



Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta

Ing. Klara Freudenberger

**Autoreferát dizertačnej práce
Hybridné sústavy z ocele a CLT**

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

v doktorandskom študijnom programe:

3659 Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb

v študijnom odbore:

35. stavebníctvo

Forma štúdia:

denná

Miesto a dátum:

Bratislava, máj 2024



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

Predkladateľ

Ing. Klara Freudenberger
Stavebná fakulta STU
Katedra kovových a drevených konštrukcií
Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovenská republika

Školiteľ

prof. Ing. Jaroslav Sandanus, PhD.
Stavebná fakulta STU
Katedra kovových a drevených konštrukcií
Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovenská republika

Autoreferát bol rozoslaný dňa:.....

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa.....o.....hod.
na Katedre kovových a drevených konštrukcií Stavebnej fakulty Slovenskej technickej univerzity
v Bratislave, Radlinského 11, v miestnosti č.

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

1. Úvod

Spriahnuté konštrukcie predstavujú efektívny príklad nosných konštrukcií, ktorý je založený na princípe spolupôsobenia jednotlivých materiálov v rámci zloženého prierezu. Na základe toho je dosiahnuté lepšie využitie použitých materiálov.

Spriahnutím takéhoto zloženého prierezu sa dokáže obmedziť nepriaznivé namáhanie jednotlivých materiálov – v prípade stropných konštrukcií napríklad eliminácia ťahových oblastí v betóne. Zvýšením efektivity nosnej konštrukcie je možné redukovať spotrebu materiálu, ako aj vyhovieť požiadavkám architektov s nárokmi na estetické a štíhle konštrukcie s čo najväčšími dosahovanými rozpätiami medzi podperami. Veľkú rolu hrá aj možnosť prefabrikácie mimo staveniska. Stupeň spriahnutia vyjadruje schopnosť prenášania pozdĺžnych šmykových síl pri jednotlivých častiach prierezov použitých v zloženom priereze, pričom spriahovací prostriedok by mal spĺňať dostatočnú odolnosť a duktilnosť.

V prípade použitia kombinácie dreveného a betónového prierezu je možné získať viaceré výhody v porovnaní so železobetónovou alebo čisto drevenou konštrukciou. Najmä v porovnaní so železobetónovými stropnými konštrukciami dochádza k redukcii hmotnosti nosných prvkov. Pri požiarnej situácii drevo slúži ako ochranná vrstva železobetónu (ŽB) a eliminuje sa explozívne odpraskávanie. Taktiež v prípade dreva na rozdiel od ocele nedochádza k znižovaniu materiálových parametrov pri zvyšujúcej sa teplote a vytvorená pyrolitická vrstva zabraňuje zvyšovaniu rýchlosti obhárانيا. Šmykové spojenie medzi drevom a betónom je charakterizované ako poddajné z dôvodu vplyvu popustenia medzi materiálmi.

V praxi sa najčastejšie vyskytuje nespriahnutá kombinácia ŽB dosky a dreveného trámu, čo predstavuje konštrukčne jednoduchší, no značne neefektívny variant nosnej konštrukcie. K spriahnutiu týchto konštrukčných prvkov dochádza najmä pri dodatočnom zosilňovaní či prípadnej sanácii zmieňovaných stropov - v takýchto situáciách sa najčastejšie ako spriahovacie prostriedky používajú skrutky.

Keďže efektivita doskových drevených stropov je preukázateľne vyššia oproti dreveným trámovým stropom (hlavne pri porovnateľnej hrúbke stropnej konštrukcie), postupne sa vyvíjajú spôsoby ako čo najvhodnejšie spriahovať drevené doskové prvky namiesto použitia trámov, ako aj implementovať ďalšie materiály (napr. oceľové nosníky) s cieľom zvýšiť odolnosť a zrýchliť stavebné procesy.

V úvode tejto práce je zhrnutý historický vývoj a súčasný stav drevo-betónových stropných konštrukcií a hybridných oceľových a drevených sústav. Následne sú uvedené súčasné metodiky o navrhovaní takýchto kompozitových stropných konštrukciách.

2. Ciele práce

Cieľom predkladanej práce je v maximálnej miere zamerať sa na potenciál hybridných konštrukcií na báze CLT a ocele v kombinácii s betónom. Konkrétne sa jedná o:

- Zhrnutie postupného vývoja drevených stropných konštrukcií a priblíženie možnosti spriahnutia pri drevo-betónových konštrukciách.
- Priblíženie súčasného stavu výskumu v oblasti spriahnutých drevo-betónových stropných konštrukcií a hybridných drevo-ocelových hybridných konštrukcií.
- Analýza vybraných typov drevených stropných konštrukcií a ich parametrická analýza poukazujúca na vplyv a druh drevenej časti prierezu.

- Analýza mechanizmov porušenia vybraných prípojových oblastí strednej nadpodperovej oblasti prostredníctvom numerických simulácií v programe ANSYS.
- Experimentálne overovanie hodnôt odolností a mechanizmov porušenia ťahovými skúškami navrhovaných drážok.
- Analýza vybraných prípojových detailov pomocou ohybových skúšok, ktoré verifikujú mechanizmy porušenia z predošlých analýz a stanovenie odolností navrhovaných prípojov.

Na začiatku práce sa výskum zameriava na analýzu vhodnosti aplikovania vybraných typov metód spriahnutia pri drevo-betónových konštrukciách. Na základe použiteľnosti v praxi sa následne pre účely analýzy použije vybraný druh mechanických spojovacích prostriedkov. Poukazuje na variabilitu návrhu a možnosť vytvorenia jednotných okrajových podmienok pre spojovacie prostriedky v rámci overovaných typoch konštrukcií. Následne sa predstaví vhodnosť aplikácie jednotlivých typov nosných stropných konštrukcií. Ďalej sa uvedú ich výhody a nevýhody použitia.

Aj na základe preukázaných možností aplikovania jednotlivých typov stropných konštrukcií na báze dreva, sa v pokračujúcej analýze pristúpi k bližšiemu zameraniu sa na masívne (doskové) drevené konštrukčné prvky. Skúmajú sa možnosti prepojenia stropných panelov s prievlakmi. Zameriava sa na materiálové možnosti uplatnenia pre využitie ako prievlakov. Preukazuje sa nevyhnutnosť použitia kombinácie materiálov v rámci stropného systému a tým vytvorenia konceptu hybridnej sústavy.

V ďalšej fáze sa výskum zameria na optimalizáciu prípojového detailu strednej nadpodperovej oblasti v rámci štíhlej hybridnej drevo-ocelovej stropnej konštrukcie. Na základe numerickej analýzy bude možné:

- Zamerat' sa na analýzu jestvujúceho variantu prepojenia pomocou numerických analýz v programe ANSYS.
- Vytvoriť variantné riešenie prípojového detailu.
- Stanoviť mechanizmy porušenia a overenie správania prípojovej oblasti v dôsledku aplikovaného zaťaženia.
- Overiť vhodnosť smerovania výskumu pred experimentálnym overovaním.

Experimentálna analýza sa zameria na overenie jednotlivých variantov prípojových detailov.

V priebehu analýz sa postupne bude zameriavať na:

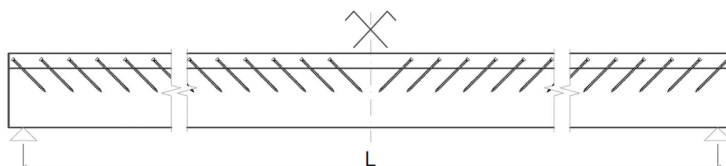
- Overenie mechanizmov porušenia prostredníctvom ťahových skúšok predikovaných z numerických analýz.
- Stanovenie vhodnosti použitia tvarov drážok.
- Optimalizáciu tvaru drážky.
- Overenie skúmanej nadpodperovej oblasti pomocou ohybových skúšok.
- Potvrdenie mechanizmov porušenia z numerických analýz a ťahových skúšok pri analýze vybraných detailov vystavených zaťaženiu prostredníctvom ohybových skúšok.
- Stanovenie odolností a maximálneho aplikovaného zaťaženia pre jednotlivé varianty prípoja.

Záverom práce bude vyhodnotenie možnosti vzájomného prepojenia v strednej nadpodperovej oblasti pri štíhlej stropnej konštrukcii.

3. Analytická - parametrická štúdia

Pre overenie efektívnosti bola vytvorená parametrická štúdia v programe Microsoft Excel. Porovnávali sa štyri systémy. Spriahnutý trámový drevo-betónový strop, spriahnutý CLT-betónový strop a ako referenčné boli riešené ich nespriahnuté varianty, a to trámový drevo-betónový strop a CLT-betónový strop. Tieto dva referenčné stropy boli vyhodnocované kvôli tomu, aby bolo možné vyhodnotiť efektívnosť spriahnutia.

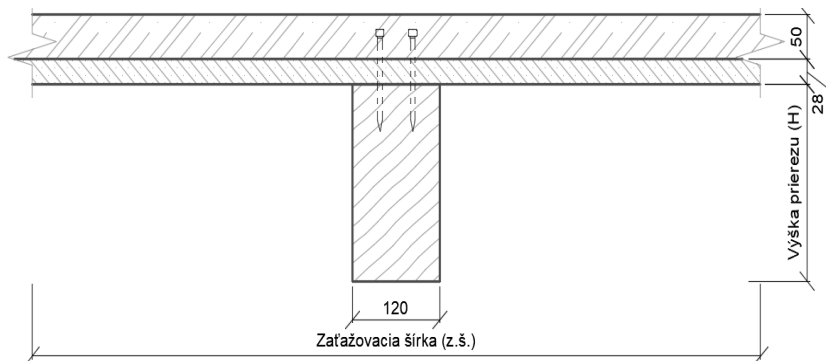
Priek v rámci jednotlivých systémov sa stanovilo aplikovanie rozpätí od 5 m do 10 m (každého 0,5 m), so zaťažovacou šírkou (ZŠ) 1 m (platí pre doskové prvky) ako prsto uložené systémy, a ďalej ich posudzovať ako nosníky. ZŠ zároveň prezentovala osovú vzdialenosť medzi jednotlivými skupinami radov spriahovacích prostriedkov, keďže pri trámovom systéme je možné aplikovať spriahovacie prostriedky len na rozhraní medzi trámom a betónovou doskou. Hrúbka betónovej dosky nebude ďalej v rámci prezentovaných výsledkov menená a jej hodnota je 50 mm. V rámci dosky je uvažovaná jedna vrstva betonárskej výstuže, ktorá má zabráňovať nadmernému zmršťovaniu betónu. Pri spriahnutých variantoch boli použité skrutky CTC od firmy Rothoblaas, s priemerom skrutky 9 mm a dĺžkou 240 mm, dvojice skrutiek boli ukladané v dvojiciach pod totožným uhlom 45° , osová vzdialenosť medzi dvojicami vrutov bola stanovená tak, aby vyhovovala pre všetky rozpätia (obr. 1). Tento krok nie je optimálny, avšak bol potrebný z dôvodu stanovenia jednotných okrajových podmienok pre všetky prípady. Z toho vyplýva, že ďalšie výsledky v rámci tejto parametrickej štúdie sa dajú považovať za mierne konzervatívne. Všetky konštrukcie boli zaťažené rovnakým plošným zaťažením, resp. rovnakou hodnotou zaťaženia na m^2 , a to úžitkové zaťaženie (2 kN/m), zaťaženie reprezentujúce tiaž nosných a nenosných stien (2,78 kN/m), ostatné stále zaťaženie od skladby podlahy (1,2 kN/m) a zaťaženie od vlastnej tiaže nosnej konštrukcie stropu [1].



Obr. 1: Schéma pozdĺžneho rezu umiestnenia spriahovacích prostriedkov.

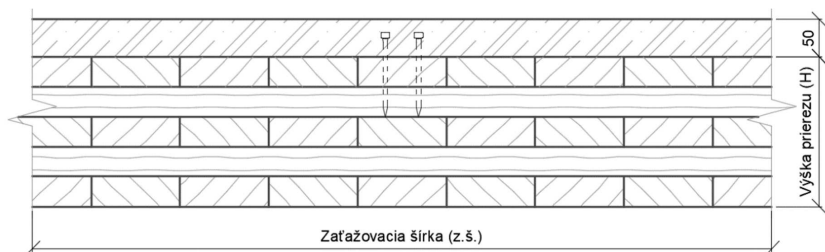
Pri návrhu boli jednotlivé varianty posúdené v súlade s normovým postupom [2] – návrh bol posúdený pre MSÚ a MSP na začiatku aj na konci životnosti konštrukcie s uvažovaním popustenia spriahovacích prostriedkov, dotvarovania dreva a zohľadnenie zmršťovania betónu vplyvom zmien v rámci životnosti konštrukcie.

Spriahnutý trámový drevo-betónový variant pozostával z dreveného trámu z KVH triedy pevnosti C24 (obr. 2). Trám (T) má konštantnú šírku (W_T) 120 mm a hrúbku (H_T) meniacu sa od 200 mm do 280 mm po 20 mm v rámci jednotlivých vzoriek v rámci variantu. Následne bolo aplikované stratené debnenie vo forme cemento-trieskovej dosky hrúbky 28 mm a už na ňu aplikovaná vrstva betónu C20/25. Na zabezpečenie spriahnutia boli aplikované skrutky CTC.



Obr. 2: Schéma Spriahnutého trémového drevo-betónového stropu.

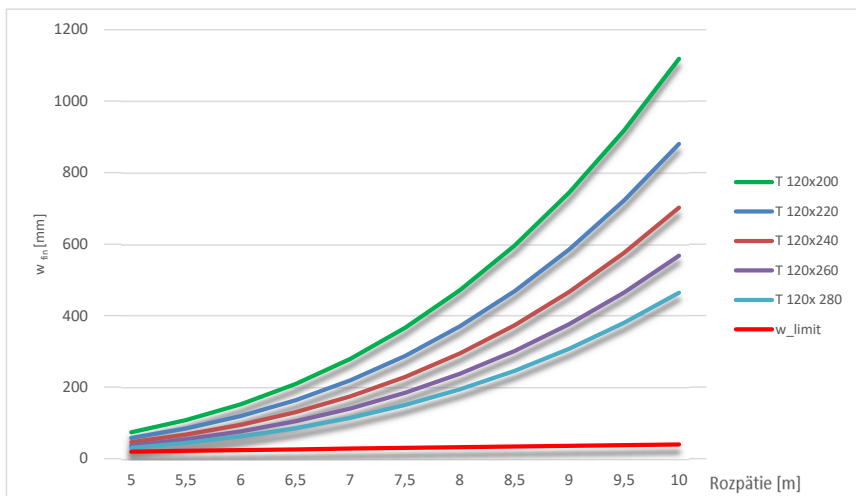
Ako najinovatívnejší variant bol vytvorený spriahnutý doskový CLT-betónový strop (obr. 3). Masívny drevený panel z CLT, použitý ako súčasť spriahnutého prierezu, plní nosnú funkciu a taktiež nahrádza potrebu použitia debnenia. Hrúbka (H_{CLT}) a počet vrstiev sa mení na základe potreby štúdie. Hrúbka panela je 200 až 280 po 20 mm v rámci jednotlivých vzoriek v rámci variantu. Následne je priamo na panel aplikovaná betónová vrstva o hrúbke 50 mm. Z vrchnej strany CLT panela sú aplikované spriahovacie prostriedky.



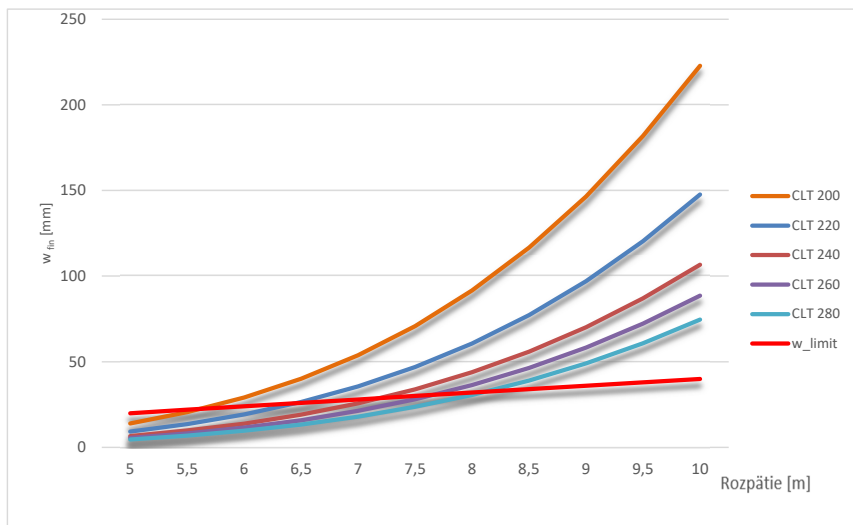
Obr. 3: Schéma Spriahnutého doskového CLT-betónového stropu.

Pre možnosť overenia účinnosti spriahnutia pri použitých systémoch boli k nim vytvorené ich nespriahnuté varianty s totožnými proporáciami a zaťažzeniami.

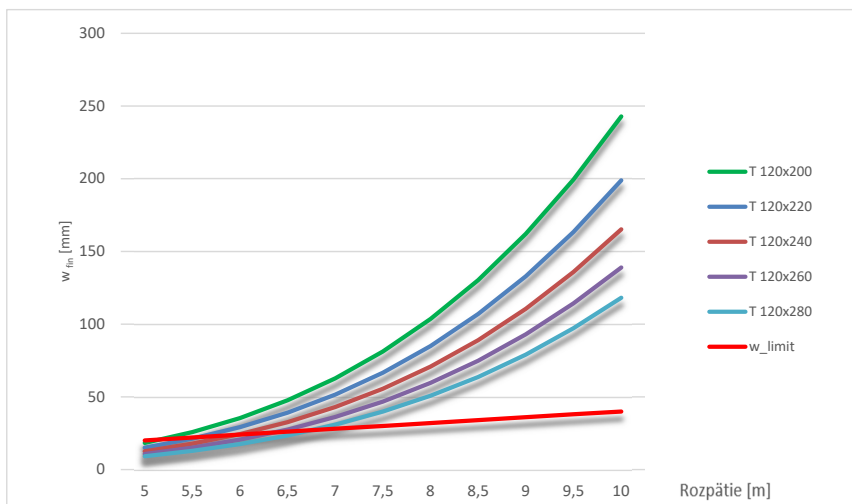
Vplyv možno vidieť na grafoch (obr. 4 až obr. 7), kde je vyobrazený konečný priebeh (w_{fin}) pre jednotlivé prierezy a vždy v rámci grafu je vyznačený aj limitný priebeh (w_{limit}). Už tu možno pozorovať (obr. 4), že nespriahnutý trémový variant nevyhovuje na ani jednej vzorke. Ostatné varianty už v rámci posudzovanej škály vyhovujú, resp. nachádzajú sa v spektre posudzovaného rozpätia.



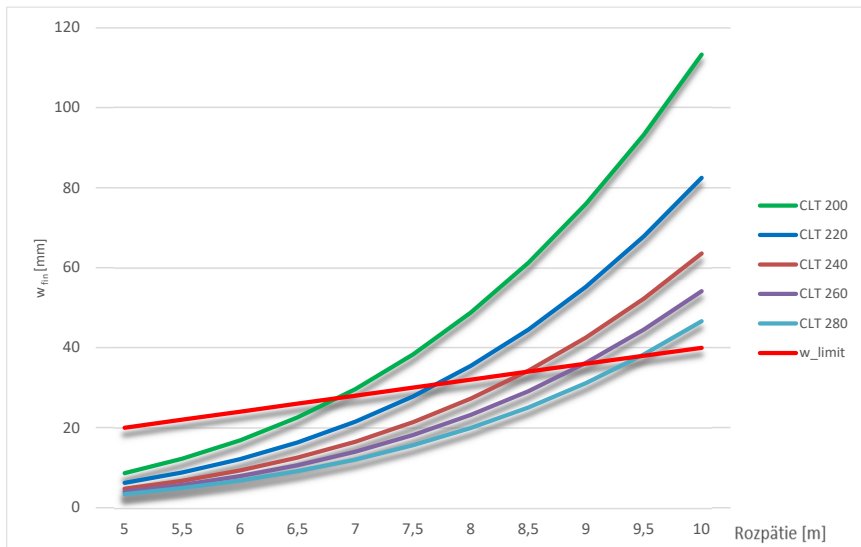
Obr. 4: Porovnanie konečných priehybov pri závislosti hrúbky trámu a rozpätia pri nespriahnutom trámovom drevo-betónovom variante.



Obr. 5: Porovnanie konečných priehybov pri závislosti hrúbky CLT dosky a rozpätia pri nespriahnutom doskovom drevo-betónovom variante.



Obr. 6: Porovnanie konečných prihybov pri závislosti hrúbky trámu a rozpätia pri spriahnutom trámovom drevo-betónovom variante.



Obr. 7: Porovnanie konečných prihybov pri závislosti hrúbky CLT dosky a rozpätia pri spriahnutom doskovom drevo-betónovom variante.

Z grafov je zrejmé, že spriahnutý doskový strop je efektívnejší a je ho možné aplikovať do rozpätia približne 9,5m. Na druhej strane, trámový spriahnutý strop je možné aplikovať do rozpätia približne 6,5m pri zaťažovacej šírke 1m. Pri porovnaní s ich nespriahnutými variantmi je možné pozorovať, že oba spriahnuté systémy sú efektívnejšie a je možné prekonať väčšie rozpätia.

Pri porovnaní je potrebné zohľadniť posúdenia pri medznom stave použiteľnosti, ale aj únosnosti. Je možné pozorovať z tab. 1 a 2, že môže nastať prípad, v ktorom posúdenie vyhovuje len na MSP.

Pri trámových variantoch je pozorované namáhanie vo vyššej miere oproti doskovým variantom. Už pri namáhaní pri hornom okraji betónovej časti je možné pozorovať násobné hodnoty pri posúdeniach. Rozdiel medzi spriahnutým a nespriahnutým variantom je 22,1% v prospech spriahnutého variantu. Vybrané vzorky trámových variantov vykazujú prekračujúce limitné hodnoty napätí. Je možné pozorovať, že v prípade spriahnutého trámového variantu došlo k poklesu o skoro 100% oproti pôvodným 214,6%. Taktiež pri posúdení konečného priehybu, kde trámový variant dosahuje hodnoty využitia až 230%. Hodnoty sú násobne prekročené a prvok nevyhovuje. Pri spriahnutom trámovom variante dochádza k poklesu na 63,2% a prvok už spĺňa podmienku pre limitný priehyb. Tak, ako bolo možné pozorovať značné rozdiely vo využiteľnosti medzi trámovým a spriahnutým trámovým variantom, je možné vidieť aj pri posúdeniach konečného priehybu. Na základe porovnania v rámci trámových variantov bolo možné pozorovať účinnosť spriahnutia.

V prípade doskovým variantom, kde sa využitie pri hornom betónovom okraji pohybuje v 7,2% a 13% sa jedná o minimálne rozdiely v porovnaní s trámovými variantmi. V posúdeniach je rozhodujúce namáhanie pri dolnom okraji dreveného prvku, kde normálové napätia trámových variantov značne prekračujú odolnosti materiálov. V prípade doskových variantov posúdenia vyhovujú. Pri ich vzájomnom porovnaní nie je pozorovaný značný rozdiel, jedná sa o pokles namáhania len o 5,7%. Dosky sú schopné lepšie prenášať zaťaženia. V rámci porovnania v uvedených tab. 1 a 2 boli porovnávané varianty pri rozpätíach 5 metrov. Toto rozpätie sa pre CLT dosky javí ako zbytočne nízke. Aby bolo možné plné využitie potenciálu CLT panelov, bolo by vhodné ich aplikovať pri väčšom rozpätí.

Tab. 1: Vyhodnotenie posúdení na konci životnosti konštrukcie pre trámové drevo-betónové stropy s rozpätím 5m.

Spriahnutý variant						Nespriahnutý variant					
Prierez		MSÚ - koniec životnosti			MSP - koniec životnosti	Prierez		MSÚ - koniec životnosti			MSP - koniec životnosti
Výška trámu [mm]	Šírka trámu [mm]	Využitie - σ_{comp} pri hornom okraji [%]	Využitie - σ_T pri dolnom okraji [%]	Využitie - τ_{max} [%]	Využitie - w_{lim} [%]	Výška trámu [mm]	Šírka trámu [mm]	Využitie - σ_{comp} pri hornom okraji [%]	Využitie - σ_T pri dolnom okraji [%]	Využitie - τ_{max} [%]	Využitie - w_{lim} [%]
200	120	39,60	157,78	50,02	91,60	200	120	84,28	288,69	69,36	370,48
220	120	34,41	136,83	46,63	75,61	220	120	65,91	248,13	65,56	289,82
240	120	30,23	119,86	43,70	63,21	240	120	52,27	214,56	61,84	229,97
260	120	26,80	105,90	41,13	53,45	260	120	42,03	186,78	58,32	184,97
280	120	23,96	94,30	38,86	45,65	280	120	34,23	163,72	55,05	150,69

Tab. 2: Vyhodnotenie posúdení na konci životnosti konštrukcie pre doskové drevo-betónové stropy s rozpätím 5m.

Spriahnutý variant					Nespriahnutý variant				
Prierez	MSÚ - koniec životnosti			MSP - koniec životnosti	Prierez	MSÚ - koniec životnosti			MSP - koniec životnosti
Výška CLT panela [mm]	Využitie - σ_{con} pri hornom okraji [%]	Využitie - σ_{CLT} pri dolnom okraji [%]	Využitie - τ_{max} [%]	Využitie - w_{lim} [%]	Výška CLT panela [mm]	Využitie - σ_{con} pri hornom okraji [%]	Využitie - σ_{CLT} pri dolnom okraji [%]	Využitie - τ_{max} [%]	Využitie - w_{lim} [%]
200	21,26	47,83	12,18	43,21	200	15,30	59,96	14,39	70,18
220	16,21	35,60	9,82	31,02	220	10,07	43,46	11,47	46,41
240	13,00	28,41	8,47	23,62	240	7,25	34,13	9,83	33,52
260	11,41	25,89	8,36	19,98	260	5,99	30,59	9,54	27,82
280	10,12	23,74	8,25	17,09	280	5,02	27,64	9,29	23,42

Analytická štúdia preukázala, že sa spriahnutie javí ako účinný spôsob ako dosiahnuť vyššiu odolnosť stropnej konštrukcie. Pri porovnávaní trámových variantov sa preukázalo, že navrhnuté spriahnutie bolo schopné eliminovať namáhanie na približne polovičné hodnoty oproti nespriahnutému variantu. Napriek tomu sa nespriahnutý trámový variant javí ako najjednoduchší variant, ktorý je možné aplikovať za predpokladu, že nie je potrebné preklenúť vzdialenosti nad 5 metrov. V prípade potreby použitia najefektívnejšieho variantu po zohľadnení kritérií: rozpätia, hrúbky stropu, že spriahnutý doskový drevo-betónový strop je najvhodnejší na použitie. Efektívnosť uvedených príkladov sa môže líšiť aj na základe zmeny pôsobiach zaťažení prípadne zmenou spôsobu zaťaženia.

4. Hybridné systémy s použitím DELTABEAM nosníka a CLT panelov

Analýza sa zameriava na optimalizáciu prepojenia stropných panelov s DELTABEAM nosníkom [3]. Cieľom je dosiahnuť obmedzenie pootočenia panelov v nadpodperovej oblasti, čím sa docieliť redukovať deformácie stropných panelov a zvýši sa únosnosť v medznom stave používateľnosti. Výsledkom bude docieľiť priblíženie sa efektu spojitej dosky. Pojednáva sa o proporciách a tvare drážky, ktorá zaisťuje prepojenie medzi jednotlivými prvkami. V rámci experimentálnych analýz od spoločnosti Peikko boli zostavené tri základné skupiny vzoriek. V prebiehajúcom výskume sa nadväzuje na prvú sériu vzoriek z uvedeného výskumu "Type A" [4].

Vzorka predstavuje výsek strednej nadpodperovej oblasti z dvojpolovej stropnej konštrukcie, jednotlivé polia majú 3-metrové rozpätie. Aby bolo možné dosiahnuť maximálneho šmykového účinku v konštrukcii, je vzorka podopieraná po celej jej šírke z oboch strán. Vzdialenosť podpier od stredovej podpory je trojnásobkom výšky stropnej konštrukcie. Na vzorku pôsobí postupne rastúce zaťaženie až do jej zlyhania. Zaťaženie reprezentuje plošnú tiaž pôsobiacu na stropnú konštrukciu.

4.1. Numerická analýza

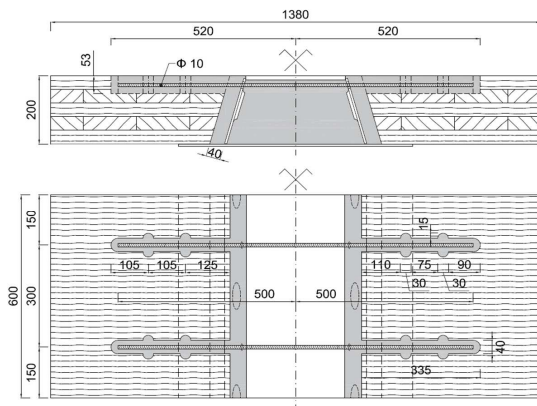
Numerické analýzy spočívajú vo vytvorení MKP modelov v programe ANSYS v prostredí WORKBENCH, ktoré zodpovedajú okrajovým podmienkam, ktoré v ďalšom kroku budú aplikované na vzorky, zostrojených v neskoršej etape pre laboratórne overovanie.

V rámci numerických modelov boli zohľadnené materiálové vlastnosti vrátane ortogónalnej anizotropie dreva a bola prispôbená orientácia vlákien pre každú vrstvu CLT panelov. Zohľadnená bola aj súdržnosť medzi jednotlivými vrstvami a materiálmi cez súčiniteľ šmykového trenia adekvátny danej kombinácii materiálov [5] [6]. Konštrukcia je podopieraná oceľovými valcami vo vzdialenosti trojnásobku výšky panela od osi nosníka. Tieto podpory majú povolené potočenie okolo osi pozdĺžne ich prierezu, s tým, že jedna z podpier má dovolený vodorovný posun.

Ako vstupný materiál pre CLT panel je uvažovaná trieda dreva C 24 ako garantuje aj výrobcu panelov StoraEnso [7] [5]. Výstuž priemeru 10 mm bola v modeli materiálovo špecifikovaná z databázy materiálov a to pre príslušnú triedu B 500 B. Materiálové charakteristiky pre DELTABEAM boli tiež špecifikované z materiálovej knižnice Granta, konkrétne oceľ S 355. V numerickej analýze bol betón uvažovaný triedy C 20 / 25.

Zaťaženie bolo vnášané na vzorku lineárnym prírastkom až po dosiahnutie hodnoty zaťaženia 64,86 kN, čo zodpovedá plošnému zaťaženiu 12 kN /m² na hornom povrchu konštrukcie. Sila bola vnášaná cez oceľový plný blok, ktorý sa nachádza zo spodnej časti dolnej pásnice DB v osi symetrie vzorky. Numerická analýza spoja slúži na stanovenie mechanizmov porušenia, aby sa bolo možné pri experimentálnej analýze dôkladnejšie zamerať na správanie spoja a lepšie predpovedať správanie vzorky a jej mechanizmy porušenia.

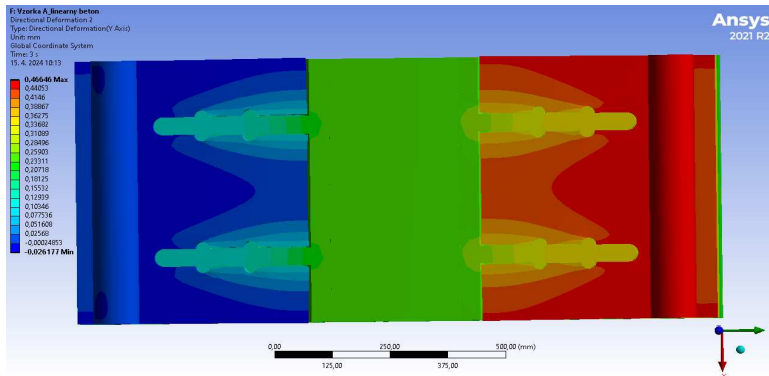
Overovaný numerický model pozostáva z priamych drážok, ktoré majú rozšírenia do bokov drážky na zabezpečenie lepšej súdržnosti medzi betónom a CLT panelom. Os výstuže sa nachádza 27 mm od hornej hrany drážky.



Obr. 8 Schéma vzorky A pre numerické modelovanie.

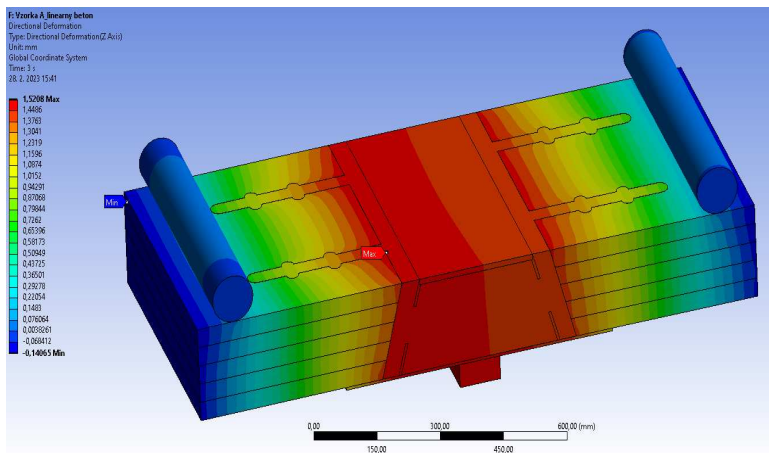
Navrhovaný variant (vzorka A) vzájomného prepojenia je založený na súdržnosti medzi jednotlivými materiálmi v prípoji (obr. 8). Predpokladá sa zlyhanie v dôsledku prekročenia ťahových odolností v betóne, vzniku trhlin a v dôsledku toho ku kolapsu prípoja. Prípadný predpoklad zlyhania výstuže vie byť v dôsledku nedostatočnej súdržnosti medzi betónom a CLT panelom. V dôsledku separácie, vydvihnutia betónového bloku z drážky, a tým kolapsu konštrukcie. Priemer

výstuže je zvolený tak, aby bol schopný preniesť predpokladané zaťaženie a nedošlo tak k zlyhaniu vzorky v dôsledku prekročenia ťahových odolností ocele.



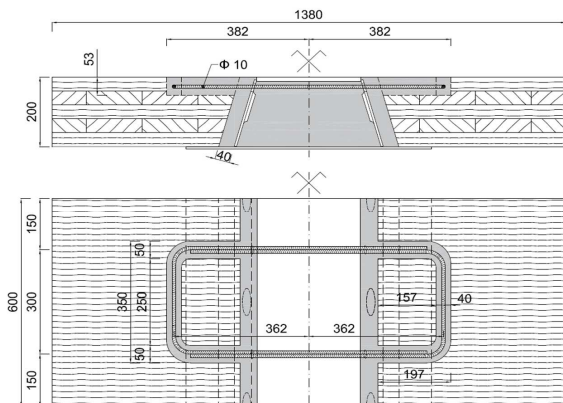
Obr. 9 Horizontálna deformácia vzorky A.

Numerickou analýzou sa preukázala vhodnosť navrhovaného tvaru (obr. 9 a 10). V priebehu analýzy v dôsledku zvyšujúceho sa zaťaženia, bolo možné pozorovať správanie vzorky. Vplyvom zaťažovania vzorky dochádzalo k vydvihovaniu betónového bloku z drážky.



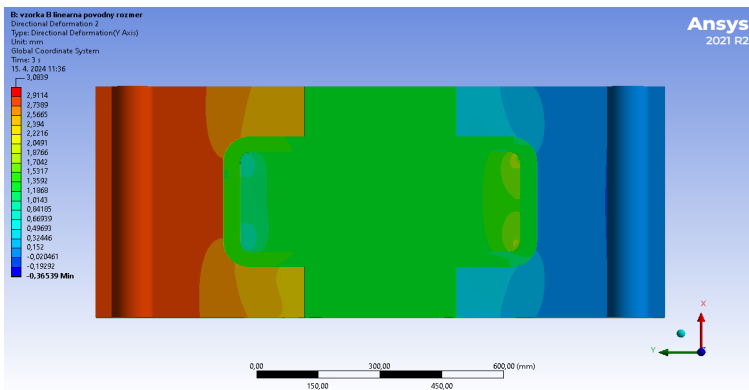
Obr. 10 Vertikálna deformácia vzorky A.

Základný princíp prenosu síl v rámci prípoja (obr. 11) je založený na aktivovaní CLT bloku vo vnútornom priestore drážky, ktorá je v tvare U (vzorka B1). Proporcie CLT klinu boli navrhované tak, aby boli dodržané konštrukčné zásady a nedošlo tak k ustrihnutiu CLT bloku vplyvom otláčania betónového bloku o hranu klinu. Predpokladá sa, že takýto tvar bude mať priaznivý vplyv na zamedzenie deformácie vplyvom narastajúceho zaťaženia.



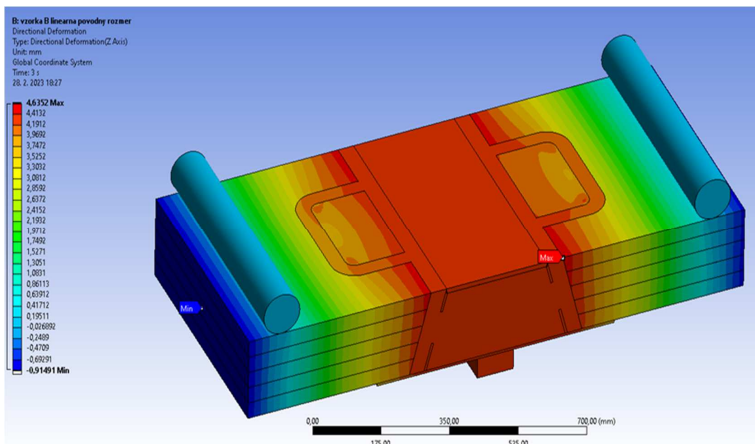
Obr. 11 Schéma vzorky B1 pre numerickú analýzu.

V tomto navrhovanom prípoji sa v pozdĺžnych častiach drážky nachádzajú dva prúty výstuže (stretáva sa výstuž z jedného smeru a z druhého smeru). V porovnaní s prvou vzorkou (vzorka A) nedošlo k poklesu deformácií (obr.12). Hodnota vertikálnych deformácií sa zvýšila.



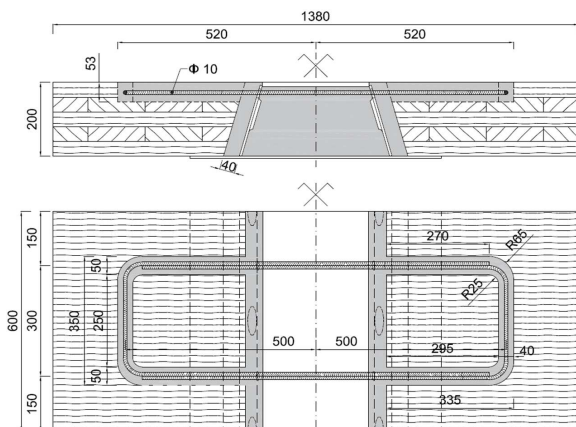
Obr. 12 Horizontálna deformácia vzorky B1.

Z priebehu vertikálnej deformácie je zjavné, že dochádza k aktivovaniu len obmedzenému úseku CLT panela a za hranou drážky začne výraznejšie narastať deformácia, je možné pozorovať, že vytvorený klin je nedostatočný a nedochádza k dostatočnému zachyteniu síl (obr. 13).



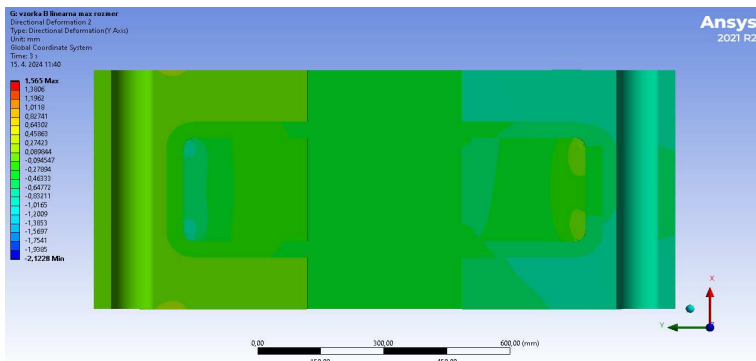
Obr. 13 Vertikálna deformácia vzorky B1.

Bolo potrebné korigovať proporcie drážky, aby bol prípoj v stanovenom koncepte čo najefektívnejší. Došlo k posunu a teda predĺženiu drážok (vzorka B2). Pri porovnaní prvej iterácie drážky s konečným tvarom drážky (obr. 14), bolo možné stanoviť pokles deformácie. Na základe toho je možné stanoviť výsledný tvar ako efektívnejší. Tento prípoj potvrdil potrebu previazania dosky s nosníkom a potrebu umiestnenia výstuže až za hranicu oblasti šmykového roznosu.



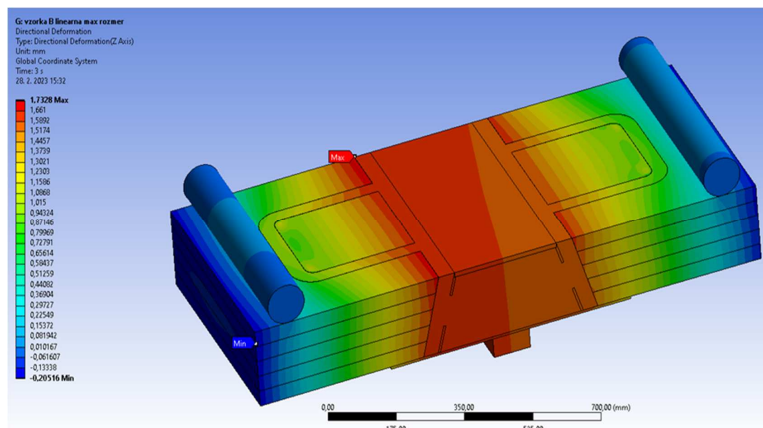
Obr. 14 Schéma vzorky B2 pre numerickú analýzu.

Taktiež je možné konštatovať, že sa potvrdil mechanizmus správania prípoja. Vplyvom zaťažovania dochádzalo k postupnému otláčaní betónového bloku spolu s výstužou do CLT klinu, na základe čoho došlo k aktivovaniu vnútorného CLT bloku, čo je možné pozorovať aj na hodnotách deformácií na paneloch (obr. 15).



Obr. 15 Horizontálna deformácia vzorky B2.

Horizontálne roztvorenie vzorky A a B2 je približne rovnaké. Vzorka A má roztvorenie 0,181mm a pri vzorky B2 sa vytvorilo roztvorenie 0,180 mm, čo sa môže považovať za zanedbateľný rozdiel. Vertikálny posun je rozdielny o 0,213 mm v prospech menšej deformácie pre vzorku A v porovnaní s vzorkou B2 (obr. 16).



Obr. 16 Vertikálna deformácia vzorky B2.

Je možné konštatovať, že modely naplnili svoju podstatu, tým, že sa na základe modelov vytvorili predpoklady mechanizmov poškodenia vzoriek, ktoré budú podliehať overovaniu v laboratóriu.

Numerickou analýzou vzorky A sa stanovil predpoklad, že bude dochádzať k vzniku priečných trhlin v betóne v miestach rozšírenia drážok a dôjde k vytvoreniu medzery medzi hranou CLT panela a betónového bloku.

Overovaním vzorky B1 sa potvrdila nutnosť úpravy geometrických proporcií drážky, aby bolo možné dosiahnuť vyššej efektivity. Na základe tohto kroku bola vytvorená vzorka B2, ktorá už zasahuje za hranicu šmykového roznosu sily. Prejavilo sa to na zvýšení efektivity navrhovaného

prípoja s predošlou vzorkou (vzorka B1). Vzorka B2 sa javí ako vhodná alternatíva prípoja k variantu reprezentujúceho pomocou vzorky A. Oba varianty sú schopné efektívne prenášať zaťaženie a redukovať pootočenú CLT panelov v miestach uloženia (v porovnaní s pristo uloženým panelom).

4.2. Experimentálna analýza

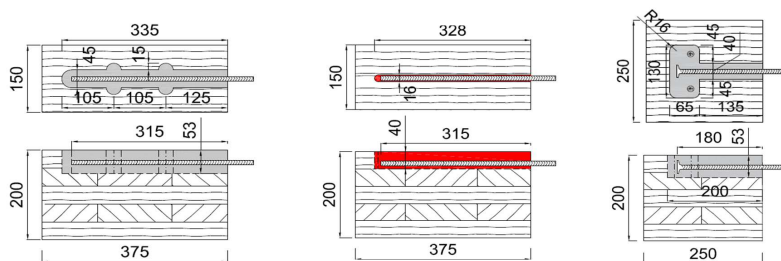
V laboratórnych podmienkach boli postupne zhotovované a overované experimentálne vzorky. V prvom kroku boli vykonané série ťahových skúšok. Na základe poznatkov z ťahových skúšok sa pristúpilo k overovaniu vzoriek celého prípojového detailu.

Analýza drážok sa zameriava na podrobnejšie overenie správania samotnej drážky pri ťahovom namáhaní. Sleduje sa jej únosnosť, mechanizmy porušenia a repetitívnosť týchto mechanizmov porušenia. Ťahové skúšky sa vykonávajú aj preto, že drážka v prípoji je vystavená priamemu ťahovým účinkom.

Overovanie prípojového detailu sa zameriava na overenie únosnosti navrhnutého prípoja. Sleduje sa maximálna únosnosť zostavy, mechanizmy porušenia a vzájomné posuny medzi jednotlivými komponentmi na vzorke v horizontálnom aj vertikálnom smere. Vzorky sú zaťažované v strednicovej rovine dolnej pásnice DB. Zaťaženie reprezentuje reakciu zo zaťaženia pre strednú podporu. Tlak je aplikovaný bodovo do sústavy pomocou lisu. Napriek bodovému zaťaženiu je tuhosť nosníka s vyplneným betónom dostatočná na dosiahnutie rovnomerného rozloženia zaťaženia po celej šírke vzorky. Podopretie vzorky na celej šírke je realizované pomocou oceľových valcov na oboch koncoch vzorky vo vzdialenosti trojnásobku jej výšky. Táto konfigurácia umožňuje vyvolať najväčší šmykový účinok na skúmanú prípojovú oblasť.

4.2.1. Experimentálna analýza – ťahové skúšky pre drážky

Boli vytvorené tri série vzoriek (obr. 17 a 18) slúžiace na preskúmanie správania drážok pred ich implementáciou do celého prípojového detailu.



Obr. 17 Schéma vzoriek drážok pre ťahové skúšky.

V prvej sérii sa overovali priame drážky vyplnené betónom. Prvé tri vzorky mali vytvorenú drážku so šírkou 45 mm, druhá časť vzoriek (tri vzorky) so šírkou 55 mm. Drážka je vyplnená betónom C 16/20, vsadená výstuž B 500 B priemeru 10 mm. Všetky vzorky boli vyfrézované do CLT panela identickej triedy pevnosti C24.

Ako druhá séria vzoriek bola navrhnutá alternatíva k priamej drážke vyplnenej betónom. Ako spojovacie médium sa používajú dvojzložkové epoxidové lepidlo Rothblaas-XEPOX FLUID

(štyri vzorky) [8] a HILTI - HIT-RE 500 V4 (štyri vzorky) [9]. Lepidlá nie sú certifikované pre použitie v tomto type spoja, cieľom tejto analýzy je posúdiť jeho vhodnosť. Hĺbka drážky 40 mm je prispôbená polohe výstuže a prídavnému otvoru v DELTABEAM nosníku. Šírka drážky je 16 mm, do ktorej je vsadená výstuž B500 B s priemerom 10 mm. Všetky vzorky boli vyfrézované do CLT panela identickej triedy pevnosti C24.

Ako posledná zo série skúšok bola séria ťahových skúšok spočívajúca v overení roznosu napätia od rozkovanej hlavy PSB (B 500 B) [10] priemeru 10 mm v rámci betónového bloku. Všetky vzorky boli vyfrézované do CLT panela identickej triedy pevnosti C24. Predmetom analýzy je zistenie uhla roznosu a možnosti zlepšenia účinnosti prenosu napätia.



Obr. 18 Vzorky pred overovaním.

Základný mechanizmus porušenia priamej drážky vyplnenej betónom v CLT paneli je založený na zlyhaní betónu v dôsledku ťahových účinkov, následne vytvorenie trhliny, ktorá vzniká na prvom rozhraní zmeny geometrie drážky smerom od čela vzorky. Trhlina sa vytvára priečne na smer namáhania, dôjde k oddeleniu predného bloku betónu a tým pádom aj k strate súdržnosti medzi betónom a CLT panelom. V dôsledku toho, zaťaženie následne začne preberať už len koncová časť drážky (za oblasťou vzniku trhliny), v tomto prípade už nie je splnená požiadavka pre kotevnú dĺžku a dochádza k strate súdržnosti medzi výstužou a betónom a tým k zlyhaniu celého detailu (obr. 19).

Pri prvých dvoch vzorkách od Rothoblaasu bol zaznamenaný rovnaký mechanizmus poškodenia. Došlo k strate súdržnosti výstuže s epoxidom a v dôsledku toho došlo k vytiahovaniu výstuže z prierezu. Pri tretej a štvrtej vzorke došlo k spoločnému mechanizmu poškodenia, nedošlo k poškodeniu súdržnosti medzi výstužou a epoxidom a ani medzi epoxidom a drevom a došlo k plastizácii výstuže, vytvoreniu zúženého hrdla, a následné pretrhnutie výstuže. Identický mechanizmus poškodenia ako pri posledných vzorkách od Rothoblaasu došlo aj pri všetkých overovaných vzorkách od Hilti (obr. 19).

Pri overovaní vzoriek sa naplnil predpoklad zlepšenia roznosu napätia vďaka aplikovaným vrutom, ktoré boli aplikované pod sklonom 45° od konca rozkovanej hlavy smerom k zaoblenému rohu drážky. Vruty nemali vplyv len na uhol roznosu napätia v betóne ale aj ich použitie zabezpečilo zvýšenie únosnosti. Zabezpečí sa tak zvýšená ťahová odolnosť skúmaného detailu (obr. 19).



Obr. 19 Vzorky drážok jednotlivých sérii po porušení.

4.2.2. Experimentálna analýza – ohybové skúšky

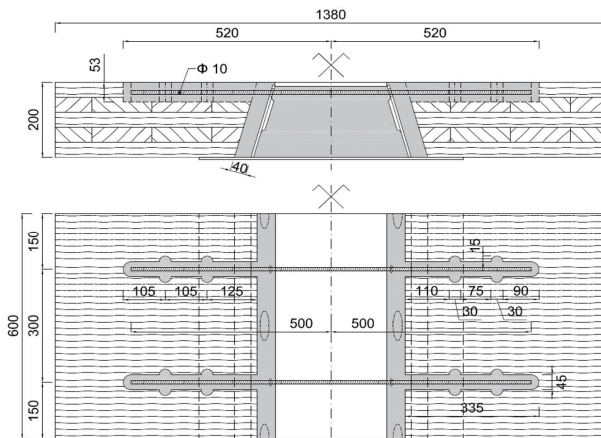
V rámci experimentálnej série zameranej na overenie prípojového detailu sa testovalo 5 vzoriek. Séria analýz nadväzuje na zistenia z ťahových skúšok drážok. Uplatňujú sa poznatky získané z numerickej analýzy, na základe ktorej je možné lepšie predpovedať správanie prípoja v procese overovania. Predmetom analýz je stanovenie odolností jednotlivých variantov prípojov. Potvrdiť mechanizmy poškodenia a stanoviť, či daný návrh je schopný prenášať zaťaženie aj po plastizácii prípoja a dosiahnutí maximálneho zaťaženia na daný prípoj.

Celkový rozmer vzoriek sa zhoduje so vzorkami z numerickej analýz. Vzorky sa líšia geometriou drážky a použitou triedou betónu. Všetky ostatné geometrické parametre sú pri všetkých vzorkách totožné. Podoprenie vzoriek je vo vzdialenosti trojnásobku hrúbky konštrukcie, aby sa docielilo vyvolanie maximálneho šmykového účinku. Prostredníctvom meracích ihliel sa zaznamenával posun vo vertikálnej aj horizontálnej rovine (obr. 20). Jednotlivé vzorky pozostávajú z 5-vrstvových CLT panelov [7] (C 24), betónu (C 16 / 20), nosníka DELTABEAM D 20-400 (S 355) [3], výstuže priemeru 10 mm (B 500 B) a PSB výstuže (B 500 B) priemeru 10 mm [10].

Vzorke určenej pre prípoj s epoxidovým lepidlom, bola drážka upravená pre dvojzložkové epoxidové lepidlo HILTI HIT – RE – 500 V4 [9].



Obr. 20 Osadenie vzorky v skúšobnom zariadení.



Obr. 21 Schéma vzorky s priamou drážkou pre ohybovú skúšku.

Prvá vzorka v sérii (Vzorka A) zameraná na overenie správania prípojového detailu, bola vzorka s priamou drážkou vyplnená betónom (obr. 21). Tvar drážky je v súlade s realizovanými experimentmi od spoločnosti Peikko. Nadväzuje sa na poznatky z numerickej analýzy, kde sa zistil predpoklad vplyvu rozšírení drážok a zachovalo sa pôvodné zoskupenie týchto rozšírení z dôvodu, že práve v miestach rozšírenia drážky by malo dochádzať k postupnému rozvoju trhlín. Z toho implicitne vyplýva, že vytvorený klin z betónu v rozšíreniach má priaznivý vplyv na súdržnosť jednotlivých materiálov v drážke.

Princíp fungovania tohto prípoja je založený na súdržnosti výstuže s betónom, ktorý funguje na základe vytvorených klinov v miestach rozšírenia drážky a tým zlepšuje súdržnosť. Týmto efektom by malo dôjsť k zamedzeniu nárastu deformácie vplyvom zvyšujúceho sa zaťaženia a tým správne fungovaniu spoja.



Obr. 22 Záber na vzniknutú medzeru v dôsledku zaťažovania.

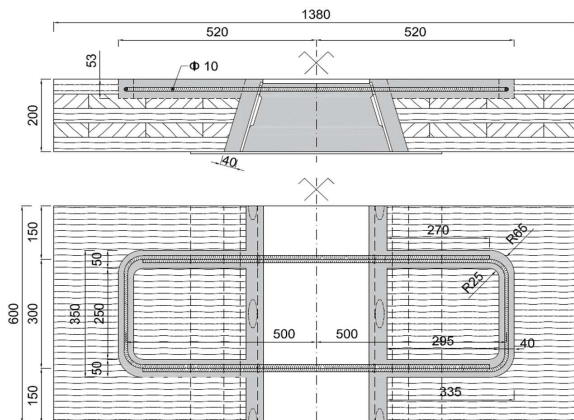
Overovaný prípoj bol schopný odolať aplikovanému zaťaženiu. Po porušení spoja bol prípoj aj naďalej schopný prenášať do istej miery zaťaženie. Je to priaznivý jav, keďže nedošlo k náhlemu kolapsu prípoja a potenciálne stropnej konštrukcii kde by bol takýto prípoj aplikovaný. Najslabším elementom v prípoji bola použitá trieda betónu. Prejavilo sa to vznikom trhlín v betóne a následnou stratou súdržnosti medzi výstužou a betónom (obr. 22). Zvolené proporcie drážky sa správali podľa očakávaní, ktoré boli predikované v priebehu ťahových skúšok.

Nasledujúca vzorka (Vzorka D) je zostavená ako kontrolná vzorka. Slúži na upresnenie výsledkov. Zámerom bolo spresniť výsledky a odpozorovať repetitívnosť mechanizmov porušenia. Parametre a proporcie sú totožné z predošlou vzorkou.



Obr. 23 Poškodenie vzorky D v priebehu testovania.

Na vzorke sa prejavili obdobné mechanizmy poškodenia. Došlo k vzniku priečnej trhliny v oblasti rozšírenia drážky. Následne došlo k rozvoju pozdĺžnej trhliny v betóne. Trhlinka vznikla v dôsledku skrátenia kotevnej oblasti. Na základe toho vznikla trhlinka, ktorá umožnila vzniknutiu priestoru na poklz výstuže v betóne (obr. 23). Vplyvom uvoľnenia výstuže došlo k roztvoreniu vzorky a nárast medzery medzi CLT panelom a DB. Tento jav na predošlom experimente nenastal. Napriek tomu správanie prípoja zodpovedá očakávaniam a stanoveným predpokladom a zvolené proporcie drážky sa správajú podľa očakávaní, ktoré boli predikované aj v priebehu ťahových skúšok.



Obr. 24 Schéma vzorky B2 pre numerickú analýzu.

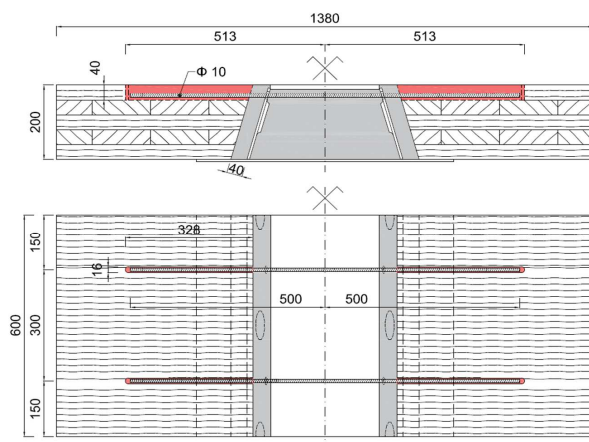
Overovaná vzorka (Vzorka B) pozostáva z drážok v tvare U, do tohto tvaru sú ohnuté aj prúty výstuže (obr. 24). Zámer zvolenia tohto tvaru bol už overovaný v numerickej analýze. Na základe predošlej numerickej analýzy došlo k predĺženiu drážok za hranicu šmykového toku zaťaženia, aby sa docielilo zvýšenie účinnosti prepojenia. Základný princíp prenosu síl v rámci prípoja je založený na zaklinení zadnej časti drážky aj spolu s výstužou do vytvoreného klinu z CLT panela. To by malo mať vplyv na zamedzenie nárastu deformácií a tým zvýšenie únosnosti prípoja.



Obr. 25 Vtláčanie výstuže do CLT bloku.

Vytvorený variant naplnil predpoklady správania z numerickej analýzy z kapitoly 4.1 a bolo možné pozorovať mechanizmy porušenia predikované na základe simulácii (obr. 25). Vzorka sa prejavila ako vhodná alternatíva prepojenia v porovnaní s vzorkou A a D. Bolo možné dosiahnuť vyššiu odolnosť a po dosiahnutí kritického zaťaženia nedošlo ani k tak náhlemu poklesu sily ako v predošlých prípadoch.

Mierny pokles sily po dosiahnutí maximálneho zaťaženia je zabezpečený na základe zlyhania len malého segmentu v rámci prípoja (došlo k vydrobeniu betónového bloku zo zadnej časti drážky vplyvom zatlačania výstuže) a na základe toho nenastal tak náhly pokles, keďže následne bolo možné zapretie výstuže do steny CLT panela v rámci drážky. Skúmaným variantom bolo možné dosiahnuť vyššiu odolnosť 78,56 kN (o 5,58 kN) ako v prípade vzorky A a D (vzorka D dosiahla vyššiu odolnosť v porovnaní so vzorkou A). Správanie prípoja zodpovedá očakávaniam a stanoveným predpokladom a zvolené proporcie drážky sa správali podľa očakávaní, návrh spoja sa môže považovať ako funkčná alternatíva spojenia.



Obr. 26 Schéma prípoja s drážkou pre chemickú kotvu (Vzorka E).

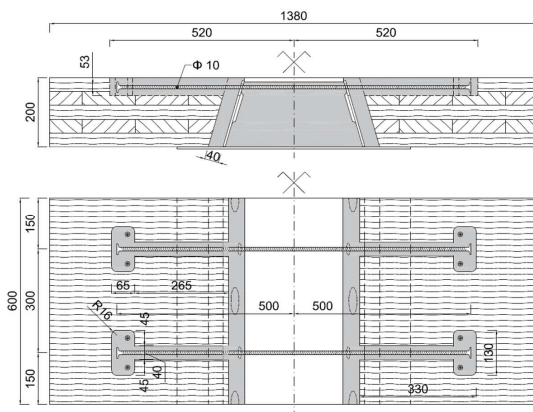
Overovaná vzorka (vzorka E) bola vytvorená na základe výsledkov z ťahových skúšok pre epoxidové lepidla. Vytvorené drážky zodpovedajú proporciám z ťahových skúšok. Na rozdiel od drážok vyplnených betónom, ktoré boli v rámci analýz overované, nebola potreba takých širokých drážok (obr. 26). Šírka drážky sa odvíja od priemeru frézy (priemer 16 mm) použitej pre vytvorenie drážok a konštrukčných zásad pre aplikáciu epoxidového lepidla, kde nie je žiadúce, aby bolo

aplikované také množstvo hmoty. Na základe toho, bola upravená aj hĺbka drážky na 40 mm. Poloha výstuže je v rovnakej polohe od horného povrchu ako pri ostatných vzorkách. Predpokladá sa, že aplikáciou epoxidového dvojzložkového lepidla HIT – RE – 500 V4 bude zabezpečené dostatočné prepojenie v drážke pre všetky obsiahnuté materiály.



Obr. 27 Detail porušenia výstuže na vzorke v dôsledku overovania.

Je možné konštatovať, že overovaný spôsob prepojenia stropných panelov cez DB je účinný. Na základe aplikovanej chémie a vynechaniu použitia betónu v drážke, bolo možné docieľiť, že nedošlo k poklzu výstuže v drážke a tým sa zabezpečila vyššia duktilita spojenia (obr. 27). Zároveň sa docielilo porušenie vo výstuži (došlo k pretrhnutiu). To vedie k záveru, že v prípade potreby vyššej odolnosti je postačujúce zvoliť väčší priemer výstuže. Odolnosť vzorky E možno považovať za najvyššiu z pomedzi overovaných v rámci kapitoly 4.2.2. a je možné vzorku radiť ako efektívny variant vzájomného prepojenia. Je mysliteľné konštatovať, že je schopný v značnej miere redukovať roztváranie prípoja a tým znižovať pootočenie panela v mieste podoprenia.



Obr. 28 Schéma pre drážku s PSB pre ohybovú skúšku.

Testovaná vzorka (Vzorka C) má prispôbené drážky na osadenie výstuže s rozkovanou hlavou (obr. 28). Z poznatkov získaných v rámci ťahových skúšok (kap. 4.2.1.) sa pristúpilo k osadeniu vrutov s tanierovou hlavou do rozšírenej oblasti drážky. Napriek rozkovaným hlavám na konci výstuže, nebol problém prevliecť výstuž cez prídavný otvor DELTABEAMu.

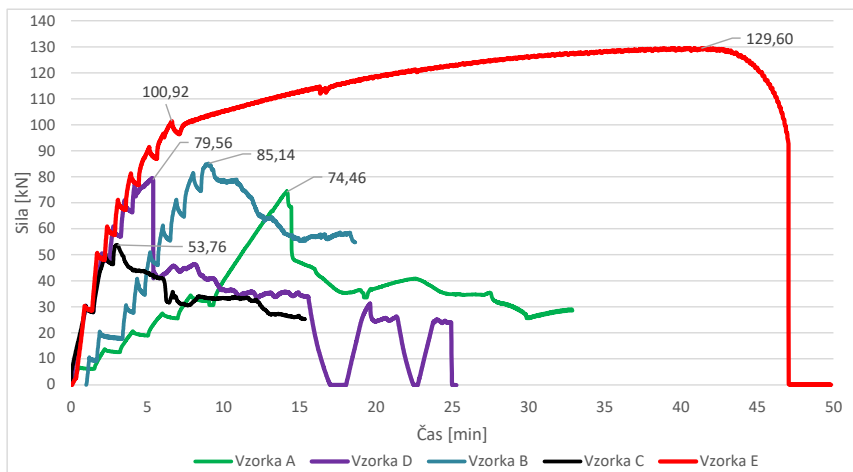
Základný princíp prenosu síl v rámci prípoja, je založený na schopnosti prenosu zaťaženia od rozkovanej hlavy do betónového bloku v drážke. Na zlepšenie roznosu boli vsadené vruty. Tlačný betónový kužel od rozkovanej hlavy sa podľa predpokladov bude opierať o čelo rozšírenej drážky a tým zabráňovať nárastu deformácie.



Obr. 29 Poškodenie drážky a obnaženie rozkovanej hlavy.

Vzorku C možno považovať za menej efektívny návrh a nebolo možné dosiahnuť alebo prekročiť odolnosti ostatných variantov overovaných v rámci výskumu (kap. 4.2.2.). V rámci prípoja nedošlo k dostatočnej aktivácii rozkovanej hlavy na konci drážky (obr. 29). Tento prípoj prejavuje potenciál, avšak bude potrebné optimalizovať proporcie drážky, aby bol schopný prenášať vyššiu mieru zaťaženia.

Porovnanie odolností a maximálnu mieru zaťaženia je možné pozorovať v súhrnnom grafe pre všetky vykonané vzorky pre ohybové skúšky (obr. 30).



Obr. 30 Porovnanie odolností skúšaných vzoriek.

5. Záver

Predkladaná dizertačná práca sa zameriava na problematiku hybridných stropných konštrukcií na báze dreva a ocele. Vďaka využívaniu hybridných sústav a voľbe konštrukčných systémov aj na báze dreva použitých v tejto práci, je možné dosiahnuť nižšiu uhlíkovú stopu stavby v porovnaní

s konvenčnými prístupmi. Týmto sa podporuje narastajúca požiadavka šetrnosti k životnému prostrediu v stavebnom sektore. Práca pozostáva z dvoch hlavných častí.

Prvá časť prináša súhrn doterajších poznatkov v oblasti spriahnutých drevo-betónových stropných konštrukcií a prezentuje možnosti spriahnutia medzi drevom a betónom. Predstavuje príklady z praxe a súčasný stav výskumu v oblasti drevo-betónových konštrukcií. Na základe parametrickej štúdie je poukazované na aplikačné možnosti trámových a doskových (CLT) stropov a výhody aplikovania spriahovacích prostriedkov.

Druhá časť práce sa zaoberá hybridnými konštrukciami. V úvode práce sa pojednáva o variantných možnostiach materiálov v rámci hybridných stropných sústav a ich potenciál. Predkladajú sa príklady uplatnenia z praxe a súčasný stav výskumu pojednávajúci o hybridných konštrukciách s použitím oceľového nosníka DELTABEAM a CLT stropných panelov. Uvádzaný výskum je pre túto prácu kľúčový, pretože poskytuje dôležité informácie o možnostiach vzájomného prepojenia stropných panelov cez nosník pri štíhlej stropnej konštrukcii.

V rámci dizertačnej práce je predkladaná numerická analýza navrhovaných variantov prepojenia. Skúmajú sa proporcie tvarov drážok a ich mechanizmy porušenia, aby bolo možné lepšie predpovedať správanie pri experimentálnej analýze. V rámci numerickej simulácie bola skúmaná priama drážka vyplnená betónom a drážka v tvare U. Vzorka s priamou drážkou slúži ako referenčná, prostredníctvom ktorej sa nadväzuje na výskum od spol. Peikko (tvar drážky je v súlade s realizovanými experimentmi od spoločnosti Peikko). Vzorka s drážkou v tvare U je novo navrhnutý tvar drážky.

Následná experimentálna analýza je rozdelená na dve etapy. Prvá etapa je zameraná na overenie ťahových odolností priamych drážok. Skúma sa vplyv šírky drážky vyplnenej betónom a s osadenou výstužou. Následne sa overuje potenciál aplikovania dvojzložkových epoxidových lepidiel. Porovnáva sa možnosť použitia dvoch druhov lepidiel, jedna od spoločnosti Rothoblaas a druhá od spoločnosti Hilti. V ďalšom kroku sa pristúpilo k overovaniu koncovej časti drážky prispôbenej pre rozkovanú hlavu PSB.

V druhej etape sa pristúpilo k overovaniu prípojových detailov. Bolo zostavených päť vzoriek, ktoré reprezentovali strednú nadpodperovú oblasť a boli overované aplikovaním ohybových skúšok.

5.1. Teoretický výskum – parametrická analýza

Parametrická analýza pojednáva o možnostiach drevených stropných konštrukcií. Ako vzťažné systémy boli do štúdie použité drevené trámové stropy so skrytým debnením z cetris dosky a s konštantnou nadbetonávkou 50 mm, ako druhý systém bol zvolený CLT panel s konštantnou hrúbkou nadbetonávky 50 mm. V rámci parametrickej štúdie sa sleduje vplyv zvýšenia drevenej časti zloženého prierezu na celkovú únosnosť stropnej konštrukcie. K týmto vzorkám sa vytvorili variantné riešenia, pri ktorých došlo k aplikácii vrutov v dvojici (na 1 meter šírky) pod sklonom 45 s konštantným rozstupom smerom od podpery. Pre všetky varianty bol zohľadnený stav na začiatku životnosti konštrukcie ako aj na konci životnosti konštrukcie. Došlo k zohľadneniu popustenia spojov, čo malo za následok navýšenie priehybov. Všetky varianty boli na konci štúdie vyhodnotené a vzájomne porovnané.

Parametrická štúdia potvrdila, že účinnosť spriahnutia sa javí ako účinný spôsob ako dosiahnuť vyššiu odolnosť stropnej konštrukcie. Pri porovnávaní trámových variantov sa preukázalo, že navrhnuté spriahnutie bolo schopné eliminovať namáhanie na približne polovičné hodnoty v

porovnaní s nepriahnutým variantom. Nepriahnutý trámový variant možno považovať za najjednoduchší variant z overovaných možností, ktorý je možné aplikovať za predpokladu, že nie je potrebné preklenúť vzdialenosti nad 5 metrov. V prípade potreby použitia najefektívnejšieho variantu po zohľadnení kritérií: rozpätia, hrúbky stropu, spriahnutý CLT-betónový strop je najvhodnejší na použitie. Pri aplikovaných okrajových podmienkach bolo možné použiť takýto stropný systém do rozpätia 9,5 m.

5.2. Teoretický výskum – numerická analýza

Analýza sa zameriava na optimalizáciu prepojenia stropných panelov s DELTABEAM nosníkom. Cieľom je dosiahnuť obmedzenie pootočenia panelov v nadpodperovej oblasti, čím sa zabezpečí lepšie spolupôsobenie celej stropnej sústavy.

V prvotnej fáze došlo k odlaďovaniu modelovania CLT panela v programe ANSYS. Pre zníženie náročnosti výpočtového výkonu došlo k zjednodušeniu modelu pre CLT panel. Došlo k nahradeniu jednotlivých lamiel v rámci jednej vrstvy, jednou tabuľou s vlastnosťami pre panel orientovaný v príslušnom smere. K tomuto kroku sa mohlo pristúpiť aj na základe zvoleného druhu CLT panela, ktorý je lepený aj z bokov hrán lamiel a vieme tak garantovať súdržnosť medzi jednotlivými lamelami.

Následne sa pristúpilo k simulácii prípojov zodpovedajúcich pre strednú nadpodperovú oblasť v rámci štíhlej stropnej konštrukcie pozostávajúcej z oceľového nosníka DELTABEAM vyplneného betónom a CLT stropných panelov. Skúmali sa dva tvary drážok. Prvý tvar zodpovedal priamej drážke s rozšíreniami pre zlepšenie súdržnosti s betónom. Táto vzorka slúži ako referenčná pre nami navrhovaný tvar. Jedná sa o drážku v tvare U. Práve analýza preukázala potrebu predĺženia drážky za hranicu roznosu šmykového napätia od podpery, aby bolo zabezpečené dostatočné spolupôsobenie navrhovaného prípoja. Zistilo sa správanie prípoja a stanovili mechanizmy poškodenia, aby sa vedelo jednoduchšie predvídať spôsob poškodenia vzorky v procese laboratórneho testovania.

Pri narastajúcej sile dochádzalo k nárastu deformácii a bolo možné pozorovať vytváranie medzery medzi hranou CLT panela a betónovou vrstvou, ktorá je medzi stenou DB a CLT panelom.

Numerickou analýzou vzorky A sa naplnil predpoklad, že bude dochádzať k vzniku priečnych trhlin v betóne v miestach rozšírenia drážok a dôjde k vytvoreniu medzery medzi hranou CLT panela a betónového bloku.

Overovaním vzorky B1 sa potvrdila nutnosť úpravy geometrických proporcií drážky, aby bolo možné dosiahnuť vyššej efektivity, v porovnaní s variantom vzorka B2, kde výstuž v tvare U prechádza až po hranicu oblasti šmykového toku. Prejavilo sa to na zvýšení efektivity navrhovaného prípoja s predošlou vzorkou (vzorka B1). Vzorka B2 sa javí ako vhodná alternatíva prípoja k variantu reprezentujúceho pomocou vzorky A. Oba varianty sú schopné efektívne prenášať zaťaženie a redukovať pootočenie CLT panelov v miestach uloženia (v porovnaní s prasto uloženým panelom).

S obsiahnutím celej šmykovej zóny sa zamedzí deformáciám, čo možno pozorovať aj na vzorke A. Horizontálne roztvorenie vzorky A a B2 je približne rovnaké.

Je možné konštatovať, že modely naplnili svoju podstatu, tým, že sa na základe modelov vytvorili predpoklady mechanizmov poškodenia vzoriek, ktoré budú podliehať overovaniu v laboratóriu.

5.3. Experimentálny výskum

Experimentálny výskum predstavuje hlavnú časť predkladanej dizertačnej práce. Zameriava sa na overenie vzájomného prepojenia stropných CLT panelov cez nosník DELTABEAM v rámci štíhlej stropnej konštrukcie.

Séria ťahových skúšok pozostáva z troch skupín testov. Skúšky boli zamerané na overenie ťahovej odolnosti drážok. V rámci prvej série pozostávajúcej z troch priamych drážok vyplnených betónom so základnou šírkou 45 mm a ďalších troch vzoriek zo základnou šírkou 55mm. Ďalšia séria sa zamerala na overenie odolnosti drážky prispôbenú pre aplikovanie epoxidového dvojzložkového lepidla. Štyri vzorky boli zhotovené pomocou lepidla od spoločnosti Rothoblaas a ďalšie štyri vzorky identických proporcií boli zhotovené od spoločnosti Hilti. Posledná séria vzoriek sa zamerala na overenie odolnosti rozkovanej hlavy PSB v drážke. Prvá vzorka obsahovala vsadenú rozkovanú hlavu v drážke zaliatu betónom a k nej bola vytvorená vzorka, ktorá mala rovnaké zostavenie, s tým, že boli pridané dva vruty. Overované vzorky potvrdili perspektívu základného smerovania dizertačnej práce.

Potvrdil sa predpoklad funkčnosti navrhnutých prípojev, ktoré sa v prvotnej fáze experimentálneho skúšania podrobovali sérii ťahových skúšok. Tie preukázali funkčnosť návrhov a pomohli odhaliť slabinu jedného z návrhov, ktorý sa dodatočnými opatreniami zosilnil.

Na základe získaných poznatkov z numerickej analýzy a z ťahových skúšok (základná analógia fungovania navrhovaného prípoja) sa aplikovali pri zostavovaní vzoriek pre overenie správania prípojev testovaných pomocou ohybových skúšok.

Bolo overovaných päť hlavných vzoriek v rámci zostavy pre overenie správania prípoja v rámci strednej nadpodperovej oblasti. Vytvorené a overené boli štyri varianty vzájomného prepojenia. Návrh priamej drážky vyplnenej betónom sa javí ako spoľahlivý konvenčný návrh, ktorý už v dnešnej dobe nachádza uplatnenie v praxi za účelom vzájomného prepojenia stropných panelov. Varianty ako vzorka s drážkou v tvare U sa preukázala ako účinný návrh prípoja, ktorý umožňuje zvýšiť kapacitu prípoja v strednej nadpodperovej oblasti. Zároveň sa vie za pomocou takéhoto prípoja redukovať pootočenie stropných panelov, čo vedie k zníženiu priehybu stropného panela. To vedie k zvýšeniu kapacity stropnej konštrukcie pri posudzovaní na medzný stav používateľnosti pri zohľadňovaní priehybu. Variant s aplikovaním výstuže s rozkovanou hlavou nenaplnil potenciál na zlepšenie vlastností prípoja. Tento prípoj je potrebné upraviť pred aplikovaním do praxe. Pri vzorke s drážkou pre chemickú kotvu sa potvrdil predpoklad dosiahnutia vyššej únosnosti v porovnaní s predošlými navrhnutými vzorkami. Podarilo sa dosiahnuť porušenie nie v spojovacej hmote, ale bolo možné dosiahnuť porušenie v prípoji v dôsledku pretrhnutia výstuže.

5.4. Prínos k riešenej problematike

Na základe výsledkov dizertačnej práce možno konštatovať, že hybridné stropné konštrukcie na báze dreva a ocele predstavujú sľubný inovatívny prístup k navrhovaniu stropných systémov. Tieto konštrukcie ponúkajú viacero výhod oproti tradičným dreveným alebo oceľovým stropom, ako napríklad nižšiu hmotnosť, vyššiu tuhosť a pevnosť. Vďaka svojim vlastnostiam sú hybridné stropné konštrukcie vhodné pre širokú škálu aplikácií, od obytných a komerčných budov.

Práca predkladá možnosti navrhovania spriahnutia stropných drevo-betónových konštrukcií. Predstavuje príklady aplikovania z praxe. A v rámci parametrickej štúdie predstavuje normový postup výpočtu takejto spriahnutej konštrukcie.

Práca rozširuje poznatky o hybridných stropných konštrukciách na báze dreva a ocele. Výsledky dizertačnej práce by mali slúžiť ako podklad pre ďalší výskum a vývoj týchto konštrukcií, ako aj pre ich praktické aplikácie v stavebnej praxi.

Vypracovaná parametrická štúdia je vhodná na použitie pri voľbe stropnej konštrukcie. Pomocou nej je možné na základe získaných dát prehľadne posúdiť, či je navrhovaná konštrukcia vhodná pre dané okrajové podmienky a zvoliť tak správny typ stropnej konštrukcie.

Numerická analýza priblížila problematiku modelovania konštrukcií na báze dreva a potrebu zohľadňovania ortogónalnej anizotropie pri návrhu. Zároveň sa potvrdila užitočnosť používania MKP modelov pre overenie počiatočných hypotéz a napriek možným nepresnostiam v modeloch, je vhodné tieto kroky vo výskume, návrhu, nepreskočiť a podrobiť daný skúmaný detail aj numerickej analýze.

Už experimentálne overovanie drážok pomocou ťahových skúšok sa môže považovať za veľmi prínosné pre uplatnenie v praxi. Potvrdili sa navrhované proporcie drážok ako sa aj overila vhodnosť aplikovania spájacieho média. Testovanie drážok vyplnených epoxidom v takejto skúmanej konštelácii nemá ešte certifikované ani jedna z použitých chemii. Napriek absencii certifikácie, výsledky sú sľubne pre oba použité prípravky a výsledky z analýzy boli posunuté ďalej do praxe, kde v budúcnosti na tieto poznatky bude možné nadviazať.

Séria ohybových skúšok priniesla možnosti vytvárania nových a únosnejších variantov vzájomného prepojenia stropných panelov cez nosník v rámci štíhlej stropnej konštrukcii. Prináša tak možnosť výberu najvhodnejšieho prepojenia na základe situácie kde sa daný prípoj aplikuje.

Predkladaná práca predkladá možnosti budúceho smerovania hybridných nosných konštrukcií s použitím aj materiálov na báze dreva.

5.5. Odporúčania pre nadväzujúci výskum

Na základe zistení z realizovaného výskumu, v tejto dizertačnej práci sa otvára potenciál na nadviazanie a prehĺbenie znalostí v problematike. Následne sú uvedené námety na potenciálny rozvoj problematiky:

- Do parametrickej štúdie je vhodné zahrnúť iné typy stropných konštrukcií, napríklad: voľbou iných základných konštrukčných materiálov ale aj spriahovacích prostriedkov. Zohľadniť potrebu zmeny hrúbky nadbetónávky v dôsledku zvyšujúcej sa výšky dreveného prierezu.
- Bližšie špecifikovať materiálové charakteristiky jednotlivých materiálov v numerickom modeli aj zo zohľadnením nelineárneho výpočtu. Stanoviť presnejšie parametre pre modelovanie CLT panelov podložené na experimentálnej analýze takýchto panelov. Vylepšenie numerických modelov zhusťením siete a tým spresnenie výsledkov.
- Ťahové skúšky potvrdili potenciál takýchto skúšok. Preto by bolo vhodné na tieto poznatky nadviazať a vykonať ďalšie série obdobných testov. Zamerať sa na zmenu proporcií drážok a preskúmať vplyv odolnosti drážky vzhľadom na jednotlivé použité materiály.
- Ohybové skúšky otvárajú veľký potenciál pre pokračovanie a nadviazanie vo výskume. Odporúča sa vytvoriť väčšiu škálu vzoriek, aby bolo ku každému navrhovanému variantu

vytvorených niekoľko vzoriek, aby sa spresnili výsledky. Na základe ktorých by bolo možné vylúčiť štatistickú chybu.

- Bolo by vhodné vytvoriť sériu experimentálnych overovaní pre nízko cyklové zaťažovanie, kde sa vzorky budú opakovane zaťažovať do 70% maximálnej odolnosti (odolnosti sa stanovili v rámci predkladaného výskumu), opakovane sa priťažia, odľahčia a znovu priťažia, aby bolo možné presnejšie stanoviť správanie prípojov.
- Významným prínosom by bolo overiť navrhované prípoje vzájomného prepojenia v rámci strednej nadpodperovej oblasti v kontexte reálnej dvojpoľovej stropnej konštrukcie so zohľadnením vplyvu klinového efektu, ktorý nebolo možné zohľadňovať v doterajších vykonaných experimentoch. Tým by sa potvrdil reálny a uplatniteľný prínos pre prax.
- Bolo by prínosné sa zamerať na overenie vplyvu aplikovania nadbetonávky pri overovaní celej stropnej konštrukcii dvojpoľovej stropnej konštrukcie, a tým stanoviť mieru vplyvu nenosnej a nosnej nadbetonávky na strednú nadpodperovú oblasť.

Bibliografia

- [1] STN EN 1991-1-1, Eurokód 1 - Zaťaženia konštrukcií - Časť 1-1: Všeobecné zaťaženia - Objemováťaž, vlastná ťaž a úžitkové zaťaženia budov, 2007: SÚTN.
- [2] STN EN 1995-1-1, Eurokód 5 - Navrhovanie drevených konštrukcií Časť 1-1: Všeobecné pravidlá pre budovy, SÚTN, 2008.
- [3] Peikko Group, SK technické posúdenie SK TP - 23/0006 - verzia 1, TECHNICKÝ A SKUŠOBNÝ ÚSTAV STAVEBNÝ, 27/02/2023.
- [4] Peikko Group, E. Camnasio, „PEIKKO WHITE PAPER - DELTABEAM WITH HYBRID TIMBER FLOORS - LOAD TRANSFER TESTS,“ Peikko Group, 2022.
- [5] U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Wood handbook: Wood as an engineering material, 1999.
- [6] J. Králik, Modelovanie konštrukcií v metóde konečných prvkov - Systém ANSYS, Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2009.
- [7] Stora Enso Wood Products OY Ltd, European Technical Assessment ETA-14/0349 of 06.04.2020 Solid wood slab elements to be used as structural elements in buildings, Österreichisches Institut für Bautechnik OIB.
- [8] Rothoblaas, „XEPOX - Dvojzložkové epoxidové lepidlo,“ Rothoblaas, 2022.
- [9] Hilti, European Technical Assessment ETA-20/0834, Österreichisches Institut für Bautechnik (OIB), 13.11.2023.
- [10] Peikko Group, European Technical Assessment ETA 21/0373 – version 01, Technický a skúšobný ústav stavebný, 04/05/2021.

Články publikované dizertantkou

- [1] J. Sandanus, M. Slivanský, K. Freudenberger,, „Analysis of circular cable suspended roof,“ Meždunarodna naučna konferencija BANI '2021', Balgarska akademija na naukite i izkustvata, 2022; pp. 106-113, ISSN 2815-3650.
- [2] K. Freudenberger, „Inovativne spriahovacie metódy pri CLT-betónových stropoch,“ Advances in architectural, civil and environmental engineering, Spectrum STU, 2021; pp. 426-431, ISBN 978-80-227-5150-6.
- [3] K. Freudenberger, J. Sandanus, „Comparative analysis of composite timber-concrete ceiling system,“ Wood research, Slovenský drevársky výskumný ústav, 2021; pp. 943-954, DOI 10.37763/WR.1336-4561/66.6.943954.
- [4] K. Freudenberger, „Parametrická štúdia porovnávajúca vplyv rozpätia a hrúbky kompozitových drevo-betónových stropov,“ Juniorstav 22 : zborník príspevků. 24. odborná konferencie doktorského štúdia s mezinárodnou účasťou., EPCON publishing, 2022.pp. 280-284, ISBN 978-80-86433-76-9.
- [5] K. Freudenberger, „Prípoj stropnej dosky k nosníku pri hybridných sústavách z krížom lepeného lamelového dreva a ocele,“ Advances in architectural, civil and environmental engineering, Spectrum STU, 2022, pp. 417-423, ISBN 978-80-227-5251-0.
- [6] M. Neusch, J. Sandanus, K. Freudenberger,, „Experimental verification of the modern semi-rigid timber connections,“ Wood research, Slovenský drevársky výskumný ústav, 2022, pp. 1005-1016, DOI 10.37763/wr.1336-4561/67.6.10051016.
- [7] K. Freudenberger, „Diagnostika krovu mestského úradu vo Vrútkach,“ Moderné trendy v navrhovaní konštrukcií z ocele, dreva, betónu a skla : 45. celoštátny aktív pracovníkov odboru oceľových konštrukcií sa zahraničnou účasťou., structureSS, 2022, pp. 99-104, ISBN 978-80-974153-1-0.
- [8] K. Freudenberger, „Vplyv spriahnutia na únosnosť drevených stropných konštrukcií,“ Sanace a rekonstrukce staveb 2022 a CRRB - 24th International Conference on Rehabilitation and Reconstruction of Buildings, Masarykova univerzita. Akademické nakladatelství CERM, 2022, pp. 39-45, ISBN 978-80-7623-098-9.
- [9] K. Freudenberger, „Application referring to the effect of continuous deck occurring in the joint used in the ceiling structure,“ The 15th International Scientific Conference of Civil and Environmental Engineering for the PhD. Students and Young Scientists – Young Scientist 2023, MATEC Web of Conferences,, Édition Diffusion Presse Sciences, 2023, DOI 10.1051/mateconf/202338501028.
- [10] K. Freudenberger, „Uplatnenie efektu spojitej dosky v rámci prípoja stropnej dosky z krížom lepeného lamelového dreva k oceľovému nosníku,“ Juniorstav 2023: zborník príspevků. 25. mezinárodní doktorská konferencie stavebního inženýrství, ECON publishing, 2023,pp. 351-356, ISBN 978-80-86433-80-6.

- [11] K. Freudenberger, „Analýza prepojenia panelov v hybridnej štíhlej stropnej konštrukcii,“ *Advances in architectural, civil and enviromental engineering*, Spektrum STU, 2023, pp. s. 356-363, ISBN 978-80-227-5378-4.
- [12] K. Freudenberger, J. Sandanus, „Skrytý potenciál masívnych drevených stropných konštrukcií,“ *Stavebné materiály* 137, 6-2023, Jaga group, s.r.o.,2023, ISSN 1336-7617.
- [13] K. Freudenberger, „EXPERIMENTAL VERIFICATION OF CEILING JOINT PERFORMANCE IN CLT-STEEL HYBRID STRUCTURES,“ *Juniorstav 2024 sborník příspěvků. 25. mezinárodní doktorská konference stavebního inženýrství*, ECON publishing, 2024 ,DOI 10.13164/juniorstav.2024.24074.
- [14] K. Freudenberger, „Analýza prepojenia CLT panelov s nosníkom DELTABEAM v štíhlej stropnej konštrukcii a výsledky praktických skúšok,“ *VOŠ VOLYNE DREVOSTAVBY: Sborník prednášiek, VOŠ a SPŠ Volyne*, 2024, pp. 29-36, ISBN 978-80-86837-07-9.