



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
STAVEBNÁ FAKULTA

Meno a priezvisko

Ing. Roman Herda

Autoreferát dizertačnej práce

**Škrupinové konštrukcie voľných tvarov, moderné metódy modelovania,
optimalizácie a navrhovania**

na získanie akademického titulu:

philosophiae doctor – PhD.

v doktorandskom študijnom programe:

teória a konštrukcie inžinierskych stavieb

v študijnom odbore:

stavebníctvo

Forma štúdia:

denná

Miesto a dátum:

Bratislava, 16.6.2025



Dizertačná práca bola vypracovaná na:

Katedre kovových a drevených konštrukcií Stavebnej fakulty STU v Bratislave

Predkladateľ:

Ing. Roman Herda

Katedra kovových a drevených konštrukcií

Stavebná fakulta, STU v Bratislave

Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Školiteľ:

prof. Ing. Jaroslav Sandanus, PhD.

Katedra kovových a drevených konštrukcií

Stavebná fakulta, STU v Bratislave

Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa: 16.6. 2025

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa: 27.8. o: 9:00h na Katedre kovových a drevených konštrukcií (Svf, STU v BA), Radlinského 11, 010 05 Bratislava.

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

Obsah

1. Úvod.....	1
2. CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE	2
3. METODIKA PRÁCE A METÓDY SKÚMANIA.....	3
4. NUMERICKÉ POSTUPY PRE NELINEÁRNU ANALÝZU A ICH APLIKOVATEĽNOSŤ NA AKTÍVNE OHÝBANÉ ŠKRUPINOVÉ KONŠTRUKCIE	4
Modifikovaný Newton-Raphson.....	4
Metóda dynamickej relaxácie	4
Zhrnutie metód a ich využitie v dizertačnej práci	4
5. NEDOSTATKY METÓDY DYNAMICKEJ RELAXÁCIE PRI POUŽITÍ ZJEDNODUŠENÉHO POSTUPU MODELOVANIA.....	5
6. MODELOVANIE AKTÍVNEHO OHÝBANIA POMOCOU METÓDY MODIFIKOVANÝ NEWTON-RAPHSON	7
Prepojenie prútov dvojvrstvovej prútovej škrupiny.....	9
7. ZHRNUTIE VÝSLEDKOV MATERIÁLOVÝCH SKÚŠOK	12
8. VERIFIKÁCIA NUMERICKÝCH MODELOV NA ZÁKLADE EXPERIMENTÁLNYCH MERANÍ	13
Porovnanie numerického a experimentálneho modelu jednovrstvovej prútovej škrupiny	13
Porovnanie výsledkov numerických a experimentálnych modelov v etape č.4 pri podvesení zaťaženia.....	15
Tvarovanie dvojvrstvovej prútovej škrupiny	16
Porovnanie numerického a experimentálneho modelu dvojvrstvovej prútovej škrupiny.....	17
Porovnanie výsledkov numerických a experimentálnych modelov v etape č.4 pri podvesení zaťaženia.....	17
ZHRNUTIE, ZÁVERY A ODPORÚČANIA	19

ABSTRAKT

Dizertačná práca prezentuje problematiku navrhovania prútových škrupinových konštrukcií so zameraním sa na využitie elastických vlastností dreva počas výstavby. Vytvorenie zakrivenej geometrie strešnej roviny priamo ohýbaním prvkov na stavenisku a teda využitím systematizovanej elastickej deformácie sa popisuje ako aktívne ohýbanie. Úvod práce je venovaný historickému prehľadu a vývoju drevených zakrivených a priestorových stavieb. V práci je charakterizovaná problematika aktívneho ohýbania a teoretický úvod do statickej analýzy s aplikáciou aktívneho ohýbania pre drevené škrupinové konštrukcie. V práci sú ďalej uvedené v praxi bežne používané spôsoby nelineárneho výpočtu škrupinových konštrukcií a ich aplikovateľnosť pre výpočet aktívneho ohýbania. Najpoužívanejšia metóda, ktorá sa používa pre výpočet konštrukcií vyhotovených spôsobom aktívneho ohýbania je metóda dynamickej relaxácie. V súvislosti s aplikáciou tejto metódy sú v práci identifikované jej obmedzenia a nedostatky. Časť práce je venovaná numerickej analýze aktívneho ohýbania prútových sietí pomocou metódy Newton-Raphson a Modifikovaný Newton-Raphson. Na základe výsledkov porovnania týchto nelineárnych metód je ďalej spracovaná podrobná analýza prepojenia prútov jedno a dvojvrstvovej prútovej škrupiny. Výsledky numerických modelov sú v závere práce konfrontované s výsledkami experimentálnych modelov. Súčasťou experimentálnej práce sú materiálové skúšky a elastické tvarovanie jedno a dvojvrstvovej prútovej škrupinovej konštrukcie s pôdorysným rozmerom 2 m x 2 m.

Kľúčové slová: škrupina, drevo, aktívne ohýbanie, Modifikovaný Newton-Raphson

ABSTRACT

The dissertation addresses the design of timber gridshell structures, with a focus on utilizing the elastic properties of wood during construction. The formation of a curved roof geometry directly on-site by bending the elements and thus using systematic elastic deformation is referred to as active bending. The introductory chapters provide a historical overview and development of curved and spatial timber structures. Subsequent chapters characterize the concept of active bending and provide a theoretical background in structural analysis applied to timber shell structures. The thesis further presents commonly used nonlinear analysis methods for shell structures and evaluates their applicability for the analysis of active bending. The most frequently used method for analyzing actively bent structures is the dynamic relaxation method, and its limitations and drawbacks are identified and discussed in the thesis. Further chapters focus on the numerical analysis of active bending of rod networks using the Newton-Raphson and Modified Newton-Raphson methods. Based on a comparison of these nonlinear approaches, a detailed analysis of the beam connections in single- and double-layer gridshells is presented. The results of the numerical models are compared with experimental results in the final chapter. The experimental part includes material testing and elastic forming of a single- and double-layer gridshell structure with a plan dimension of 2 m x 2 m.

Key words: gridshell, timber, active bending, Modified Newton-Raphson

1. Úvod

Nároky modernej architektúry sa v súčasnosti čoraz viac upriamujú na tvarovo zaujímavé konštrukcie, ktoré budú nielen plniť svoju funkciu, ale tiež sa dokážu esteticky vyčleniť vo svojom okolí a upútať svojou geometriou. Škrupinové konštrukcie, keďže ide o tvary, ktoré sú ohraničené krivočiarymi plochami, nepopierateľne do tejto kategórie patria. V súčasnosti je pri týchto konštrukciách často preferovaný viackrát zakrivený tvar strešnej roviny s malými polomermi zakrivenia a možnosťou preklenúť veľké rozpätia. Takéto riešenie predstavuje niekoľko technických a inžinierskych výziev, či už z hľadiska návrhu, analýzy alebo samotného spôsobu vyhotovenia konštrukcie. Drevo ako stavebný materiál ponúka širokú škálu svojho využitia vďaka svojim pozitívnym vlastnostiam. Nejedná sa len o vlastnosti materiálu, vďaka ktorým je drevo schopné odolávať vysokým zaťaženiám, ale aj o jeho schopnosť elastického pretvorenia. Schopnosť materiálu elasticky sa pretvárať počas procesu výstavby, bola využívaná už pri stavbe prvých príbytkov a využíva sa dodnes aj pri moderných tvarovo komplikovaných prúťových škrupinových konštrukciách. Návrh prúťovej škrupinovej konštrukcie s viackrát zakrivenou strešnou rovinou, veľkým rozpätím a zapojením elastickej deformácie prúťov do procesu výstavby, si vyžaduje špecifický prístup, pri ktorom je do výpočtových postupov potrebné zahrnúť problematiku aktívneho ohýbania. Nakoľko sa často jedná o voľne tvarované konštrukcie, ktoré nie je možné popísať jednoduchou matematickou funkciou alebo geometrickým tvarom, je nevyhnutné zvoliť správny postup pre analýzu tohto typu konštrukcie. V súčasnosti neexistuje jeden správny návrhový postup pre zohľadnenie všetkých spomenutých vplyvov a je potrebné k návrhu každej takejto konštrukcie pristupovať osobitým spôsobom. V minulosti sa návrh aktívne ohýbaných konštrukcií, ktoré sú podrobne rozpísané v tejto práci, realizoval na základe empirických postupov, neskôr to boli zmenšené fyzické modely a dnes je možné využiť iteračné výpočtové postupy alebo analýzu za pomoci 3D softvérov ponúkajúcich nelineárnu analýzu a metódu konečných prvkov.

2. CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Hlavným cieľom dizertačnej práce je prehĺbenie a rozšírenie vedomostí o spôsobe analýzy drevených prútových škrupinových konštrukcii zhotovených pomocou metódy aktívneho ohýbania. Napriek tomu, že na Slovensku sa takýto typ stavby dosiaľ nenachádza, ide o metódu výstavby, pomocou ktorej sa už vo svete postavili unikátne konštrukcie. Ide však o komplikovaný proces, ktorý predstavuje niekoľko inžinierskych výziev.

Podporným cieľom k dosiahnutiu hlavného cieľa je stanovenie metodiky a limitov numerickej analýzy aktívneho ohýbania pomocou nelineárnej metódy Modifikovaný Newton-Raphson, ktorá sa radí medzi bežne používané výpočtové metódy integrované do komerčných softvérov.

K naplneniu hlavného cieľa je potrebné spracovanie čiastkových úloh medzi ktoré patrí:

1. spracovanie súhrnného prehľadu dostupných poznatkov k danej problematike,
2. poukázať na potenciálne nedostatky spojené s využitím zjednodušeného postupu analýzy aktívneho ohýbania pomocou metódy dynamickej relaxácie,
3. preskúmanie limitov analýzy veľkých deformácií pre aktívne ohýbanie pomocou metódy Newton-Raphson a metódy Modifikovaný Newton-Raphson,
4. overiť výsledky numerických riešení na základe experimentálnych meraní,
5. formulovať závery a odporúčania pre inžinierskú prax.

3. METODIKA PRÁCE A METÓDY SKÚMANIA

Postup spracovania práce vychádza z na seba nadväzujúcich etáp, pomocou ktorých je možné dosiahnutie hlavného cieľa dizertačnej práce.

Prvým krokom je na základe získaných súhrnných poznatkov k problematike navrhnúť metodiku numerickej analýzy, ktorú bude možné následne overiť pomocou experimentálnych meraní.

Numerická analýza začína skúmaním limitov analýzy veľkých deformácií na prípade jedného dreveného prúta pomocou metódy Newton-Raphson a Modifikovaný Newton-Raphson. Na základe výsledkov porovnania uvedených metód je potrebné vyhodnotiť ich vhodnosť pre analýzu aktívneho ohýbania a rozšíriť štúdiu pre jednovrstvovú prútovú škrupinovú konštrukciu.

Ďalším krokom je definovanie parametrov prípojev, ktoré je potrebné zahrnúť do výpočtových modelov.

Posledným krokom numerickej analýzy bude spracovanie numerického modelu aktívneho ohýbania dvojvrstvovej prútovej škrupiny s rešpektovaním parametrov potrebných pre korektné modelovanie prepojenia jednotlivých vrstiev.

Výsledky numerických modelov sa následne overia pomocou experimentálnych meraní v postupnosti začínajúcej meraniami limitných vzopätí drevených lát, pokračujúc experimentálnym modelom jednovrstvovej prútovej škrupiny a končiac experimentálnym modelom dvojvrstvovej prútovej škrupinovej konštrukcie.

Kľúčovými parametrami pre porovnanie numerických a experimentálnych modelov bude korektné stanovenie materiálových charakteristík.

Jedným z prvkov metodického postupu bolo aj nadviazanie odbornej spolupráce so zahraničnou univerzitou Limerick v Írsku. Spolupráca je zameraná na definovanie niektorých nedostatkov metódy dynamickej relaxácie.

4. NUMERICKÉ POSTUPY PRE NELINEÁRNU ANALÝZU A ICH APLIKOVATEĽNOSŤ NA AKTÍVNE OHÝBANÉ ŠKRUPINOVÉ KONŠTRUKCIE

Numerické výpočtové postupy pre hľadanie optimálneho tvaru sa opierajú o iteračné postupy. Pomocou numerických algoritmov sa vykonávajú geometrické úpravy konštrukcie, kým sa nedosiahne statická rovnováha. Najpoužívannejšími metódami, ktoré sa využívajú na nelineárnu analýzu a hľadanie výsledného optimálneho tvaru škrupín sú metódy:

- Force density,
- Newton-Raphson,
- Modifikovaný Newton-Raphson,
- Metóda dynamickej relaxácie.

Modifikovaný Newton-Raphson

Nelineárna výpočtová metóda Modifikovaný Newton-Raphson sa podľa [24] používa na postkritickú analýzu, kedy je potrebné prekonať oblasť s nestabilitou. Výpočtová metóda funguje na princípe, že ak sa pri výpočte objaví nestabilita a maticu tuhosti nie je možné ďalej invertovať, program použije maticu tuhosti z posledného iteračného kroku.

Z týchto informácií sa vychádza pri spracovaní tejto práce za predpokladu, že je možné využiť túto metódu pre analýzu aktívne ohýbaných prútových škrupinových konštrukcií. Viaceré zahraničné štúdie, ktoré porovnávajú nelineárne metódy pre analýzu aktívneho ohýbania, túto metódu buď opomínajú alebo sa odkazujú na metódu Newton-Raphson, ktorá sa preukazuje byť pre analyzovanie týchto konštrukcií nevhodnou. Aplikácia tejto metódy teda dosiaľ nie je podrobne preskúmaná.

Metóda dynamickej relaxácie

V prípade aktívne ohýbaných sústav preukázala metóda dynamickej relaxácie výskumom uvedeným v [21], že odstraňuje nedostatky metód Force density a Newton-Raphson, ponúka rýchle a stabilné konvergovanie výpočtu a je vhodná pre použitie pri aktívne ohýbaných konštrukciách.

Podľa informácií uvedených v [22] metóda dynamickej relaxácie predstavuje pseudo-dynamický postup. Hmota je sústredená v príslušných uzloch a osciluje okolo počiatočnej polohy vplyvom nevyvážených síl. Vďaka umelému tlmeniu sa dostanú do rovnovážnej polohy. Pôvodným teoretickým postupom je využitie viskózneho tlmenia. Alternatívou je kinematické tlmenie, ktoré sa pri týchto výpočtoch ukázalo ako stabilnejšie a s rýchlejšou konvergenciou pri riešení veľkých posunov.

Zhrnutie metód a ich využitie v dizertačnej práci

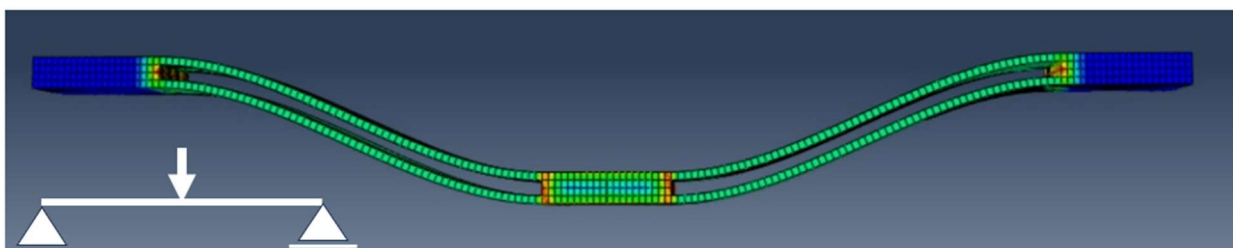
Použitie metódy dynamickej relaxácie pre analýzu aktívne ohýbaných prútových škrupinových konštrukcií, sa vo viacerých prípadoch [19, 25] odkazuje na riešenia pomocou zjednodušeného postupu, kedy je prútová zostava vo fáze tvarovania modelovaná ako jednovrstvová v jednej rovine s momentom zotrvačnosti zodpovedajúcim samostatnému (nespriahnutému) prierezu. Po dosiahnutí výsledného tvaru sa pre ďalšiu analýzu prierezové charakteristiky vymenia za charakteristiky dvoj a viacvrstvového prierezu. Takýto zjednodušený postup však môže obsahovať viaceré nedostatky, ktoré sú zhrnuté v kapitole 5.

Vzhľadom na nedostatok informácií o použití metódy Modifikovaný Newton-Raphson pre analýzu aktívneho ohýbania sa táto práca v kapitole 6 zameriava na spracovanie numerických

modelov pomocou tejto metódy, cieľom ktorých je stanovenie metodiky modelovania konštrukcií vyhotovených metódou aktívneho ohýbania. Závěry numerických modelov sú konfrontované s výsledkami experimentálnych meraní v kapitole 7.

5. NEDOSTATKY METÓDY DYNAMICKEJ RELAXÁCIE PRI POUŽITÍ ZJEDNODUŠENÉHO POSTUPU MODELOVANIA

Medzi nedostatok využitia zjednodušeného postupu modelovania za pomoci využitia metódy dynamickej relaxácie, patrí efekt s názvom sekundárne ohýbanie, ku ktorému dochádza pri viacvrstvových prútových zostavách medzi šmykovými blokmi. Tento efekt sa pri zjednodušenom postupe zanedbáva. Vplyvom sekundárneho ohýbania dochádza okrem „primárnej“ deformácií od zaťaženia aj k príspevku deformácie medzi šmykovými blokmi v „S“ tvare (obr. 5.1).



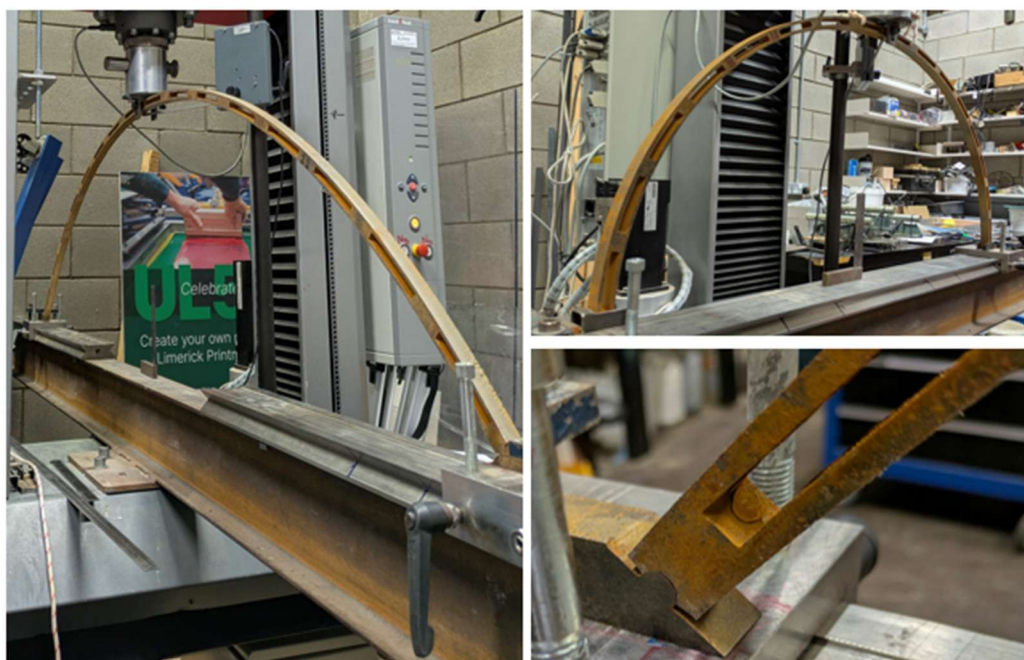
Obr. 5.1 Tvar deformácie dvojvrstvého prúta od sekundárneho ohýbania [20]

Štúdia pre analýzu sekundárneho ohýbania bola spracovaná v spolupráci so zahraničnou Univerzitou Limerick v Írsku. Súčasťou tejto práce je analytické, numerické a experimentálne riešenie. Pre verifikáciu analytického riešenia boli v laboratóriu Univerzity Limerick spracované merania na siedmich oceľových dvojvrstvových oblúkoch. Tvary oblúkov boli vytvorené rezaním vysokotlakovým prúdom vody z oceľového plechu hrúbky 20 mm (obr. 5.2). Celý proces vyrezávania vzoriek bol realizovaný pod dohľadom odborných pracovníkov v laboratóriu a trval viac ako 20 hodín.



Obr. 5.2 Proces vyrezávania vzoriek z oceľového plechu hrúbky 20 mm

Skúšobné vzorky boli vyrezané z oceľovej dosky pevnostnej triedy S275. Pre skúšobné vzorky bola zvolená oceľ na základe nižšej variability materiálových vlastností a vyššiu presnosť meraných výsledkov.

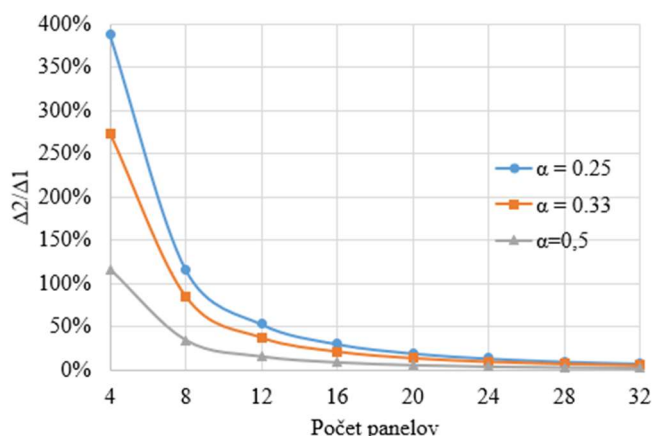


Obr.5.3 Vzorky oblúkov a okrajové podmienky v zaťažovacej zostave

Z výskumu sekundárneho ohýbania možné vyvodiť záver, ktorého obsahom je potreba zohľadnenia príspevku sekundárneho ohýbania k výslednej zvislej deformácii. Z grafického zobrazenia (obr. 5.4) pri pohľade na príspevky

- Δ_1 – príspevok deformácie od primárneho ohýbania (výsledok pri zanedbaní sekundárneho ohýbania),
- Δ_2 - príspevok deformácie od sekundárneho ohýbania,

je možné pozorovať, že ak by bola vo výpočte zohľadnená len primárna deformácia prúta Δ_1 pre zložený prierez, na základe ktorej je počítaná deformácia pomocou metódy dynamickej relaxácie, významne by sme podhodnotili deformáciu, ktorá sa v skutočnej konštrukcii môže vyskytnúť, nakoľko pomer Δ_2 od sekundárneho ohýbania a Δ_1 od primárneho ohýbania je pri prútoch s nízkym počtom panelov a teda aj šmykových blokov viac ako 3. Za jeden panel sa považuje osová vzdialenosť medzi šmykovými blokmi.

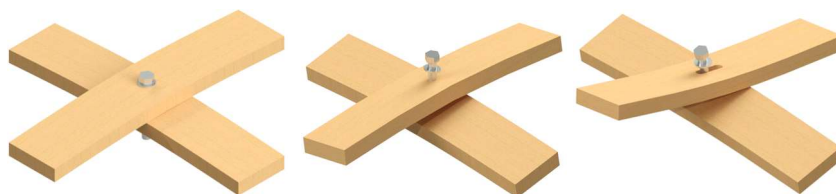


Obr.5.4 Pomer sekundárneho a primárneho ohýbania pre rôzny počet panelov

6. MODELOVANIE AKTÍVNEHO OHÝBANIA POMOCOU METÓDY MODIFIKOVANÝ NEWTON-RAPHSON

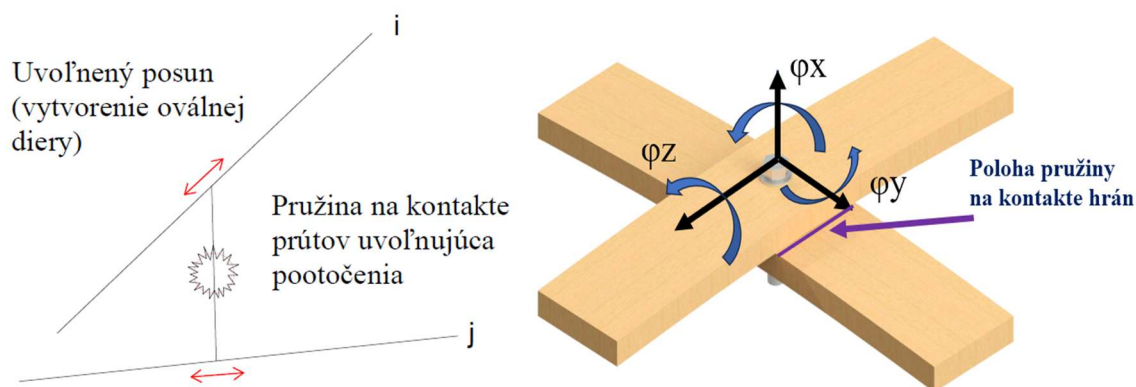
Dizertačná práca je v ďalších častiach zameraná na stanovenie modelovacieho postupu pre analýzu aktívne ohýbaných prútovej škrupinových konštrukcií z dreva pomocou metódy Modifikovaný Newton-Raphson. Jednou z najväčších výziev tohto postupu je definovanie parametrov modelovania prípojov pri jedno a dvojvrstvovej prútovej škrupine.

Vzhľadom na spôsob realizácie prútovej škrupiny metódou aktívneho ohýbania, je nevyhnutné uvoľnenie prípojov počas štádia formovania (obr. 6.1), aby sa zabránilo možným poškodeniam. Modelovanie uvoľneného prípoja znamená, že je potrebné na kontakte jednotlivých vrstiev uvoľniť pootočeniu prútoy φ_y a φ_z . V niektorých prípadoch sa v jednotlivých prútoch vytvárajú aj oválne diery pre spojovací prostriedok, ktoré umožňujú posun vrstiev škrupiny počas formovania.



Obr. 6.1 Správanie sa prípoja prútoy jednovrstvovej prútovej škrupiny a) Utiahnutý spoj b) Spoj s uvoľneným pootočením φ_y , φ_z a φ_x , c) Spoj s uvoľnenými pootočeniami a vytvorenou oválnou dierou pre spojovací prostriedok

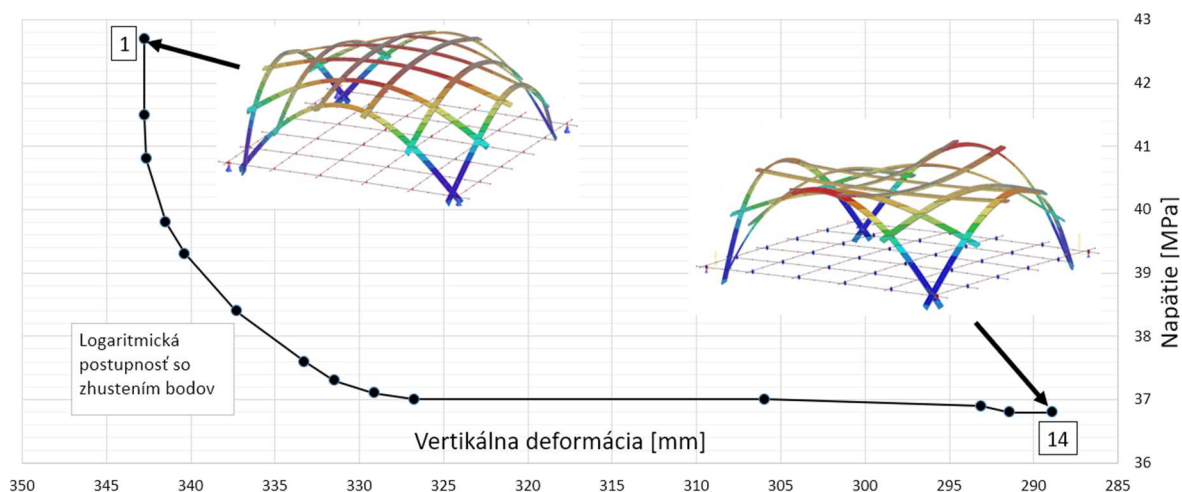
Implementácia okrajových podmienok (obr. 6.2) pôsobenia prípoja bola vykonaná v softvéri SCIA Engineer. Prepojenie prútoy bolo zabezpečené pomocou krátko prúta reprezentujúceho svorník.



Obr. 6.2 Schematické znázornenie okrajových podmienok prepojenia vrstiev vo výpočtovom modeli

Vzhľadom na požadovanú stabilitu konvergenzie nelineárneho výpočtu boli do modelu zadané pružné klby na kontakte hrán medzi jednotlivými vrstvami (obr. 6.2) a pružné posuny v miestach prepojenia prútoy so spojovacím prostriedkom. Nakoľko predpokladom správania sa skutočného prípoja je uvoľnené pootočeniu a uvoľnený posun, boli hodnoty rotačných tuhostí a posunov postupne znižované (obr. 6.3). Pre postupné uvoľňovanie bola pri zaťažení posunom 100 mm smerom do ťažiska prútovej zostavy, zvolená logaritmická postupnosť znižovania hodnôt v 14 krokoch. Prvým bol model tuho prepojený medzi

jednotlivými vrstvami. Posledným modelom č.14 je model s hodnotou rotačnej tuhosti $1\text{E-}06$ MNm/rad a hodnotou pružného posunu $1\text{E-}03$ MN/m.



Obr.6.3 Grafická závislosť deformácie a napätia pre postupné znižovanie hodnôt rotačných tuhostí a tuhostí posunov

Obrázok 6.3 reprezentuje grafickú závislosť vertikálnej deformácie a napätia (vo vrchole obvodových oblúkov) jednotlivých modelov s postupným znižovaním hodnôt rotačných tuhostí a tuhostí uzlového posunu. Na základe výsledkov grafu je možné konštatovať, že veľkosti hodnôt definovaných rotačných tuhostí a posunov sú dostatočne nízke na reprezentáciu uvoľneného spoja s oválnou dierou pre spojovací prostriedok.

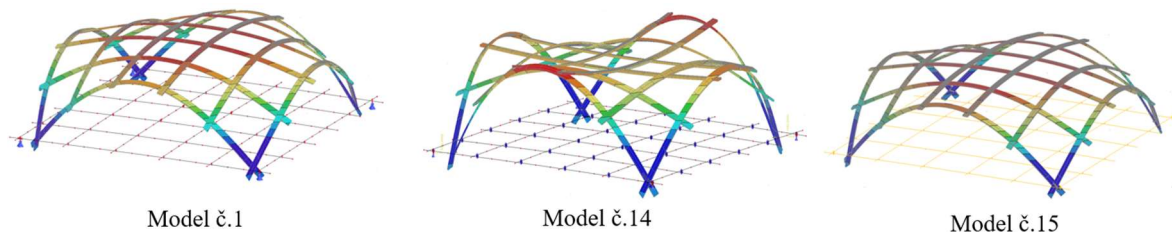
Ďalším z overených predpokladov správania sa konštrukcie (tabuľka 6.1) je, že vyhotovením uvoľnených spojov a vytvorením oválnych dier pre spojovacie prostriedky dochádza okrem k zníženiu napätosti v prútoch aj k zmene výsledného tvaru konštrukcie. Táto zmena sa prejavuje poklesom vzopätia v strede prútovej zostavy.

Pre porovnanie vplyvu uvoľnenej rotácie a uvoľneného posunu bol vytvorený model č.15, ktorý dovoľuje rotáciu φ_y , φ_z a φ_x , ale zabraňuje posunu prútov, resp. model neobsahuje oválnu dieru pre spojovací prostriedok (obr. 6.2). Z výsledkov vyplýva, že na poklese napätosti sa podieľa najmä vytvorenie oválnej diery. Pri uvoľnení rotácie prútov nedochádza k významnému poklesu napätia, nakoľko sa medziľahlé prúty siete stále nachádzajú vo vzopätom stave.

Tab.6.1 Výsledky modelov pre jednovrstvovú prútovú sieť

Označenie	Hodnota rotačnej tuhosti	Uvoľnený posun	Napätie	Deformácia
	[MNm/rad]	[-]	[MPa]	[mm]
Model č.1	Tuhý	Nie	42,7	341
Model č.14	$1\text{e-}06$	Áno	37,1	284
Model č.15	$1\text{e-}06$	Nie	42,7	310,5

Vyhotovenie oválnej diery pre spojovací prostriedok, ktorá umožňuje vzájomné posuny medzi vrstvami prútovej zostavy počas formovania sa preukazuje na základe výpočtového modelu ako nežiadúce z hľadiska zabezpečenia vzopätého tvaru jednovrstvovej škrupinovej konštrukcie (obr. 6.4).

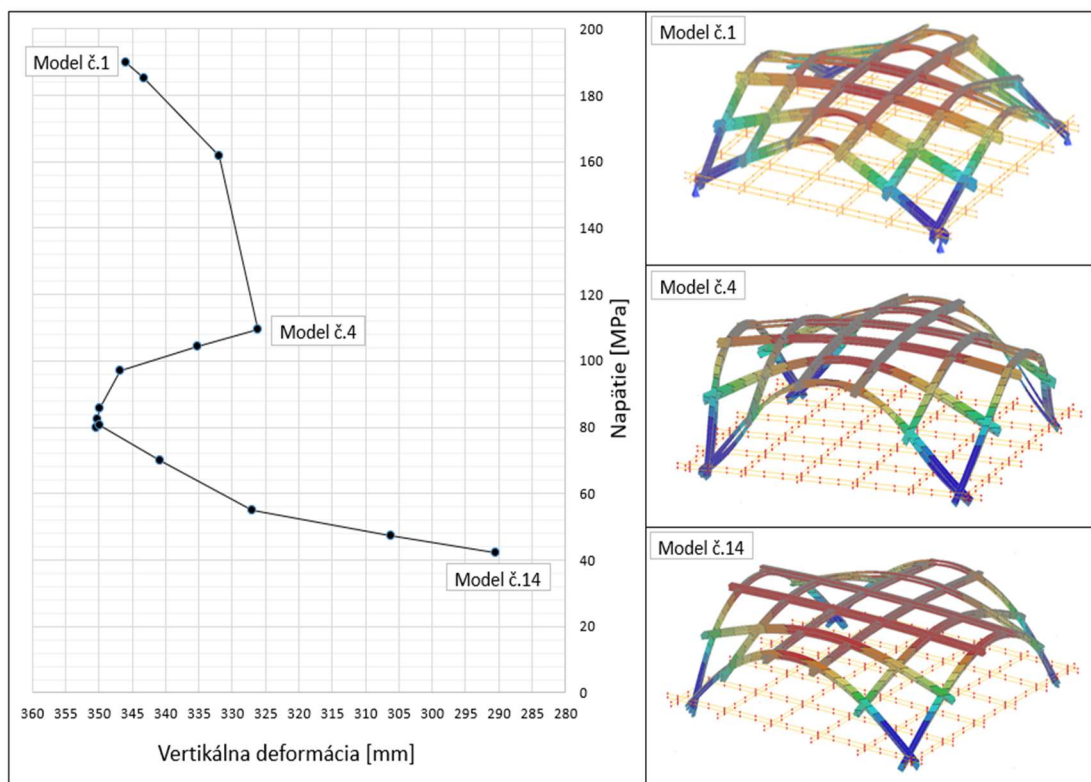


Obr. 6.4 Grafické zobrazenie modelov porovnaných v tabuľke 6.1

Vytvorenie oválnej diery môže byť významným faktorom pri analýze a vyhotovení dvojvrstvovej prútovej zostavy, nakoľko dovolený posun paralelných vrstiev umožňuje tvarovanie škrupinovej konštrukcie s namáhaním približujúcim sa tvarovaniu jednovrstvovej prútovej škrupine. Dodatočným utiahnutím prípoja sa následne vytvára zložený prierez s podstatne vyššou hodnotou ohybovej tuhosti.

Prepojenie prútov dvojvrstvovej prútovej škrupiny

Vychádzajúc z poznatkov získaných pri analýze jednovrstvovej prútovej škrupiny s ohľadom na veľkosti rotačných tuhostí a tuhostí posunov boli spracované výpočtové modely pre dvojvrstvové prútové siete. Cieľom modelovacieho prístupu je sa výsledkami namáhania dvojvrstvovej prútovej siete, uvoľnením spojov, priblížiť namáhaniu jednovrstvovej prútovej siete.

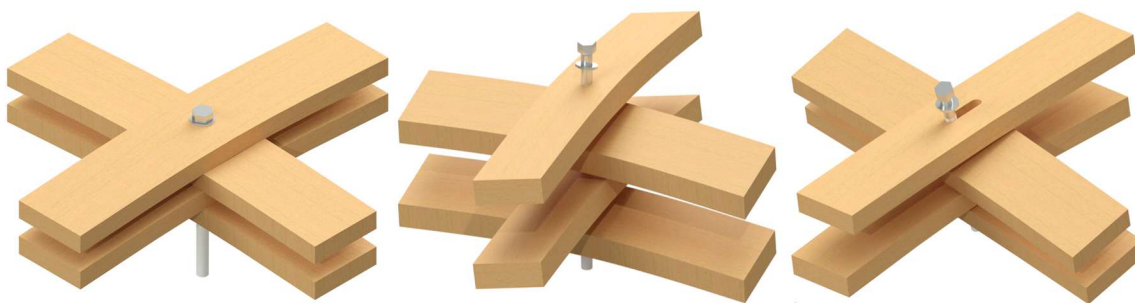


Obr. 6.5 Grafické porovnanie závislosti napätosť- vertikálna deformácia pri postupnom znižovaní rotačných tuhostí a tuhostí posunov

Spracované je grafické porovnanie závislosti napätosť-vertikálna deformácia pri postupnom znižovaní rotačných tuhostí a tuhostí posunov (obr. 6.5). Modelom č.1 je model s tuhými prepojeniami. Model č. 14 reprezentuje model úplne uvoľnený s oválnymi dierami medzi všetkými vrstvami.

Vplyvom tuhého prepojenia jednotlivých vrstiev, ako je zrejmé aj z grafickej reprezentácie modelu č.1, nedochádza na styku medzi jednotlivými vrstvami k voľnému pootočeniu prierezov, čo vedie k vysokej koncentrácii napätí vo vrchole hlavných obvodových oblúkov. Postupným uvoľňovaním prepojení dochádza k významnému zníženiu napätosti (Model č.4) v tomto mieste a k tvarovaniu obvodových oblúkov. Ďalším znižovaním rotačných tuhostí a tuhostí posunov dochádza k nárastu deformácie aj medziľahlých uzlov pozdĺž obvodových oblúkov, čo má za následok zvýšenie vzopätia stredných prútov. Po dosiahnutí maximálnej hodnoty vzopätia oblúkov vychádzajúcich z geometrie, dochádza ďalším znižovaním rotačných tuhostí a tuhostí posunov k zníženiu zvislých deformácií aj napätosti, približujúcej sa napätosti jednovrstvovej prútovej siete (Model č.14).

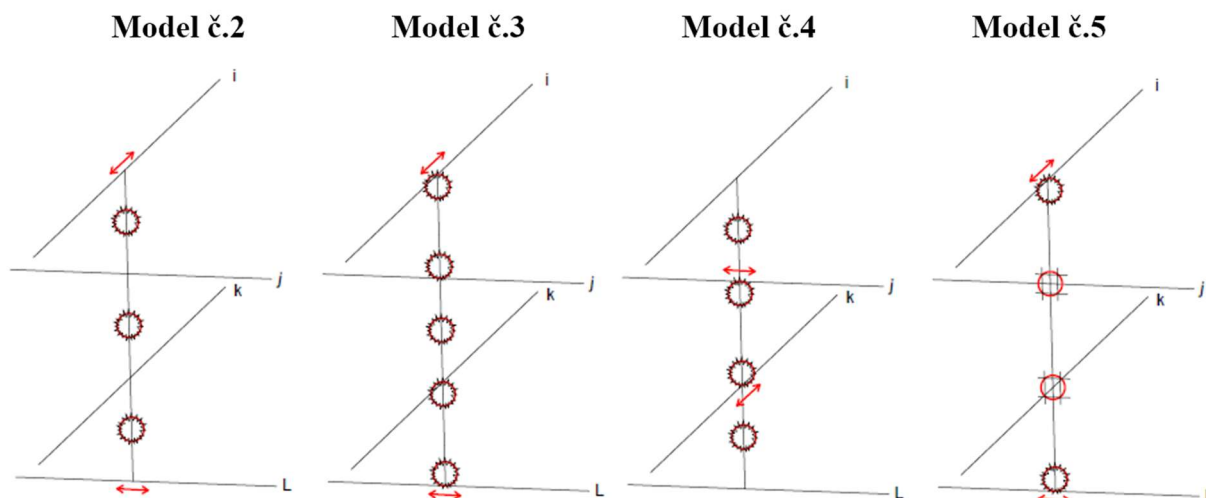
Zo záverov tuhostnej analýzy taktiež priamo vyplýva potreba uvoľnených spojov pri tvarovaní viacvrstvových prútových sietí. Pre ďalšiu analýzu je však potrebné definovať špecifikácie správania sa konkrétneho prípoja (obr. 6.6), ktorý by umožňoval posun len hornej a spodnej laty.



Obr. 6.6 Správanie sa prípoja prútov dvojvrstvovej prútovej škrupiny a) Utiahnutý spoj b) Spoj s uvoľneným pootočením φ_y , φ_z a φ_x , c) Spoj s uvoľnenými pootočeniami a vytvorenou oválnou dierou pre spojovací prostriedok

Na stanovenie spôsobu modelovania prípojov dvojvrstvovej prútovej zostavy tak, aby sa pri deformovaní správala z hľadiska napätosti porovnateľne s jednovrstvovou prútovou zostavou, bolo spracovaných 5 modelov s rôznymi okrajovými podmienkami definovanými na kontakte vrstiev a na kontakte spojovacieho prostriedku s prútom. Prvým modelom je tuhé prepojenie medzi všetkými vrstvami. Modely č. 2-5 reprezentujú ďalšie porovnávané spôsoby modelovania prepojenia medzi vrstvami podľa obrázku 6.7.

Tabuľka 6.2 uvádza vyhodnotenie výsledkov pre okrajové podmienky modelov č.1-5. Model č. 2 nadväzuje na výsledky analýzy jednovrstvovej prútovej škrupiny v predchádzajúcej kapitole a obsahuje polohu klbových pružín iba vo výškovej úrovni kontaktu hrán medzi vrstvami prútov. Model č.3 obsahuje kyvné stojky medzi vonkajšími a vnútornými vrstvami, ktoré uvoľnenými pootočeniami na oboch koncoch umožňujú okrem rotácie aj naklonenie kyvnej stojky a teda posun vonkajšej a vnútornej vrstvy. Model č.4 reprezentuje kyvnú stojku medzi vnútornými vrstvami prútovej siete. Týmto modelom je sledované správanie sa hornej a spodnej dvojice lát ako samostatných jednovrstvových sietí. Posledným modelom č.5 je model s priebežným prvkom prepájajúcim jednotlivé vrstvy, ktorý reprezentuje spojovací prostriedok. Medzi vnútorné prepojenia bolo vložené klbové kríženie a na kontakte s horným a spodným prútom sú vložené pružné klby.



Obr. 6.7 Okrajové podmienky prepojenia vrstiev: Model č.2) Poloha pružín na kontakte hrán medzi vrstvami, Model č.3) Kyvná stojka medzi vonkajšími a vnútornými vrstvami, Model č.4) Kyvná stojka medzi vnútornými vrstvami, Model č.5) Kľbové kríženie pri vnútorných vrstvách

Hodnoty definovaných pružín boli v jednotlivých modeloch uvažované nasledovne:

- Rotačná tuhosť: $1\text{E-}06 \text{ MNm/rad}$
- Tuhosť uzlového posunu: $1\text{E-}03 \text{ MN/m}$

Tab. 6.2 Vyhodnotenie výsledkov z modelov prepojenia prútov dvojvrstvovej siete

Označenie	Hodnota rotačnej tuhosti	Uvoľnený posun	Napätie	Deformácia
	[MNm/rad]	MN/m	[MPa]	[mm]
Model č.1-1	Tuhý	Nie	-189,8	346
Model č.2-1	$1\text{e-}06$	$1\text{e-}03$	-56	360
Model č.2-2	$1\text{e-}06$	Nie	-81,2	322,5
Model č.3-1	$1\text{e-}06$	Nie	-61	326
Model č.3-2	$1\text{e-}06$	$1\text{e-}03$	-57,7	330
Model č.4-1	$1\text{e-}06$	$1\text{e-}03$	-52,2	338
Model č.4-2	$1\text{e-}06$	Nie	-55	347
Model č.5-1	$1\text{e-}06$	$1\text{e-}03$	-41	361
Model č.5-2	$1\text{e-}06$	Nie	-50	359
Jednovrstvová prútová zostava	$1\text{e-}06$	Nie	42,7	310

Vyhodnotenie výpočtových modelov v tabuľke 6.2 predstavuje vyhodnotenie celkového extrémneho napätia vyskytujúceho sa na konštrukcii. Efektívne porovnanie modelov je obvykle vzťahované k rovnakému miestu. Ak by bolo porovnanie vzťahované na rovnaké miesto, napríklad stred vzopätého obvodového oblúku, modely č.3 a č.4 by sa preukazovali ako efektívny spôsob vytvorenia modelu vzhľadom na to, že napätosť v tomto mieste sa pohybovala v oboch prípadoch okolo 40 MPa. Nedostatkom týchto modelov je však členitý spôsob modelovania spojovacieho prostriedku. Tým, že je spojovací prostriedok modelovaný

z viacerých častí ako kyvná stojka, je umožnený jej odklon od zvislej osi. Toto umožňuje v obmedzenom rozsahu simulovať posun lát v smere pozdĺžnych osí, avšak náklonom kyvnej stojky sa do miesta pripojenia k ortogonálnemu prútu vnáša výrazná reakcia, ktorá vytvára extrém napätia v mieste prepájania prútov.

Najvhodnejším spôsobom modelovania uvoľnených prípojev počas tvarovania zostavy sa preukázal byť spôsob zohľadňujúci modelovací prístup v modeli 5-1.

Tento modelovací prístup je ďalej spracovaný pri porovnaní s experimentálnymi modelmi opísanými v kapitole 8.

7. ZHRNUTIE VÝSLEDKOV MATERIÁLOVÝCH SKÚŠOK

Výsledky materiálových skúšok na stanovenie ohybovej pevnosti, ťahovej pevnosti a modulu pružnosti sú uvedené v tabuľke 7.1. Všetky merania boli spracované pri vlhkosti vzoriek 9-10 %.

Tab. 7.1 Zhrnutie výsledkov materiálových skúšok: Ohybová pevnosť, modul pružnosti a ťahová pevnosť

Popis materiálovej vlastnosti	Označenie	Hodnota	Jednotka
Ohybová pevnosť – 5% kvantil	$f_{m,0,05}$	79,8	[MPa]
Ohybová pevnosť – Charakteristická hodnota	$f_{m,k}$	46,3	[MPa]
Ohybová pevnosť – priemerná hodnota	$f_{m,mean}$	92,7	[MPa]
Modul pružnosti – 5% Kvantil	$E_{0,05}$	16,1	[GPa]
Modul pružnosti – Priemerná hodnota	$E_{0,mean}$	20,9	[GPa]
Ťahová pevnosť – 5% kvantil	$f_{t,0,05}$	81,2	[MPa]
Ťahová pevnosť – Charakteristická hodnota	$f_{t,k}$	47,2	[MPa]
Ťahová pevnosť – priemerná hodnota	$f_{t,0,mean}$	104,6	[MPa]

Hodnoty 5 % kvantilu z nameraných ohybových pevností, ťahových pevností výrazným spôsobom presahujú charakteristické hodnoty uvedené v norme EN 338 [31]. Po redukovani nameraných hodnôt súčiniteľom k_h , ktorým je potrebné deliť 5 % kvantil pri vzorkách s výškou menšou ako 150 mm, sa hodnota ohybovej pevnosti približuje zatriedeniu do pevnostnej triedy C50.

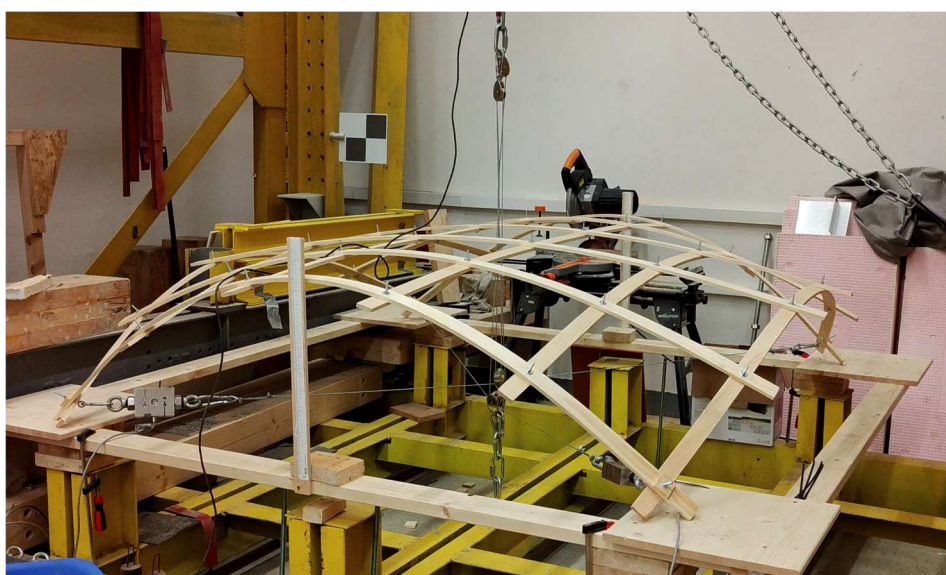
Priemerné hodnoty získané zo skúšok ťahových a ohybových pevností norma EN338 neuvádza, avšak literatúra [32] uvádza priemerné pevnosti pre konkrétne typy drevín, pričom pre borovicu je uvádzaná hodnota ohybovej pevnosti 80 MPa a ťahovej pevnosti 100 MPa. Porovnateľnosť týchto údajov zvyšujú dôveru v korektnosť nameraných hodnôt. Priemerná hodnota modulu pružnosti 20,90 GPa nespadá do rámca priemerných hodnôt uvedených v norme EN 338 pre ihličnaté dreviny. Pri výberovom triedení vzoriek malých prierezov dochádza k menšiemu výskytu prirodzených väd dreva, čo môže významným spôsobom zvýšiť hodnoty modulov pružnosti. Toto potvrdzujú aj výsledky materiálových skúšok uvedené v [33]. Objemová hmotnosť integrovaná do numerických modelov bola stanovená ako priemerná s hodnotou 597 kg/m³. Táto hodnota bola stanovená priemerom hmotností desiatich vzoriek.

8. VERIFIKÁCIA NUMERICKÝCH MODELOV NA ZÁKLADE EXPERIMENTÁLNYCH MERANÍ

Prvou konštrukciou, pri ktorej bola experimentálnym spôsobom overovaná presnosť numerických modelov bola jednovrstvová prútová sieť. Počiatočná geometria vychádzala z vodorovnej polohy prútovej zostavy (obr. 8.1). Výsledky počas ohýbania a tvarovania jednovrstvovej prútovej zostavy boli zaznamenané vo viacerých etapách od rovnej geometrie až po výslednú geometriu, pri ktorej nastalo porušenie.



Obr. 8.1 Počiatočná geometria po vložení do skúšobnej zostavy – Etapa 1



Obr.8.1 Výsledný tvar škrupinovej konštrukcie pri vzopätí 450mm (tesne pred porušením) – Etapa 7

Porušenie bolo zaznamenané v etape č.7 pri vzopätí 450 mm. Tento jav bol sprevádzaný zvukom prasknutia drevenej laty a poklesom sily. Toto porušenie sa v konštrukcii neprejavilo vizuálne.

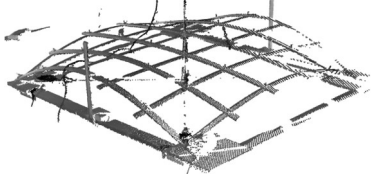
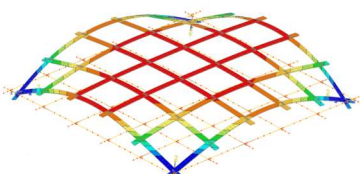
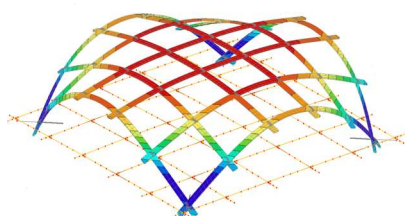
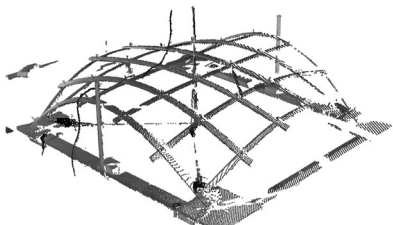
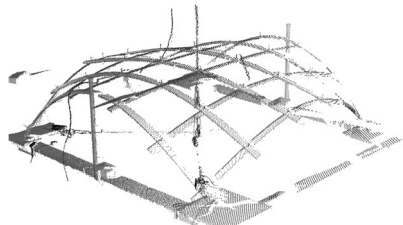
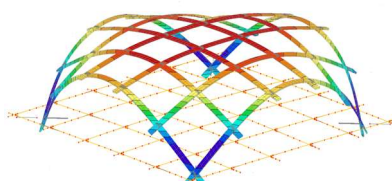
Porovnanie numerického a experimentálneho modelu jednovrstvovej prútovej škrupiny

Na základe výsledkov z meraní popísaných v predchádzajúcej kapitole je spracované porovnanie experimentálnych a numerických modelov. Porovnanie je spracované pre etapy 4, 6 a 7. Cieľom porovnania

je verifikácia výsledkov z numerických modelov na základe hodnoty sily, ktorú je potrebné aplikovať na prúťovú sieť na dosiahnutie výsledného tvaru.

Výsledky numerických modelov vychádzajú z materiálových vlastností zistených z ohybových a ťahových skúšok, pričom uvažovaná hodnota modulu pružnosti je 20,9 GPa. Vyhodnotené porovnanie je uvedené v tabuľke 8.1. Aby boli jednotlivé modely porovnateľné, musia sa opierať o rovnaký referenčný bod vzopätia pre oba prípady. Týmto bodom je vzopätie hlavného obvodového oblúku v prednej časti. Numerické modely vychádzajú z predpokladu symetrie prúťovej zostavy.

Tab.8.1 Porovnanie výsledkov z experimentálneho merania a výsledkov z numerických modelov

Realizácia - Meranie pomocou skeneru a silomerov	Vzopätie 300mm		Výsledky z numerických modelov	Vzopätie 300mm	
					
	1. Meranie: Silomer č.1	351N		Sila pôsobiaca v rohu	356N
	1. Meranie: Silomer č.2	342N		Napätie v konštrukcii	75,7MPa
	2. Meranie: Silomer č.1	336N		Vzopätie 400mm	
	2. Meranie Silomer č.2	366N			
	Vzopätie 400mm			Sila pôsobiaca v rohu	379N
				Napätie v konštrukcii	107MPa
	Vzopätie 450mm			Vzopätie 450mm	
					
	1. Meranie: Silomer č.1	369N		Sila pôsobiaca v rohu	392N
	1. Meranie Silomer č.2	390N		Napätie v konštrukcii	120MPa

Za referenčnú hodnotu vzopätia hlavného obvodového oblúku sa považuje vzopätie spodnej hrany s hodnotou 300 mm. Pri tomto vzopätí sa predpokladá najväčšia napätosť v konštrukcii na základe numerických modelov s hodnotou 75,7 MPa. Očakávané porušenie sa na základe skúšok ohybových pevností očakáva pri hodnote napätia 75-125 MPa s priemernou hodnotou 92,7 MPa.

Porušenie nastalo pri vzopätí hlavného oblúku 450 mm, pri ktorom sa na základe numerických modelov predpokladá napätosť 120 MPa. Táto napätosť spadá do rámca testov realizovaných na stanovenie materiálových vlastností.

Z výsledkov porovnania v tabuľke 8.1. vyplýva, že pri zaťažovaní experimentálnych modelov bola potrebná nižšia sila ako tá, ktorá sa predpokladala na základe výsledkov z numerických modelov.

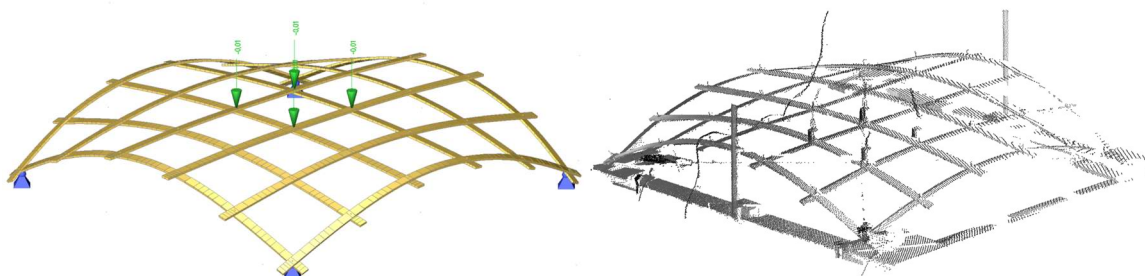
Najväčšia chybovosť pri výpočte veľkosti pôsobiacej sily je 5,87 %. Táto odchýlka môže byť spôsobená niekoľkými faktormi:

- nedokonalou symetriou skúšobnej zostavy,
- opakovaným meraním, na základe ktorého sa preukázal väčší rozptyl síl medzi silomerom č.1 a silomerom č.2,
- nižšou hodnotou objemovej hmotnosti ako predpokladal numerický výpočet,
- nižšou hodnotou modulu pružnosti ako predpokladal numerický výpočet.

Menšia hodnota pôsobiacich síl v rohoch poukazuje na to, že hodnota modulu pružnosti 20,9 GPa získaná z materiálových testov nemusí odrážať realitu materiálových vlastností každej laty integrovanej do experimentálneho modelu. Skutočná hodnota modulu pružnosti však nemôže byť príliš vzdialená získaným výsledkom, nakoľko pri nižšom module pružnosti, napríklad 11 GPa zodpovedajúceho drevu pevnostnej triedy C24, ktorý je uvádzaný v [31], by veľkosť pôsobiacej sily nebola 336 N, ale 200 N. Tento fakt zvyšuje dôveru v získané výsledky a správnosť numerických modelov a experimentálnych skúšok.

Porovnanie výsledkov numerických a experimentálnych modelov v etape č.4 pri podvesení zaťaženia

Pri etape č.4, ktorá reprezentuje vzopätie škrupinovej konštrukcie 300 mm bolo aplikované zaťaženie vo forme podvesenia 4 bodov v stredovej časti prútovej zostavy (obr. 8.3). Nakoľko sa pri vzopätí 300 mm predpokladá na základe výsledkov numerických modelov napätie 75,7 MPa, veľkosť podveseného zaťaženia nie je tak vysoká, aby po aplikovaní zaťaženia napätosť presiahla 92,7 MPa, ktorá reprezentuje priemernú hodnotu ohybovej pevnosti, pri ktorej je predpokladom, že dôjde k porušeniu konštrukcie. Numerický model (obr. 8.3) bol vytvorený prevzatím deformovaného tvaru, ktorý vznikol posunom podpier smerom do ťažiska prútovej zostavy. Tento tvar bol následne exportovaný ako čiarový model a spätne importovaný ako prútový model so zmenými okrajovými podmienkami.



Obr.8.3 Zaťaženie numerického modelu – 4kg: Numerický model, Experimentálny model

Zaťaženie experimentálneho modelu (obr. 8.3) bolo realizované podvesením 1 kg závažia na 4 body (4x1 kg), ktoré boli rovnaké ako pri numerickom modeli.

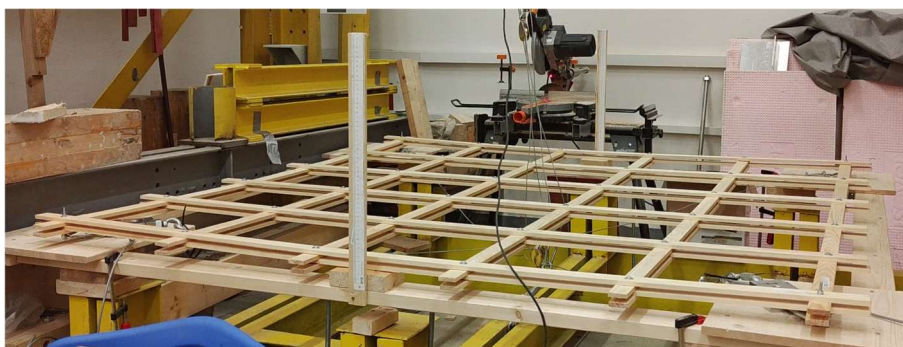
Výsledné deformácie z experimentálneho a numerického modelu sú nasledovné:

- experimentálny model – Deformácia (priehyb) – 9,5 mm,
- numerický model – Deformácia (priehyb) – 9 mm.

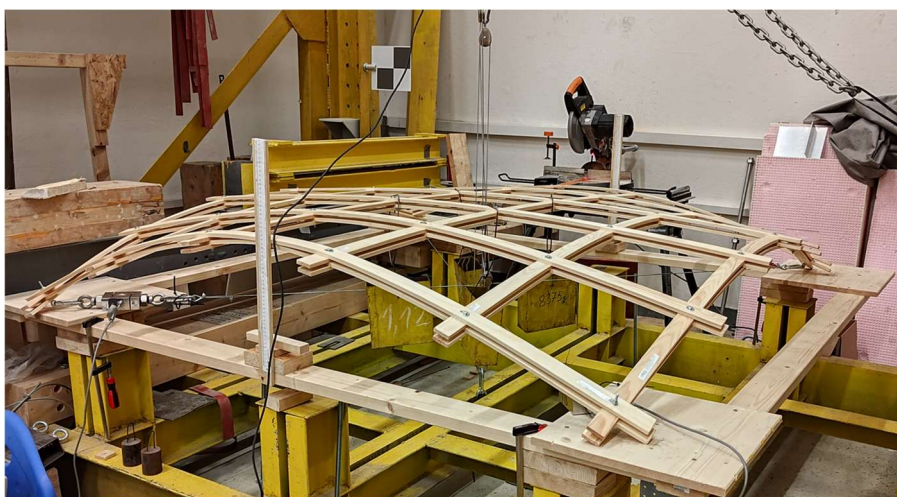
Rozdiel medzi deformáciou vypočítanou numerickým a experimentálnym modelom je 5 %. Pre korektné vyhodnotenie by bolo kvôli presnosti merania vhodnejšie pohybovať sa vo vyšších hodnotách priehybov, avšak v dôsledku limitného napätia, ktoré sa už pohybuje v rozsahu 75-125 MPa, nebolo aplikované zaťaženie s vyššími hodnotami.

Tvarovanie dvojvrstvej prútovej škrupiny

Ďalšou z testovaných konštrukcií bola dvojvrstvová prútová zostava s rovnakými pôdorysnými rozmermi ako pri predchádzajúcom experimente a to 2 m x 2 m. Hlavným rozdielom okrem zdvojeného počtu prútových prvkov je vyhotovenie oválnych dier, ktoré umožňujú posun v smere osi prútov na hornej a spodnej strane. Prvým krokom bolo vloženie prútovej zostavy do skúšobného priestoru (obr. 8.4) a zapojenie zdvíhacích a meracích zariadení. Opäť boli merané sily v rohoch prútovej zostavy pomocou dvoch silomerov prepojených v diagonálnom smere.



Obr.8.4 Dvojvrstvová prútová zostava v skúšobnom priestore – rovinná poloha



Obr.8.5 Dvojvrstvová prútová škrupina – vzopätá na hodnotu 300 mm

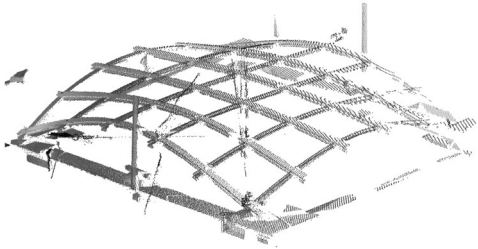
Po dosiahnutí vzopätia 330 mm sa utiahli jednotlivé prípoje a konštrukcia sa povolila. Po úplnom uvoľnení si konštrukcia zachovala svoju geometriu so vzopätím 120 mm. Zachovanie vzopätia s hodnotou 120 mm vzniklo vplyvom utiahnutia prípojov, čo malo dopad na priestorovú tuhosť škrupinovej konštrukcie.

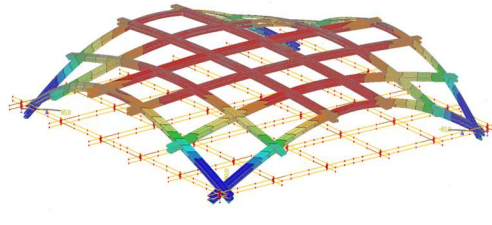
Po opakovanom meraní prútovej zostavy sa nepreukázal významný rozdiel v geometrii medzi prvým a druhým tvarovaním.

Porovnanie numerického a experimentálneho modelu dvojvrstvovej prútovej škrupiny

Porovnanie výsledkov medzi numerickým a experimentálnym modelom je spracované pre etapu č. 4, ktorá reprezentuje vzopätie spodnej hrany obvodového oblúka v prednej časti s hodnotou 300 mm. Táto prútová zostava nebola ďalej zaťažovaná až do porušenia. Výsledky porovnania sú uvedené v tabuľke 8.2.

Tab. 8.2 Porovnanie výsledkov z experimentálneho merania a výsledkov z numerických modelov pre dvojvrstvovú prútovú škrupinu

Experimentálny model	Vzopätie 300mm	
		
	1. Meranie: Silomer č.1	804N
	1. Meranie Silomer č.2	807N
	2. Meranie: Silomer č.1	780N
	2. Meranie Silomer č.2	780N
	3. Meranie: Silomer č.1	744N
	3. Meranie Silomer č.2	789N

Numerický model	Vzopätie 300mm	
		
	Sila pôsobiaca v rohu	700N
	Napätie v konštrukcii	82MPa
	Doplňujúce údaje	
	Posun smerom do ťažiska	80mm

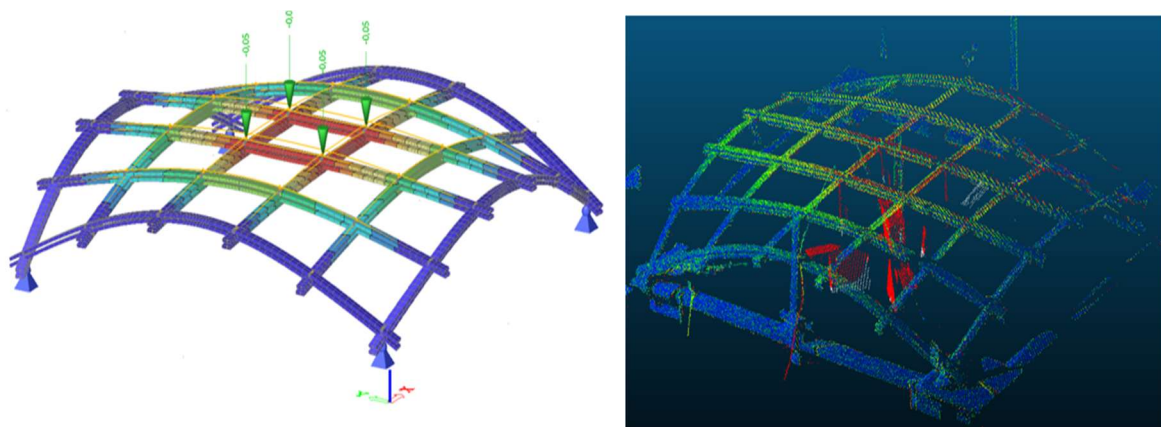
Z výsledkov porovnania vyplýva, že sila potrebná na tvarovanie prútovej zostavy do vzopätia 300 mm je vyššia pri experimentálnom modeli ako pri numerickom modeli s odchýlkou 6-13 %.

Na základe získaných výsledkov a štúdií popísaných v predchádzajúcich kapitolách, je možné predpokladať, že moduly pružnosti lát (týka sa najmä hlavných obvodových oblúkov) integrovaných do experimentálneho modelu sú vyššie ako bol predpoklad v numerickom modeli s hodnotou 20,9 GPa.

Porovnanie výsledkov numerických a experimentálnych modelov v etape č.4 pri podvesení zaťaženia

Pri tvarovaní dvojvrstvovej prútovej škrupiny, za predpokladu vytvorenia oválnych dier, umožňujúcich posun vrstiev, je možné predpokladať že hodnota momentu zotrvačnosti prútovej zostavy bude zodpovedať momentu zotrvačnosti jednej vrstvy. Toto bolo preukázané numerickými modelmi, ktoré vykazujú pri uvoľnenom posune podobnú napätosť prútov ako bola dosiahnutá pri jednovrstvovej prútovej škrupine. Po dosiahnutí výsledného tvaru a utiahnutí jednotlivých prípojev, je možné predpokladať, že moment zotrvačnosti bude zodpovedať momentu zotrvačnosti zloženého prierezu.

Vychádzajúc z tohto predpokladu, bolo možné na dvojvrstvovú prútovú sieť aplikovať zaťaženie vo forme podvesenia závaží s významne väčšou hodnotou ako bolo pri jednovrstvovej prútovej škrupine. Na experimentálny model bolo do 4 bodov v stredovej časti umiestnené závažie s hodnotou váhy pre každý bod 4,970 kg.



Obr.8.6 Schematické zobrazenie výsledkov prítiaženia konštrukcie podvesením závažia

Výsledné deformácie z experimentálneho a numerického modelu sú nasledovné:

- Experimentálny model – Deformácia (priehyb) – 11,5 mm,
- Numerický model – Deformácia (priehyb) – 12,9 mm.

Zvýšenie ohybovej tuhosti vytvorením zloženého prierezu pri realizácii dvojvrstvovej prútovej škrupiny je preukázateľné na základe prezentovaných výsledkov. Pri analýze experimentálneho modelu jednovrstvovej prútovej škrupiny bola deformácia 9,5mm pri aplikácii závažia s celkovou hmotnosťou 4 kg. Pri analýze dvojvrstvovej prútovej škrupiny bola aplikovaná 5x vyššia hodnota zaťaženia, pričom veľkosť výslednej deformácie je 11,5 mm.

Zaznamenaný rozdiel v priehybe medzi experimentálnym a numerickým modelom dvojvrstvovej prútovej škrupiny je 11 %. Vzniknutá odchýlka v porovnaní je s najväčšou pravdepodobnosťou spôsobená vyššou tuhosťou (modulov pružnosti) drevených lát integrovaných do experimentálneho modelu.

ZHRNUTIE, ZÁVERY A ODPORÚČANIA

Dizertačná práca sa venuje problematike modelovania prútových škrupinových konštrukcií vyhotovených pomocou metódy aktívneho ohýbania. Analýza škrupinových konštrukcií je komplexnou problematikou, ktorá si vyžaduje špecifický prístup. Je preto dôležité rozširovať poznatky, ktoré je možné uplatniť pri ich návrhu v inžinierskej praxi.

Úvodná časť práce sa venovala súhrnnému spísaniu poznatkov týkajúcich sa zahraničných výskumov aktívne ohýbaných prútových konštrukcií.

V dôsledku výstavby pomocou elastického tvarovania dochádza k vzniku veľkých deformácií. Z toho vyplýva potreba analyzovať takúto konštrukciu geometricky nelineárne. Najrozšírenejšou metódou, ktorá ponúka stabilnú konvergenciu výpočtu je metóda dynamickej relaxácie.

- Záverom kapitoly 5 je poukázanie na nedostatky využitia metódy dynamickej relaxácie pri použití zjednodušeného postupu modelovania. Výsledky kapitoly 5 poukazujú na základe parametrických štúdií a experimentálnych meraní, na zvyšujúci sa vplyv sekundárneho ohýbania pri dvojvrstvových zakrivených prútových zostavách s nízkym počtom šmykových prepojení (nízky počet panelov N), ktorý zjednodušený modelovací postup zanedbáva. Výsledky štúdie poukazujú na to, že v týchto prípadoch môže byť vplyv sekundárneho ohýbania rozhodujúcou zložkou zvislej deformácie.

Práca je v kapitole 6 ďalej zameraná na spôsob analýzy aktívne ohýbaných prútových zostáv pomocou metódy Newton Raphson a Modifikovaný Newton-Raphson.

- Kapitola č. 6 v prvej časti overuje tvrdenie, že metóda Newton-Raphson nie je pre analýzu aktívne ohýbaných/elasticky tvarovaných konštrukcií vhodná. Toto tvrdenie sa z dôvodu častej divergencie výpočtu už pri analýze veľkých deformácií jedného ohýbaného prúta potvrdilo.
- Metóda Modifikovaný Newton-Raphson prekonala nedostatky metódy Newton-Raphson a preukázala stabilnú konvergenciu výpočtu veľkých deformácií ako jedného prúta, tak aj jedno a dvojvrstvových prútových zostáv.
- Na základe predkladanej štúdie sa pre dané okrajové podmienky ukázalo, že z hľadiska konverencie výpočtu, trvania simulácie a výpočtovej náročnosti je vhodnejšie vnášať zaťaženie do prútovej zostavy prostredníctvom posunu podpier než zadávaním uzlových síl.
- Stabilná konvergencia výpočtu pomocou metódy Modifikovaný Newton-Raphson bola preukázaná pre viaceré tvary škrupinových konštrukcií.
- V kapitole 6 sú zhrnuté odporúčania pre modelovanie prepojenia jedno a dvojvrstvej prútovej siete. Vzhľadom na to, že pri skúmanom spôsobe zaťažovania nie je možné modelovať prepojenie ako úplne kĺby s voľnou rotáciou, boli stanovené hodnoty rotačných tuhostí a tuhosti uzlových posunov, pri ktorých dochádza k stabilnej konvergencii výpočtu a ich správanie sa približuje úplnému uvoľneniu. Výsledné hodnoty sú nasledovné:
Rotačná tuhosť: $1\text{E-}06\text{ MNm/rad}$,
Tuhosť uzlového posunu (pri vytvorení oválnej diery): $1\text{E-}03\text{ MN/m}$.

Kapitola 8 sa zameriava na overenie numerických výstupov pomocou experimentálnych modelov.

- Medzi prvé experimentálne testy patrila selekcia rozmerov prierezu, ktorý je vhodný na aktívne ohýbanie v laboratórnych podmienkach Slovenskej technickej univerzity

v Bratislave. Skúšky boli realizované na drevených latách s dĺžkou 2 m. Desiatimi testami sa zisťovali limitné hodnoty vzopätí, ktoré je možné dosiahnuť pre prierez 10 mm x 40 mm pred tým, ako dôjde k porušeniu. Dosahované hodnoty vzopätí boli v rozsahu 520 – 700 mm.

- Súčasťou experimentálnych meraní sú materiálové skúšky, pri ktorých je uvedený normový postup pre stanovenie ohybovej pevnosti a modulu pružnosti. Skúškami stanovené materiálové vlastnosti potrebné ako vstupy pre numerické modely boli nasledovné:

Priemerná ohybová pevnosť: $f_{m,mean}=92,7 \text{ MPa}$,

Priemerný modul pružnosti: $E_{mean}= 20,9 \text{ GPa}$.

- Materiál je vhodný na aktívne ohýbanie, ak je pomer ohybovej pevnosti a modulu pružnosti viac ako 2,5. Materiál z borovicového dreva skúšaný v tejto práci dosahuje pomer 4,4. Na základe tohto pomeru je možné konštatovať, že testovaný materiál je pre analýzu aktívneho ohýbania vhodný.
- V kapitole 8 je opísaná séria 11 testov, ktoré slúžili na stanovenie hodnôt limitného vzopätia pre drevené laty s dĺžkou 2 m, ktoré mali oslabený prierez kruhovým otvorom priemeru 5,5 mm. Dosahované vzopätia zistené testami boli 365 – 615 mm.
- Na základe výsledkov predchádzajúcich testov, bol v laboratóriu vytvorený experimentálny model jedno a dvojvrstvovej prútovej zostavy s pôdorysnou plochou 2 m x 2 m. Cieľom bolo porovnanie výsledkov numerických modelov s experimentálnymi meraniami.

Vyhodnotenie pre jednovrstvovú prútovú škrupinu:

- Najväčšia odchýlka v hodnote sily potrebnej na dosiahnutie potrebného vzopätia medzi experimentálnym a numerickým modelom bola 5,87 %.
- Rozdiel medzi prieťahom experimentálneho a numerického modelu pri podvesení závažia s celkovou hmotnosťou 4 kg na vzopätý tvar 300 mm bol 5 %.
- Porovnaním zvislých súradníc bodov medzi experimentálnym a numerickým modelom sa zistil rozdiel 6,8 cm.

Vyhodnotenie pre dvojvrstvovú prútovú škrupinu:

- Najväčšia odchýlka v hodnote sily potrebnej na dosiahnutie potrebného vzopätia medzi experimentálnym a numerickým modelom bola 13 %.
- Rozdiel medzi prieťahom experimentálneho a numerického modelu pri podvesení závažia s celkovou hmotnosťou 20 kg na vzopätý tvar 300 mm bol 11 %.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] KUKLÍK, P.: *Kapitola 1: Historie dřevěných konstrukcí*. In: *Příručka 1: Dřevěné konstrukce*. Leonardo da Vinci Pilot Project CZ/06/B/F/PP/168007. Educational Materials for Designing and Testing of Timber Structures. 2008, s. 1–12.
- [2] KUKLÍK, P.: *Dřevěné konstrukce*. Praha, 2005, ISBN 80-86769-72-0.
- [3] JIAN-MIN, LI.: *Timber Shell Structurec. Form finding and Structural Analysis of Active Bent Grid Shells and Segmental Plate Shells*. Universität Stuttgart, 2017. 200 s. ISBN 978-3-922302-42-1.
- [4] LIENHARD, J – ALPERMANN, H. – GENGNAGEL, C. – KNIPPPERS, J.: *Active bending, a review on structures where bending is used as a self-formation process*. International Journal of Space Structures, 2013, s. 28(3-4), 187-196.
- [5] LIENHARD, J.: *Bending – Active Structures. Form – finding strategies using elastic deformation in static and kinematic systems and the structural potentials therein*. Universität Stuttgart - Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen: 2014, 211 s. ISBN 978-3-922302-36-0.
- [6] STRAKA, B. – SÝKORA, K.: *DŘEVĚNÉ KONSTRUKCE. MODUL BO03-M05. DŘEVĚNÉ PROSTOROVÉ KONSTRUKCE*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Brno. 48 s.
- [7] KAISER, J.: *Škrupinové konštrukcie. Nové výpočtové metódy v stavebnej mechanike*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave. Stavebná fakulta. 1981, 167 s.
- [8] TOUSSAINT, M.H.: *A Design Tool for Timber Gridshells. The Development of a Grid Generation Tool*. Delft University of Technology, 2007, 237 s.
- [9] GENGNAGEL, CH. – BÄUMER R. – HERNÁNDEZ, E.: *Natural – fibre – reinforced plastic in actively bent structures*. ResearchGate. Construction Materials, 2013, 24 s. ISSN 1747-650X. <http://dx.doi.org/10.1680/coma.12.00026>
- [10] COLLINS, M.: *A Review of the State of the Art of Timber Gridshell Design and Construction*. ResearchGate, 2016.
https://www.researchgate.net/publication/307546000_A_Review_of_the_State_of_the_Art_of_Timber_Gridshell_Design_and_Construction

- [11] D'AMICO, B.: *Timber Grid-shell Structures: form-finding, analysis and optimisation*. Edinburg Napier University, 2015, 161 s.
- [12] COLLINS, M. – O'REGAN, B.: *Potential of Irish Orientated Strand Board in Bending Active Gridshells*. ResearchGate, 2015.
- [13] QUINN, G.: *PNEUMATIC ERECTION OF ELASTIC GRIDSHELLS. DESIGN, SIMULATION AND REALISATION*. Department for Structural Design and Engineering. Universität der Kunste Berlin, 2018, 205 s.
- [14] QUINN, G. – WILLIAMS, Ch. – GENGNAGEL, Ch.: *Comparison of Erection Methods for Long-Span Strained Grid Shells*, 2015.
- [15] Melbourne School of Design: *AIRSHELL - Bending timber with air* [online]. Youtube, 20.2.2017. Dostupné na: <https://youtu.be/6fIPMmNxUVA?list=LL>
- [16] HAPPOLD, E. – LIDDELL, W.I.: *Timber lattice roof for the Mannheim Bundesgartenschau*. The Institution of Structural Engineers. London: 1975, 37 s.
- [17] LIDDEL, I.: *Frei Otto and the development of gridshells*. ELSEVIER JOURNAL. United Kingdom: 2015, 11 s.
- [18] FRITZ, W.: *Multihalle Mannheim. Wie kann es weitergehen mit Frei Ottos Holzgitterschale?*. Bautechnik, 2019, Jg. 96, Nr. 1, S. 21-24.
- [19] COLLINS, M.: *A computational and experimental study of Irish orientated strand board in bending active gridshells*. The Faculty of Science and Engineering. University of Limerick, 2016, 320 s.
- [20] XINYUAN, D.: *An Experimental and Computational Investigation of Secondary Bending in Double Layer Gridshell Assemblies*. School of Engineering, University of Limerick, 2023, 204 s.
- [21] MESNIL, R.: *Stability of elastic gridshells*. ResearchGate, 2013.
- [22] GRANČIČOVÁ, I.: *Teoretické a konštrukčné problémy prútových škrupinových konštrukcií*. Dizertačná práca. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave. Stavebná fakulta, 2015, 140 s.
- [23] KRÁLIK, J.: *Modelovanie konštrukcií v metóde konečných prvkov*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave. Stavebná fakulta, 2018, 156 s.
- [24] DLUBAL SOFTWARE.: *Nelineárni řešiče* [online]. [cit. 2025-06-11].

Dostupné z: <https://www.dlupal.com/cs/stahovani-a-informace/dokumenty/online-manualy/validace-software/004011>

- [25] BRUSCIA, N.: *ARC411/412_Kangaroo2 Basics: General Intro, Bending* [online].

[cit.2025-06-11]. Youtube, 17.11.2020.

Dostupné na: https://www.youtube.com/watch?v=0_EqwVNNu7s

- [26] TIMOSHENKO, S.: *Mechanics of Materials*, 4th ed. Boston, MA: PWS. 1997.
- [27] DOUTHE, C. – BAVEREL, O. – CARON, J.F.: *Form-nding of a grid shell in composite materials*. International Association for Shells and Spatial Structures, 47(1):53 {62, April 2006, 27, 34, 35, 49, 94.
- [28] STN EN 408.: *Drevené konštrukcie. Drevo na stavebné konštrukcie a lepené lamelové drevo. Stanovenie niektorých fyzikálnych a mechanických vlastností*. 2005.
- [29] PAVLÍK, T. – DUŠEK, L.: *Biostatika*. Investice do rozvoje vzdělávání. Brno. 2012, ISBN 978-80-7204-782-6.
- [30] STN EN 384.: *Konštrukčné drevo. Zisťovanie charakteristických hodnôt mechanických vlastností a hustoty*. 2010.
- [31] STN EN 338.: *Konštrukčné drevo. Pevnostné triedy*. 2010.
- [32] STN EN 789.: *Drevené konštrukcie. Skúšobné metódy. Určovanie mechanických vlastností dosiek na báze dreva*. 2005.
- [33] MICHÁLIK, J.: *EXPERIMENTÁLNE OVERENIE MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ DREVA A NÁVRH NOSNEJ KONŠTRUKCIE ŠPORTOVEJ HALY V HORNEJ SÚČI*. Diplomová práca. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave. Stavebná fakulta, 2011, 210 s.
- [34] STN EN 1995-1-1: 2008; *Eurokód 5. Navrhovanie drevených konštrukcií. Časť 1-1: Všeobecné pravidlá a pravidlá pre budovy*.
- [35] WINANDY, J. – ROWELL, R. M.: *The chemistry of Wood Strengtrh*. Researchgate. 1984. Dostupné na: <http://dx.doi.org/10.1021/ba-1984-0207.ch005>

ZOZNAM PUBLIKÁCIÍ

SVK - Herda, Roman, Slivanský, Miloš. Analýza krovu historického objektu In: structures.sk. Navrhovanie, posudzovanie, realizácia a obnova nosných konštrukcií: vedecko-odborný on-line časopis o navrhovaní, posudzovaní, realizácii a obnove nosných konštrukcií v stavebníctve. Stupava: structureSS, 2023, Roč. 5, č. 2, s. 13-17 [online]. ISSN 2644-6553. <https://files.exoweb.eu/84/84/8484c1c7-3089-45c8-be6d-4535042e4ed4.pdf>. [slovenčina]
<https://app.crepc.sk/?fn=detailBiblioForm&sid=3BDBB36CA09E1926FB88A780E219>

SVK - Herda, Roman. Analýza aktívneho ohýbania jednovrstvovej prútovej škrupiny In: Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering: 33rd Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave. Spektrum STU, 2023, s. 371-378 [CD-ROM]. ISBN 978-80-227-5378-4. [slovenčina]
<https://app.crepc.sk/?fn=detailBiblioForm&sid=5307003F770ACE027C872534961F>

SVK - Herda, Roman, Slivanský, Miloš. Modelovanie a nelineárna analýza aktívne ohýbaných drevených prútových konštrukcií In: 47. aktív pracovníkov odboru oceľových konštrukcií: zborník prednášok. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2024, s. 69-76 [tlačená forma]. ISBN 978-80-553-3305-2. [slovenčina]
<https://app.crepc.sk/?fn=detailBiblioForm&sid=6AF24C20D77B2492B56AE8D70B33>

SVK - Herda, Roman, Slivanský, Miloš. Statická a tvarová analýza drevenej škrupiny pre konštrukciu športovej haly In: structures.sk. Navrhovanie, posudzovanie, realizácia a obnova nosných konštrukcií: vedecko-odborný on-line časopis o navrhovaní, posudzovaní, realizácii a obnove nosných konštrukcií v stavebníctve. Stupava: structureSS, 2021, Roč. 3, č. 1, s. 18-23 [online]. ISSN 2644-6553. <http://files.exoweb.eu/d8/be/d8be5b07-dbb5-400d-8a63-15affbd31a75.pdf>. [slovenčina]
<https://app.crepc.sk/?fn=detailBiblioForm&sid=F4F83FF99D02212E8E4E65EA70>

SVK - Herda, Roman. Škrupinové konštrukcie voľných tvarov In: Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering: 32nd Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave. Spektrum STU, 2022, s. 439-444 [CD-ROM]. ISBN 978-80-227-5251-0. [slovenčina]
<https://app.crepc.sk/?fn=detailBiblioForm&sid=AB79513DA0109ABBEFBC8413DA>

SVK - Herda, Roman, Slivanský, Miloš, Brodniansky, Ján, Klas, Tomáš. Determination of flexural strength and Young's modulus of elasticity of actively bent wood [elektronický dokument]. DOI 10.37763/wr.1336-4561/69.3.485494 In: Wood research. Bratislava: Slovenský drevársky výskumný ústav, 2024, Roč. 69, č. 3, s. 485-494 [tlačená forma]. ISSN 1336-4561. ISSN (online) 2729-8906. <https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/69.3.485494>. [angličtina]
<https://app.crepc.sk/?fn=detailBiblioForm&sid=6C0594DA955AD34A4778ABEAF53B>

SVK - Herda, Roman, Slivanský, Miloš. Aktívne ohýbané prútové škrupiny z dreva In: 46. aktív pracovníkov odboru oceľových konštrukcií: zborník prednášok. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2023, s. 94-102 [tlačená forma]. ISBN 978-80-554-1967-1. [slovenčina]
<https://app.crepc.sk/?fn=detailBiblioForm&sid=F663A84A814A8CA0F0742F81CF64>

CZE - Herda, Roman, Slivanský, Miloš. An overview of factors affecting the design of actively bent timber gridshells In: Dřevostavby 2024: sborník přednášek. Volyně: Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola Volyně, 2024, s. 112-122 [tlačená forma]. ISBN 978-80-86837-07-9. [angličtina]
<https://app.crepc.sk/?fn=detailBiblioForm&sid=A61021784F381E68C4088990830C>

SVK - Herda, Roman, Slivanský, Miloš, Sandanus, Jaroslav. Modeling of Active Bending by the Method Newton-Raphson and the Modified Newton-Raphson [elektronický dokument]. DOI 10.2478/cee-2024-0063 In: Civil and Environmental Engineering: scientific-technical journal: vedecko-technický časopis. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline. Stavebná fakulta, 2024, Roč. 20, č. 2, s. 862-870 [tlačená forma]. ISSN 1336-5835. ISSN (online) 2199-6512. <https://doi.org/10.2478/cee-2024-0063>. [angličtina]
<https://app.crepc.sk/?fn=detailBiblioForm&sid=06A19284842164CC030399C8E116>