

MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav nauky o dřevě



Lesnická
a dřevařská
fakulta

Numerický model celodřevěného konstrukčního
spoje

Bakalářská práce

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci: Numerický model celodřevěného konstrukčního spoje zpracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b Zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladu spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně, dne: podpis studenta:

Daniel Koutník

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Janu Tippnerovi, Ph.D. za odborné vedení práce. Dále bych chtěl velmi poděkovat Ing. Jaromíru Milchovi, Ph.D. a Ing. Martinu Brabcovi, Ph.D. za metodickou pomoc a mnoho cenných rad při zpracovávání tématu. V neposlední řadě patří velké díky mé přítelkyni a mé rodině, kteří jsou pro mě při studiu velkou oporou.

Jméno: Daniel Koutník

Název práce: Numerický model celodřevěného konstrukčního spoje

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá problematikou celodřevěného konstrukčního spoje s dřevěnými spojovacími prostředky. Konkrétně se jedná o plátový spoj s dubovými hmoždíky a kolíkem, který je namáhaný tahovým zatížením. Pro posouzení celkové odezvy spoje bylo nejdříve nutné experimentálně stanovit vybrané mechanické vlastnosti dubu (*Quercus L.*) na základních normovaných vzorcích pro tlak, tah, smyk a ohyb. Stanovení poměrných deformací a posunutí vstupujících do výpočtů materiálových charakteristik bylo provedeno metodou digitální korelace obrazu (DIC). Takto získané parametry slouží pro a) stanovení materiálových charakteristik; b) validaci materiálového modelu pomocí základních numerických modelů zkoušek. Pro následné hodnocení celkové odezvy plátového spoje bylo nutné v první části této práce sestavit a verifikovat materiálový model dubu, který umožňuje popis elastické a plastické oblasti pracovního diagramu. Validovaný bilineární elasto-plastický materiálový model byl úspěšně verifikován (%chyby = 7%) a implementován do komplexního řešení numerického plátového spoje s hmoždíky a kolíkem.

Klíčová slova: dub, celodřevěný spoj, metoda digitální korelace obrazu (DIC), mechanické vlastnosti, posunutí, poměrné deformace, materiálový model, numerické modelování, metoda konečných prvků

Name: Daniel Koutník

Title: Numerical model of all-wooden construction joint

Abstract

The bachelor thesis deals with problems of all-wooden construction joint with wooden fasteners. Specifically, it is a plate joint with oak dowels and a pin which is stressed by pulling. To assess the overall response of the joint, it was necessary to experimentally determine the selected mechanical properties of oak (*Quercus L.*) on basic standard samples for pressure, pull, shear and bending. Determination of the relative deformations and displacements entering the calculations of the material characteristics was performed by the Digital Image Correction (DIC) method. The parameters thus obtained serve to: a) determine the material characteristics; (B) validation of the material model using basic numerical test models. For the subsequent evaluation of the overall response of the plate joint, it was necessary to assemble and verify an oak material model that allows the description of the elastic and plastic area of the working diagram. The validated bilinear elastoplastic material model has been successfully verified (% error = 7%) and implemented in a complex solution of the numeral plate joint with dowels and pin.

Keywords: Oak, All-wooden joint, digital image correlation method (DIC), mechanical properties, displacement, relative deformation, material model, finite element method.

Obsah

1.	Úvod.....	9
2.	Cíl práce	10
3.	Literární přehled.....	11
3.1	Historie krovů	11
	Typologie konstrukce krovů	11
3.1.1	Krokevní soustava	11
3.1.2	Hambálková soustava	12
3.1.3	Vaznicové soustavy:.....	12
3.2	Krovy	13
3.3	Historie spojování	14
3.4	Tesařské celodřevěné spoje:	15
3.5	Opravy dřevěných konstrukcí:	20
3.6	Metoda konečných prvků (MKP)	21
3.7	Metoda korelace obrazu (DIC)	21
4.	Materiál a metodika.....	23
3.1	Materiál.....	23
3.2	Příprava zkušebních tělísek:	23
3.3	Zatížení vzorků:	24
3.3.4	Tlak.....	25
3.3.5	Tah.....	26
3.3.6	Smyk.....	27
3.3.7	Ohyb	29
3.4	Měření deformací.....	30
3.5	Zpracování obrazových dat (DIC)	31
3.6	Výpočet mechanických charakteristik	31
3.7	Bilineární elasto-plastický model	33

3.8	Numerické modely základních zkoušek	34
3.8.1	Typ použitého elementu	35
3.9	Numerické modelování 3D a 2D modelu v ANSYS APDL.....	35
5.	Výsledky:	38
6.	Diskuze:.....	50
7.	Závěr:	52
8.	Summary:	53
9.	Přehled literatury:.....	54
10.	Seznam obrázků.....	56
11.	Seznam tabulek.....	58

1. Úvod

V současné době je dřevo hojně využíváno jako stavební materiál, a to v celosvětovém měřítku. Toto využití má více důvodů, které jsou zohledňovány při výběru stavebního materiálu. Jedná se především o důvody ekonomické a ekologické, jelikož je dřevo lehce dostupný a obnovitelný materiál, ale také technologické, díky jeho výborným fyzikálním a mechanickým vlastnostem. V minulosti bylo dřevo také bohatě využíváno a jedním z příkladů mohou být konstrukce střešních krovů. Právě historické krovy jsou výborným studijním materiálem, ze kterého lze vycházet pro výzkum a vývoj konstrukcí nových. Mnoho dochovaných historických konstrukcí, ve většině případů se jedná o významné historické budovy, jsou vlivem různých faktorů znehodnoceny a je potřeba je adekvátním způsobem opravit. Abychom byli schopni při opravách i nadále zachovat jejich historický ráz, musíme kromě statické funkce dbát i na historický vývoj spojování dřevěných konstrukcí.

V úvodu se bakalářská práce zaměřuje na celodřevěné konstrukční spoje, jejich historii a opravy dřevěných konstrukcí. Dále se zabývá hodnocením mechanických vlastností celodřevěného konstrukčního plátového spoje s dubovými spojovacími prostředky (hmoždíky a kolík). Toto hodnocení je provedeno za využití numerických simulací vytvořených ve výpočetním softwaru ANSYS Mechanical APDL. Pomocí numerických úloh je možné posoudit mechanickou odezvu tohoto spoje na zatížení.

V experimentální části jsou postupně testovány mechanické vlastnosti dubových tělísek namáhaných různými druhy zatížení. K získání potřebných dat z experimentů byla použita metoda digitální korelace obrazu (DIC), kdy jsou tělíska v průběhu zatěžování snímána dvěma kamerami a výsledky jsou zaznamenávány do počítače. Tato metoda využívá předem naneseného skvrnitého vzoru (tzv. „speckle pattern“) na povrchu zkušebního tělíska k posouzení posunutí jednotlivých bodů v obraze. Před samotným numerickým hodnocením plátového spoje bylo nutné sestavit a ověřit materiálový model dubu. Tento materiálový model byl sestaven a ověřován na základě experimentálních dat. Po úspěšném ověření byl tento materiálový model vložen do komplexního numerického řešení plátového spoje s hmoždíky a kolíkem

2. Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je sestavení a analyzování numerického modelu celodřevěného plátového konstrukčního spoje s hmoždíky a kolíkem namáhaného tahem za použití bilineárního materiálového modelu dubu.

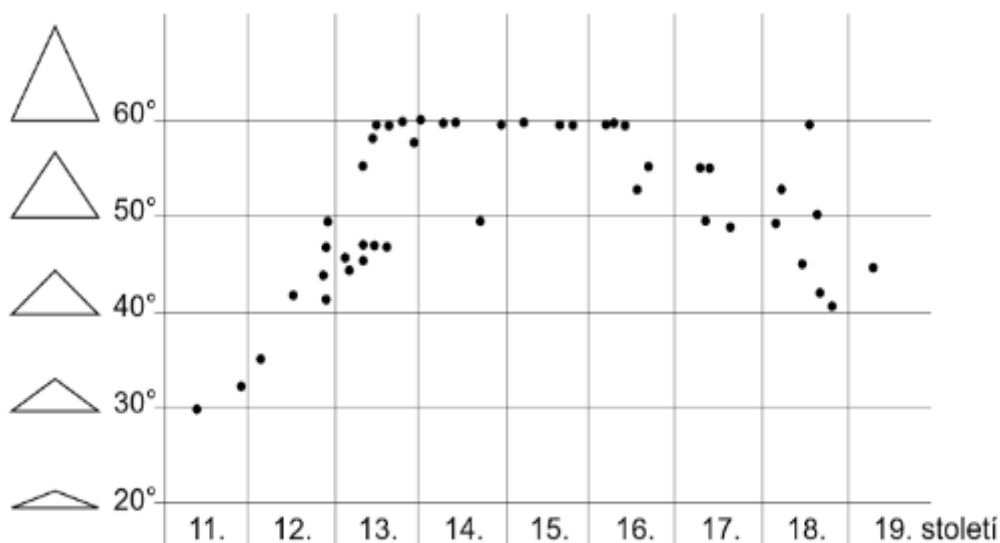
Dílčí cíle práce jsou rozděleny:

1. Experimentální stanovení vybraných materiálových charakteristik,
2. Sestavení a ověření bilineárního elasto-plastického materiálového modelu dubu,
3. Hodnocení mechanické odezvy konstrukčního spoje.

3. Literární přehled

3.1 Historie krovů

Tvar střešních konstrukcí z pohledu tesařského umění se odvíjel podle jednotlivých architektonických slohů. Zásadní byl sklon střech, který byl poznávacím znamením pro jednotlivá architektonická období. Podle *Obr. 3-1* lze sledovat vývoj sklonů střešních konstrukcí, který se odvíjel podle: a) doby vzniku; b) umístění stavby; c) dostupnosti suroviny, aj. (Vinař 2004). Postupným vývojem v oblasti střešních konstrukcí se přicházelo na ideální typy konstrukcí, které vykazovaly úsporu nákladů na materiál a vysoké užitné vlastnosti. Využívaly se zejména konstrukce namáhané na tlak a tah, nikoliv na ohyb. Sklon cca 30° v 9. až 12. století byl charakteristický pro románský sloh, naopak vyšší sklony střech 50° až 60° byly charakteristické pro období gotiky a renesance. Typická stavba pro toto období je např. kostel sv. Jakuba v Brně. Koncem 17. a počátkem 18. století docházelo k postupnému ustálení sklonu střešních konstrukcí na 45° (Vinař 2004, Hoffsummer 1993, Gerner 2003)



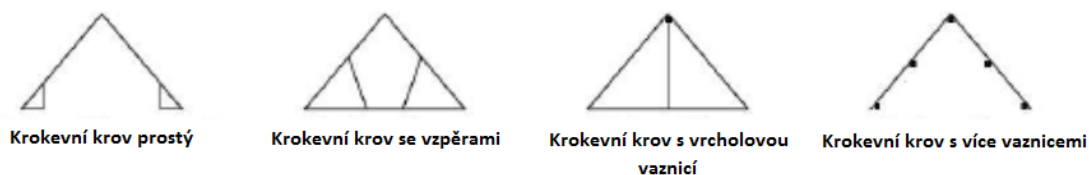
Obr. 3-1 Proměny sklonů střech (Hoffsummer 1993)

Typologie konstrukce krovů

3.1.1 Krokevní soustava

Základem krokevní soustavy je nosník uložený šikmo ve směru sklonu střechy (Vinař 2004, Reinprecht, Štefko 2000). Připevnění krokve v dolní části se provádí

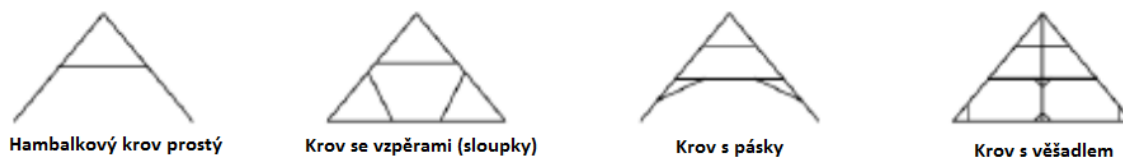
nejčastěji k pozednici, která je přikotvena k podpěrné (nosné) zdi, nebo se přichytí ke stropnímu trámu (Jelínek 2003). Pro správné navržení kroevní soustavy zohledňujeme sklon střechy a její podepření, které nám udává rozpětí jednotlivých krokví. Při řešení některých kroevních soustav se mohou krokve podepírat vzpěrami či sloupky, jako je schematicky vyobrazeno na *Obr. 3-2* (Vinař 2004, Reinprecht, Štefko 2000).



Obr. 3-2 Typy krovů kroevní soustavy (Vinař 2010)

3.1.2 Hambálková soustava

Využití hambalků v krovech se objevuje již ve středověku a trvá dodnes. Jedná se o příčné spojení krokví, které zajišťuje přenášení tlakových sil a dokáže tak výrazně vyztužit celý krov. Napojení hambalku ke krokví tvarově odpovídá rovnostrannému trojúhelníku a zajistí relativně vysokou tuhost konstrukce (Vinař 2004, Reinprecht, Štefko 2000). Existuje celá škála možných provedení od jednoduchých konstrukcí po komplexní soustavy *Obr. 3-3*



Obr. 3-3 Typy krovů hambálkové soustavy s volným hambalkem (Vinař 2010)

3.1.3 Vaznicové soustavy:

Základním nosným prvkem vaznicové soustavy je vodorovný trám neboli vaznice. Krovové zatížení je zachyceno vaznicemi a dále sloupky, které je podporují. Sloupky poté přenášejí zatížení celé konstrukce do nosných stěn budovy. Charakteristické znaky vaznicové soustavy jsou plné vazby a prázdné tzv. jalové vazby. Vaznice můžeme rozdělit na vrcholovou, též hřebenovou vaznici, dále střední, umístěnou mezi hřebenem a okapem střešní konstrukce, a nakonec pozední tzv. pozednici, která je uložena na nosné obvodové stěně, do které je i ukotvena. Podle typu a polohy sloupků v soustavě je ovlivněno i namáhání vazného trámu. U stojatě a ležatě stolice je vazný trám namáhaný

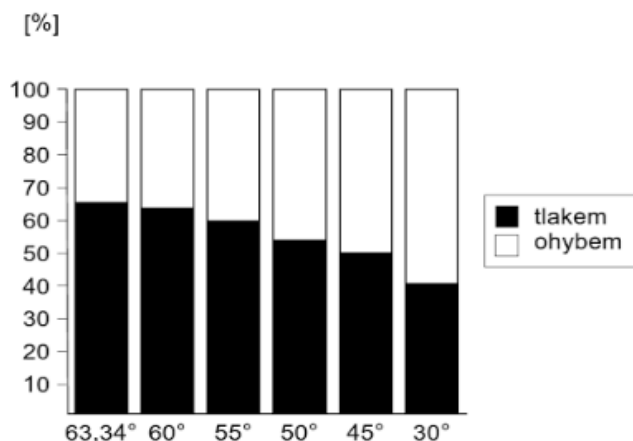
na tlak. U věšadla a vzpěradla je naopak vazný trám namáhán na tah. Vaznicové soustavy lze použít pro téměř každý tvar budovy a jsou oblíbeny díky úspoře materiálu (Vinař 2004, Reinprecht, Štefko 2000).



Obr. 3-4 Typy krovů vaznicové soustavy (Vinař 2010)

3.2 Krov

Stavba vázané nosné konstrukce střechy, tedy krov, který přenáší různá zatížení, vychází především ze sklonu a tvaru (typu) střechy, a také z postavení nosných stěn uvnitř objektu (Jelínek, 2003). Šikmé prvky ve střešních konstrukcích jsou významně namáhány tlakem a ohybem. Tlakem namáhaná konstrukce je charakteristická pro větší sklony konstrukcí, nejčastěji mezi 50 až 60°. Namáhání ohybem pozorujeme u střešních konstrukcí s nižším sklonem přibližně 30°. V případě konstrukce s nižším sklonem se musí počítat s většími dimenzemi prvků, zejména pak s výškou prvku. Při sledování vývoje krovových konstrukcí podle Obr. 3-1 je patrné, že se častěji využívalo uspořádání s vyšším sklonem střech, které upřednostňuje tlakové namáhání dřevěných prvků (Vinař, 2004). Na Obr. 3-5 je znázorněn podíl převládajících složek zatížení šikmých prvků tlakem a ohybem v závislosti na sklonu prvků.



Obr. 3-5 Zatížení šikmých prvků tlakem a ohybem (Vinař 2004)

Při dimenzování jednotlivých prvků konstrukce krovu hrají důležitou roli klimatické podmínky, které se mohou vyskytovat v daných lokalitách (např. podle map sněhových a větrných oblastí dle EN 1991-1-3 a EN 1991-1-4, v daném pořadí) a podle toho uzpůsobit tvar a sklon střechy (Kuklík, Kuklíková 1995; Eurokód 5). Větším sklonem střechy eliminujeme zatížení sněhem, protože sníh se na příkré střeše neudrží a není tak důležité s ním počítat. Naopak vítr zde zatěžuje krov větší silou vzhledem k rozměrnější nárazové ploše. Při větším sklonu střechy se zvětšuje i objem potřebného materiálu a krytiny na vybudování příslušné konstrukce a to mohl být jeden z hlavních důvodů postupného snižování střešních sklonů, jak dokazuje (Hoffsummer 1993, Vinař 2004, Kuklík Kuklíková 1995).

Velikost vodorovné síly, která působí v místě uložení krovu, roste s klesajícím sklonem střechy do 45°, kdy při tomto sklonu dosahuje nejvyšších hodnot, a proto je nutné ji vhodným konstrukčním opatřením zachytit a přenést do pevného základu (Vinař 2004). Při vyšších hodnotách vodorovných sil je nutné ji zachytit např. železobetonovým pozedním věncem, vaznými trámy nebo táhly (Jelínek, 2003, Vinař 2004).

Při menších hodnotách vodorovných sil je možné ji přenést přímo do pevného zdiva nebo ji zachytit vazným trámem (Jelínek 2003).

3.3 Historie spojování

Podle historických dokladů se dřevěné spoje objevily už několik tisíc let př. n. l. Vývoj těchto spojů závisel na vynalézavosti zhotovitelů, dostupnosti vhodného materiálu a nástrojů pro opracování (Gerner 2003). První pokusy o spojování dřeva probíhaly za využití přirozeného tvaru kmenů, které se zaklesly do sebe, popřípadě se tyto kmeny v místě styku určitým způsobem opracovaly. Pomocí provazů nebo kožených řemenů se prvky spojů zajistily pro stabilní spojení. Podle dochovaných nálezů se za nejstarší spoj považuje kúlová vidlice, kterou lidé využívali již v mladší době kamenné. Kúlová vidlice vznikla přirozeným rozchodem (rozvětvením) dvou větví a sloužila jako podpěrná konstrukce pro překlenovací kmen (vaznici), která byla hřebenová nebo prahová. Tvar vidlice nebylo třeba nijak upravovat, jen v některých případech se částečně upravila, aby vložená kulatina lépe dosedla. Tíha dřeva dosedávajícího do vidlice, byla většinou dostatečná, a proto nebylo nutné tento spoj dodatečně zajišťovat provazy (Gerner 2003, Kohout et al. 1996).

Postupným vývojem společnosti vznikaly více propracované a sofistikované nástroje, které umožnily propracovanější výrobu spojů dřevěných konstrukcí a nábytku. Osoba, která se podílela na této výrobě, byla označována povoláním tesař, bez rozdílu, zda se jednalo o velké konstrukce staveb či drobný nábytek. Až později bylo povolání tesař uděleno tomu, kdo zhotovoval konstrukce krovů, staveb apod. (Gerner 2003, Kohout et al. 1996). Například různé čepové spoje se objevily poprvé u nábytku a teprve poté byly zakomponovány i do větších konstrukcí a staveb (Gerner 2003).

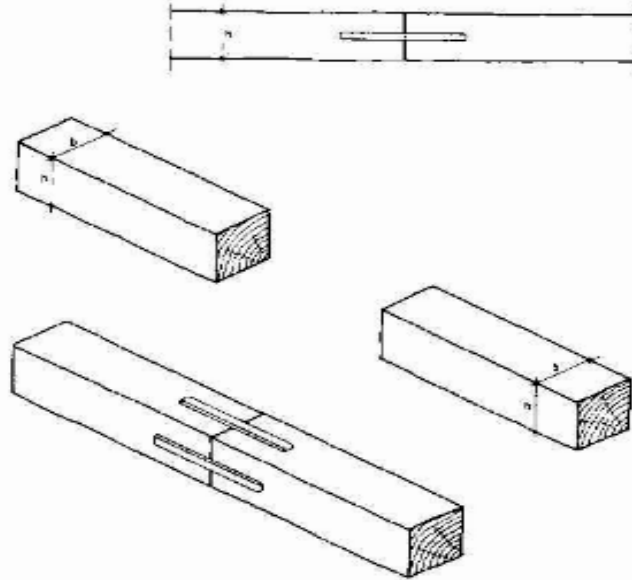
3.4 Tesařské celodřevěné spoje:

Používání tesařských celodřevěných konstrukčních spojů při výstavbě nových konstrukcí nebo při rekonstrukcích historických objektů v posledních desetiletích byly tyto spoje značně opomíjeny v důsledku časové a finanční náročnosti byly postupně nahrazovány moderními spojovacími prostředky (ocelové pláty, gang-nail desky, kolíky, svorníky a další nedřevěné montážní sestavy.) Nicméně, v posledních letech jsou tyto spoje opětovně nasazovány při stavbách a zejména pak při rekonstrukcích historických dřevěných konstrukcí (Gerner 2003). Mezi nejpoužívanější spoje můžeme zařadit tyto typy spojů:

- **Spoje na sraz**

Nejjednodušším prvkem podélného spojování je *spoj na sraz*. Byl to jeden z prvních používaných spojů pro podélné nebo nárožní prodlužování dřevěných prvků. Provádí se v místech, kde je zajištěno podepření trámem nebo nosnou podporou. Místa styku dvou spojovaných částí jsou buďto na čelech, bocích či seříznutých rozích trámů. Pokud se jedná o jednodušší typy srazů, jakými jsou například *tupý sraz* (Obr. 3-6), *šikmý sraz* či *rovný/šikmý sraz přisazený*, je zapotřebí použít přídatná zajištění, aby se o nich dalo mluvit jako o spojih. Bez těchto prvků by spoje nedržely pohromadě. Složitější spoje na sraz jsou náročné na tesařskou a někdy i kovářskou práci, pokud je do spoje zakomponován i kovový prvek. Mezi tyto spoje patří například *sraz s rybinovou vložkou*, který dokáže zachytit smykové i menší tahové síly. Dalšími spoji jsou srazy s vloženým středním kusem. Díky různým tvarovým úpravám a pomocným klínům jsou schopny tyto spoje zachytit síly tahové, smykové a zabraňují i působícím silám ve zdvihu. Těmito spoji jsou například *rovně vyříznutý sraz s vloženým středním kusem*, *šikmo vyříznutý sraz s vloženým středním kusem*, *rovně vyříznutý sraz s vloženým hákem*, *šikmo vyříznutý sraz s vloženým hákem*. Do posledních dvou zmiňovaných spojů

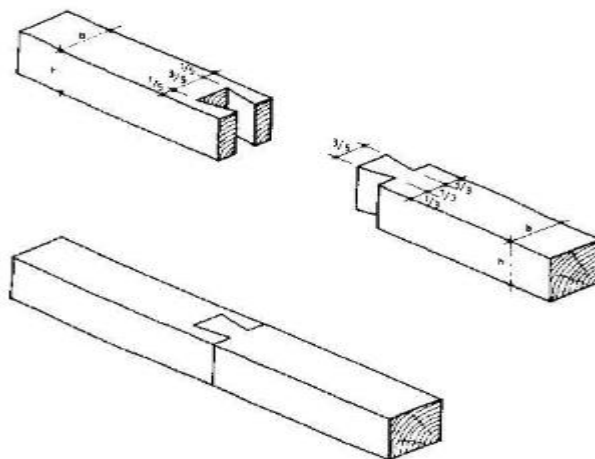
se mohou vkládat i klíny či zdvojovat vkládané háky. Za zmínku stojí i *rohový spoj sraz na pokos* a *příčný spoj sraz s přiloženou dřevěnou spojkou*. Oba tyto spoje se zajišťují skobami, či jinými přídatnými prvky (Gerner 2003, Koželouh 1998).



Obr. 3-6 Tupý sraz (Gerner 2003).

- **Čepové spoje**

Čepové spoje jsou svým charakterem a jednoduchostí hojně využívány a mohou mít různou geometrií čepů a dlabů. Díky jejich nepřebernému množství to byly nejběžnější tesařské vazby pro podélné i příčné napojování dřevěných konstrukcí (Gerner 2003). Čepem je myšlen „výstupek“ trámu vsazený do „prohlubně“ (dlabu) trámu napojovaného. Velikost prohlubně (dlabu) odpovídá velikosti čepu. U příčných vazeb by měl být čep široký do třetiny šířky trámu a dlouhý přibližně čtvrtinu až polovinu výšky trámu (Gerner 2003, Koželouh 1998). U ostatních vazeb se rozměry čepu liší podle určitého typu spoje v závislosti na typu přenášených vnitřních sil. Klasický rovný tvar čepu je schopen přenášet příčné, i podélné tlakové zatížení. Naopak, rybinové čepy (viz. *Obr. 3-7*) umožňují přenášet i tahové zatížení (Gerner 2003)



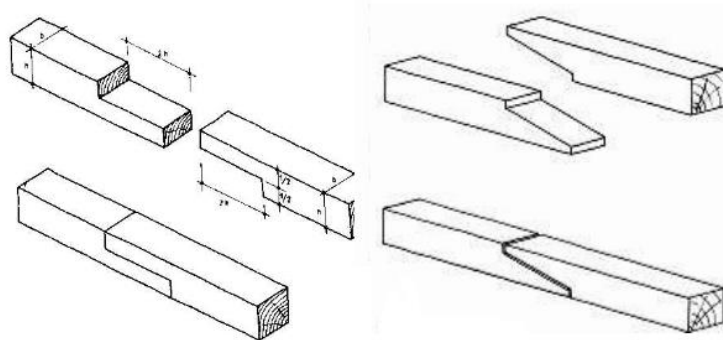
Obr. 3-7 Rybinový čep (čep na čele do rybiny) (Gerner 2003).

- **Plátové spoje**

Plátovými spoji rozumíme podélné, příčné, rohové či křížové vazné spojení dvou trámů, ve kterých je v místě styku vytvořen protilehlý zářez (Gerner 2003). Tyto spoje jsou za správného zhotovení a podmínek velmi trvanlivé a dosahují vysoké únosnosti. Vzhledem k estetičnosti a spolehlivosti spoje, jsou využívány především na opravy historických konstrukcí. Pro správnou funkci spoje je nutné dodržovat některé zásady. Příkladem těchto zásad je: a) použití kvalitního dřeva bez vad, b) mít na paměti, že mohou nastat nevyžádané změny tvaru dřeva vlivem změny vlhkosti, c) při použití spojovacích prostředků dodržet jejich dokonalý kontakt se dřevem, apod. (Kunecký et al.) Jednotlivé typy plátových spojů je možné rozdělit podle sklonu plátu na rovný a šikmý a také podle tvaru plátu na rovnočelný, šikmočelný, klínočelný, klesající, s ozubem, s klíny (Gerner, 2003).

Plátové spoje jsou také jedny z nejpoužívanějších spojů při opravách. Pro nastavování podélných prvků a částečně i pro stojaté prvky jsou určeny **rovné pláty**. Mezi tyto pláty patří například *rovný plát na jedné nebo obou stranách šikmo seříznutý*, *rovný plát se zasouvací drážkou*, *rovný plát řezaný naostro* nebo *šikmo podříznutý rovný plát řezaný naostro*. Zmíněné druhy plátových spojů svým provedením dokáží zachytit různá zatížení na vybočení nebo zajistí rychlý odvod vody, aby nepronikala do spáry řezu. Vodorovné prvky se spravují pomocí **šikmých plátů**. Tyto spoje se objevují v provedení *šikmého plátu s krytým hákem*, *s vložkou*, *hmoždíkem*, nebo jako *jednostranně* či *na obou stranách šikmo podříznutý plát* (Obr. 3-11). Poslední zmiňovaný spoj je při zajištění svorníky výborným řešením pro dlouhá provedení

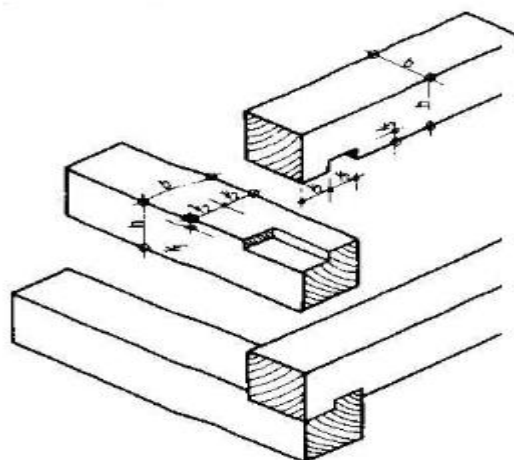
(čtyřnásobek až pětinásobek výšky hranolu). Dalšími spoji pro opravy jsou ještě například **hákové pláty**, či méně používané **šikmé hákové pláty**. Pro zajištění plátových spojů jsou vhodné dřevěné kolíky, klíny nebo hmoždíky (Gerner, 2003, Koželouh 1998, Kunecký et al.).



Obr. 3-8 Vlevo rovňý plátový spoj, vpravo šikmý plátový spoj (Gerner 2003).

- **Kampové spoje**

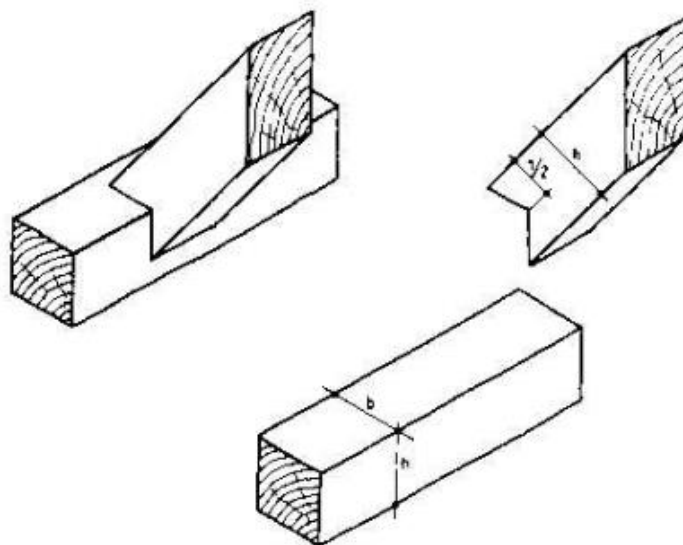
Původ kampových spojů neboli kampování vychází ze spojů plátových. Je to v podstatě druh částečného přeplátování. Charakteristické rysy těchto spojů spočívají v tom, že vůči sobě neleží vazně a nelze je použít pro podélné spoje. Hloubka zapuštění je rovna hloubce jednoho zářezu. Zářez se provádí pouze na jednom ze spojovaných trámů. Druhý trám je bez zářezu nebo je vybaven jen zářezem nezbytným pro spojení těchto prvků. Podle tvaru zářezů rozdělujeme kampování na rovné, křížové či rybinové a vzhledem k sevřenému úhlu spojovaných prvků je dělíme na spoje kolmé nebo šikmé (Gerner, 2003).



Obr. 3-9 Rovňý kamp rohový (Gerner 2003).

- **Drápové (sedlové) spoje**

Sedlovým spojem je myšlen spoj dvou dřevěných prvků (trámů), které leží každý v jiné rovině. Nejčastěji se s ním setkáme u spojení krokve a pozednice/vaznice. Rozlišujeme pojem „sedláni“ (zadrápnutí do) a „osedláni“ (zadrápnutí přes). U sedláni jde o příčný spoj, u osedláni mluvíme o křížovém spoji. Mezi příčné spoje patří například zadrápnutí čelním zářezem v krokvi, zadrápnutí do podříznuté vaznice, zadrápnutí s výstupky ve tvaru H nebo zadrápnutí čepem do hnízda. U křížových spojů můžeme zmínit zadrápnutí přes zásek na krokvi nebo zadrápnutí přes podříznutou vaznici (Gerner. 2003).



Obr. 3-10 Zadrápnutí čelním zářezem v krokvi (sedláni čelem krokve) (Gerner 2003)

- **Hmoždíky a hmoždíkové spoje**

Hmoždík je spojovací prostředek, sloužící především k přenosu smykových sil ve spojích plátového typu. Hmoždíky mohou mít tvar připomínající mašli nebo vlaštovčí ocas a používají se nejčastěji při spojování více prvků do větších ploch, jakými jsou desky stolů, dveře, lavice apod., nebo mají konický (klínový) tvar a používají se pro stabilizaci plátových spojů v různých modifikacích, např. jako znázorňuje *Obr. 3-11* Hmoždíky se vyrábějí především z tvrdých listnatých dřevin, nejčastěji dubu a akátu (Gerner, 2003). Při použití hmoždíků u konstrukčních celodřevěných spojů je nutné, aby byly u spoje podkosená čela a nedocházelo tak k jeho rozevírání.



Obr. 3-11 Plátový spoj s podkosenými šikmými čely zajištěný dvěma hmoždíky a jedním kolíkem (foto Kunecký).

3.5 Opravy dřevěných konstrukcí:

Do současné doby se nám dochovala spousta historických dřevěných budov a konstrukcí, a proto pro zachování tohoto kulturního dědictví a jedinečnosti dřevěných staveb budoucím generacím je nutné, aby tyto stavby byly náležitě udržovány. V případě nutných sanačních opatření je nezbytné provádět tyto opravy podle původních tradičních metod, aby nedocházelo ke snižování estetické a historické hodnoty těchto staveb. Dále při opravách historických dřevěných konstrukcí se snažíme o zachování autenticity díla, tzn., že usilujeme o to, aby bylo zachováno co největší množství původního materiálu. Právě takový postup nám zajistí jedinečnost a historickou hodnotu stavby. Před spuštěním vlastních sanačních opatření je nutné zvážit statickou funkci, přihlídnout k stavebně-historickému vývoji a výsledku diagnostiky aktuálního stavu konstrukce. Z důvodu zvýšené vlhkosti a nesprávné údržby může docházet ke znehodnocení dřevěných konstrukcí a spojů, což může mít za následek to, že poté bude potřeba vyměnit celý prvek. V této situaci je nejefektivnější využití nastavovacího spoje. Nový prvek tzv. protéza se napojí na původní dřevěný prvek. Nově napojený prvek by měl být ze stejného materiálu, v nejlepším případě by měl zachovat původní tvar a jeho fyzikální a mechanické vlastnosti by měly být rovněž podobné s vlastnostmi prvotní konstrukce (Gerner 2003, Reinprecht, Štefko 2000).

Využití ocelových svorníků pro opravy dřevěných spojů je dnes ve většině případů oblíbeným řešením, ovšem při poškození cenných historických konstrukcí je z hlediska estetiky a citlivosti ideální variantou celodřevěný spoj. Navrhování těchto spojů však není zcela jednoduché a chybí zde dostatečná informovanost z norem. Výjimkou není ani Eurokód 5, který je sice zaměřen na navrhování dřevěných konstrukcí, avšak neposkytuje komplexní postup pro řešení celodřevěných tesařských spojů (Fajman, Kunecký, Hasníková 2015).

Pro opravy poškozených dřevěných konstrukcí se časem vyvinuly speciální spoje, díky kterým se nemusí demontovat celá stavba, ale pouze daný úsek konstrukce. To je důležité hlavně pro sanace památkově chráněných objektů (Gerner, 2003).

3.6 Metoda konečných prvků (MKP)

Metoda konečných prvků, zkráceně MKP, je napěťově-deformační analýza, která slouží k hodnocení a simulaci napětí, deformací a dalších dějů ve vytvořeném virtuálním geometrickém modelu.

Principem metody je diskreditování spojité oblasti (kontinua) na předem zvolený konečný počet prvků. Vytvořený virtuální geometrický model tělesa se rozdělí na prvky konečných rozměrů. Těmito prvky jsou čtyřúhelník (v rovině) a šestistěn (v prostoru). Pro zjednodušení lze použít i trojúhelník nebo čtyřstěn, záleží na řešené úloze. Jednotlivé prvky vytvoří síť a jejich rohy, či jiné význačné body jsou označovány jako uzly. V jednotlivých uzlech jsou poté určovány parametry řešeného problému. Na hustotě sítě závisí přesnost výpočtu, a právě hustotu volí výpočtář na základě svých zkušeností. Je nutné použít takovou hustotu sítě, aby výpočet netrval příliš dlouho, ale také aby jeho přesnost byla co největší a nedocházelo k podhodnocení napětí. Poté jsou do systému zadány parametry materiálu (Poissonova čísla, moduly pružnosti atd.). Dalším krokem je definování okrajových podmínek (zatížení, vazby), následuje řešení („solving“), které na základě vstupních údajů řeší soustavu rovnic s neznámými posuvy, ze kterých je poté počítáno napětí a přetvoření. Posledním krokem je „postprocessing“. Zpracovává výsledky a znázorňuje rozložení neznámých parametrů.

Stěžejním cílem této metody je možnost předpovídat selhání například dřevěných konstrukcí, či jejich částí a odhalovat problémová místa těchto narušení (Kolář et al. 1997)

3.7 Metoda korelace obrazu (DIC)

Principem metody korelace obrazu je hledání korelačního vztahu mezi jednotlivými body obrazů. Určuje se zde poloha, deformace a posuvy na povrchu objektu. Dva obrazy jednoho objektu, který obsahuje skvrnitý povrch („speckle pattern“), lze mezi sebou porovnat tak, abychom určili změny polohy, které se vytvořily při přechodu od prvního obrazu do druhého. Díky dvěma kamerám, které snímají jeden a ten samý

objekt, je získán jeho prostorový model (3D snímání). Opakováním této akce v různých časech jsou zjištěny posuvy (deformace) během zatěžování (Petter, Ranson 1982)

Abychom byli schopni vyhodnotit změny poloh bodů, použijeme matematickou funkci korelace. Digitální korelace obrazů (DIC – Digital Image Correlation) počítá s kontrastním povrchem tělesa pokrytého virtuálními pixely. Ke zdůraznění kontrastu na povrchu zkoumaného objektu je použit již výše zmiňovaný dvoubarevný nástřík neboli „speckle pattern“.

Sutton (2008) uvádí, že korelační vztah mezi jednotlivými body, každý v jednom obraze, je shoda těchto bodů neboli jejich párování („matching“). Následně se lokalizují nalezené shodné body na obou obrazech. Shodná poloha obou bodů je rovna nulovému posunutí bodu neboli nulové deformaci v daném bodě na povrchu tělesa. Odlišná poloha obou bodů je naopak důkazem o nenulové deformaci čili posunutí bodů. Abychom zjistili skutečné posunutí v jednotkách délky, musíme zjistit počet bodů v obraze, které odpovídají jednotce délky na skutečném povrchu tělesa. Získání těchto parametrů je zajištěno při kalibraci snímacího zařízení (Pan et al. 2009).

Okolí pixelu je nazýváno faseta neboli („subset“). Velikost tohoto okolí závisí na rozlišení obrazu, kontrastu povrchu objektu a velikosti a charakteru deformace (Sutton, 2008).

4. Materiál a metodika

3.1 Materiál

Pro výrobu zkušebních tělísek byla použita dřevina dub (*Quercus* L.). Je to jedna z nejpoužívanějších dřevin pro konstrukční prvky (např. dřevěné kolíky, hmoždíky). Vyniká vysokou tvrdostí, houževnatostí, rozměrovou a tvarovou stabilitou a řadí se mezi trvanlivé dřeviny (Vigué 2006, Gibbs 2005). Dub patří do skupiny dřev s kruhovitě pórovitou stavbou dřeva s vylišeným jádrem a bělí. Barva jádra je světlá až tmavohnědá, běl má barvu nažloutlou až světlehnědou. Jarní dřevo obsahuje makrocévy o velikosti 200 μm , letní dřevo mikrocévy o průměru 100 μm s typickým seskupením do tvaru „V“. Dub řadíme do kategorie středně těžkých dřev s hustotou ρ_0 680 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Vigué 2006, Požgaj 1993, Wagenführ 2002)

3.2 Příprava zkušebních tělísek:

Laboratorní zkušební vzorky pro jednotlivé mechanické zkoušky byly vyrobeny a testovány v souladu s příslušnými standardy – (ČSN EN 490110 Dřevo. Medza pevnosti v tlaku v smere vláken, ČSN EN 490111 Skúšky vlastností rastlého dreva. Metóda zist'ovania modulu pružnosti v tlaku podlž vláken, ČSN EN 490112 Dřevo. Tlak naprieč vláken, ČSN EN 490113 Skúšky vlastností rastlého dreva. Metóda zist'ovania pevnosti v ťahu pozdlž vláken, ČSN EN 490114 Skúšky vlastností rastlého dreva. Metóda zist'ovania pevnosti v ťahu naprieč vláken, ČSN EN 490115 Dřevo. Zist'ovanie medze pevnosti v statickom ohybe, ČSN EN 490116 Dřevo. Metóda zist'ovania modulu pružnosti pri statickom ohybe, ČSN EN 490118 Dřevo. Medza pevnosti v šmyku v smere vláken, ASTM D143). Zkušební tělíska neobsahovala žádné viditelné vady (např. suky, trhlíny, odklon vláken).

Pro potřeby DIC analýz bylo nutné zvýšit kontrast snímaných ploch zkušebních vzorků pomocí unikátního dvoubarevného vzoru. První podkladová vrstva byla nanášena bílým sprejem, která zakryla přirozenou strukturu dřeva. Po zaschnutí první vrstvy byl na povrch tělísek jemně nastříkán pomocí černého spreje unikátní, náhodně skvrnitý vzor, tzv. „speckle pattern“ (viz. *Obr. 4-1*) umožňující korelaci obrazu pro vykreslení deformací a posunutí na povrchu vzorků.



Obr. 4-1 Unikátní, náhodně skvrnitý vzor, tzv. „speckle pattern“.

Všechny zkušební vzorky byly umístěny do klimatizované místnosti při teplotě 20°C a relativní vlhkosti vzduchu 65 %, pro ustálení rovnovážné vlhkosti dřeva na 12 % (± 2 %). Průměrná hustota všech zkušebních tělísek byla $738,3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. V následující části jsou zobrazena schémata a zatížení jednotlivých zkušebních vzorků.

3.3 Zatížení vzorků:

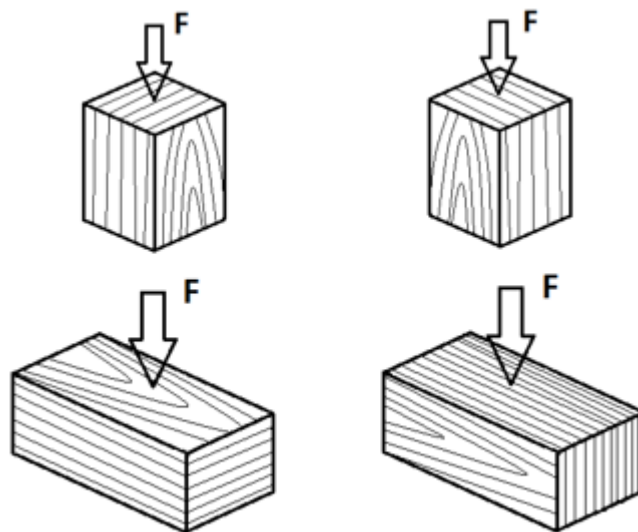
Všechny zkušební vzorky byly testovány na univerzálním zkušebním stroji Zwick Z050 (*Obr. 4-2*). Zatěžování vzorků bylo prováděno pomocí horního mechanického příčnicku se siloměrnou hlavou max. 50 kN. Pro jednotlivé typy zkoušek byly používány vyměnitelné čelisti a podpory. Ovládání, nastavení a kontrola vlastního měření byla řízena pomocí softwaru TestXpert. v11.02.



Obr. 4-2 Zkušební stroj Zwick Z050 (převzato z: www.zwick.com)

3.3.4 Tlak

Tlaková zkouška byla prováděna na normovaných zkušebních těliscích o rozměrech 20×20×30 mm podél a napříč vláken v radiálním i tangenciálním směru. V následujících schématech jsou nastíněny směry zatížení.



Obr. 4-3 Horní dva vzorky – tlak podél vláken, spodní dva vzorky – tlak napříč vláken (šipky naznačují směr zatížení).

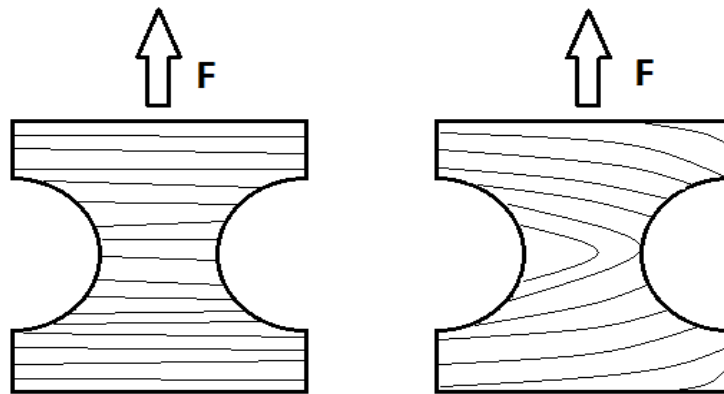
Tato zkouška byla řízena podle ČSN EN 49 0110 a ČSN EN 49 0112. Při tlaku podél vláken byla rychlost příčnicku 1,3 mm/min a čas porušení trval okolo 50 s. V tlaku napříč vláken byla rychlost 1,3 mm/min a čas porušení se pohyboval v rozsahu 30 až 40 s.



Obr. 4-4 Tlakové zatížení napříč (vlevo) a podél (vpravo) vláken.

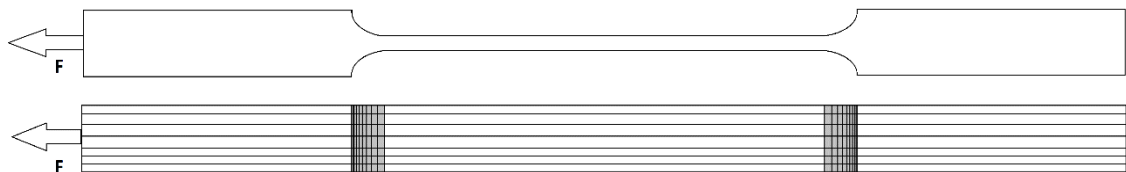
3.3.5 Tah

Tahová zkouška napříč vláken byla prováděna na normovaných těliscích se základními rozměry $50 \times 20 \times 60$ mm s polokruhovitými výřezy na bočních stranách s poloměrem R15 mm. Na schématu je znázorněn směr zatížení vzorku.



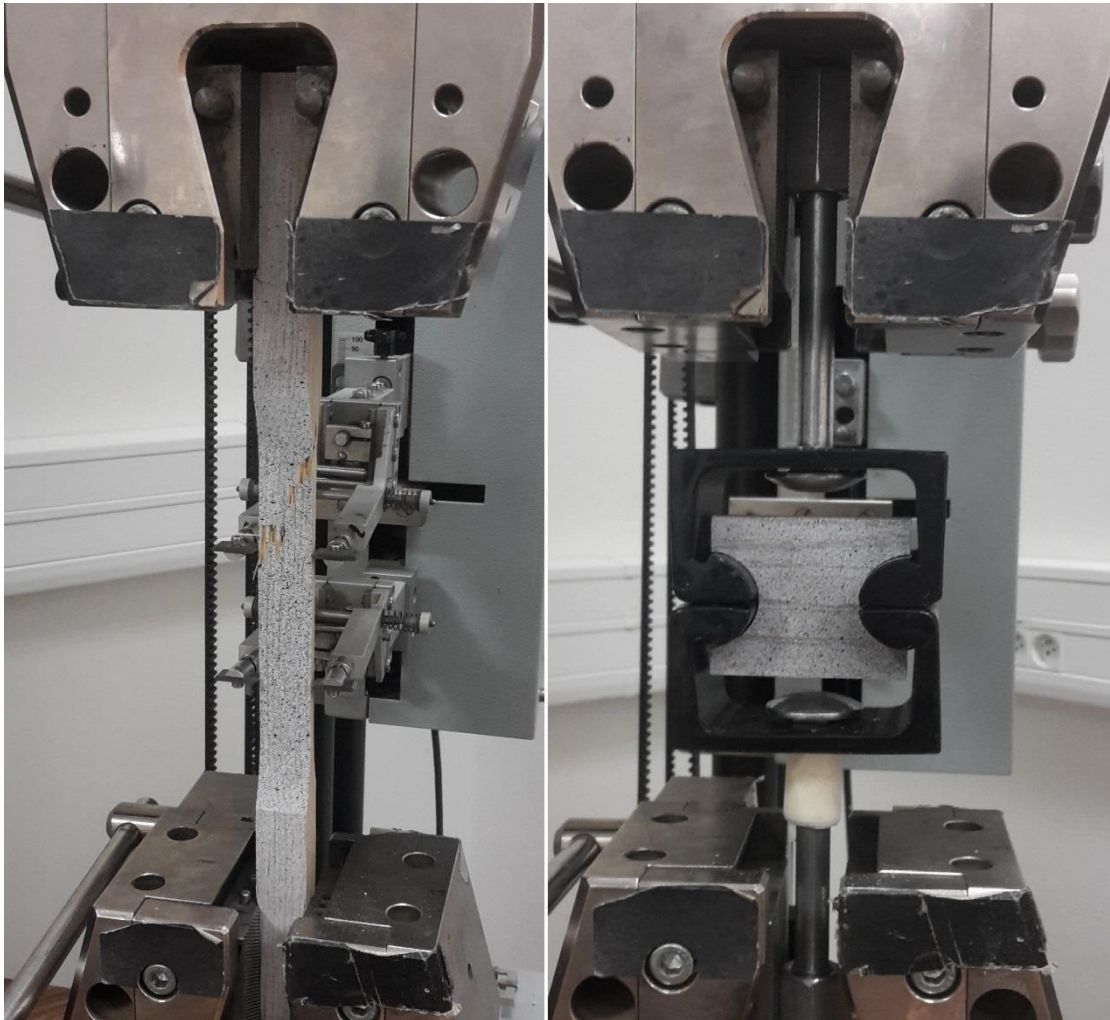
Obr. 4-5 Tahová tělíska zkoušky napříč vláken s naznačeným směrem zatížení.

Při tahovém zatížení podél vláken byly použity tělíska o rozměrech $20 \times 20 \times 350$ mm. Pracovní část tělíska byla dvoustraně zúžená na 4 mm. Poloměr výřezu byl 26,5 mm. Délka zúžení včetně výřezu byla 130 mm. Šipky na schématu označují směr zatížení.



Obr. 4-6 Tahové tělísko zkoušky podél vláken s naznačeným směrem zatížení.

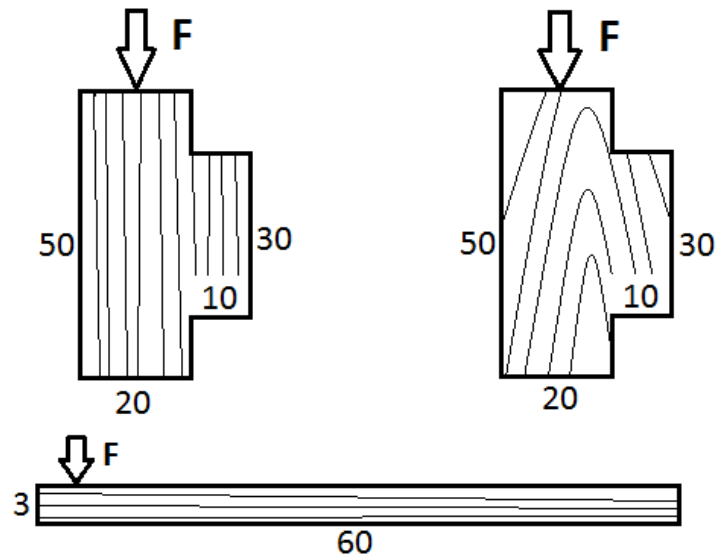
Při tahu podél vláken byla rychlost zatížení 10 mm/min a čas do porušení se pohyboval okolo 50 s. U tahu napříč byla rychlost zatížení 2 mm/min a čas porušení dosahoval 40 s. Testování bylo v souladu norem ČSN EN 49 0113, ČSN EN 49 0114 a ASTM D143.



Obr. 4-7 Tahové zatížení podél (vlevo) a napříč (vpravo) vláken.

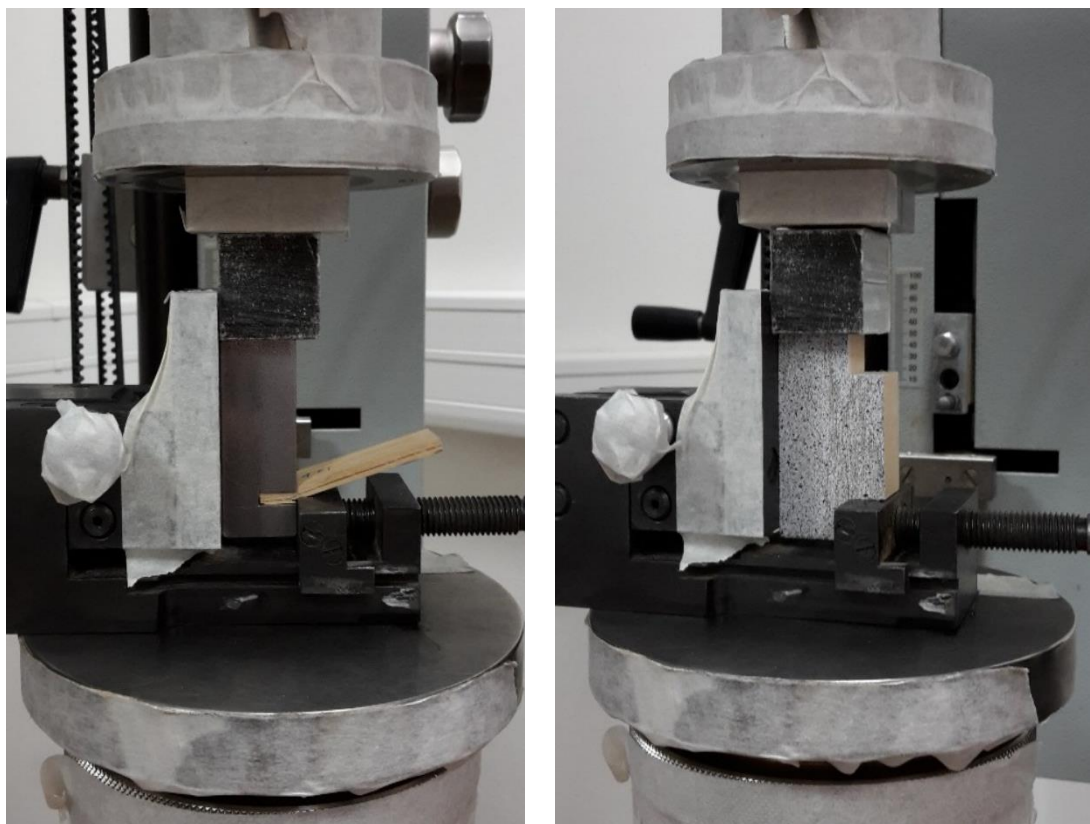
3.3.6 Smyk

Pro smykovou zkoušku jsme použili dva druhy zkušebních vzorků. První vzorky ve tvaru „T“ (Obr. 4-8) byly zhotoveny pro zkoušky v *LR* a *LT* rovinách, kdy zatěžující síla působila ve směru dřevních vláken. Druhý typ tělíska byl zkoušen v *RT* rovině, kdy zatěžující síla působila napříč dřevních vláken v tangenciálním směru.



Obr. 4-8 Smyková tělíska podél vláken (nahore) a napříč vláken (dole) s naznačeným směrem zatížení.

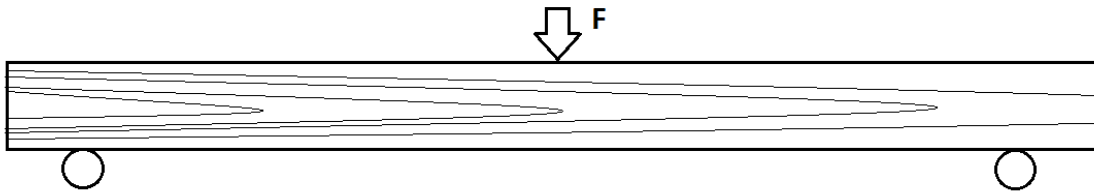
Pro tuto zkoušku byla použita ČSN EN 49 0118 s rychlostí zatížení 1,4 mm/min a čas porušení byl cca 40 s.



Obr. 4-9 Smykové zatížení napříč vláken v RT rovině (vlevo) a podél vláken v LT rovině (vpravo).

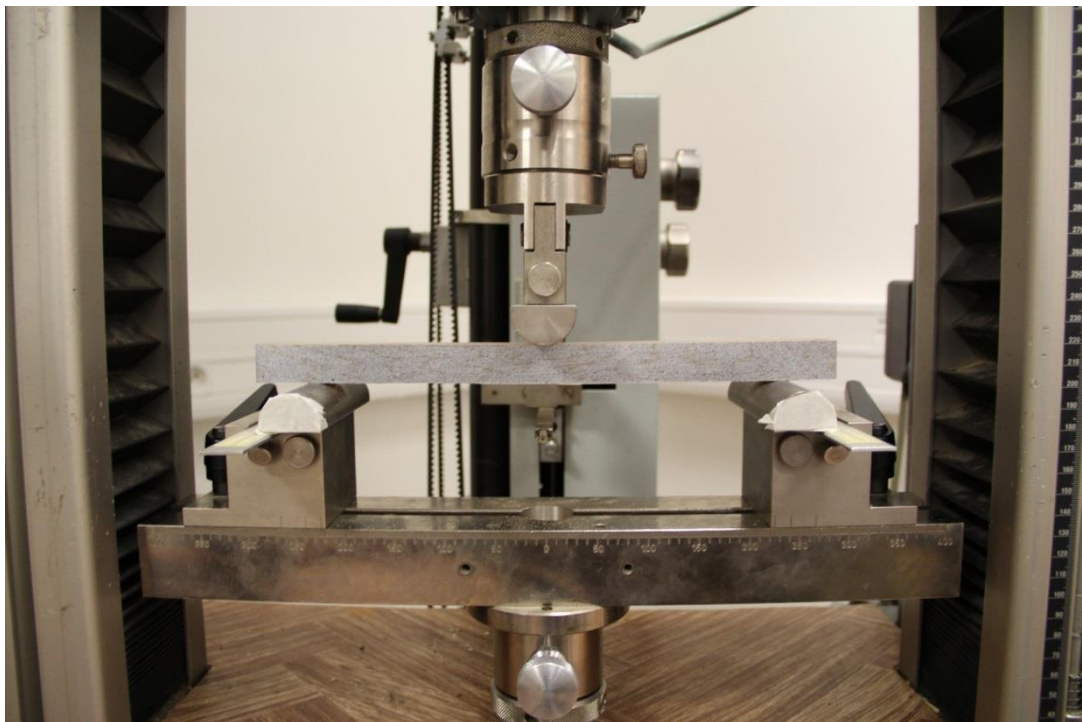
3.3.7 Ohyb

Tělíska pro ohyb byla vyrobena v rozměrech 20×20×300 mm.



Obr. 4-10 Ohybové tělísko s naznačením směru zatížení a statickými podpěrami.

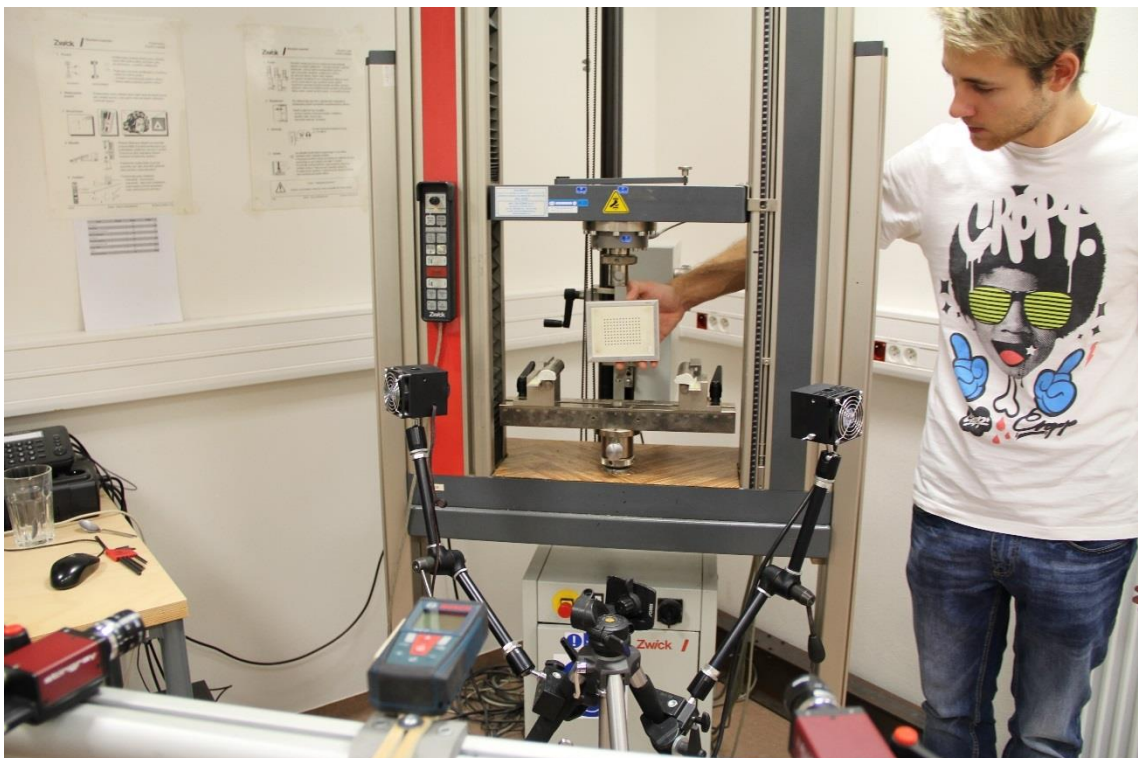
Ohybové zatížení bylo provedeno metodou třibodé ohybové zkoušky v souladu s normami ČSN 49 0115 a ČSN 49 0116. Rychlost zatížení ohybových vzorků byla nastavena na 6 mm/min a doba porušení se pohybovala okolo 40 s.



Obr. 4-11 Ohybová zkouška.

3.4 Měření deformací

Posunutí a deformace byly zjišťovány: a) bodovým měřením, které bylo zachyceno pomocí „clip-on“ extenzometrů, které jsou součástí zkušebního stroje Zwick Z050 s rozlišovací schopností příčnicku a „clip-on“ extenzometrů 0,001 mm; b) plno-polním 3D snímáním deformací za použití optického systému, který aplikuje principy DIC. Část systému zahrnují dvě kamery CCD AVT Stingray Copper F-504B (Allied Vision Technologies, Osnabrück, Německo), podpořené dvěma zdroji studeného světla SobrietyCube 360 (Sobriety s.r.o., Kuřim, Česká republika). Pro dosažení maximálního prostorového rozlišení vzorovaného povrchu („speckle pattern“) zkušebního tělíska, bylo potřeba důkladné nastavení celého snímacího setu. Optimální úhel kamer pro zajištění přesnosti měření je 25°. Rozteč a vzdálenost kamer od měřené oblasti zájmu (AOI – „Area of interest“) byla nastavena pro jednotlivé zkoušky zvlášť. Po nastavení hardwaru optického setu byla provedena kalibrace pomocí několika snímků kalibrační mřížky s roztečí 5,5 mm (Obr. 4-12). Kalibrace byla provedena pro každý typ namáhání zvlášť, jelikož se měnilo nastavení snímacího systému a také úchopové hlavy ve zkušebním stroji.



Obr. 4-12 Foto z kalibrace snímacího zařízení.

Materiálové charakteristiky získané z jednotlivých zkoušek (tlak, tah, smyk, ohyb) byly následně použity jako vstupní parametry pro sestavení materiálového modelu dubu

používaného v numerických analýzách základních modelů zkoušek a modelu hmoždíkového spoje založených na metodě konečných prvků MKP (FEM).

3.5 Zpracování obrazových dat (DIC)

Obrazová data (posunutí obrazů) byla zpracována za pomoci softwaru Vic-3D v. 2010 (Correlated Solutions Inc., Columbia, SC, USA). Tento software počítá potřebné poměrné deformace a posunutí z předem definované oblasti zkoušeného vzorku. Oblast, ze které jsou tyto hodnoty počítány, se označuje jako *oblast zájmu* (AOI – „area of interest“). Před spuštěním výpočtu zkalibrujeme obraz (snímek) pomocí záložky „calibration“. Zde se odkážeme na již hotovou kalibraci pro jednotlivé typy namáhání, která byla provedena před samotným testováním vzorků na zkušebním stroji pomocí kalibrační mřížky. Následuje definování AOI, které je provedeno ručně ikonou „create rectangle“. Požadovanou oblast označíme kurzorem myši co nejpřesněji podle tvaru zkušebního tělíska. Do vybrané oblasti vložíme startovací bod pro výpočet, a to ikonou „create start point“. Pro výpočet je také důležité nastavit hodnotu podmnožiny „subset“, která byla v našem případě 15 a rozestup „step“ jehož hodnota byla 2. Následuje spuštění výpočtu pomocí ikony „start analysis“. Během počítání je možné sledovat deformace a posunutí v různých směrech. Po ukončení vyexportujeme report výpočtu do tabulkového kalkulátoru MS Excel, kde data dále zpracujeme.

3.6 Výpočet mechanických charakteristik

Pro stanovení modulů pružnosti v tlaku v L , R , T směrech byly použity následující rovnice:

$$E_{L,c} = \frac{(F_{40} - F_{10}) \times l_{ext}}{R \times T \times (u_{40} - u_{10})} \quad (1)$$

$$E_{R,c} = \frac{(F_{yield,40} - F_{yield,10}) \times R}{L \times T \times (u_{yield,40} - u_{yield,10})} \quad (2)$$

$$E_{T,c} = \frac{(F_{yield,40} - F_{yield,10}) \times T}{L \times R \times (u_{40} - u_{10})} \quad (3)$$

F_{40} , F_{10} ... síla ve 40 a 10 % z maximální síly zatížení (N)

$F_{yield,40}$, $F_{yield,10}$... síla ve 40 a 10 % odpovídající síle v mezi úměrnosti (N)

l_{ext} ... počáteční vzdálenost extenzometrů (mm), 1/3 z L směru vzorku (mm)

u_{40} , u_{10} ... deformace na úrovni F_{40} a F_{10} (mm)

$u_{\text{yield},40}, u_{\text{yield},10}$... deformace na úrovni $F_{\text{yield},40}$ a $F_{\text{yield},10}$ (mm)

L, R, T ... rozměr vzorku v podélném, radiálním a tangenciálním směru (mm)

Mez úměrnosti v tlaku podél a napříč vláken byla vypočítána podle následujících rovnic:

$$\sigma_{L,c} = \frac{F_{\text{max}}}{R \cdot T} \quad (4)$$

$$\sigma_{R,c} = \frac{F_{\text{yield}}}{L \cdot T} \quad (5)$$

$$\sigma_{T,c} = \frac{F_{\text{yield}}}{L \cdot R} \quad (6)$$

F_{max} ... maximální síla zatížení (N)

F_{yield} ... síla odpovídající mezi úměrnosti (N)

T ... rozměr vzorku v tangenciálním směru (mm)

L ... rozměr vzorku v podélném směru (mm)

R ... rozměr vzorku v radiálním směru (mm)

Pevnost v ohybu byla vypočtena podle rovnice:

$$\text{MOR} = \frac{3 \cdot F_{\text{max}} \cdot l_s}{2 \cdot R \cdot T^2} \quad (7)$$

F_{max} ... maximální síla zatížení (N)

l_s ... rozpon (mm)

R ... rozměr vzorku v radiálním směru (mm)

T ... rozměr vzorku v tangenciálním směru (mm)

Modul pružnosti v ohybu byl vypočítán podle:

$$\text{MOE} = \frac{(F_{40} - F_{10}) \cdot l_s^3}{4 \cdot R \cdot T^3 (u_{\text{def},40} - u_{\text{def},10})} \quad (8)$$

F_{40}, F_{10} ... síla ve 40 a 10 % z maximální síly zatížení (N)

l_s ... rozpon (mm)

R ... rozměr vzorku v radiálním směru (mm)

T ... rozměr vzorku v tangenciálním směru (mm)

u_{40}, u_{10} ... deformace na úrovni F_{40} a F_{10} (mm)

Smyková napětí bylo vypočteno podle:

$$\tau = \frac{F}{S} \quad (9)$$

F ... síla (N)

S ... průřez vzorku

Smykový modul pružnosti byl vypočítán ze vztahu:

$$G = \frac{E}{2*(1+\mu)} \quad (10)$$

E ... Youngův modul pružnosti

μ ... Poissonovo číslo

Výpočet Poissonova čísla:

$$(\nu)\mu = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad (11)$$

ε_y ... poměrná deformace v příčném směru

ε_x ... poměrná deformace v podélném směru

3.7 Bilineární elasto-plastický model

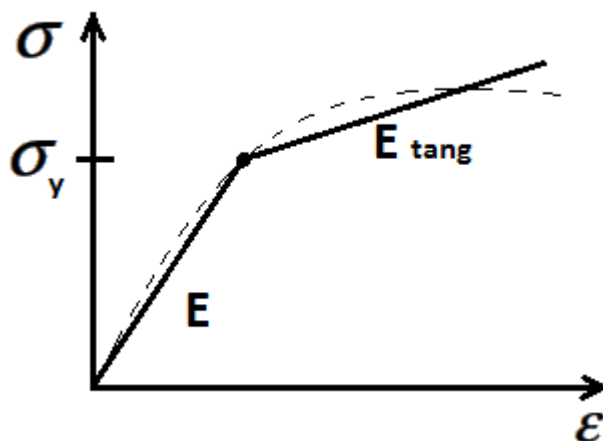
Pro popis nelineární chování dřeva v ANSYS byl použit materiálový model TB,ANISO, pro který je charakteristické bilineární elasto-plastické chování. Jedná se tzv. Hillův zobecněný materiálový model. Je to zobecněná forma kritéria *von Mises*, které přesně popisuje anizotropii materiálů. Volba TB,ANISO umožňuje v materiálech rozlišovat různé napětově-deformační chování pro tlak, tah a smyk ve 3 na sebe vzájemně kolmých směrech x , y , z .

Pro popis elastické oblasti napětově-deformační křivky je použito 9 materiálových charakteristik. Těmito charakteristikami jsou a) normálový modul pružnosti pro L , R , T ($E_{L,R,T}$), b) smykový modul pružnosti v rovinách LR , RT , LT ($G_{LR,RT,LT}$) c) Poissonovo číslo pro LR,RT,LT směry ($\nu_{LR,RT,LT}$).

Popis plastické oblasti napětově-deformační křivky definuje 18 parametrů (materiálových charakteristik) rozlišených pro tlak, tah a smyk v podélném, radiální a

tangenciálním směru. Těmito parametry jsou tangentiální moduly pružnosti a meze úměrnosti a) tlak ($E_{\tan,L,R,T,comp}$ a $\sigma_{y,R,L,T,comp}$) b) tah ($E_{\tan,L,R,T,ten}$ a $\sigma_{y,R,L,T,ten}$) c) smyk ($G_{\tan, LR,RT,LT, shear}$ a $\tau_{y,LR,RT,LT, shear}$). Tyto parametry určují zpevnění („hardening“) v plastické oblasti.

Pro každý směr se předpokládá bilineární odezva viz *Obr. 4-13*. Počáteční sklon křivky je považován za elastický modul pružnosti. Za mezí úměrnosti pokračuje křivka podél druhého sklonu, definovaná jako tangentiální modul pružnosti (plastická část).



Obr. 4-13 Bilineární elasto-plastický model.

3.8 Numerické modely základních zkoušek

Pro modelování, řešení a vyhodnocení spoje byl využit software ANSYS Mechanical ADPL v. 16.2. Vytvoření numerických simulací, bylo provedeno pomocí APDL (ANSYS Parametric Design Language), díky kterému byly vytvořeny skripty, které se vkládaly do příkazového řádku a vznikl tak numerický model.

K sestavení materiálového modelu dubu byly použity materiálové charakteristiky získané při dílčích experimentech na zkušebních vzorcích (tah, tlak, smyk, ohyb). Následovala kalibrace materiálových modelů na základě zmíněných materiálových charakteristik, prováděna v prostředí ANSYS na modelech základních zkoušek, a to srovnáním předem daných a experimentálně zjištěných napětí-ově-deformačních vztahů, které vystihují proces zatížení a mechanické odezvy dřeva. Jinak řečeno, aby výpočet numerické simulace fungoval, bylo zapotřebí jej nejdříve odzkoušet na jednodušších případech, kde byl opakovanými výpočty zjišťován „ideální“ materiálový model reflektující skutečné chování dřeva. Relativní chybové odchylky, vypočítané ve třech krocích mezi předpokládanými a experimentálně zjištěnými hodnotami nám určili

přesnost mechanické odezvy. Po úspěšné kalibraci byl tento verifikovaný materiálový model použit ve výpočtu numerického modelu hmoždíkového spoje. Výpočet relativní chybové odchylky byl vypočítán podle následujícího vztahu:

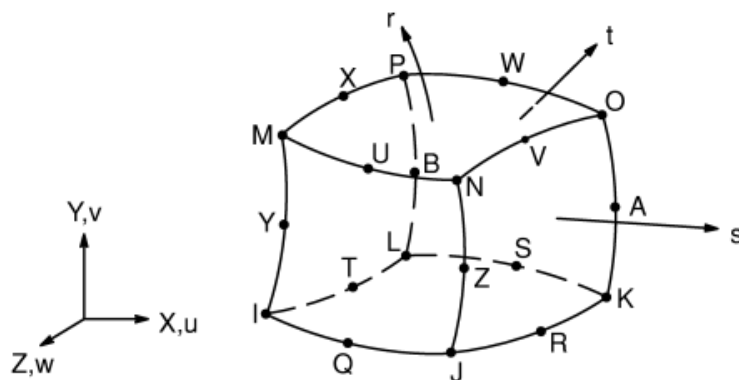
$$\text{error}_{\text{rel}} = \frac{\text{expvalue} - \text{numvalue}}{\text{expvalue}} * 100 \quad (12)$$

exp_{value} ... experimentálně získaná hodnota

num_{value} ... numerická hodnota

3.8.1 Typ použitého elementu

Pro diskreditaci virtuálně vytvořeného geometrického modelu tělesa, byl použit konečně-prvkový kvadratický element SOLID 95. Tento element je definovaný 20-ti uzly, kde pro každý uzel náleží 3 stupně volnosti posunutí v podélném, radiálním a tangenciálním směru viz *Obr. 4-14*.



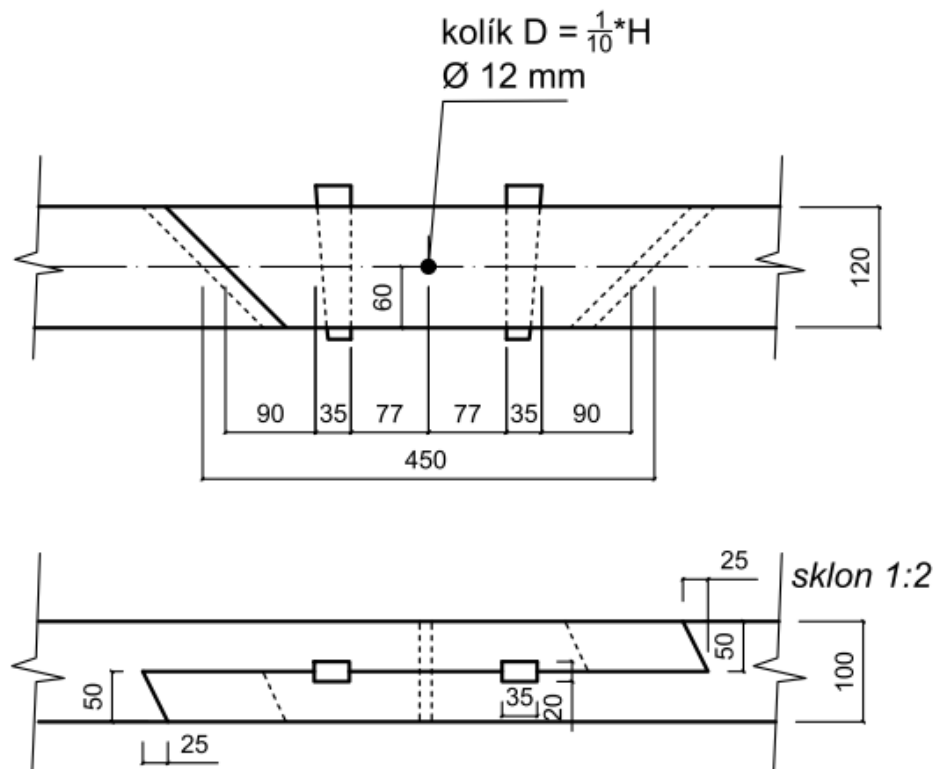
ELEMENT TYPE - **SOLID 95**

Obr. 4-14 Konečný element SOLID 95 (převzato z: ANSYS manual)

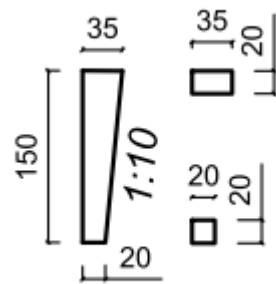
3.9 Numerické modelování 3D a 2D modelu v ANSYS APDL

V prostředí ANSYS je možné modelovat tzv. parametrickou výstavbou numerických modelů pomocí APDL. Tyto modely pak lze jednoduše upravit či předělat na základě změny vstupních podmínek (materiálové charakteristiky, okraj. podmínky atp.). Vstupní podmínky vyjádřené číslem či vlastností se nahrazují parametrem, který je poté možné měnit v průběhu modelování a vytvářet tak jednoduše různé simulace.

Prvním krokem při tomto modelování je definování vstupních parametrů, v našem případě rozměrů tělesa, velikost konečno-prvkového elementu, počet kroků řešení a zatížení a další parametry. Následuje tvorba geometrie v preprocesoru, tedy definice tvaru. Dalším krokem uplatňujeme experimentální zkoušky a materiálové charakteristiky z nich získané. Definujeme elasto-plastický materiálový model pomocí materiálových charakteristik. Těmito charakteristikami jsou pro elastickou oblast deformací a) Youngovy moduly pružnosti b) smykové moduly pružnosti c) Poissonova čísla. Následně zadáme materiálový model pro elastickou oblast deformací a hustotu. Nyní tyto poslední dva kroky zopakujeme s tím rozdílem, že zadáme požadované materiálové charakteristiky pro plastickou oblast deformace a použijeme zobecněný Hillův materiálový model TB,ANISO. Poté vytvoříme konečně-prvkovou síť, kde nastavíme velikost a typ elementu (SOLID 95). Posledním krokem je definice okrajových podmínek a následné spuštění řešiče. Pro ověření materiálového modelu, byl vytvořen 3D i 2D numerický model spoje.



Obr. 4-15 Schéma plátového konstrukčního spoje s hmoždíky a kolíkem.



Obr. 4-16 Schéma dubového hmoždíku.

5. Výsledky:

Tab. 5.1 Přehled materiálových charakteristik z experimentálního měření, hustoty a vlhkosti vzorků. V závorkách jsou uvedeny variační koeficienty.

		E	σ_{\max}	σ_{yield}	E_{tang}	Hustota	Vlhkost
Tlak podél	L	16436.9 (17.6)	77 (10.6)	56.8 (12.6)	2120.5 (39.6)	757.1	11.8
Tlak napříč	R	1766.8 (18.6)	16.3 (15.1)	8.2 (11.8)	185.4 (59.3)	706.9	12.3
	T	1026.4 (21)	14 (11.6)	5.9 (22.4)	110.4 (10)	750.9	12.1
Tah	L	13929.4 (8.2)	6.8 (18.4)	137.2 (14.3)	14282 (7.1)	720.2	11.75
	R	2462.1 (29.4)	6.8 (18.4)	5.9 (25)	1949.4 (37.7)	735.1	12.9
	T	836 (11.9)	7.1 (8.9)	4.8 (10.5)	527 (12)	741.3	11.2
		MOE	MOR			Hustota	Vlhkost
Ohyb		15881.6 (19.6)	110,45 (19.4)	—	—	749	12.8
		G	τ_{\max}	τ_{yield}	G_{tang}	Hustota	Vlhkost
Smyk	LR	1900.43 (15.2)	9.04 (7.46)	6.91 (9.1)	1229.68 (19.8)	702	12.4
	LT	2015.86 (8.8)	12.29 (9.32)	10.14 (11.5)	1285.59 (11.4)	736	13.1
	RT	127.52 (12.8)	42.86 (10)	4.75 (10.4)	77.73 (18.2)	712	12.6

V tabulce 5.2 jsou uvedeny stanovené hodnoty mechanických vlastností z dílčích experimentů pro tlakovou, tahovou, ohybovou a smykovou zkoušku. Dále jsou zde uvedeny průměrné hustoty a vlhkosti vzorků při jejich testování.

Tab. 5.2 Ortotropní elasto-plastické materiálové charakteristiky pro konečno-prvkovou analýzu.

Hustota	Elastická část			
738	MPa	L	R	T
	E	16436.0	627.0	468.0
		LR	RT	LT
	G	1900	127	2015
	ν	0.037	0.326	0.028
	Plastická část			
	MPa	L	R	T
tah	σ_{yield}	56.9	11.1	9.3
	E_{tang}	105	25	15
tlak	σ_{yield}	56.9	11.1	9.3
	E_{tang}	105	25	15
		LR	RT	LT
smyk	τ_{yield}	6.91	4.75	6.14
	G_{tang}	22	5	18

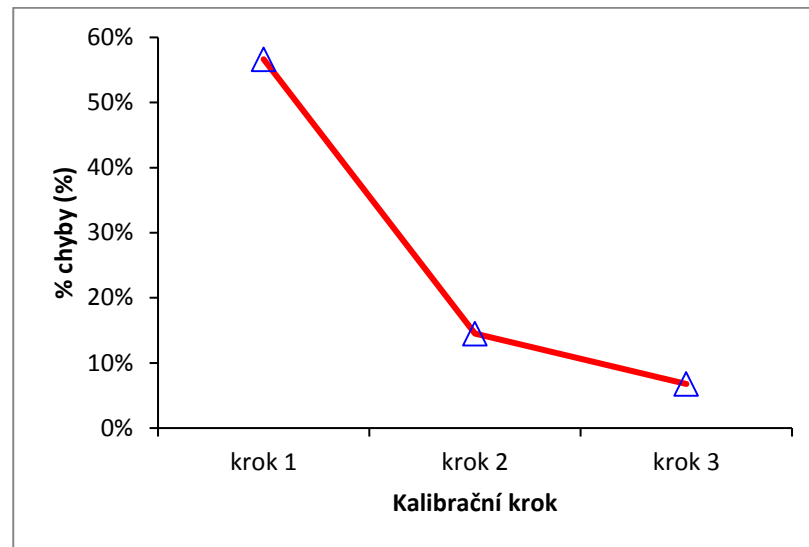
Tabulka 5.3 **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** obsahuje validované materiálové charakteristiky popisující elastickou a plastickou část pracovního diagramu aplikovatelných v numerických analýzách. Uváděné hodnoty materiálových charakteristik byly získány na základě kalibrace, kdy v průběhu jednoho kalibračního kroku byly numericky řešeny čtyři základní výpočty modelů (tlak podél a napříč vláken v R a T směrech, 3-bodý ohyb). Vzájemným porovnáním sledovaných „verifikačních“ parametrů, uvedených v Tab. 5.3, byly stanoveny relativní odchylky (procento chyby - % chyby) podle Rovnice (12), které jsou uvedeny v tabulce 5.4.

Tab. 5.3 Vstupní experimentální data použitá v numerických řešičích v rámci kalibrace materiálového modelu. Výpis jednotlivých vstupních materiálových charakteristik v kalibračních krocích. * tyto materiálové charakteristiky byly stanovovány na základě dat získaných z příčnicku zkušebního stroje.

EXP		FEA			%chyba krok1	%chyba krok2	%chyba krok3
		krok 1	krok 2	krok 3			
E_L	16436	17323	17410	17228	5%	6%	5%
E_R *	627	2067	816	693	230%	30%	11%
E_T *	468	1088	603	529	132%	29%	13%
σ_L	67.6	63.5	60.2	65.6	6%	11%	3%
$\sigma_{yield,R}$	11.3	7.6	11.9	11.2	33%	5%	1%
$\sigma_{yield,T}$	9.1	6.7	10	9.3	26%	10%	2%
E_b	15275	15317	14488	13757	0%	5%	10%
σ_b	110.45	88.2	88.6	99.6	20%	20%	10%
					57%	14%	7%
					krok 1	krok 2	krok 3

Výsledky získané z experimentálního měření a numerických konečně-prvkových analýz pro tlak a 3-bodý ohyb uvádí Tab. 5.3. Ve sloupci „EXP“ vidíme hodnoty materiálových charakteristik pro tlak a ohyb získané z experimentů. Ve sloupcích „FEA“ jsou uvedeny „verifikační“ parametry pro jednotlivé kalibrační kroky, pomocí kterých byla hodnocena shoda numerických a experimentálních dat. Minimální relativní chybová odchylka zajistí přesnost odezvy modelovaného spoje při zatížení. V kroku 1 („krok 1“) je relativní chybová odchylka poměrně vysoká, přesně 57 %, proto bylo nutné provést korekci vstupních hodnot a opakovat výpočty. Výsledkem bylo dosažení $error_{rel} = 14\%$ ve druhém kalibračním kroku („krok 2“). Nejmenší hodnota

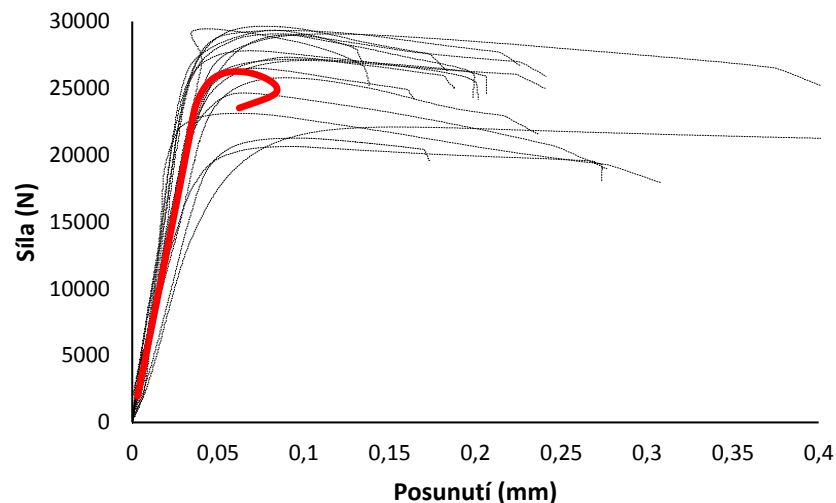
$error_{rel}=7\%$ byla dosažena ve třetím kalibračním kroku („krok 3“). Průběh jednotlivých kalibračních kroků je znázorněn na Obr. 5-1.



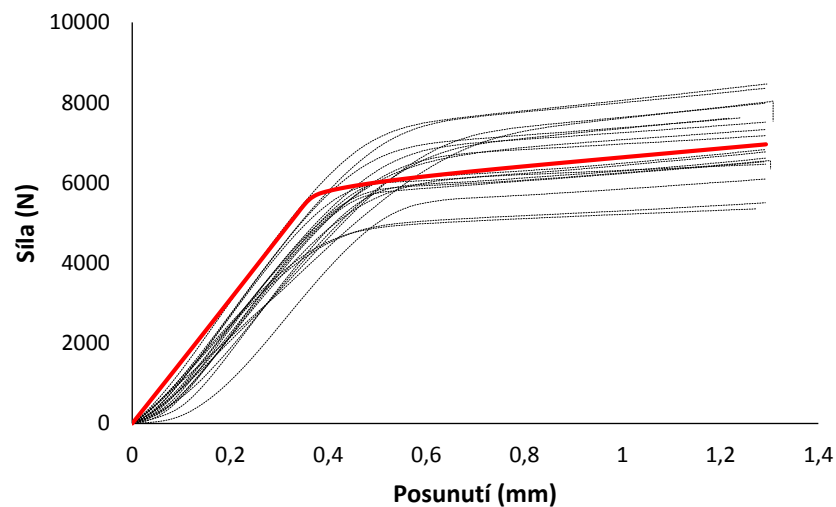
Obr. 5-1 Průběh kalibrace.

Kalibrační proces materiálových charakteristik byl ukončen na základě dosažení nízké 7% relativní odchylky. Další kalibrační krok nebyl nutný vzhledem k tomu, že přirozená variabilita mechanických vlastností se pochybuje v rozmezí 15–30 %, proto další zpřesňování materiálového modelu již by nebylo efektivní. Nejmenší relativní chybové odchylky by zjištěny u $\sigma_{yield,R}$, $\sigma_{yield,T}$ a σ_L . Naopak největší odchylky nastaly u E_R a E_T .

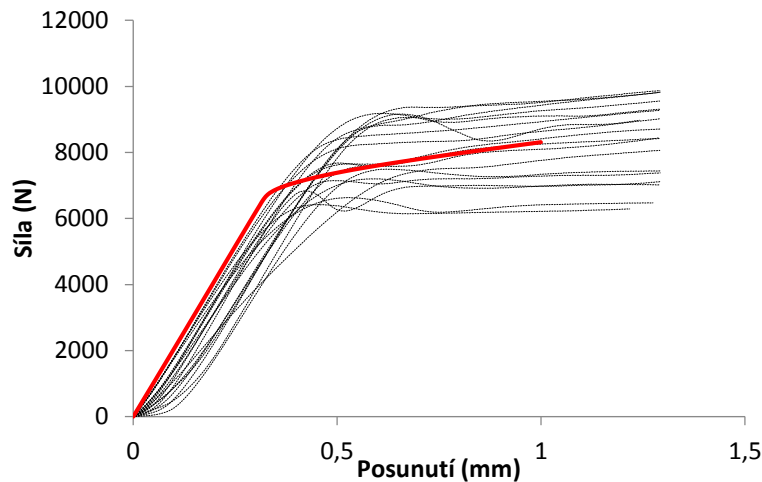
Na následujících obrázcích pracovních diagramů pro tlak podél a napříč vláken v tangenciálním a radiálním směru, jsou prezentovány průběhy pomocí grafů síly a posunutí. Červená křivka znázorňuje numerická data pro elasto-plastického materiálový model, čárkovaně jsou zobrazeny experimentální data.



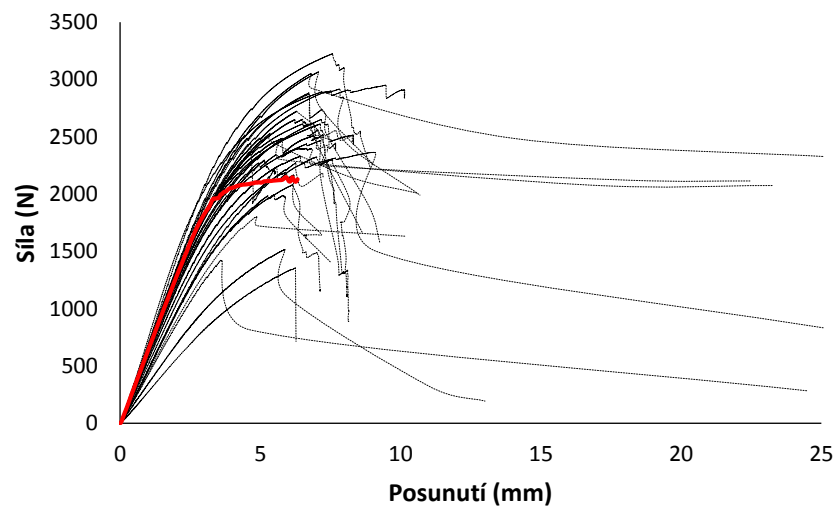
Obr. 5-2 *Experimentální pracovní diagramy a numerická predikce pro zkoušku v tlaku podél vláken. Červená křivka reprezentuje chování elasto-plastického materiálového modelu (FEA).*



Obr. 5-3 *Experimentální pracovní diagramy a numerická predikce pro zkoušku v tlaku napříč vláken v tangenciálním směru. Červená křivka reprezentuje chování elasto-plastického materiálového modelu (FEA).*



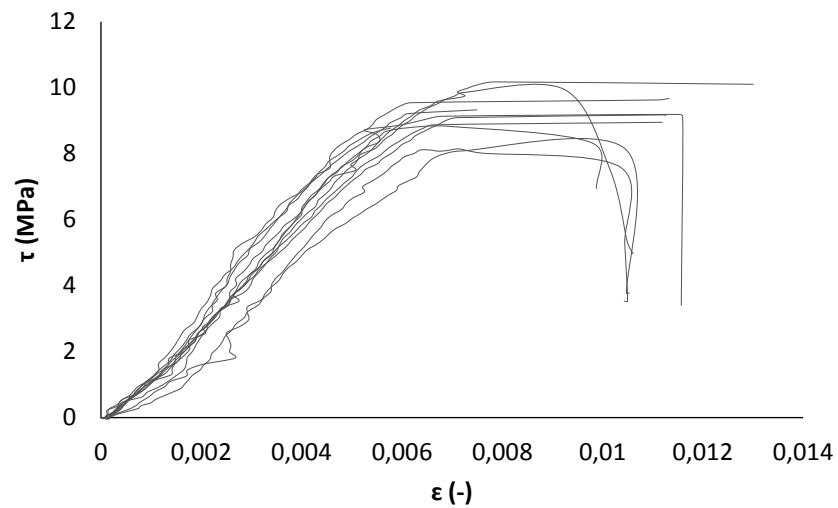
Obr. 5-4 *Experimentální pracovní diagramy a numerická predikce pro zkoušku v tlaku napříč vlákna v radiálním směru. Červená křivka reprezentuje chování elasto-plastického materiálového modelu (FEA).*



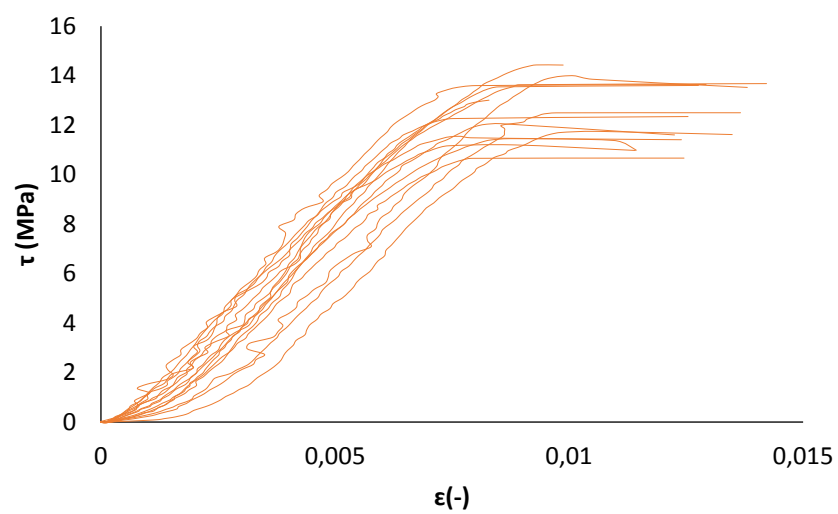
Obr. 5-5 *Experimentální pracovní diagramy a numerická predikce pro zkoušku ve 3-bodém ohybu. Červená křivka reprezentuje chování elasto-plastického materiálového modelu (FEA).*

Na Obr. 5-5 pro ohybovou zkoušku jsou čárkovaně znázorněny experimentální křivky a červená křivka reprezentuje predikci elasto-plastického chování materiálového modelu ve FEA. Zmíněné predikce chování uvedené na Obr. 5-2 až Obr. 5-5 reprezentují validovaný materiálový model ověřený pomocí různých typů zatížení.

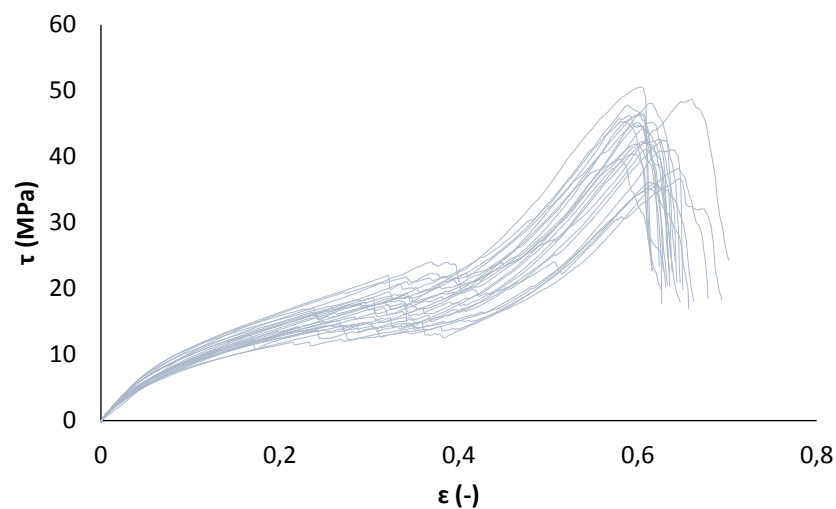
Obr. 5-6 až Obr. 5-11 zobrazují experimentální průběhy pro jednotlivé typy prováděných zkoušek. Tyto napěťově deformační křivky sloužily jako zdrojová data pro stanovení požadovaných materiálových charakteristik vstupující do bilineárního elasto-plastického materiálového modelu



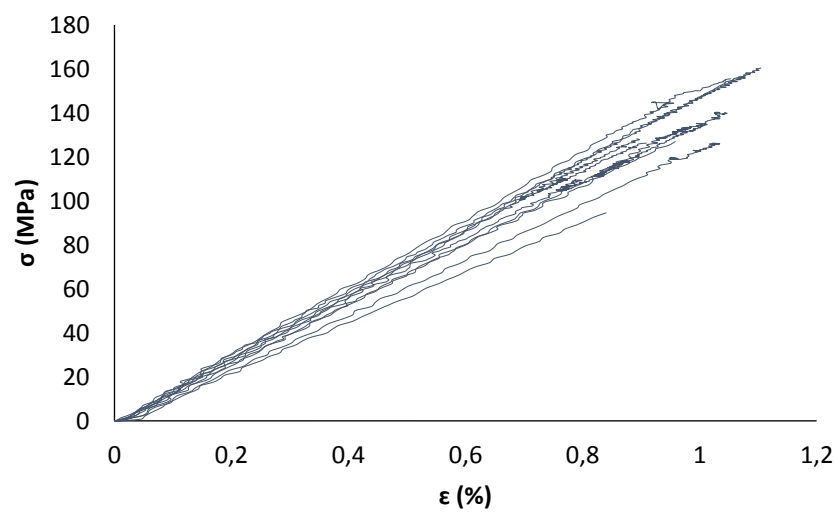
Obr. 5-6 Napětově deformační křivky pro smyk v LR rovině.



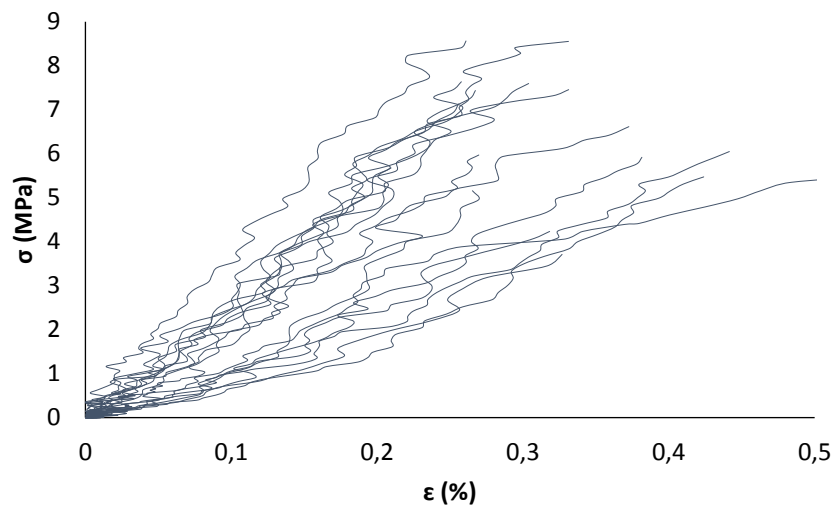
Obr. 5-7 Napětově deformační křivky pro smyk v LT rovině.



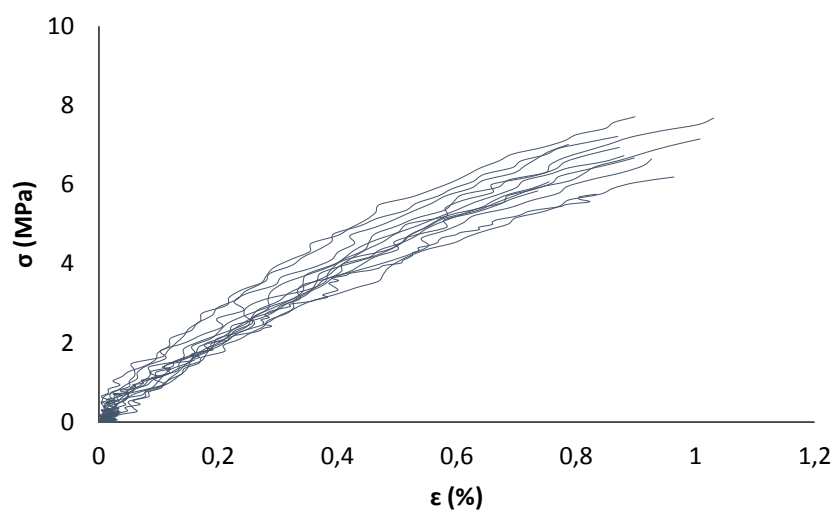
Obr. 5-8 Napěťově deformační křivky pro smyk v RT rovině. Tyto hodnoty nebyly použity do kalibrace materiálového modelu.



Obr. 5-9 Napěťově deformační křivky pro tah podél vláken.

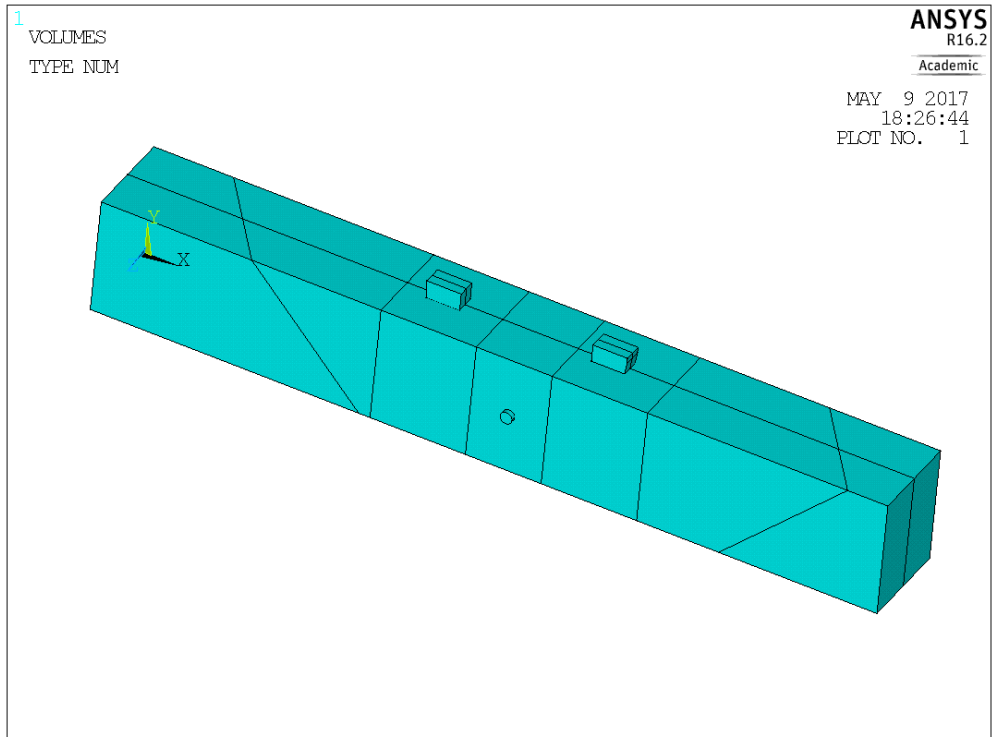


Obr. 5-10 Napětově deformační křivky pro tah napříč vláken v radiálním směru.

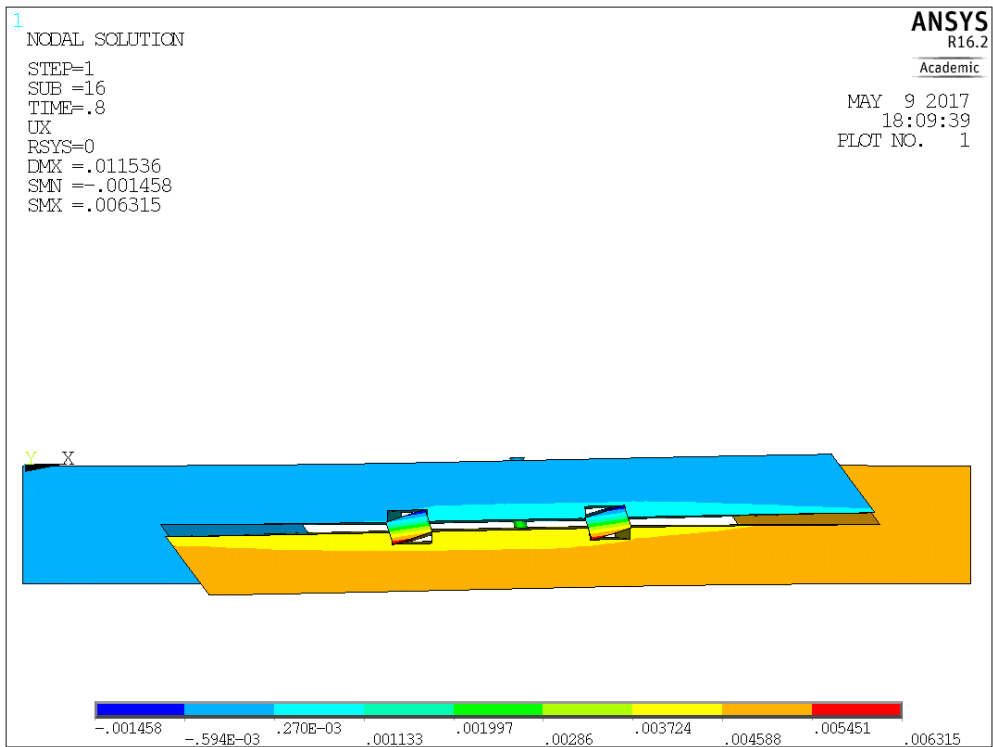


Obr. 5-11 Napětově deformační křivky pro tah napříč v tangenciálním směru.

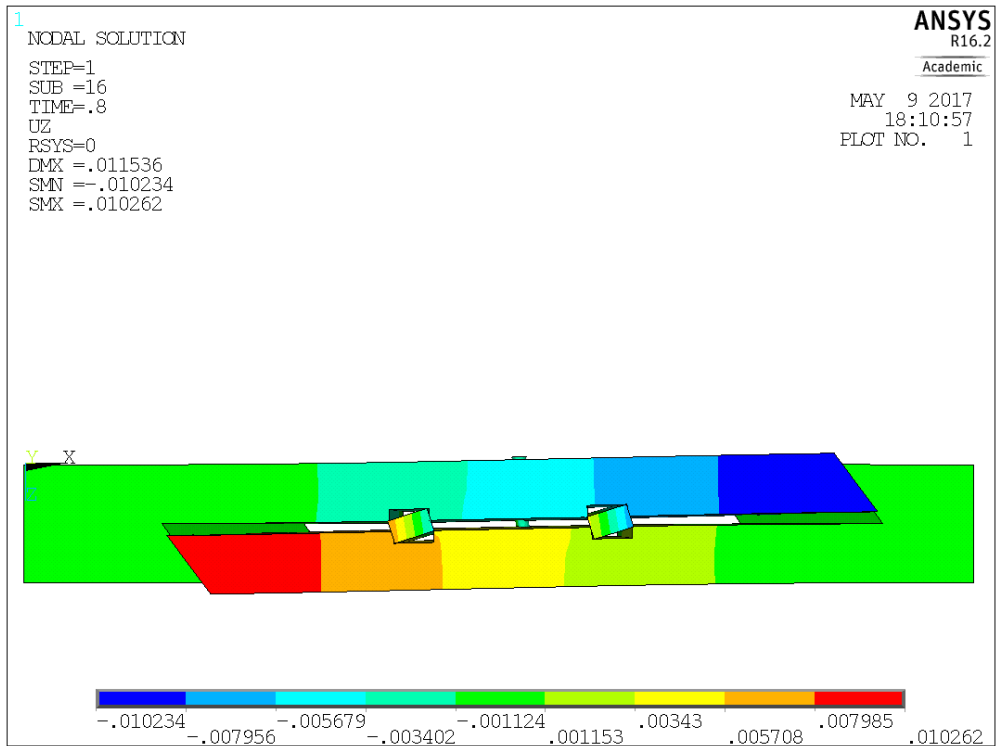
3D model



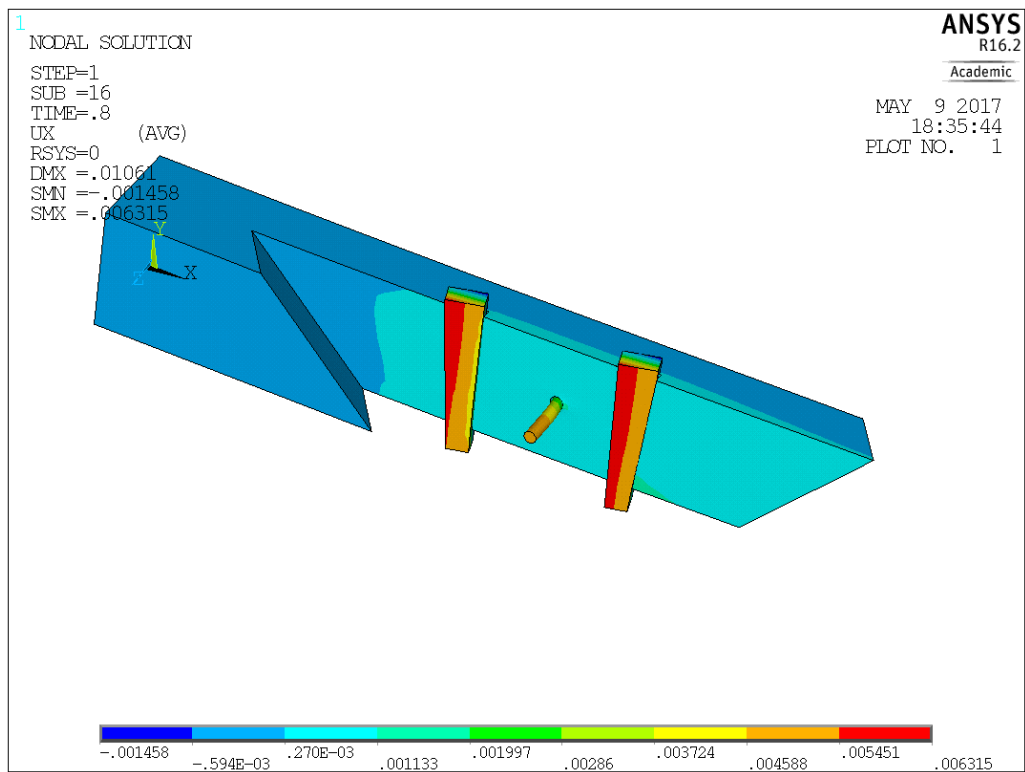
Obr. 5-12 Geometrie 3D spoje



Obr. 5-13 Posunutí v ose X

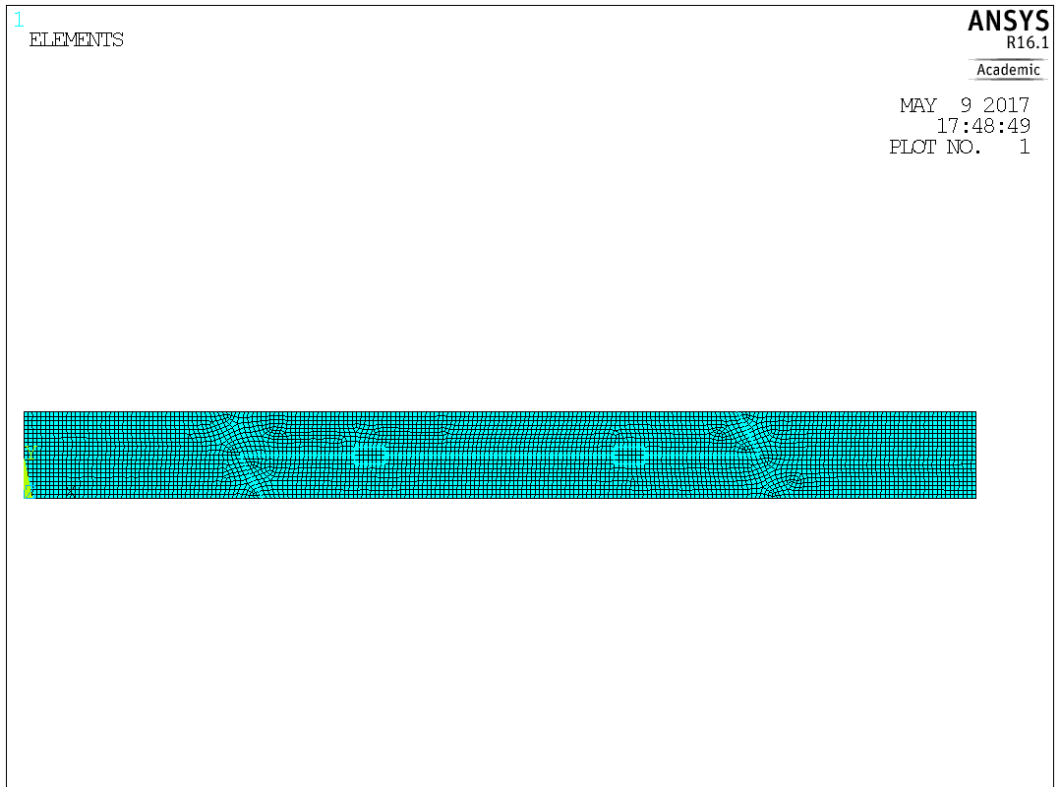


Obr. 5-14 Posunutí v ose Z

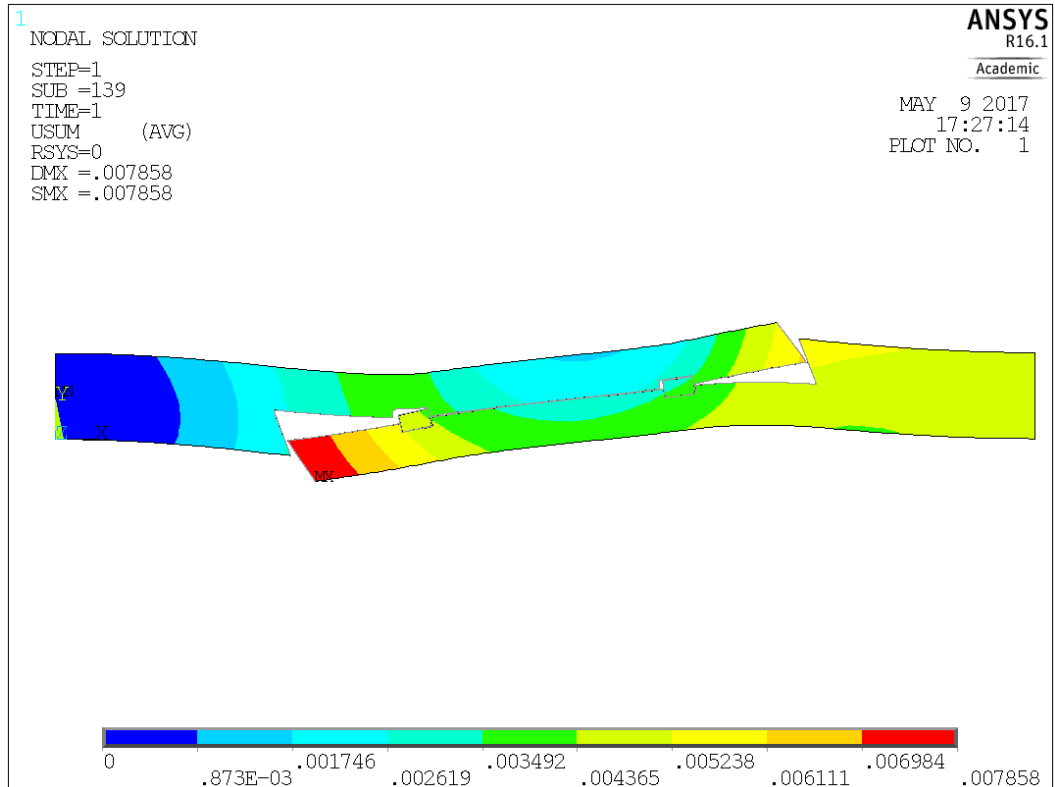


Obr. 5-15 Posunutí hmoždíků a kolíků uvnitř plátu

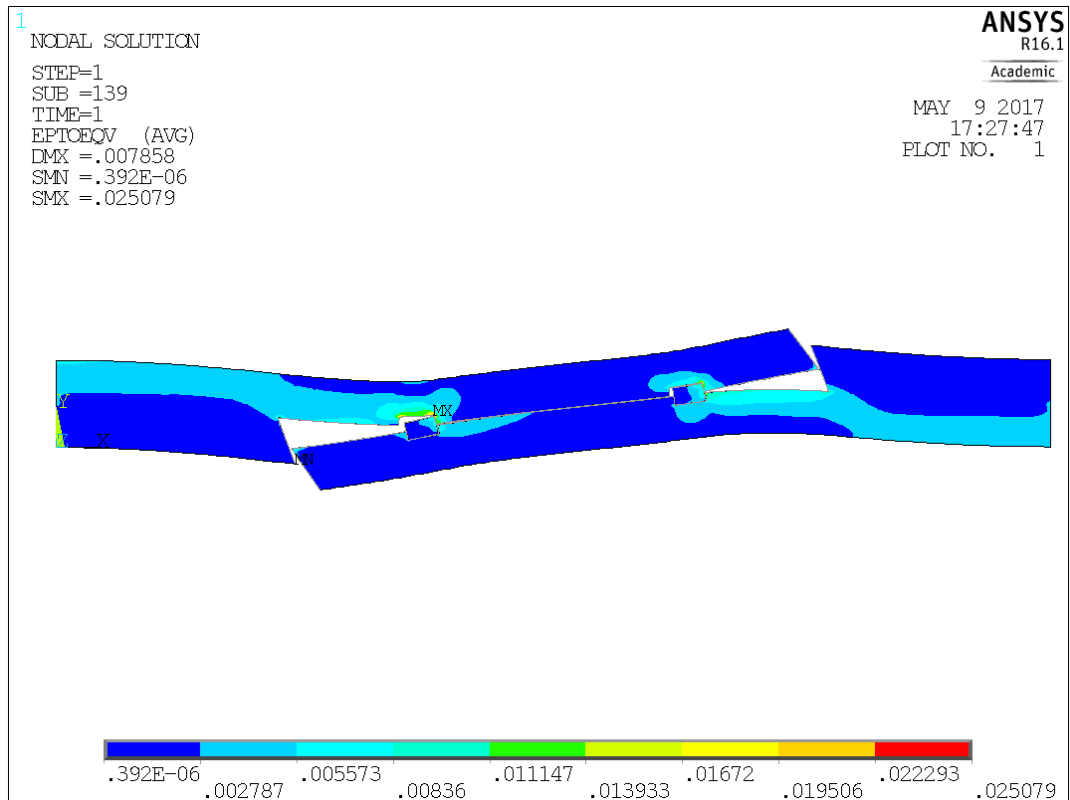
2D model



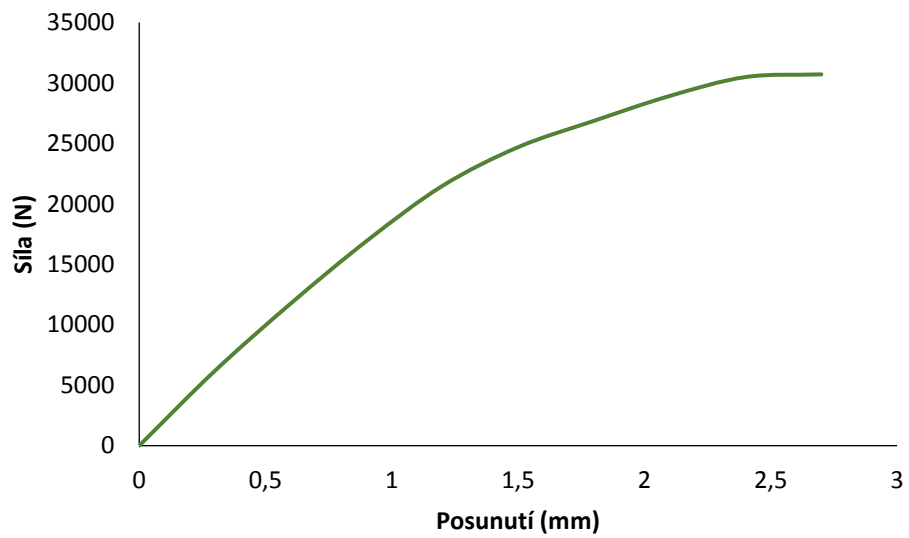
Obr. 5-16 Zobrazení geometrie a vysítování 2D spoje



Obr. 5-17 Celkové posunutí 2D model



Obr. 5-18 Poměrné deformace ve 2D spoji



Obr. 5-19 závislost posunutí na síle zatěžování

6. Diskuze:

Pro stanovení materiálových charakteristik z experimentálního měření byly použity normované vzorky dubu, které se před samotným testováním na dobu 14 dnů umístily do klimatizované místnosti o teplotě vzduchu 20°C a relativní vzdušné vlhkosti 65 %, aby se ustálila jejich vlhkost na 12 % (± 2 %). Tím byla minimalizována variabilita ve výsledných mechanických vlastnostech testovaného dřeva. Zkušební vzorky byly poté postupně testovány na tlak, tah, ohyb a smyk podle odpovídajících norem. Pomocí univerzálního zkušebního stroje a optického setu pro obrazový záznam průběhu zkoušek s následným vyhodnocením pomocí metody DIC byly určeny jednotlivé materiálové charakteristiky. Výpočet materiálových charakteristik se prováděl v MS Excel, kde byly u tlaku, tahu a smyku zjištěny moduly pružnosti, tangenti moduly pružnosti, maximální pevnosti a meze úměrnosti. U ohybové zkoušky se stanovoval modul pružnosti (MOE) a maximální pevnost (MOR). Do elasto-plastického materiálového modelu vstupují materiálové charakteristiky specifikované v

Tab. 5.2. Tyto materiálové charakteristiky byly ve 3 kalibračních krocích validovány a verifikovány pomocí základních numerických modů v programu ANSYS. Experimentální hodnota modulu pružnosti pro tlak podél vláken byla 16436 MPa. Hodnota modulu pružnosti u tlaku napříč v radiálním směru byla 627 MPa a v tangenciálním směru 468 MPa. Ve srovnání s jinou literaturou jsou tyto hodnoty odlišné. Například Požgaj et al. (1993) ve své publikaci uvádí hodnotu E_L 11778 MPa, E_R 2046 MPa a E_T 1028 MPa. Tyto rozdíly dokazují, že není možné určit konkrétní hodnotu dané vlastnosti a že se tyto vlastnosti vykazují značnou přirozenou variabilitu v závislosti na hustotě, vlhkosti, způsobu stanovení apod. Stejně je tomu i u ostatních charakteristik, které nabývají vyšších hodnot, než je uvedeno v literatuře.

Verifikace materiálového modelu byla ukončena třetím kalibračním krokem, kdy bylo dosaženo kompromisního výsledku řešení v závislosti na velikosti odchylky v porovnání s experimentálními daty. Tato průměrná chybová odchylka činila 7 %.

Pro komplexní numerický model plátového spoje s hmoždíky a kolíkem byl použit validovaný materiálový model (viz.

Tab. 5.2). V numerickém modelu plátového spoje byly sledovány deformace a posunutí. Dále byla sledována detailní odezva na styčných plochách spojovaných prvků a spojovacích prostředků. Numerické výpočty zahrnující kontaktní analýzy jsou nelineární a mají vysoké požadavky na výpočetní techniku. Pro modelování spoje byl

použit konečně-prvkový element SOLID95, který umožňuje popis ortotropní chování dřeva. Numerické modely jsou geometricky ideální. Kontaktní plochy jsou homogenní a ideálně rovné, nejsou zde žádné nerovnosti způsobené tesařskou prací.

Na obrázku *Obr. 5-12* je zobrazena geometrie spoje, kde můžeme pozorovat vzhled spoje v 3D prostoru, spojovací prostředky (hmoždíky, kolík) a jednotlivé řezy ve spoji vytvořené v programu ANSYS. Na dalším obrázku vidíme barevně znázorněné posunutí v ose x. Toto posunutí dosahovalo cca 5 mm, jak můžeme vidět v tmavě oranžové oblasti. Zde je dobře patrné, jak se celý spoj rozevívá. Zároveň je zde vidět rotace obou hmoždíků a deformace kolíku. *Obr. 5-13* znázorňuje posunutí v ose z, které dosahovalo okolo 10 mm. Bylo zde tedy zaznamenáno větší posunutí, jak ve směru zatěžování, tedy osy x. Na dalším obrázku vidíme detailně znázorněné posunutí a přetvoření hmoždíků a kolíku. Červená oblast znázorňuje největší posunutí v ose x. Pro srovnání byl materiálový model v další části ověřován a aplikován na 2D numerický model plátového spoje se dvěma hmoždíky. *Obr. 5-16* demonstruje geometrii 2D modelu spoje a jeho vysíťování. Dále zde pozorujeme kontaktní spojení obou plátů. Na následujícím obrázku sledujeme celkové posunutí spoje. Na rozdíl od 3D modelu jsou zde hmoždíky v tahovém směru přilepeny k plátu. Na *Obr. 5-18* sledujeme hlavní deformace na koncích zkosených čel plátů a uvnitř spojení mezi hmoždíky a pláty. Rotace hmoždíků je zde závislá na vybočení plátu, jelikož jsou hmoždíky k plátu přilepeny. I přesto, že měly pláty zkosená čela, tak se spoj rozevřel, což je vidno právě na *Obr. 5-18*. Poslední *Obr. 5-19* vyjadřuje závislost posunutí na síle zatížení a dokazuje nelineární chování spoje.

7. Závěr:

Tato práce byla zaměřena na stanovení materiálových charakteristik aplikovaných v konečno-prvkové analýze pro dub, kde bylo zohledněno chování ortotropního elasto-plastického materiálu s izotropním nelineárním vytvrzením. Nově vytvořené elasto-plastické modely byly validovány na základě experimentálních dat získaných při tlaku podél a napříč vláken a tříbodém ohybu. Získané numerické hodnoty byly v souladu s experimentálními daty. Numerické elasto-plastické modely v tlaku a tříbodém ohybu umožnily předpovědět nejvyšší pevnost dřeva. Tyto modely byly úspěšně zavedeny a ověřeny v řešení složitějšího konstrukčního spoje a prokázaly jejich potencionální využití v hodnocení dřevěných prvků a konstrukcí.

8. Summary:

This paper evaluated the mechanical behavior of the structural plate joint with oak dowels and pin. An important part was the determination of material properties, ie oak, using experimental test specimen loading and digital image correlation (DIC). These material properties were applied in the finite element analysis, where the orthotropic elastoplastic behavior of the material was taken into account. The newly created elastoplastic material models were calibrated and then used to construct a complex numerical model of the all-wood joint. Consequently, the junction behavior of the joint was evaluated. The field of displacement, deformation and tension was observed on the formed coupling model. As a result of our research, we have come to the conclusion that the verified models demonstrate the use for the assessment of wood elements and structures.

9. Přehled literatury:

JELÍNEK L., Tesařské konstrukce., Informační centrum České komory autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě., ČKAIT Praha, 2003. ISBN 801-86364-98-4.

VINAŘ J. a kol., Historické krovy I. Konstrukce a statika., Grada Publishing, a. s. 2004. ISBN 80-7169-575-0.

VINAŘ J., KAUFNER, V., Historické krovy: Typologie, Průzkum, Opravy. Praha: Grada publishing, 2010. 978-80-247-3038-7.

HOFFSUMMER P., L'évolution des charpents des toitures en Belgique et dans le nord de la France. Conference Le bois dans l'architecture, 1993.

GERNER M., Tesařské spoje. Praha: Grada, 2003. ISBN 80-247-0076-X.

KUKLÍK P. KUKLÍKOVÁ A., Navrhování dřevěných konstrukcí: příručka k ČSN EN 1995-1. Praha: Pro Ministerstvo pro místní rozvoj a Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě vydalo Informační centrum ČKAIT, 2010. ISBN 978-80-87093-88-7.

KUNECKÝ J., FAJMAN P., HASNÍKOVÁ H., KUKLÍK P., KLOIBER M., SEBERA V., TIPPNER J., Celodřevěné plátové spoje pro opravy historických konstrukcí: metodika. Praha: [Ústav teoretické a aplikované mechaniky Akademie věd České republiky, v.v.i.], 2015. ISBN 978-80-86246-64-2.

PETER W.H. and RANSON W.F., Digital imaging technique in experimental stress analysis. Opt. Eng. 1982., 21: 427-431

KOLÁŘ V., NĚMEC I., KANICKÝ V., FEM - Principy a praxe metody konečných prvků. Praha: Computer Press, 1997. ISBN 80-7226-021-9.

REINPRECHT L., ŠTEFKO J., Dřevěné stropy a krovy: Typy, poruchy, průzkumy a rekonstrukce. Praha: ABF, 2000. ISBN 80-86165-29-9.

KOHOUT J., TOBEK A., MÜLLER P., Tesařství: tradice z pohledu dneška. 8., upr. a dopl. vyd. Praha: Grada, 1996. ISBN 80-7169-413-4.

KOŽELOUH B., Dřevěné konstrukce podle eurokódu 5. Step 1., Navrhování a konstrukční materiály. Zlín, c1998. ISBN 80-238-2620-4.

VIGUÉ J. (vedoucí projektu), Dřevo od A do Z. Čestlice: Rebo, 2006. ISBN 80-7234-531-1.

GIBBS N., Dřevo: obrazový přehled více než 100 druhů dřev včetně jejich využití. V Praze: Slovart, 2005. ISBN 80-7209-720-2.

POŽGAJ A., Štruktúra a vlastnosti dreva. Bratislava: Príroda, 1993. ISBN 80-07-00600-1.

WAGENFÜHR R., Dřevo: obrazový lexikon. Praha: Grada, 2002. ISBN 80-247-0346-7.

Elektronické zdroje:

FAJMAN P., KUNECKÝ J., HASNÍKOVÁ H., 2015, Navrhování celodřevěných tesařských spojů, Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/navrhovani-celodrevenych-tesarskych-spoju/>

Použité normy:

ČSN EN 1991-1-3 (730035) - Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-3: Obecná zatížení - Zatížení sněhem (2005)

ČSN EN 1991-1-4 (730035) - Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem (2007)

ČSN 49 0110 Drevo. Medza pevnosti v tlaku v smere vláken (1980)

ČSN 49 0111 Skúšky vlastností rastlého dreva. Metóda zisťovania modulu pružnosti v tlaku pozdĺž vláken (1992)

ČSN 49 0112 Drevo. Tlak naprieč vláken (1979)

ČSN 49 0113 Skúšky vlastností rastlého dreva. Metóda zisťovania pevnosti v ťahu pozdĺž vláken (1992)

ČSN 49 0114 Skúšky vlastností rastlého dreva. Metóda zisťovania pevnosti v ťahu naprieč vláken (1992)

ČSN 49 0115 Drevo. Zisťovanie medze pevnosti v statickom ohybe (1979)

ČSN 49 0116 Drevo. Metóda zisťovania modulu pružnosti pri statickom ohybe (1982)

ČSN 49 0118 Drevo. Medza pevnosti v šmyku v smere vláken (1980)

ASTM D143

10. Seznam obrázků

Obr. 3-1 Proměny sklonů střech (Hoffsummer 1993)	11
Obr. 3-2 Typy krovů krokevní soustavy (Vinař 2010)	12
Obr. 3-3 Typy krovů hambalkové soustavy s volným hambalkem (Vinař 2010)	12
Obr. 3-4 Typy krovů vaznicové soustavy (Vinař 2010)	13
Obr. 3-5 Zatížení šikmých prvků tlakem a ohybem (Vinař 2004).....	13
Obr. 3-6 Tupý sraz (Gerner 2003).	16
Obr. 3-7 Rybinový čep (čep na čele do rybiny) (Gerner 2003).....	17
Obr. 3-8 Vlevo rovný plátový spoj, vpravo šikmý plátový spoj (Gerner 2003).....	18
Obr. 3-9 Rovný kamp rohový (Gerner 2003).	18
Obr. 3-10 Zadrápnutí čelním zářezem v krokvi (sedláni čelem krokve) (Gerner 2003)	19

Obr. 3-11 Plátový spoj s podkosenými šikmými čely zajištěný dvěma hmoždíky a jedním kolíkem (foto Kunecký).....	20
Obr. 4-1 Unikátní, náhodně skvrnitý vzor, tzv. „speckle pattern“	24
Obr. 4-2 Zkušební stroj Zwick Z050 (převzato z: www.zwick.com).....	25
Obr. 4-3 Horní dva vzorky – tlak podél vláken, spodní dva vzorky – tlak napříč vláken (šipky naznačují směr zatížení).....	25
Obr. 4-4 Tlakové zatížení napříč (vlevo) a podél (vpravo) vláken.....	26
Obr. 4-5 Tahová tělíska zkoušky napříč vláken s naznačeným směrem zatížení.	26
Obr. 4-6 Tahové tělísko zkoušky podél vláken s naznačeným směrem zatížení.....	26
Obr. 4-7 Tahové zatížení podél (vlevo) a napříč (vpravo) vláken.....	27
Obr. 4-8 Smyková tělíska podél vláken (nahore) a napříč vláken (dole) s naznačeným směrem zatížení.	28
Obr. 4-9 Smykové zatížení napříč vláken v RT rovině (vlevo) a podél vláken v LT rovině (vpravo).	28
Obr. 4-10 Ohybové tělísko s naznačením směru zatížení a statickými podpěrami.	29
Obr. 4-11 Ohybová zkouška.	29
Obr. 4-12 Foto z kalibrace snímacího zařízení.	30
Obr. 4-13 Bilineární elasto-plastický model.....	34
Obr. 4-14 Konečný element SOLID 95 (převzato z: ANSYS manual).....	35
Obr. 4-15 Schéma plátového konstrukčního spoje s hmoždíky a kolíkem.....	36
Obr. 4-16 Schéma dubového hmoždíku.	37
Obr. 5-1 Průběh kalibrace.....	40
Obr. 5-2 Experimentální pracovní diagramy a numerická predikce pro zkoušku v tlaku podél vláken. Červená křivka reprezentuje chování elasto-plastického materiálového modelu (FEA).	41
Obr. 5-3 Experimentální pracovní diagramy a numerická predikce pro zkoušku v tlaku napříč vláken v tangenciálním směru. Červená křivka reprezentuje chování elasto-plastického materiálového modelu (FEA).	41
Obr. 5-4 Experimentální pracovní diagramy a numerická predikce pro zkoušku v tlaku napříč vláken v radiálním směru. Červená křivka reprezentuje chování elasto-plastického materiálového modelu (FEA).	42
Obr. 5-5 Experimentální pracovní diagramy a numerická predikce pro zkoušku ve 3-bodém ohybu. Červená křivka reprezentuje chování elasto-plastického materiálového modelu (FEA).	42

Obr. 5-6 Napětově deformační křivky pro smyk v LR rovině.	43
Obr. 5-7 Napětově deformační křivky pro smyk v LT rovině.	43
Obr. 5-8 Napětově deformační křivky pro smyk v RT rovině. Tyto hodnoty nebyly použity do kalibrace materiálového modelu.	44
Obr. 5-9 Napětově deformační křivky pro tah podél vláken.....	44
Obr. 5-10 Napětově deformační křivky pro tah napříč vláken v radiálním směru.	45
Obr. 5-11 Napětově deformační křivky pro tah napříč v tangenciálním směru.....	45
Obr. 5-12 Geometrie 3D spoje.....	46
Obr. 5-13 Posunutí v ose X.....	46
Obr. 5-14 Posunutí v ose Z.....	47
Obr. 5-15 Posunutí hmoždíků a kolíku uvnitř plátu	47
Obr. 5-16 Zobrazení geometrie a vysítování 2D spoje	48
Obr. 5-17 Celkové posunutí 2D model.....	48
Obr. 5-18 Poměrné deformace ve 2D spoji	49
Obr. 5-19 závislost posunutí na síle zatěžování.....	49

11. Seznam tabulek

Tab. 5.2 Přehled materiálových charakteristik z experimentálního měření, hustoty a vlhkosti vzorků. V závorkách jsou uvedeny variační koeficienty.	38
Tab. 5.3 Ortotropní elasto-plastické materiálové charakteristiky pro konečno-prvkovou analýzu.	38
Tab. 5.4 Vstupní experimentální data použitá v numerických řešičích v rámci kalibrace materiálového modelu. Výpis jednotlivých vstupních materiálových charakteristik v kalibračních krocích. * tyto materiálové charakteristiky byly stanovovány na základě dat získaných z příčnicku zkušebního stroje.	39