



Obrázok 22. Navrhovaná koncepcia definície vs. dáta z parametrickej MKP analýzy.

Je nutné poznamenať, navrhnutú metódu je potrebné overiť na širšom rozsahu experimentálnych vzoriek.

Napriek tomu autori veria, že predložené zistenia podnietia ďalší výskum, ktorý sa pokúsi overiť zdokumentované.

8 ZÁVER

V rámci tejto dizertačnej práce za meranej na odolnosť a pôsobenie spriahnutých nosníkov s otvormi v stene boli prezentované nasledovné tematické okruhy:

- Rozsiahly rozbor aktuálnych vedeckých poznatkov a momentálnej koncepcie k návrhu odolnosti.
- Prehľad výsledkov z analyticko-numerických štúdií.
- Experimentálny program.
- Detailný popis simulácia betónu v prostredí ANSYS.
- Rozsiahla parametrická MKP analýza využitím Microplane modelu.
- Predstavenie novej koncepcie definujúcej prerozdelenie šmykovej sily medzi horným a dolným T-prierezom s cieľom zjednodušiť momentálny prístup k stanoveniu odolnosti voči Vierendeelovmu namáhaniu.

Na základe uvedeného autor pevne verí, že tento výskum prispel k hlbšiemu porozumeniu pôsobenia spriahnutých nosníkov s otvormi v stenách z viacerých hľadísk.

LITERATÚRA

1. EN 1994-1-1 (2004), Eurocode 4, Design of composite steel and concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings, CEN, Brussels, 2004.
2. EN 1993-1-1 (2005), Eurocode 3, Design of steel structures, Part 1-1: General rules for buildings, CEN, Brussels, 2005.
3. Granade, Charles J. An investigation of composite beams having large rectangular openings in their webs. Master's Thesis, University of Alabama at Tuscaloosa, 1968.
4. Todd, D. M., Cooper, P. B. Strength of Composite Beams with Web Openings. *Journal of the Structural Division*, 1980, 106(2), 431–444.
5. Clawson, W. C., Darwin, D. Strength of Composite Beams At Web Openings. *Journal of the Structural Division*, 1982, 108(ST3), 623–641.
6. Redwood, R., Cho, S. H. Design of steel and composite beams with web openings. *Journal of Constructional Steel Research*, 1993, 25(1–2), 23–41.
7. R.M. Lawson, S.J. Hicks, Design of Beams with Large Web Openings, The Steel Construction Institute, 2011.
8. Lawson, R. M., Lim, J., Hicks, S. J., Simms, W. I. Design of composite asymmetric cellular beams and beams with large web openings. *Journal of Constructional Steel Research*, 2006, 62(6), 614–629.
9. Chung, K. F., Liu, C. H., Ko, A. C. H. Steel beams with large web openings of various shapes and sizes: An empirical design method using a generalised moment-shear interaction curve. *Journal of Constructional Steel Research*, 2003, 59(9), 1177–1200.
10. Classen M. On the structural behavior of composite beams with composite dowels and large web openings. PhD thesis, RWTH Aachen University Institute of Structural Concrete (No. RWTH-2017-01834), 2016.
11. Classen, M., Kurz, W., Schäfer, M., Hegger, J. A mechanical design model for steel and concrete composite members with web openings. *Engineering Structures*, 2019, 197, 109417.
12. Tsavdaridis, K. D. Structural performance of perforated steel beams with novel web openings and with partial concrete encasement. PhD thesis, City University London, 2010.
13. Bartuš, J., Odrobiňák, J. Study on distribution of longitudinal shear forces in composite beams with web openings. *Transportation Research Procedia*, 2021, 55, 1221–1228.
14. Zeng, X., Jiang, S. F., Zhou, D. Effect of shear connector layout on the behavior of steel-concrete composite beams with interface slip. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2019, 9(1), 207.

15. Popovics, S. A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete. *Cement and Concrete Research*, 1973, 3(5), 583–599.
16. Cintora, T. Softening response of concrete in direct tension, Master thesis, New Jersey Institute of Technology, 1988.
17. Zreid, I., Kaliske, M. A gradient enhanced plasticity–damage microplane model for concrete. *Computational Mechanics*, 2018, 62(5), 1239–1257.
18. Yun, X., Gardner, L. Stress-strain curves for hot-rolled steels. *Journal of Constructional Steel Research*, 2017, 133, 36–46.
19. Classen, M. Limitations on the use of partial shear connection in composite beams with steel T-sections and uniformly spaced rib shear connectors. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 142, 99–112.
20. Lam, D., El-Lobody, E. Behavior of Headed Stud Shear Connectors in Composite Beam. *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131(1), 96–107.

PREHLAD PUBLIKÁCIÍ AUTORA

1. Bartuš, J., Odrobiňák, J. (2021). Study on distribution of longitudinal shear forces in composite beams with web openings. *Transportation Research Procedia*, 55, 1221–1228.
2. Bartuš, J., Odrobiňák, J. (2022). Analýza pôsobenia spriahnutých nosníkov s otvormi v stene, APOOK 2023, Kočovce.
3. Bartuš, J., Odrobiňák, J. (2022). Lateral-torsional buckling of nonsymmetrical plate girders with web openings. *Pollack Periodica*, 17(3), 47–52.
4. Bartuš, J., Odrobiňák, J. (2023). Composite Beams with Web Openings Employing Alternative Layout of Shear Connectors. *Transportation Research Procedia*, 74, 1079–1086.
5. Bartuš, J., Odrobiňák, J. (2023). Vplyv usporiadania otvorov v stenách spriahnutých oceľobetónových nosníkov. APOOK 2023, Osčadnica.
6. Bartuš, J., Odrobiňák, J. (2023). On Influence of Web Openings Presence on the Structural Performance of Steel and Concrete Beams. [Unpublished manuscript].
7. Bartuš, J., Odrobiňák, J. (2023). On FE modeling techniques of concrete in steel and concrete composite members. 020018.
8. Vanova, P., Dubecky, D., Weisssova, M., Bartuš, J., Kvocak, V. (2023). An experimental and numerical study of twin dowel type shear connector. *Scientific Reports*, 13(1), 3071.
9. Bartuš, J., Odrobiňák, J. (2024). On Shear Force Redistribution in Composite Steel and Concrete Beams with Web Openings. [Manuscript submitted for publication].
10. Bartuš, J., Odrobiňák, J. (2024). Prerozdelenie šmykového namáhania v spriahnutých oceľobetónových nosníkoch s otvormi v stenách, APOOK 2024, Čingov. [Manuscript submitted for publication].