



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
STAVEBNÁ FAKULTA

Ing. Matúš Neusch

Autoreferát dizertačnej práce
Vývoj novodobých prípojov pomocou oceľových kolíkových spájacích prostriedkov a lepidiel

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 2022

Dizertačná práca bola vypracovaná na Stavebnej fakulte Slovenskej technickej univerzite v Bratislave na katedre Kovových a drevených konštrukcií.

Predkladateľ: **Ing. Matúš Neusch**
Stavebná fakulta STU
Katedra kovových a drevených konštrukcií
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Školiteľ: **doc. Ing. Jaroslav Sandanus, PhD.**
Stavebná fakulta STU
Katedra kovových a drevených konštrukcií
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Oponenti: **prof. Ing. Antonín Lokaj, PhD.**
Stavební fakulta VŠB TUO
Ludvíka Podéště 1875/17
708 00 Ostrava - Poruba

Ing. Martin Magura, PhD.
Stavebná fakulta STU
Katedra kovových a drevených konštrukcií
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Ing. Zuzana Kamenická, PhD.
DISTLER ENGINEERING s.r.o.
Jaskový rad 21
831 01 Bratislava

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 fakulty

Abstrakt

Práca sa zaoberá teoretickým a experimentálnym výskumom polotuhých prípojov s využitím moderných spojovacích prostriedkov Rothoblaas Alumidi. Tieto spojovacie prostriedky umožňujú polotuhé pôsobenie prípojov. Práca opisuje teoretické pozadie polotuhých prípojov, vysvetlené sú metódy použité pri numerickej analýze a návrh skúšobných prípojov. Práca pokračuje experimentálnym overovaním navrhnutých prípojov. Výsledky experimentu sú porovnané s numerickej analýzou. V závere sú zhrnuté poznatky získané z experimentu a odporúčania pre prax.

Kľúčové slová:

- Kolíkové spojovacie prostriedky
- Polotuhé prípoje
- Rotačná tuhosť
- Modul popustenia
- Experiment

Abstract

This paper is a theoretical research of semi-rigid timber connections using modern fasteners Rothoblaas Alumidi. These connectors allow for semi-rigid behaviour. The paper describes theoretical research, methods used in the numerical analysis and design of the experiment specimen. Dissertation continues with the experimental verification. Outcomes of the experiment are confronted with the numerical analysis. At the end, the findings from the experiment and recommendations for practice are summarized.

Key words:

- Dowel-type fasteners
- Semi-rigid connections
- Rotational stiffness
- Slip modulus
- Experiment

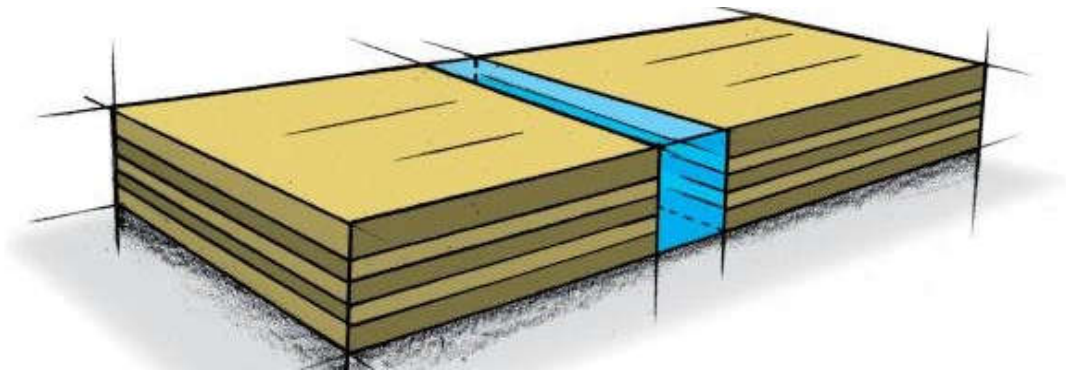
ÚVOD

V rámci doktorandského štúdia som sa venoval výskumu novodobých spájacích prostriedkov s použitím oceľových kolíkových spájacích prostriedkov a lepidiel. Táto práca obsahuje úvod do riešenej problematiky, opis uskutočneného experimentu a interpretáciu výsledkov.

V inžinierskej praxi je správny návrh nosnej konštrukcie rovnako dôležitý ako správny návrh konštrukčných prípojov. V drevených konštrukciách sa často stáva, že únosnosť konštrukcie ako celku limituje únosnosť prípojov. Pri návrhu prípojov sa často počíta s klbovým pôsobením, čo znamená, že v prípoji je umožnené voľné pootočenie. Moderné spojovacie prostriedky však umožňujú istý stupeň votknutia. Ich rotačná tuhosť sa pohybuje niekde medzi klbovým pôsobením a votknutím. Môžeme teda hovoriť o polotuhých prípojoch. V rámci experimentu bol overovaný prípoj s Alumidi konektormi, ktoré sa najčastejšie používajú na prípoj nosníkov k primárnej nosnej konštrukcii. Sú to hliníkové konzoly, ktoré sú umiestnené vo vnútri pripájaného prvku, z čoho plynie viacero výhod. V experimente bol pomocou tejto konzoly pripojený KVH nosník na nosník z lepeného lamelového dreva. Počas experimentu boli odčítavané deformácie KVH nosníka a samotnej konzoly. Na základe deformácií prípoja bola spätne dopočítaná rotačná tuhosť Alumidi prípoja. Experimentálne boli overené 4 varianty prípoja, ktoré sa rozlišovali rozličným počtom spojovacích prostriedkov. Každý prípoj bol realizovaný na 4 vzorkách. Výsledky experimentu boli následne konfrontované s výsledkami numerickej analýzy.

1 LEPENÉ PRÍPOJE

V rámci dizertačnej práce som sa zaoberal čiastočne aj lepenými prípojmi. V práci bola v krátkosti spomenutá história využívania a vývoja lepených prípojov, materiály využívané v lepených prípojoch, výrobné princípy a mechanické pôsobenie lepeného prípoja. Spomenuté bolo aj lepenie dreva „na tupo“ v rámci Timber structures 3.0. ide o inovatívne lepenie nosných konštrukcií, prevažne panelov z krížom lepeného dreva. Vývoj lepidiel a výskum v tejto oblasti dovoľuje lepiť vlákna pozdĺžne a týmto spôsobom vytvárať zaujímavé konštrukcie. Ide o pokrokovú technológiu, kde nie sú potrebné žiadne kovové spojovacie prostriedky. Konštrukcia budovy pozostáva zo stujúcich stien, stĺpov a bezprievlakových stropných dosiek.



Obr. 1.1 Schéma lepenia CLT panela „na tupo“

Pre lepenie „na tupo“ doposiaľ neexistovali lepidlá, preto sa inžinieri spojili s firmou Henkel a vyvinuli dvojzložkové polyuretánové lepidlo Purbond AG, ktoré spĺňalo požiadavky lepenia „na tupo“. Takýto štýl lepenia konštrukčných prvkov je prísny na konštrukčné zásady. Plniaci proces je veľmi dôležitý, pretože vrstva lepidla nemôže obsahovať žiadne vzduchové bubliny. Rovnako je dôležité dbať na vlhkosť konštrukčných prvkov, znečistenie olejom či prachom, pohyby a vibrácie pri lepení a teplotu.

Výsledky štúdie preukázali výborné vlastnosti lepeného prípoja. Charakteristická odolnosť v ohybe bola dosiahnutá v rozmedzí 15,6 – 20,7 MPa. Zvýšená vlhkosť viedla k zníženiu ohybovej odolnosti. Pri dlhodobých testoch neboli preukázané značné zmeny v odolnosti. Rovnako prebehli aj požiarne testy lepených prípojov. Výsledky testov odhalili, že lepený prípoj sa správa podobne ako ostatné prvky. Hrúbka zuhoľnatenej vrstvy je rovnaká alebo o niečo menšia ako v reze bez lepeného prípoja.

Následne je v práci opísaný výskum lepených prípojov vo svete a zo Slovenska.

2 KOLÍKOVÉ PRÍPOJE

V dizertačnej práci som sa venoval najmä spojovacím prostriedkom kolíkového typu. Konkrétne išlo o pripojenie nosníka, ako sekundárnej nosnej konštrukcie, na prievlak alebo stenu. Pripojenie je zabezpečené konektorom Alumidi. Nosník je na Alumidi pripojený pomocou samorezných kolíkov a konektor Alumidi je pripojený na prievlak pomocou rebierkovaných klinec.

V inžinierskej praxi sa kladie veľký dôraz na správny návrh nosnej konštrukcie a špeciálne konštrukčných prípojov. Vo viacerých prípadoch platí, že únosnosť konštrukcie je limitovaná únosnosťou prípojov. Dôležitým faktorom pri návrhu konštrukčných prípojov je odolnosť jednotlivých spojovacích prostriedkov a tiež tuhosť prípoja. Najčastejšie sa prípoje uvažujú ako kĺbové, to znamená, že umožňujú voľné pootočenie prípoja. V málo

prípadoch sa zvažuje pre drevené konštrukcie aj tuhé pripojenie votknutím. Použitím moderných spojovacích prostriedkov sa vnesie do prípoja istý stupeň rotačnej tuhosti. Skutočné správanie prípoja sa teda pohybuje niekde medzi kĺbovým pôsobením a votknutím. Môžeme teda povedať, že tieto prípoje umožňujú polotuhé pôsobenie.

Práve uvažovaný konektor Alumidi umožňuje polotuhé pôsobenie a výpočet tuhosti prípoja môže byť dôležitý pri správnom návrhu nosnej konštrukcie ako celku.

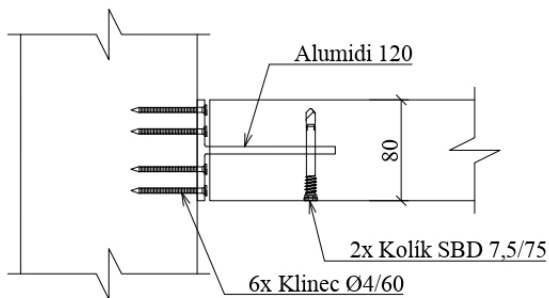
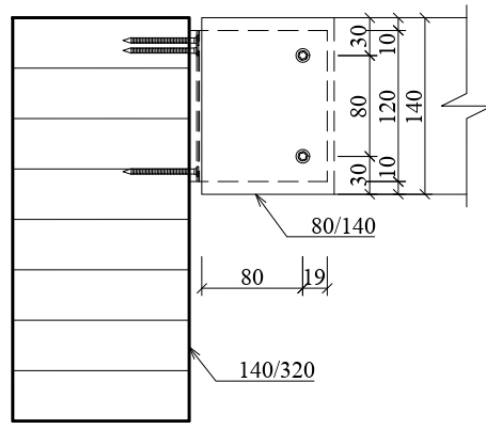
V práci sú spomenuté metódy výpočtu modulu popustenia a ostatných faktorov potrebných pre výpočet rotačnej tuhosti prípoja.

3 EXPERIMENT

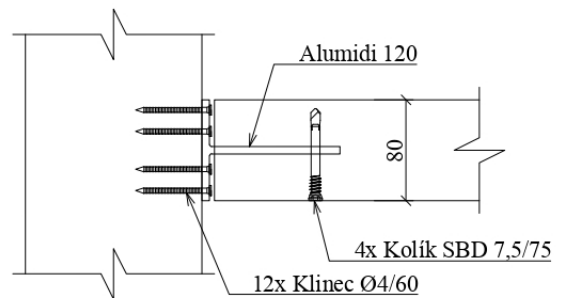
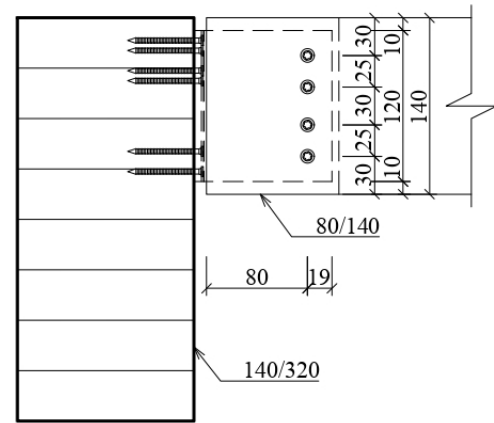
Hlavnou časťou dizertačnej práce bolo experimentálne overenie navrhnutých prípojov. Ako konštrukčný prípoj bol zvolený prípoj nosníka na prievlak s použitím kovového spájacieho prostriedku Rothoblaas Alumidi. Alumidi je kovová konzola vyrobená lisovaním zo zliatiny EN AW-6060, s hutníckym označením AlMgSi0,5. Zliatina má veľmi dobrú odolnosť voči korózii. K dispozícii boli Alumidi s rozdielnou výškou, a to Alumidi 120 a Alumidi 160 bez otvorov pre hladké kolíky. Na začiatku je dôležité rozdeliť si prípoj na dve časti, a to pripojenie KVH konzoly na Alumidi konektor - časť A, a pripojenie Alumidi na primárnu nosnú konštrukciu - časť B. Výpočtom sú vyjadrené dve rôzne hodnoty tuhostí pre obe časti prípoja. V oboch prípadoch platí rovnaký postup výpočtu. KVH konzola dĺžky 0,75 m je pripojená na Alumidi pomocou samorezných kolíkov SBD Ø7,5 mm s dĺžkou 75 mm. Konektor Alumidi je pripojený na prievlak z lepeného lamelového dreva triedy GL24h s rozmermi 140/320 pomocou rebierkovaných klincov s priemerom 4 mm a dĺžkou 60 a 100 mm.

V navrhnutých detailoch sú dodržané konštrukčné pravidlá a minimálne vzdialenosti medzi jednotlivými spojovacími prostriedkami podľa Eurokódu 1 Alumidi prípoj je navrhnutý v 4 variantoch, pričom každý variant je skúšaný na 4 vzorkách. V jednotlivých variantoch sa zvyšuje počet spojovacích prostriedkov, čo sa prejaví na výslednej tuhosti.

Variant 1 - 4x
M 1:5

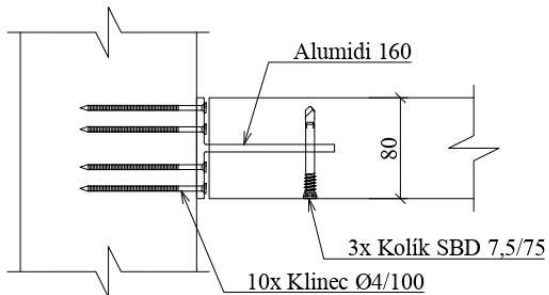
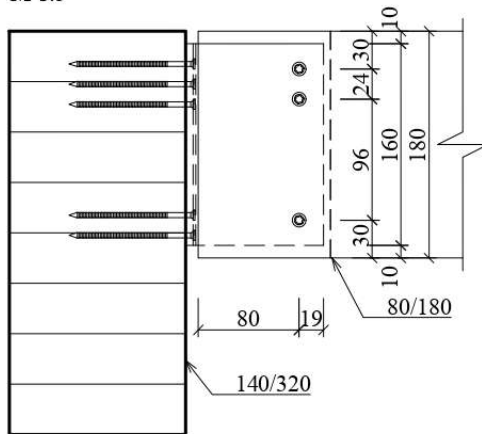


Variant 2 - 4x
M 1:5

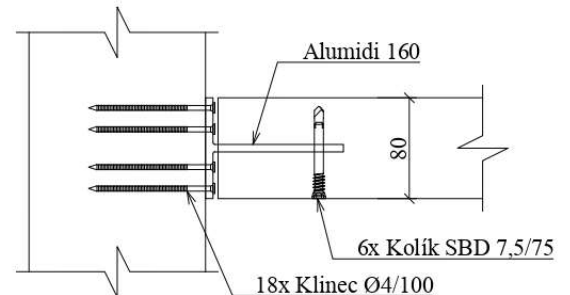
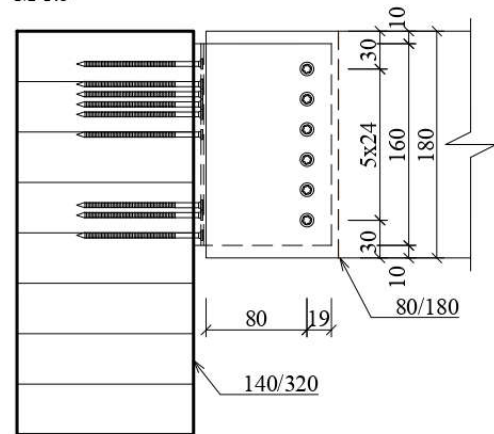


Obr. 3.1 Konštrukcia detailov s Alumidi 120

Variant 3 - 4x
M 1:5



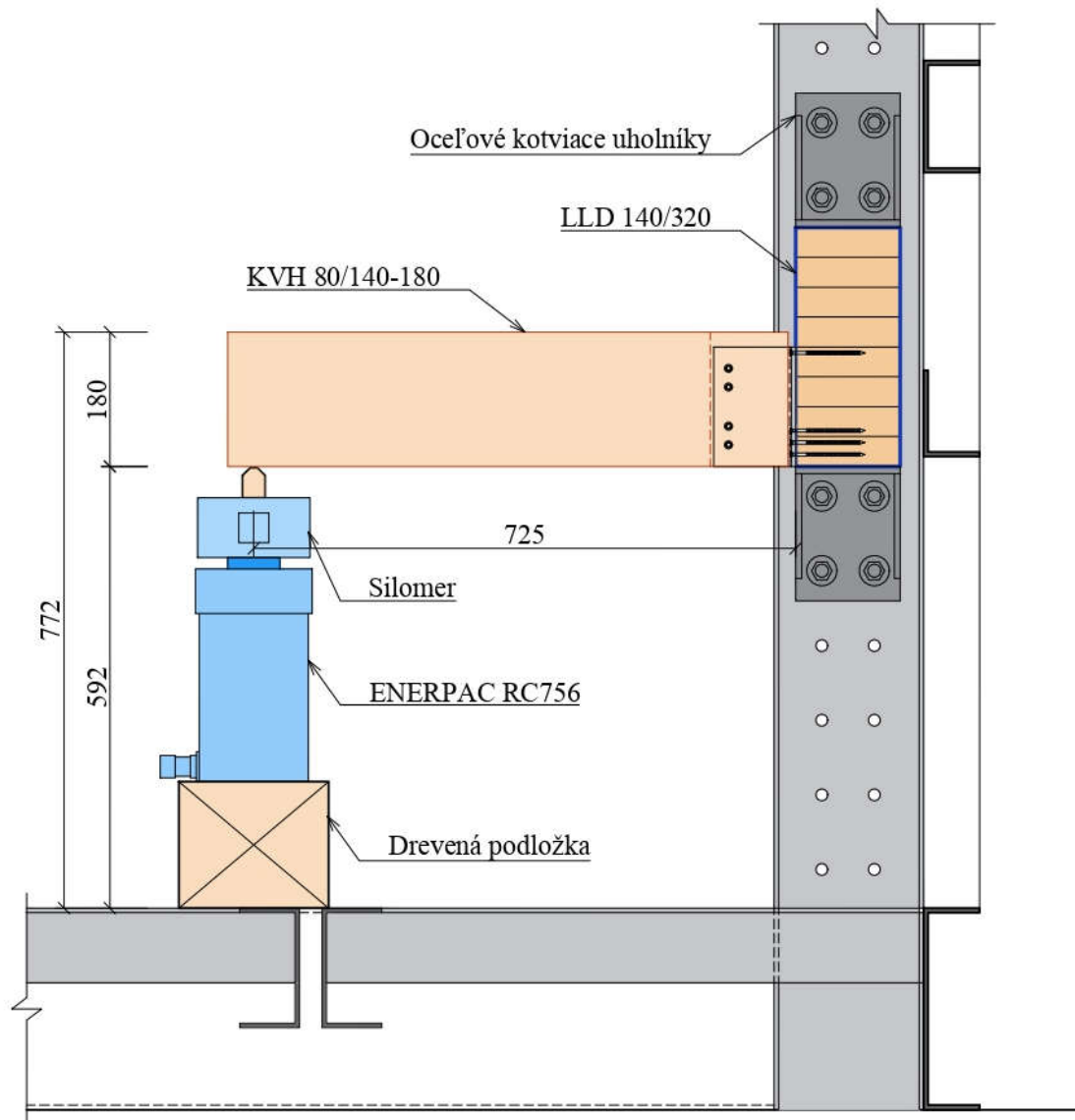
Variant 4 - 4x
M 1:5



Obr. 3.2 Konštrukcia detailov s Alumidi 160

Kvôli konštrukčným možnostiam nebolo možné zaťažovať vzorku zhora, teda v smere gravitácie. Z tohto dôvodu bol celý prípoj vyhotovený horizontálne zrkadlovo a konzola bola zaťažovaná zo spodnej strany. Vlastná tiaž KVH konzoly bola v tomto prípade zanedbateľná.

KVH konzola bola zaťažovaná vo vzdialenosti 0,725 m od hrany LLD nosníka zo spodnej strany hydraulickým lisom ENERPAC RC756. Lis bol tlakovaný hydraulickou ručnou pumpou ENERPAC P-80.

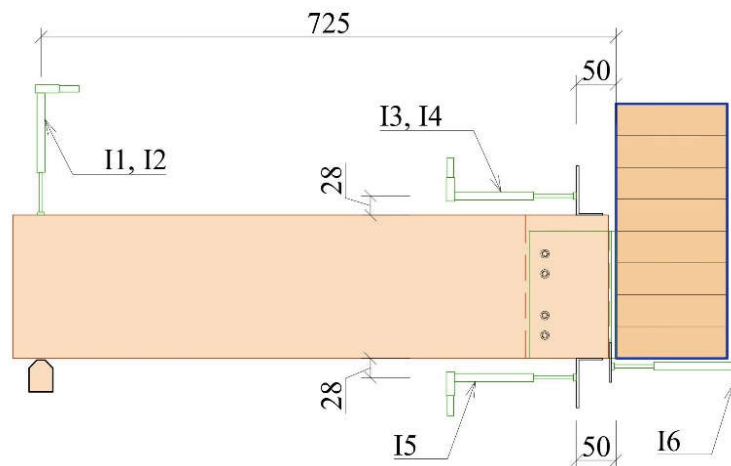


Obr. 3.3 Zostava pre zaťažovanie vzoriek

Na vzorke boli merané deformácie KVH konzoly a deformácie Alumidi spájacieho prostriedku. Pre tento účel boli použité senzory posunu HBM WA-T s merateľným posunom 5 a 15 cm.

Meranie prebiehalo v miestach:

- I1 - zvislá deformácia KVH konzoly, závislá od deformácie/skrútenia LLD prievlaku - HBM WA-T/100,
- I2 - zvislá deformácia KVH konzoly, nezávislá od deformácie LLD prievlaku - HBM WA-T/100,
- I3 - horizontálna deformácia KVH konzoly pri kolíkovom prípoji z vrchnej strany KVH, nezávislá od deformácie LLD prievlaku - HBM WA-T/50,
- I4 - horizontálna deformácia KVH konzoly pri kolíkovom prípoji z vrchnej strany KVH, závislá od deformácie LLD prievlaku - HBM WA-T/50,
- I5 - horizontálna deformácia KVH konzoly pri kolíkovom prípoji zo spodnej strany KVH, nezávislá od deformácie LLD prievlaku - HBM WA-T/50,
- I6 - horizontálna deformácia Alumidi konzoly - HBM WA-T/50.

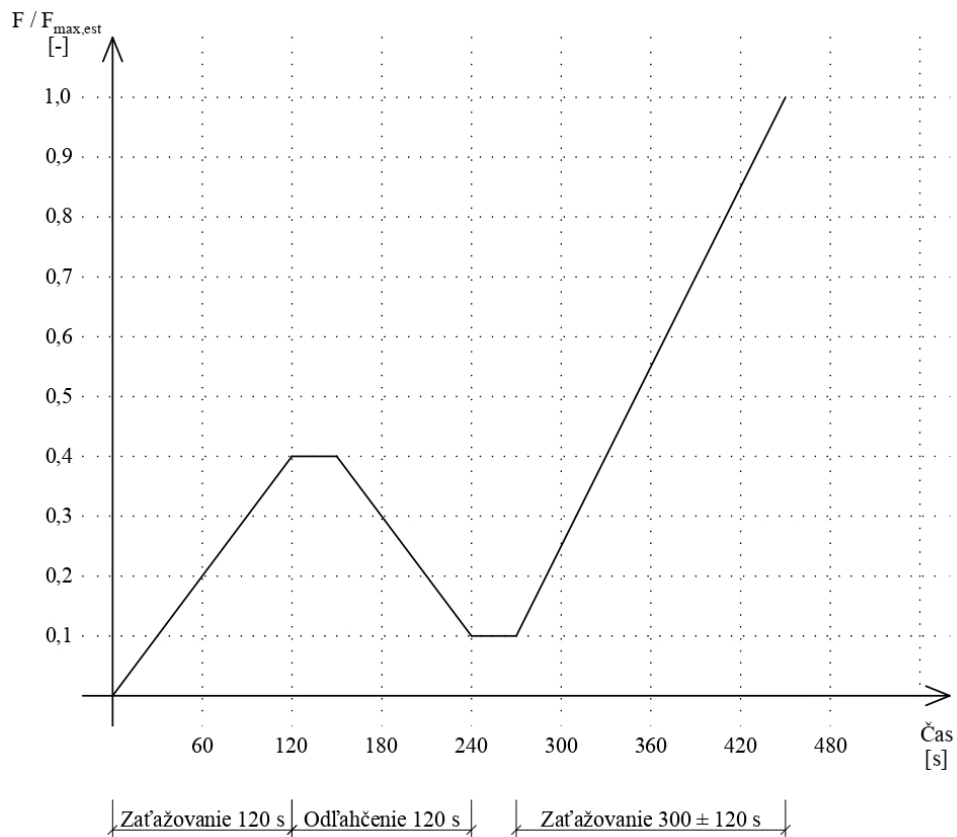


Obr. 3.4 Poloha senzorov

Postup zaťažovania vzorky je daný normou STN EN 383. Zaťažovanie prebieha vo viacerých krokoch:

- Zaťaženie vzorky na úroveň $0,4 * F_{max,est}$ počas trvania 120 s.
- Následne vzorka zotrvá na úrovni $0,4 * F_{max,est}$ a odľahčí sa na úroveň $0,1 * F_{max,est}$ počas trvania 120 s.
- Na úrovni $0,1 * F_{max,est}$ vzorka zotrvá po dobu 30 s.
- Nasleduje zaťaženie vzorky na úroveň $F_{max,est}$ počas trvania 300 ± 120 .

Maximálna sila, ktorou bolo možné vzorky zaťažovať bola odvodená z charakteristickej odolnosti kolíkového a klincového prípoja.



Obr. 3.5 Postup zaťažovania vzoriek

4 VYHODNOTENIE EXPERIMENTU

4.1 Deformácie vzoriek

Už počas prvých vzoriek boli pri experimente zistené nadmerné deformácie KVH konzoly. Výsledky deformácie na konci konzoly boli neporovnateľne väčšie ako deformácie z 3D modelov so zahrnutými tuhosťami prípoja. Podľa pozorovania pri experimente, tieto deformácie boli spôsobené kolíkovou časťou prípoja.

Počas zaťažovania dochádzalo k pootáčaniu KVH konzoly v kolíkovom prípoji. Až po zaťažení približne $0,7 * F_{\max,est}$ sa badateľne začali vyťahovať rebierkované klince v ťahanej časti konzoly Alumidi.

Celkovo sú hodnoty deformácií v jednotlivých variantoch približne rovnaké. Mierne odchýlky boli spôsobené imperfkciami v KVH konzole. Drevo je nehomogénny materiál a môže obsahovať rastové suky, živичné kanáliky, náhle zmeny rastu a iné. Tieto imperfkcie môžu lokálne zmenšovať alebo zväčšovať pevnosť dreva, čo sa odzrkadlí na výslednej

tuhosti a deformácii KVH konzoly. Vzorky použité v experimente obsahovali značné množstvo rastových súk a živičných kanálikov.

4.2 Tuhosť prípojov

Výpočet tuhosti kolíkového a klinevého prípoja vychádza z výpočtu tuhosti podľa metódy deformácie od jednotkového momentu. Prípoj je zaťažený jednotkovým ohybovým momentom, ktorý spôsobí deformáciu na najviac namáhanom spojovacom prostriedku. Pomocou goniometrických funkcií je z deformácie vypočítaný uhol pootočenia φ zdeformovaného spojovacieho prostriedku. Jednoduchým prepočtom uhla pootočenia je vypočítaná tuhosť prípoja.

V rámci experimentu je známa veľkosť ohybového momentu a veľkosť deformácie v prípoji. Pre výpočet tuhosti klinevého prípoja je použitá hodnota deformácie zo senzora I6. Bod pootáčania bol odhadnutý na vrchnú hranu konzoly Alumidi, čo sa potvrdilo aj v uskutočnených experimentoch, kedy sa horná hrana konzoly zatlačala do prievlaku z LLD.

Drevo je nehomogénny materiál, čo sa výrazne podpísalo pod výsledky tuhosti kolíkového a klinevého prípoja. Čo sa týka kolíkovej časti prípoja, hodnoty tuhostí sú celkovo výrazne nižšie ako boli vypočítané podľa Eurokódu 5. Vo variante č. 1 neplatí predpoklad o závislosti tuhosti od objemovej tiaže a vzorky s nižšou objemovou tiažou majú väčšiu tuhosť. Výsledky boli ovplyvnené výskytom rastových hŕč, ktoré lokálne zvyšujú pevnosť dreva, zvyšujú odolnosť a hodnotu tuhostí prípoja. Hodnoty tuhostí vzoriek variantu č. 2 názorne korešpondujú s objemovou tiažou prípoja. Vzorka č. 2, ktorá má najväčšiu objemovú tiaž, má zároveň aj najvyššiu tuhosť. Pri tejto vzorke je tuhosť takmer totožná s výpočtovou hodnotou. Jediná výchylka vo variante č. 2 je vzorka č. 3. Tuhosť kolíkového prípoja je výrazne nižšia ako pri ostatných vzorkách. Je to spôsobené krehkým porušením drevenej časti prípoja. V mieste najviac zaťaženého kolíka sa nachádza živičný kanálik a začiatku zaťažovania došlo k rozštípeniu vlákien KVH konzoly vplyvom ťahu kolmo na vlákna. Hodnoty tuhostí vo variante č. 3 sú približne rovnaké. Vzorka č. 3 vykazuje mierne vyššiu hodnotu tuhosti. Je zrejmé, že zvýšenú tuhosť spôsobila prítomnosť rastových hŕč v tesnej blízkosti kolíkov. Celkovo sú však hodnoty približne polovičné s výsledkami numerickej analýzy.

Na výslednú tuhosť má vplyv nie len objemová tiaž dreva, ale aj geometria samorezného kolíka. V niektorých vzorkách boli najviac namáhané kolíky mierne ohnuté. Boli to vzorky s vyššou objemovou tiažou alebo vzorky, kde sa vyskytovala rastová hrča. Vo väčšine

prípadov ale nastalo zatlačanie hrotu samorezného kolíka do dreva. Hrot kolíka nemá dostatočný priemer drieku a je sploštený na dĺžke približne 19 mm. Pri montáži prípoja je pravdepodobné, že hrot kolíka bude orientovaný v smere vlákien, čo môže viesť k zníženiu odolnosti prípoja.



Obr. 4.1 Samorezný kolík SBD po zdeformovaní



Obr. 4.2 Zdeformovaný otvor po odrezaní konca KVH konzoly

Nemenej zaujímavé sú aj výsledky tuhostí klincovej časti prípoja. Vo variante č. 1 a 2 je možné pozorovať mierne vyššie hodnoty tuhosti z experimentu ako pri hodnotách tuhostí z výpočtu. Výnimku tvorí vzorka č. 4 z variantu č. 1. Pri montáži konzoly Alumidi tejto vzorky rebierkované klince narazili na rastové hrče v prievlaku z LLD a nebolo možné ich správne aplikovať, preto museli byť otvory pre klince predvrtané, čo spôsobilo menšiu tuhosť klincového prípoja. Ďalšou výnimkou je vzorka č. 4 variantu č. 2, ktorá má približne dvojnásobnú tuhosť ako ostatné vzorky. Vidieť to aj na výsledkoch deformácie konzoly Alumidi, ktorá je približne dvojnásobne nižšia. Príčina zvýšenej tuhosti je nesprávne osadenie kovového pliešku na Alumidi, ktorý slúži ako doraz pre senzor posunu I6.

Vo variante č. 3 prvé dve vzorky vykazujú nižšie hodnoty tuhosti ako sú vypočítané a vzorky 3 a 4 vykazujú väčšie hodnoty. Priemerná hodnota tuhostí je však takmer totožná s výpočtovou hodnotou tuhosti.

Prekvapivé hodnoty tuhostí sú vo variante č. 4. Vzorky obsahovali najväčší počet rebierkovaných klincov, z čoho logicky a numericky vychádza najväčšia rotačná tuhosť. Výsledky z experimentu ukázali rovnakú alebo menšiu ohybovú tuhosť pri zaťažení $F_{\max,est}$ v porovnaní s variantom č. 3. Po opätovnom preskúmaní použitého prievlaku z LLD bola zistená trhlinka pozdĺž prievlaku, ktorá mala za následok zníženie tuhosti klincového prípoja. Tento variant by bolo potrebné nanovo experimentálne overiť, či táto trhlinka naozaj spôsobila zníženie tuhosti.

V klincovej časti prípoja pozorujeme veľkú počiatočnú tuhosť, ktorá sa postupne znižuje. Je to dané geometriou rebierkovaných klincov. Na začiatku pôsobenia zaťaženia sú rebrá klincov zaklinené v drevenom prievlaku. So zvyšujúcou sa silou sa zaklinenie deformuje, zatláča sa, dochádza k vyťahovaniu klincov a výsledná tuhosť exponenciálne klesá.

4.3 Modul popustenia

Predpoklad numerickej analýzy pre výpočet tuhosti Alumidi prípoja je výpočet modulu popustenia. Eurokód 5 nám udáva hodnoty K_{ser} pre spájacie prostriedky kolíkového typu namáhané na šmyk. Použité samorezné kolíky svojou geometriou nespĺňajú definíciu z tabuľky 7.1 z kapitoly 7.1 v Eurokóde 5 a výsledkom tohto experimentu by mala byť definícia pre určenie vzťahu pre výpočet modulu popustenia.

Rovnako sa v norme nenachádzajú vzťahy pre výpočet modulu popustenia osovo/kombinovane namáhaných spojovacích prostriedkoch.

Pre určenie modulu popustenia z experimentu je použitý spätný výpočet metódy podľa Schickhofera [8]. Následne je definovaný vzťah pre výpočet modulu popustenia samorezných kolíkov a rebierkovaných klincov.

Priemerná hodnota modulu popustenia kolíka z experimentu je **2167,4 N/mm**. V porovnaní s normou je táto hodnotou dvojnásobne nižšia. V numerickej analýze pri výpočte K_{ser} bola vo výpočte zahrnutá poznámka (3) z kapitoly 7.1 Poddajnosť spojov v Eurokóde 5 [1]. Poznámka hovorí o tom, že pri spojoch plech – drevo, alebo pri spojoch betón – drevo sa má K_{ser} určiť pomocou objemovej tiaže σ_m dreva a môže sa vynásobiť faktorom 2,0. Zároveň platí, že vzťahy pre výpočet modulu popustenia sú určené pre 1

strihovú rovinu. Preto bola výsledná hodnota K_{ser} vynásobená počtom strihových rovín (2 pre kolíkový prípoj) a faktorom 2,0 z poznámky (3).

Pri spojovacích prostriedkoch, ktoré sú spomenuté v tabuľke 7.1 v Eurokóde 5 [1] je možné túto poznámku zahrnúť vo výpočte modulu popustenia. Samorezné kolíky majú premenlivú geometriu po dĺžke kolíka a poznámka (3) by nemala byť zahrnutá vo výpočte K_{ser} . Modul popustenia kolíka sa teda zmenší na polovicu, konkrétne **2151,8 N/mm**, čo je porovnateľné s priemernou hodnotou získanou z experimentu.

Pri klincovej časti prípoja je potrebné rozlíšiť varianty č. 1 a 2, kde boli použité rebierkované klince 4/60 a vo variantoch č. 3 a 4 boli použité klince 4/100. Priemerná hodnota modulu popustenia prvej skupiny je **3632,7 N/mm**. Pri druhej skupine sú spriemerované hodnoty len z variantu č. 3, a to práve kvôli chybným výsledkom variantu č. 4, ktoré boli spôsobené trhlinou vo votknutom prievlaku. Priemerná hodnota modulu popustenia druhej skupiny je **4315,6 N/mm**. V porovnaní s numerickou analýzou pri variante č.1 a 2 je tuhosť z experimentu vyššia o 26%. Naopak tuhosť klincového prípoja variantu č. 3 je o 7% nižšia. Pre presnejšie určenie modulu popustenia rebierkovaných klincov je potrebné väčšie množstvo vzoriek.

5 ZÁVER

Témou dizertačnej práce je Vývoj novodobých prípojov pomocou oceľových kolíkových spájacích prostriedkov a lepidiel. Táto práca sa venovala teoretickému opisu danej problematiky a experimentálnemu overovaniu.

V prvých dvoch kapitolách sú popísané všeobecné charakteristiky kolíkových prípojov a prípojov pomocou lepidiel. V rámci týchto kapitol sú spomenuté typy, materiály, výrobné princípy, odolnosti a mechanické pôsobenie spájacích prostriedkov. Nasledujúca kapitola obsahuje teoretické informácie o polotuhých prípojoch, numerické metódy výpočtu rotačnej tuhosti prípoja, modul popustenia K_{ser} a moderné spojovacie prostriedky, ktoré umožňujú polotuhé pôsobenie. V 4. kapitole je opísaná príprava experimentu, návrh skúšobných prípojov, výpočet odolnosti a tuhosti prípojov. Odvođené sú vzťahy pre výpočet modulu popustenia spojovacích prostriedkov. V kapitole je nasledovne opísaný samotný priebeh experimentu a postup zaťažovania. 5. kapitola obsahuje výsledky uskutočnených experimentov. Konkrétne ide o hodnoty deformácie KVH konzoly a konektora Alumidí. Tieto hodnoty boli použité pri spätnom výpočte modulu popustenia a rotačnej tuhosti kolíkového a klincového prípoja. Výsledky experimentu boli porovnané s výsledkami numerickej analýzy.

Experimentálne boli overené 4 varianty prípoja. Každý variant obsahoval 4 vzorky. Okrem 16 vzoriek boli odskúšané 2 prípravné vzorky pre vyladenie experimentálne zostavy a ako prezentácia pre študentov.

Ako prvé boli z meraní pri experimente vyhodnotené výstupy deformácií KVH konzoly. Zistené boli väčšie deformácie oproti výsledkom z 3D modelu v programe SCIA Engineer. Deformácie KVH konzoly z experimentu boli 1,5-2 násobne väčšie. Z deformácií boli následné vypočítané hodnoty tuhosti pre medzný stav použiteľnosti a medzný stav únosnosti. Tuhosť z numerickej analýzy pri kolíkovom prípoji bola priemerne 1,69-2,26 násobne väčšia ako tuhosť v experimente. Hodnoty tuhostí boli v jednotlivých vzorkách vyvážené s rozptylom výsledkov do 12%. Výnimku tvorí variant č. 2, kde vzorka č. 2 dosiahla hodnotu tuhosti z numerickej analýzy a naopak vzorka č. 3 mala trojnásobne menšiu tuhosť. Pri vzorke č. 2 je vyššia tuhosť daná vysokou objemovou tiažou až 555 kg/m^3 a čistým prierezom KVH konzoly bez viditeľných hrč a živičných kanálikov. Pri vzorke č. 3 je výrazne nižšia tuhosť spôsobená krehkým porušením prípoja, a to v dôsledku trhliny v živičnom kanáliku v oblasti kolíkov.

Čo sa týka klincovej časti prípoja, tu boli pozorované vyššie hodnoty tuhosti z experimentu ako pri numerickej analýze. Výsledky tuhostí sú relatívne porovnateľné. Vo variante č. 1 sa odlišuje vzorka č. 4, kde museli byť niektoré klince predvrtané kvôli prítomnosti rastových hrč v prievlaku z LLD, keďže klince nebolo možné aplikovať bez porušenia cez hrču. Naopak, vo vzorke č. 4 variantu č. 2 je pozorovaná dvojnásobná tuhosť. Spôsobené to je nesprávnym pripevnením kovového pliešku na Alumidi konzolu. Počas zaťažovania sa pliešok neatáčal rovnako ako Alumidi konzola, čo vidieť aj na deformácii I6. Zaujímavé výsledky sa ukázali pri vyhodnocovaní variantu č. 4. Prípoj obsahoval najviac rebierkovaných klinčov a numericke bola vypočítaná najväčšia ohybová tuhosť. Výsledky tuhosti z experimentu ukázali výrazne nižšie hodnoty. Po opätovnom preskúmaní prievlaku z LLD bola nájdená trhlina v spodnej časti prierezu, ktorá ovplyvnila výsledky klincovej časti variantu č. 4. Prierez použitého prievlaku bude prepílený, aby sa zistil priebeh trhliny vnútri prierezu.

Následne prebehol výpočet modulu popustenia spojovacích prostriedkov. Výsledky kolíkovej časti preukázali približne dvojnásobne nižšie hodnoty ako boli vypočítané podľa normy [1]. Po krátkej úvahe bola nájdená príčina, a to v normovom výpočte modulu popustenia, kde je možné prenásobiť K_{ser} faktorom 2,0 pri spojoch oceľ-drevo. Pri samorezných kolíkoch, ktoré majú špeciálnu geometriu tento faktor nie je potrebné zahrnúť vo výpočte. Následne je priemerná tuhosť z experimentu porovnateľná s výsledkami

numerickej analýzy. Výpočet modulu popustenia klincovej časti prípoja priniesol väčší rozptyl výsledkov. Pri variantoch č. 1 a 2 bola vypočítaná vyššia hodnota modulu popustenia ako pri numerickej analýze a naopak pri variante č. 3 boli hodnoty modulu popustenia priemerne nižšie. Variant č. 4 bol vynechaný z výsledkov modulu popustenia. kvôli spomínanej trhline v oblasti klinčov.

Na záver sú v práci vykreslené pracovné diagramy kolíkového a klincového prípoja všetkých odskúšaných vzoriek.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] STN EN 1995-1-1 + A1: Eurokód 5. Navrhovanie drevených konštrukcií. Časť 1-1: Všeobecne – Všeobecné pravidlá a pravidlá pre budovy
- [2] STN EN 1993-1-1: Eurokód 3. Navrhovanie oceľových konštrukcií. Časť 1-1: Všeobecné pravidlá a pravidlá pre budovy
- [3] STN EN 1993-1-8: Eurokód 3. Navrhovanie oceľových konštrukcií. Časť 1-8: Navrhovanie uzlov
- [4] STN EN 383: Drevené konštrukcie. Skúšobné metódy. Stanovenie pevnosti stien otvorov a charakteristík stlačiteľnosti pre kolíkové spájacie prostriedky. SÚTN, 2007
- [5] STN EN 380: Drevené konštrukcie. Skúšobné metódy. Všeobecné zásady skúšania statickým zaťažením. SÚTN, 1998
- [6] Rácz, A. 2017. Experimentálno-teoretické overovanie polotuhých spojov v drevených konštrukciách [Diplomová práca]. Bratislava: SvF STU v Bratislave. 60 s.
- [7] Duchoň, V. Teoretická a experimentálna analýza spojov s vlepovanými tyčami [Dizertačná práca]. Bratislava: SvF STU v Bratislave. 80 s.
- [8] Schickhofer, G. (2006) Holzbau Nachweisführen für Konstruktionen aus Holz (Graz: Institut für Holzbau & Holztechnologie Technische Universität Graz)
- [9] Duchoň, V., Klas, T., Katona, O., Brodniansky, J., Balcierák, L., Sandanus, J., & Sógel, K. (2016). Experimental tests of timber connections with glued-in rods in bending. *Wood Research*, 61(4).
- [10] *Design of timber structures Introduction to design and design process*. (2016) (Vol. 1). Retrieved from www.swedishwood.com
- [11] Gečys, T., & Daniūnas, A. (2017). Rotational stiffness determination of the semi-rigid timber-steel connection. *Journal of Civil Engineering and Management*, 23(8), 1021–1028. <https://doi.org/10.3846/13923730.2017.1374305>
- [12] Xu, B. H., Bouchaïr, A., & Racher, P. (2012). Analytical study and finite element modelling of timber connections with glued-in rods in bending. *Construction and Building Materials*, 34, 337–345. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.087>
- [13] Guan, Z. W., & Rodd, P. D. (2001). Hollow steel dowels - a new application in semi-rigid timber connections. *Engineering Structures*, 23(1), 110–119. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(00\)00027-4](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(00)00027-4)

- [14] Ogrizovic, J., Wanninger, F., & Frangi, A. (2017). Experimental and analytical analysis of moment-resisting connections with glued-in rods. *Engineering Structures*, 145, 322–332. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.05.029>
- [15] Solarino, F., Giresini, L., Chang, W.-S., & Huang, H. (2017). Experimental Tests on a Dowel-Type Timber Connection and Validation of Numerical Models. *Buildings*, 7(4), 116. <https://doi.org/10.3390/buildings7040116>
- [16] Izzi, M., Rinaldin, G., Polastri, A., & Fragiaco, M. (2018). A hysteresis model for timber joints with dowel-type fasteners. *Engineering Structures*, 157(November 2017), 170–178. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.12.011>
- [17] Izzi, M., Flatscher, G., Fragiaco, M., & Schickhofer, G. (2016). Experimental investigations and design provisions of steel-to-timber joints with annular-ringed shank nails for Cross-Laminated Timber structures. *Construction and Building Materials*, 122, 446–457. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.072>
- [18] Sandhaas, C., Munch-Andersen, J., Dietsch, P., & Jockwer, R. (2018). *Design of Connections in Timber Structures, a state-of-the-art report by COST Action FP1402 / WG 3*. <https://doi.org/10.2370/9783844061444>
- [19] Schweigler, M., Bader, T. K., & Hochreiner, G. (2018). Engineering modeling of semi-rigid joints with dowel-type fasteners for nonlinear analysis of timber structures. *Engineering Structures*, 171(May), 123–139. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.063>
- [20] Johansson, C. J., Aicher, S., Bainbridge, R., Bengtsson, C., Blass, H., Görlacher, R., ... Serrano, E. (2002). GIROD – Glued-in Rods for Timber.
- [21] Tlustochowicz, G., Serrano, E., & Steiger, R. (2011). State-of-the-art review on timber connections with glued-in steel rods. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 44(5), 997–1020. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9682-9>
- [22] <https://stavba.tzb-info.cz/drevne-konstrukce/15789-ramovy-roh-navrh-a-skusanie>
- [23] <https://www.rothoblaas.com>
- [24] Zöllig, S., Frangi, A., Franke, S., & Muster, M. (2016). Timber structures 3.0 - New technology for multi-axial, slim, high performance timber structures. *WCTE 2016 - World Conference on Timber Engineering*, (August).
- [25] Jockwer, R., Caprio, D., Jorissen, A. (2022) Evaluation of parameters influencing the load-deformation behaviour of connections with laterally loaded dowel-type fasteners, *Wood Material Science & Engineering*, 17:1, 6-19, DOI:10.1080/17480272.2021.1955297

- [26] <http://www.sherpa-connector.cz>
- [27] <https://www.strongtie.co.uk>
- [28] <https://www.hbm.com/en/0236/displacement-sensors-and-displacement-transducers/>
- [29] <https://dynea.com/products/product-technology/phenol-resorcinol>

PUBLIKÁCIE AUTORA

- 1) NEUSCH, M. -- SANDANUS, J. -- SÓGEL, K. Semi-rigid operation of connection in timber engineering. In YS2019 - Young Scientist 2019. Bristol: IOP Publishing, 2019.
- 2) NEUSCH, M. Polotuhé prípoje v drevených konštrukciách s využitím Alumidi konzol. In Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering. Bratislava: Spektrum STU, 2019, s. 417-421. ISBN 978-80-227-4972-5.
- 3) NEUSCH, M. Príprava experimentu prípoja s Alumidi konzolou. In Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering. Bratislava: Spektrum STU, 2020, s. 484-489. ISBN 978-80-227-5052-3.
- 4) NEUSCH, M. Rotačná tuhosť prípojov v drevených konštrukciách s Alumidi konzolami. In ŠUHAJDOVÁ, E. - BIOLEK, V. - MRŇOVÁ, Z. Juniorstav 2020. Brno: ECON publishing, 2020, s. 335-340. ISBN 978-80-86433-73-8.
- 5) NEUSCH, M. Diagnostika historického krovu. structures.sk. Navrhovanie, posudzovanie, realizácia a obnova nosných konštrukcií, 2. s. 22-26.
- 6) NEUSCH, M. Diagnostika historickej strešnej konštrukcie. In BISTÁK, A. Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering. Bratislava: Spektrum STU, 2021, s. 471-476. ISBN 978-80-227-5150-6.
- 7) NEUSCH, M. -- SANDANUS, J. Experiment procedure with semi-rigid timber connectors. In PAPÁN, D. - ZVAKOVÁ, Z. - ŠČOTKA, M. EDES 2021 - Extraordinary Dynamic Experiments and Simulations. Les Ulis: Édition Diffusion Presse Sciences, 2021.
- 8) NEUSCH, M. Experimentálne overovanie drevených polotuhých prípojov s Alumidi. In ŠUHAJDOVÁ, E. - NOVÁK, D. - BAJER, M. Juniorstav 2022. Brno: ECON publishing, 2022, s. 285-290. ISBN 978-80-86433-76-9.