

MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ

Fakulta lesnická a dřevařská

Ústav nauky o dřevě



**Mechanické vlastnosti vrstveného konstrukčního dřeva ze
smrku spojovaného kolíky.**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2016

JAN LIŠKA

Rád bych poděkoval Prof. Dr. Ing. Petru Horáčkovi za odborné vedení mojí bakalářské práce, za vstřícnost, ochotu, užitečné rady a zejména za plodné diskuze, které vedly k úspěšnému zpracování a dokončení této práce.

Čestné prohlášení

*Prohlašuji, že jsem tuto práci: „**Mechanické vlastnosti vrstveného konstrukčního dřeva ze smrku spojovaného kolíky**“ vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace jsou uvedeny 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 o tom, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně, květen 2016

.....

ABSTRAKT

Základním cílem bakalářské práce bylo experimentální stanovení vybraných mechanických vlastností vrstvených panelů, vyrobených z konstrukčního smrkového dřeva, destruktivním způsobem dle ČSN EN 408. Vyrobené panely z křížem skládaného smrkového řeziva, spojeny bukovými kolíky bez použití lepidla, byly vyrobeny ve dvou variantách tří a pětivrstvé.

Z vyrobených panelů byla nařezána zkušební tělesa, která byla postupně zatěžována 4-bodým ohybem pro zjištění meze pevnosti v ohybu a ohybového modul pružnosti. Pro zjištění smykového modulu pružnosti byl využit 3-bodý ohyb. Postupy zkoušek a výpočty daných vlastností byly provedeny dle předpisu v ČSN EN 408. Výsledky získané experimentálním měřením byly vyhodnoceny a srovnány s třídami pevnosti konstrukčního dřeva.

Klíčová slova

Smrk, panel, ohyb, smyk, pevnost, modul pružnosti

ABSTRACT

The main aim of the thesis was an experimental determination of mechanical properties of laminated panels made of construction spruce wood by destructive methods according to EN 408. Panels were made of crosswise stacked spruce lumber connected with beech pins without the use of adhesives. Two versions were produced - three and five-layer panels.

Manufactured panels were cut into test specimens which were gradually loaded with 4 points bending to determine maximal bending strength and modulus of elasticity. To determine the shear modulus 3 points bending were used. Test procedures and calculations of the properties were carried out as prescribed in EN 408. The results obtained by experimental measurements were evaluated and compared with the strength classes of structural timber.

Keywords

Spruce, panel, bending, shear, strength, modulus of elasticity

OBSAH

1	ÚVOD	10
2	CÍL PRÁCE	11
3	LITERÁRNÍ PŘEHLED	12
3.1	Dřevěné stavby	12
3.1.1	Rámové dřevostavby	12
3.1.2	Skeletové dřevostavby	14
3.1.3	Masivní dřevostavby	14
3.1.4	Ostatní konstrukce	16
3.2	Třídění řeziva	17
3.3	Použitá dřeva	21
3.3.1	Smrk	21
3.3.2	Buk	21
3.4	Fyzikální vlastnosti dřeva	22
3.4.1	Vlhkost	22
3.4.2	Bobtnání a sesýchání dřeva	23
3.4.3	Hustota	24
3.4.4	Rychlost šíření zvuku	26
3.5	Mechanické vlastnosti dřeva	26
3.5.1	Pružnost	27
3.5.2	Pevnost	27
4	METODIKA	29

4.1	Experiment.....	29
4.1.1	Výroba panelů	29
4.1.2	Třídění řeziva	29
4.2	Výpočet hodnot z experimentu	30
4.2.1	Schéma čtyř-bodého ohybu	31
4.2.2	Vzorce.....	31
4.3	Vyhodnocení naměřených dat.....	34
5	MATERIÁL	35
5.1	Výroba panelů.....	35
5.1.1	Výroba prken.....	38
5.1.2	Výroba kolíků.....	39
5.2	Výroba zkušebních těles	40
6	VÝSLEDKY	42
6.1	Ohyb.....	42
6.1.1	Třívrstvé panely	43
6.1.2	Pětivrstvé panely	49
6.2	Smyk.....	54
6.2.1	1 lamela	54
6.2.2	2 lamely	55
6.2.3	Bokem	55
6.2.4	Srovnání panelů dle počtu vrstev.....	56
6.2.5	Obrázky porušení	57

7	DISKUZE	59
8	ZÁVĚR	63
9	SUMMARY	64
10	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	65

1 ÚVOD

Dřevo je jeden z nejdéle používaných materiálů pro stavbu nejen obydlí lidí a hospodářských staveb, ale i mostů a jiných konstrukcí. V dnešní době, kdy je výzkum nových materiálů na vysoké úrovni se dřevo dostává opět do popředí stavebních materiálů, ať už jako rostlé dřevo, kterého se těží stále více po celém světě, či různé nové materiály na bázi dřeva. Dřevo jako možný materiál budoucnosti je podrobován stálému výzkumu, který zaručuje neustálé zdokonalování nejen jeho obrábění, ale i zpracování.

Výsledkem jsou nejen další nové materiály na bázi dřeva, či lepené rostlé dřevo, ale i masivní panely, které nejsou spojované lepidlem ale pouze bukovými kolíky. Tento systém panelové konstrukce dřevostaveb uvedla rakouská firma Thoma – Holz. Lamely z rostlého dřeva jsou spojovány výhradně bukovými kolíky, kde se využívá bobtnání a sesychání dřeva, k vytvoření dostatečně pevného spoje.

Panely vyrobené pro tuto bakalářskou práci jsou inspirovány právě tímto systémem výroby masivních dřevostaveb a jsou navrženy ve více variantách pro určité srovnání hodnot mechanických vlastností. Podobné panely jsou víceméně novinkou, proto není dostatek odborné literatury, která by se zabírala touto problematikou. Ani samotná firma Thoma – Holz neuvádí příliš mnoho informací ohledně jeho vlastností, ať už fyzikálních či mechanických.

2 CÍL PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je experimentálně stanovit vybrané mechanické vlastnosti vrstvených panelů ze smrkového konstrukčního dřeva destruktivním způsobem dle ČSN EN 408.

Křížem vrstvené lamely se smrkového dřeva budou spojeny kolíkovým spojem z bukového dřeva, bez použití lepidla. Panely budou vyrobeny ve dvou variantách, tří a pětivrstvé. Z těchto panelů budou vyřezána zkušební tělíska. Tělíska budou mít výšku podle mocnosti panelu a šířka bude vymezena počtem lamel. Vzniknou tedy čtyři skupiny vzorků pro oba druhy panelů, tedy vzorky o šířce jedné až čtyř lamel.

Všechna zkušební tělíska budou podrobena ohybové zkoušce, ze které stanovíme meze pevnost, lokální a globální modul pružnosti v ohybu a smykový modul pružnosti. Takto získaná data budou porovnána mezi jednotlivými vzorky různé šířky, mezi oběma druhy panelů a zároveň s odbornou literaturou, tedy se třídami pevnosti konstrukčního dřeva.

3 LITERÁRNÍ PŘEHLED

3.1 Dřevěné stavby

Pro realizaci staveb ze dřeva se používá nejčastěji dřevo smrku a jedle, či dalších dřevin. Smrk je vhodný nejen z hlediska ceny, ale zejména pro jeho mechanické vlastnosti. Smrkové dřevo je lehké, měkké, tudíž snadněji opracovatelné, ale zároveň pevné a pružné.

Pro všechny stavby ze dřeva je důležitá jeho ochrana. Dřevo totiž podléhá degradaci vlivem působení abiotických a biotických činitelů. U staveb je tedy důležitá nejen ochrana samotného stavebního materiálu, například proti dřevokaznému hmyzu a houbám vhodnou impregnací, ale i vhodný návrh konstrukčního řešení. V současné době se obytné dřevostavby dělí na konstrukce rámové, skeletové a masivní.

3.1.1 Rámové dřevostavby

Rámové dřevostavby, jak je patrné z názvu, jsou tvořeny nosným rámem, kde jsou stěny ztuženy vodorovnými prkny, či dnes více používanými velkoplošnými materiály na bázi dřeva. Stejně tak je složen i rám pro konstrukční řešení stropu a střechy. Do konečné skladby stěny patří samozřejmě i tepelná izolace, či pohledové vrstvy ať už vnější či vnitřní. Rámové dřevostavby lze dělit na dvě skupiny, podle stupně předvýroby. První skupinou je realizace přímo na místě stavby, kde se jednotlivé rámy sestavují a spojují natupo ve vodorovné poloze. (obr. 1) Celá stěna je pak zvednuta do svislé polohy. Takto vystavěné stěny každého podlaží jsou svázány dalším vodorovným prvkem, který slouží jako obvodový věnec. Druhou skupinou jsou stavby s vyšším stupněm prefabrikace. Výroba probíhá v hale, kde je sestavena celá stěna rámové konstrukce, je z obou stran opláštěná velkoplošnými materiály a vyplněná tepelnou izolací. Do takto vytvořeného panelu lze podle projektové dokumentace provádět rozvody instalací, vsazovat okna, či provést konečnou povrchovou úpravu i s vnějším zateplovacím systémem. Takto vytvořené stěny jsou transportovány na staveniště a smontovány k sobě. (Obr. 2). (Kolb 2008)



Obr. 1 Rámová konstrukce



Obr. 2 Panelová výstavba

3.1.2 Skeletové dřevostavby

Skeletové dřevostavby jsou tvořeny svislými vodorovnými prvky, se šikmými výztužemi, které jsou spojeny tesařskými, nebo inženýrskými spoji (Obr. 3). Takto sestavená kostra je samonosná, a není tedy potřeba stěny ztužovat velkoplošnými materiály. Stěny jsou pouze výplní této soustavy a jsou budovány nezávisle. Z historie známe hrázděné konstrukce, které můžeme také zařadit mezi skeletové soustavy. Na rozdíl od staveb rámových lze jednotlivé sloupy skeletové soustavy navrhnout s větším rozpětím, při použití lepeného lamelového dřeva až několik metrů, tudíž lze do stěn umisťovat velkoplošná okna, či vytvářet větší a vzdušnější místnosti. (Kuklík 1994)



Obr. 3 Skeletová konstrukce

3.1.3 Masivní dřevostavby

Masivní dřevostavby lze dělit na klasické srubové a moderní panelové stavby. Srubové stavby jsou tvořeny vodorovně uloženými hranoly, či odkorněnými výřezy, které jsou v rozích spojeny různými tesařskými spoji. Klasický srub se staví na místě, ručním

opracováním odkorněných kmenů a stěna je tvořena pouze vrstvou dřeva. V dnešní době se také staví srubové domy s dvojitou stěnou, do které je vložena izolace. Moderní roubené domy lze vyrobit podle projektové dokumentace z lepených hranolů, které jsou hoblované a jednotlivé tesařské spoje jsou provedeny na CNC strojích s maximální přesností (Obr. 4). Takovéto předpřipravené části se po transportu na staveniště pouze poskládají jako stavebnice. Čím se ušetří čas potřebný pro výstavbu tak i peníze za materiál.

Panelová konstrukce z masivního dřeva vzniká ve výrobních halách. Dřevo je lepeno či jinak spojováno do vrstev, které bývají proti sobě otočeny o 90 stupňů, což napomáhá udržení tvarové stálosti panelu i při změnách vlhkosti. Takto lepené dílce se skládají a montují dohromady. Takto vytvořenou hrubou stavbu lze obložit vnějším izolačním systémem. Vnitřní povrch stěny může být pohledový. Existují však i další systémy konstrukčního řešení masivních dřevostaveb, například kdy je stěna tvořena panelem, který je lepen z lamel, které jsou skládány širší stranou k sobě. Šířka prkna tedy udává šířku takového masivního bloku. (Kolb 2008)



Obr. 4 Detail roubení z lepeného dřeva

3.1.4 Ostatní konstrukce

Dřevo lze použít i pro výstavbu staveb větších rozměrů. Ať už se jedná o sportovní či výrobní haly, mosty či rozhledny. U takovýchto projektů se používá lepeného lamelového dřeva, které lépe odolává napětí, z důvodu odstranění vad ze dřeva použitého při jejich výrobě, ale také povětrnostním vlivům, což je využito u staveb, jako jsou mosty (obr. 5), kdy nosná konstrukce není chráněna a je pohledová. I takto lepené konstrukce je nutné chránit vhodně zvolenou impregnací a konstrukční ochranou dřeva, která zajistí dlouhou životnost a stálou pevnost takto navrhnutých konstrukcí.



Obr.5 Dřevěná mostní konstrukce

3.2 Třídění řeziva

Rostlé dřevo, které je použito při stavbě a záleží u něj tedy na pevnosti a tuhosti ale i trvanlivosti je nutné roztrždit, aby bylo možné použít dřevěné nosníky s předepsanou nosností. Pro třídění mechanicky namáhaného rostlého dřeva platí norma ČSN EN 338. Tato norma rozděluje dřevo do pevnostních tříd. (Tab. 1 a 2) Do těchto tříd lze zařadit i konstrukční dřevo nastavované zubovitým spojem.

Při moderním navrhování staveb na bázi dřeva se často používají také lepené prvky. Nejen již zmíněné konstrukční dřevo nastavované zubovitým spojem, které dosahuje lepších vlastností z důvodu odstranění vad ve dřevě, ale také celé nosníky. Nosníky vyráběné lepením více lamel na sebe právě ze dřeva nastavovaného zubovitým spojem, lze využít i pro rozpětí několik desítek metrů. Dosáhneme toho hlavně tím, že můžeme poskládat takřka jakoukoliv dimenzi nosníku, bez ztráty jeho vlastností. Takto lepené dřevo se dělí do tříd dle normy ČSN EN 1194 (Tab. 3). (Kolb 2008)

Tab. 1 Vybrané mechanické vlastnosti dle ČSN EN 338

Třída řeziva	Pevnosti (N/mm ²)					
	Ohyb	Tah ve směru vláken	Tah kolmo na vlákna	Tlak ve směru vláken	Tah kolmo na vlákna	Smyk
	$f_{m,k}$	$f_{t,0,k}$	$f_{t,90,k}$	$f_{c,0,k}$	$f_{c,90,k}$	$f_{v,k}$
C14	14	8	0,4	16	2	3
C16	16	10	0,4	17	2,2	3,2
C18	18	11	0,4	18	2,2	3,4
C20	20	12	0,4	19	2,3	3,6
C22	22	13	0,4	20	2,4	3,8
C24	24	14	0,4	21	2,5	4
C27	27	16	0,4	22	2,6	4
C30	30	18	0,4	23	2,7	4
C35	35	21	0,4	25	2,8	4
C40	40	24	0,4	26	2,9	4
C45	45	27	0,4	27	3,1	4
C50	50	30	0,4	29	3,2	4
D18	18	11	0,6	18	7,5	3,4
D24	24	14	0,6	21	7,8	4
D30	30	18	0,6	23	8	4
D35	35	21	0,6	25	8,1	4
D40	40	24	0,6	26	8,3	4
D50	50	30	0,6	29	9,3	4

Tab. 2 Vybrané mechanické vlastnosti dle ČSN EN 338

Třída řeziva	Tuhost (kN/mm ²)				Hustota (kg/m ³)
	Modul pružnosti ve směru vláken	Modul pružnosti ve směru vláken (5%)	Modul pružnosti kolmo k vláknům	Smykový modul pružnosti	
	E _{0,mean}	E _{0,05}	E _{90,mean}	G _{mean}	ρ _{mean}
C14	7	4,7	0,23	0,44	350
C16	8	5,4	0,27	0,5	370
C18	9	6	0,3	0,56	380
C20	9,5	6,4	0,32	0,59	390
C22	10	6,7	0,33	0,63	410
C24	11	7,4	0,37	0,69	420
C27	11,5	7,7	0,38	0,72	450
C30	12	8	0,4	0,75	460
C35	13	8,7	0,43	0,81	480
C40	14	9,4	0,47	0,88	500
C45	15	10	0,5	0,94	520
C50	16	10,7	0,53	1	550
D18	9,5	8	0,63	0,59	570
D24	10	8,5	0,67	0,62	580
D30	11	9,2	0,73	0,69	640
D35	12	10,1	0,8	0,75	650
D40	13	10,9	0,86	0,81	660
D50	14	11,8	0,93	0,88	750

Tab. 3 Vybrané mechanické vlastnosti lepených nosníků dle ČSN EN 1194

Třída pevnosti dle ČSN EN 1194: 1999		GL24c	GL28c	GL32c	GL36c
Charakteristické hodnoty pevností v N/mm²					
Ohyb	$f_{m,k}$	24	28	32	36
Tah rovnoběžně s vlákny	$f_{t,0,k}$	14	16,5	19,5	22,5
Tah kolmo k vláknům	$f_{t,90,k}$	0,35	0,4	0,45	0,5
Tlak rovnoběžně s vlákny	$f_{c,0,k}$	21	24	26,5	29
Tlak kolmo k vláknům	$f_{c,90,k}$	2,4	2,7	3	3,3
Smyk	$f_{v,k}$	2,2	2,7	3,2	3,8
Charakteristické hodnoty tuhostí v kN/mm²					
Průměrná hodnota modulu pružnosti rovnoběžně s vlákny	$E_{0,mean}$	11,6	12,6	13,7	14,7
5% kvantil modulu pružnosti kolmo k vláknům	$E_{0,05}$	9,4	10,2	11,1	11,9
Průměrná hodnota modulu pružnosti kolmo k vláknům	$E_{90,mean}$	0,32	0,39	0,42	0,46
Průměrná hodnota modulu pružnosti ve smyku	G_{mean}	0,59	0,72	0,78	0,85
Hustota v kg/m³					
Hustota	r_k	350	380	410	430

3.3 Použitá dřeva

3.3.1 Smrk

Smrk patří do rodu *Picea*, který zahrnuje asi 40 druhů. Mezi ty všeobecně známé druhy patří smrk ztepilý (*Picea abies*), což je v České republice jedinný původní druh. Dále smrk dvoubarvý (*Picea alcoquiana*), smrk čínský (*Picea brachytyla*), smrk sivý (*Picea glauca*), smrk omorika (*Picea omorika*), smrk pichlavý (*Picea pungens*). Smrk je dnes našim nejběžnějším jehličnatým stromem. Je to způsobeno především lesnickou kultivací našich lesů. Mladé stromky bývají vysazovány přímo do oplocenek, kde jim nehrozí okusování zvěří. Přesto stále rostou i v takzvaných náletech. Zdravé smrky výborně čistí vzduch a dokáží denně uvolňovat značné množství kyslíku.

Chemické složení dřeva dělíme na hlavní složky, které tvoří 90-97 %. Mezi hlavní složky řadíme celulosu, hemicelulosu a lignin. A doprovodné složky, což jsou anorganické a organické látky. Celulosa a hemicelulosa tvoří sacharidovou část a ligning aromatickou část dřeva. Celulosa tvoří v průměru něco okolo 50 % z celkové hmotnosti dřeva. Základní jednotkou celulosy je celobiosa. Hemicelulosa tvoří pojivou slůžku mezi strukturami celulosy a mezi ligninem. Lignin je složka, která zabezpečuje dřevnatění buněčných stěn dřeva, dodává dřevu tuhost a zvyšuje pevnost dřeva. Představuje asi 20 až 30 % z hmotnosti dřeva. Konkrétně smrk obsahuje 45,6 % celulózy, 27,6 % hemicelulózy a 26,9 % ligninu (*Požgaj a kol., 1997*).

3.3.2 Buk

Buk patří mezi nejpěstovanější listnatou dřevinu nejen v České republice. Dožívá se v průměru 300-500 let. Jeho dřevo je tvrdé. Buk se řadí do rodu *Fagus*, který čítá okolo 10 druhů objevujících se v mírném pásu severní polokoule (*Patříčný, 2005*). Nejběžnější druh buku je Buk lesní (*Fagus sylvatica*). Buk lesní je původně u nás vyskytující se druh. Buk dorůstá výšky 20 až 30 m. Jeho plody nazývané bukvice mají jedlé jádro.

Chemické složení dřeva tvoří celulosa, hemicelulosa a lignin. Mezi doprovodné složky dřeva patří anorganické a organické látky. Zastoupení celulosy v listnácích je 41-48 %. Hemicelulosu dělíme na xylany, které u listnáčů tvoří až 35 %, manany, které tvoří 3-5 % u listnáčů a galaktany. Galaktany mají malý podíl konkrétně u buku (0,5 – 3 %). Zastoupení ligninu v listnácích je 19-28 %. U listnáčů vykazuje lignin větší variabilitu

svého složení než je tomu u jehličnanů. Buk obsahuje 39,2 % celulosy, 35,3 % hemicelulosy a 20,9 % Ligninu (Požgaj a kol., 1997).

3.4 Fyzikální vlastnosti dřeva

3.4.1 Vlhkost

Absolutní vlhkost dřeva vyjadřuje podíl hmotnosti vody, ku hmotnosti absolutně suchého dřeva tj. dřevo s vlhkostí 0%. Tato je vyjádřena v procentech.

$$W_{abs} = \frac{m_w^w - m_0}{m_w} * 100 \quad (\%)$$

m_w = hmotnost vlhkého dřeva (kg)

m_0 = hmotnost absolutně suchého dřeva

Voda se vyskytuje ve dřevě ve dvou formách vody vázané a vody volné. Výskyt vody volné je podmíněn výskytem vody vázané, z čehož vyplývá, že při odstraňování vlhkosti sušením, se nejdříve odpařuje voda volná a později voda vázaná.

Voda vázaná (hygroskopická) se vyskytuje v buněčné stěně a je vázána vodíkovými můstky na části celulózy a hemicelulózy.

Naopak voda volná (kapilární), se již dle názvu, nikam ve dřevě neváže, a vykytuje se pouze v lumenech dřevních buněk, kde je držena kapilárními silami.

Hranice mezi vodou vázanou a volnou určuje mez nasycení buněčných stěn, která vyjadřuje stav buňky, kdy je buněčná stěna zcela nasycena vodou vázanou, ale lumen neobsahuje žádnou vodu volnou. Pro zjednodušení se v praxi více používá mez hygroskopicity, která vyjadřuje stejnou hodnotu jako mez nasycení buněčných stěn, jen pro její výpočet je dřevo vystaveno prostředí, kde se voda nevyskytuje v kapalném, nýbrž plynném skupenství, z čehož vyplývá, že mez hygroskopicity je závislá na teplotě, ale při 20°C jsou hodnoty totožné, což pro běžnou záměnu těchto hodnot stačí.

Mez hygroskopicity pro smrk je pohybuje v rozmezí od 30 do 34% pro druhé dřevo, které jsem používal, buk, se udává hodnota 32 až 35% obsahu vody ve dřevě.

Vlhkost dřeva je jednou z nejdůležitějších fyzikálních vlastností, protože výrazně ovlivňuje ostatní fyzikální, ale i mechanické vlastnosti daného dřeva. (Gandelová,2009)

3.4.2 Bobtnání a sesýchání dřeva

Dřevo je materiál, který je schopný přijímat a odevzdávat vodu okolnímu prostředí. Tato schopnost se nazývá hygroskopicitá. Když se mění vlhkost dřeva, a to v oblasti, kdy se vyskytuje ve dřevě již pouze voda vázaná, dochází ke změně rozměrů. Odpařením vody volné se rozměry nemění, je tedy zřejmé, že rozměry se mění pouze v oblasti pod mezí nasycení buněčných stěn resp. mezí hygroskopicity. Při odstranění vody vázané ze dřeva tedy dřevo sesychá, a při přijímání vody dřevo bobtná.

Bobtnání a sesýchání tedy probíhá v místě vody vázané – buněčné stěně. Kde dochází v závislosti na množství přítomné vody k přibližování či oddalování fibrilární struktury. Tak se mění rozměry stavebních elementů a dřeva jako celku. Vzhledem k tomu, že největší podíl (90 %) buněčné stěny tvoří S₂ vrstva sekundární buněčné stěny, kde se orientace fibril neodklání od podélné osy, dochází k maximálnímu bobtnání a sesýchání právě ve směru kolmo k vláknům. V podélném směru dřevo bobtná či sesychá minimálně. (Horáček 2008)

Tab. 4 Koeficienty bobtnání

Druh dřeva	Koeficient bobtnání α (%/1%w)		
	K α Obj.	K α Rad.	K α Tan.
Buk	0,55	0,18	0,35
Smrk	0,5	0,17	0,31

(Požgaj et al. 1993)

3.4.3 Hustota

Dřevo jako polymer je výborný konstrukční materiál, právě díky hustotě, která zajišťuje dostatečnou pevnost i při srovnatelně nižších hustotách, než u ostatních materiálů, jako je například ocel. Smrkové dřevo je využíváno nejvíce pro stavbu domů ne proto, že by bylo nejpevnější, ale právě vzhledem k výbornému poměru pevnosti na hustotě, který se projeví při statickém výpočtu. Smrkového dřeva se tedy používá při výrobě nosných prvků, sloupů, či rámu dřevostaveb.

Hustotu daného dřeva můžeme vyjádřit podílem hmotnosti a objemu daného dřevěného prvku. Základní jednotkou hustoty je tedy $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Díky schopnosti dřeva přijímat vodu – hygroscopicitě, se mění i samotná hustota právě díky hmotnosti přijímané vody a v oblasti vody vázané dochází i ke změně objemu tělesa, proto je důležité při udávání hustoty dřeva udávat i vlhkost, při které byla hustota zjištěna.

Nejčastěji se využívá hustota při vlhkosti 12%, tato hodnota se vyskytuje i v normách, protože jde o vlhkost dřeva, které je vystaveno běžným podmínkám v temperované místnosti.

$$\rho_{12} = \frac{m_{12}}{V_{12}}$$

Pro porovnávání výsledků v teoretických výpočtech se naopak používá hustota dřeva v absolutně suchém stavu, tedy dřevu, které obsahuje 0% vody. Jedná se tedy o čistou dřevní substanci, která ovšem vykazuje vždy určitou pórovitost, proto je hustota absolutně suchého dřeva vždy nižší než hustota samotné dřevní substance. Hustota dřevní substance se pohybuje v rozmezí 1440 – 1550 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0}$$

Dále je pak možno udávat hustotu dřeva při jakékoliv vlhkosti, která se vypočítá prostým dosazením do vzorce.

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w}$$

Kde hustota při dané vlhkosti se rovná podílu hmotnosti při dané vlhkosti a objemu dřeva při stejné vlhkosti.

Dle hustoty lze dřeva našich dřevin rozdělit do tří skupin. Většina z našich dřev má tedy nízkou (do 540 kg.m^{-3}) či střední ($540 - 750 \text{ kg.m}^{-3}$) hustotu. Mezi dřeva s vysokou hustotou patří např. habr či akát. Dle tabulek tedy mnou používaný smrk patří mezi dřeva s nízkou hustotou a buk do skupiny dřev se střední hustotou. (Matovič 1993)

Tab. 5 Hustota dřeva

Druh dřeva	hustota (Kg.m^{-3})	
	ρ_0	ρ_{12}
Buk	680	730
Smrk	350 - 400	460

(Požgaj et al. 1993)

3.4.4 Rychlost šíření zvuku

Zvuk se přenáší pomocí vazeb a vzájemných srážek částic v pevných a kapalných látkách. Tyto vazby zapříčiňují, že kmitání částic se přenáší a tím je mechanické vlnění přenášeno, čímž vznikají elastické vlny. Dřevo jako anizotropní materiál, stěžuje studium šíření vln na rozdíl od takřka izotropních materiálů, zejména kovů. (Horáček 2008)

Rychlost šíření zvukových vln klesá se zvyšující se vlhkostí dřeva, zejména ve směru podélném s vlákny dřeva a to z důvodu nižší schopnosti vody šířit zvuk. Zatímco rychlost šíření zvuku ve vodě je 1485 m.s^{-1} , dřevo smrku vykazuje rychlost ve směru rovnoběžným s vlákny 4800 m.s^{-1} a u buku dosahuje rychlosti zhruba 4600 m.s^{-1} . Je tedy zřejmé, že čím je vyšší podíl vody ve dřevě, tím klesá schopnost daného dřeva šířit zvukové vlny.

Rychlost šíření zvuku dřevem lze počítat z následujícího vztahu:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

E = modul pružnosti (Pa)

ρ = hustota dřeva (kg.m^{-3})

Z rovnice je zřejmé, že rychlost šíření zvuku se zvětšuje se zvyšujícím se modulem pružnosti a naopak klesá s vyšší hustotou dřeva. Měřením rychlosti šíření zvuku ve dřevě a znalostí hustoty daného dřeva lze tedy vypočítat modul pružnosti i nedestruktivní metodou, tedy takovou, která nepoškodí zkoumaný prvek, a lze ji tedy použít i pro části konstrukcí, které nelze vyjmout a následně měřit.

3.5 Mechanické vlastnosti dřeva

Mechanické vlastnosti dřeva vyjadřují celkovou schopnost odolávat působení vnějších sil na dřevo. Základními mechanickými vlastnostmi popisujícími dřevo máme na mysli pružnost, plastičnost, pevnost, či houževnatost. Z těchto základních vlastností můžeme odvodit například tvrdost, odolnost proti tečení, či odolnost proti únavovému lomu.

Dřevo jako anizotropní materiál vykazuje i u mechanických vlastností anizotropní charakter, čili při zatížení vzorku hraje roli orientace hlavních mechanických elementů dřeva, kam patří tracheidy a libriformní vlákna.

3.5.1 Pružnost

Pružnost dřeva je definována jako schopnost dřeva vracet se do původního tvaru a rozměru po odtížení vnějších sil. Odpor proti deformaci způsobené vnějšími silami se nazývá modul pružnosti. Čím vyšších hodnot dosahuje modul pružnosti, tím je napětí (síla) je potřebné k vyvolání pružné deformace.

Moduly pružnosti můžeme rozdělit na Youngovy moduly pružnosti – při normálových namáháních (ohyb, tak tlak). Další skupinou jsou smykové moduly pružnosti při namáháních tangenciálních (smyk a krut). Při navrhování dřevěných konstrukcí představují tyto moduly významné materiálové konstanty. (Gandelová 2009)

Tab. 6 Moduly pružnosti

Druh dřeva	Modul pružnosti Mpa						
	v tlaku a tahu			v ohybu	ve smyku		
	E_L	E_R	E_T	E_{oh}	G_{LR}	G_{LT}	G_{RT}
Smrk	14300	680	470	12800	1230	800	55

(Gandelová 2009)

3.5.2 Pevnost

Pevnost dřeva vyjadřuje odolnost dřeva vůči trvalému poškození. Velikost pevnosti je vyjádřena napětím, při kterém je těleso porušeno – mezí pevnosti. Pevnost nelze teoreticky vypočítat, je tedy nutné provést destruktivní zkoušky, při kterých je sledováno skutečné napětí (síla) působící právě v okamžiku trvalého poškození tělesa.

Vzhledem k anizotropii dřeva je nutné, brát ohled na směr působení síly, či postavení zkoušeného vzorku. Rozlišujeme tedy nejen pevnosti dřeva v tlaku, tahu, ohybu či smyku, ale pro každou kategorii také směry, čili pevnosti dřeva ve směru vláken, a ve směrech napříč vláken radiálním a tangenciálním.

Tab.7 Meze pevnosti

Druh dřeva	Mez pevnosti (Mpa) při 12% vlhkosti					
	Tlak			Tah		
	ve směru vláken	napříč vláken		ve směru vláken	napříč vláken	
		Radiální	Tangenciální		Radiální	Tangenciální
Smrk	44,4	3,4	2,3	103	2,2	1,7

Druh dřeva	Mez pevnosti (Mpa) při 12% vlhkosti				
	Ohyb	Smyk			
		ve směru vláken v rovině		napříč vláken v rovině	
		Radiální	Tangenciální	Radiální	Tangenciální
Smrk	80	6,9	6,8	3,3	2,8

(Gandelová, 2009)

4 METODIKA

V této kapitole podrobně popíši, jakým způsobem probíhala zkouška a samotný výpočet dat. Hodnoty vypočtené z experimentálního zkoušení tělísek, budou porovnány s hodnotami uvedenými v odborné literatuře.

4.1 Experiment

4.1.1 Výroba panelů

Pro experimentální zkoušku, nutnou pro zpracování této práce, bylo nutno vyrobit panely z masivního smrkového řeziva, které byly následně spojeny bukovými kolíky. Řezivo bylo dodáno netříděné s různými mechanickými vlastnostmi. Prkna bylo nutno roztřídit, aby prkna s vyšší tuhostí mohla být zařazena do vrchních vrstev panelů.

4.1.2 Třídění řeziva

Třídění řeziva bylo prováděno jak vizuálně, kde se zkoumali zejména suky, praskliny a odklon vláken, tak následně přístrojem Fakopp Ultrasonic timer (obr. 6) na měření rychlosti šíření zvuku ve dřevě.

Po změření rychlosti šíření zvuku v již zhotovených prknech, byl vypočítán modul pružnosti a prkna byla následně rozdělena do dvou skupin. První skupina byla určená pro povrchové vrstvy panelů a jednalo se tedy o prkna s vyšším modulem pružnosti, zatímco druhá skupina obsahovala prkna s nižším modulem pružnosti, tedy méně kvalitní prkna pro vyhotovení středových vrstev.

Přístroj Ultrasonic měří čas, za který vyslaný impuls projde dřevem z jedné sondy do druhé. Při známé a konstantní délce prken, je možno vypočítat samotnou rychlost šíření zvuku dřevem. Po vypočítání rychlosti šíření ji lze dosadit do vzorce pro výpočet modulu pružnosti, při známé hustotě, kterou vypočítáme váhovou metodou, při známých rozměrech prken.

Výpočet rychlosti šíření zvuku:

$$v = \frac{s}{t}$$

s = dráha (m)

t = čas (s)

Výpočet modulu pružnosti:

$$E = c^2 \cdot \rho$$

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

c = rychlost šíření zvuku ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

ρ = hustota ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)



Obr. 6 FAKOPP Ultrasonic Timer

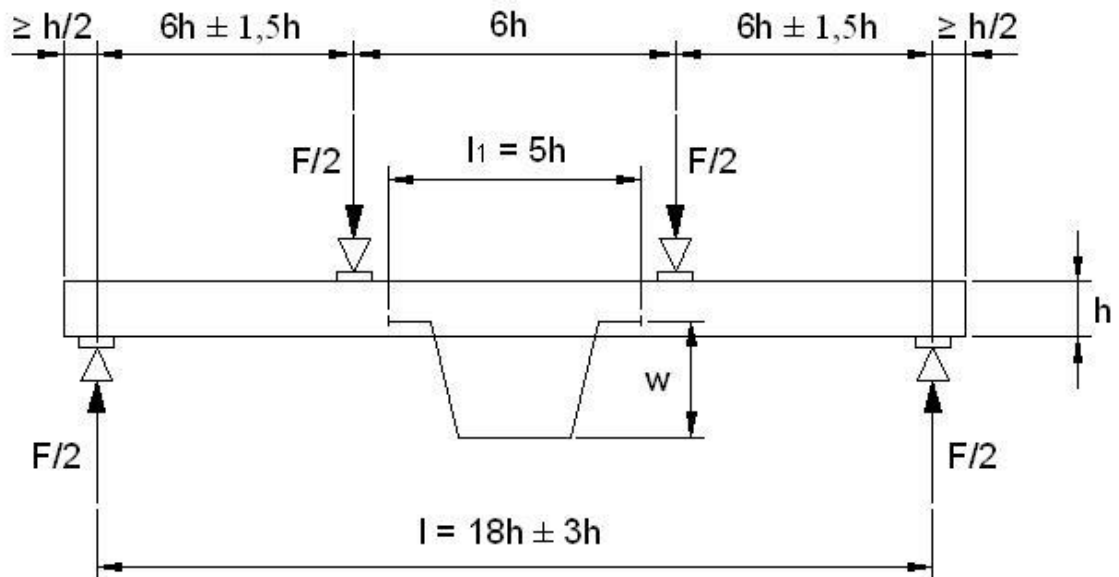
4.2 Výpočet hodnot z experimentu

Pro provedení experimentu a výpočet výsledných hodnot, byla použita norma EN 408. Pro zkoušení vzorků a následného výpočtu Pevnosti, lokálního a globálního modulu pružnosti se využívá čtyřbodého ohybu, zatímco pro smyk se použít ohyb třibodý.

Z pracovních diagramů každé provedené zkoušky, se dle vzorců uvedených v normě vypočítají hodnoty mechanických vlastností jednotlivých vzorků. Tyto hodnoty jsou následně zpracovány do grafů a tabulek.

4.2.1 Schéma čtyř-bodého ohybu

Schéma čtyřbodého ohybu ukazuje nastavení zkušebního stroje a hodnoty se kterými se počítá při samotném výpočtu naměřených hodnot. (obr. 7)



Obr. 7 Schéma čtyřbodého ohybu dle EN 408

4.2.2 Vzorce

Vzorce z normy EN 408, dle kterých byly počítány mechanické vlastnosti jednotlivých zkušebních vzorků. Jedná se tedy o lokální a globální modul pružnosti, pevnost dřeva v ohybu a smykový modul pružnosti.

Vzorec pro výpočet pevnosti v ohybu:

$$f_m = \frac{a \cdot F_{max}}{2 \cdot W}$$

a = vzdálenost krajní podpory k nejbližšímu trnu (mm) dle obr. 7

F_{\max} = maximální síla (N)

W = modul průřezu (mm^3)

Vzorec pro výpočet lokálního modulu pružnosti:

$$E_{m,l} = \frac{al_1^2(F_2 - F_1)}{16I(w_2 - w_1)}$$

a = vzdálenost krajní podpory k nejbližšímu trnu (mm) dle obr. 7

l_1 = vzdálenost tlačných trnů (mm) dle obr.

I = moment setrvačnosti (mm^4)

$F_2 - F_1$ – rozdíl sil z pracovního diagramu, kde F_1 je zhruba 0,1 a F_2 je 0,4 F_{\max} . w_2 a w_1 jsou odpovídající hodnoty k silám z pracovního diagramu vyjadřující deformaci (posunutí tlačných trnů).

Výpočet globálního modulu pružnosti:

$$E_{m,g} = \frac{l^3(F_2 - F_1)}{bh^3(w_2 - w_1)} \left[\left(\frac{3a}{4l} \right) - \left(\frac{a}{l} \right)^3 \right]$$

l = vzdálenost podpor (mm)

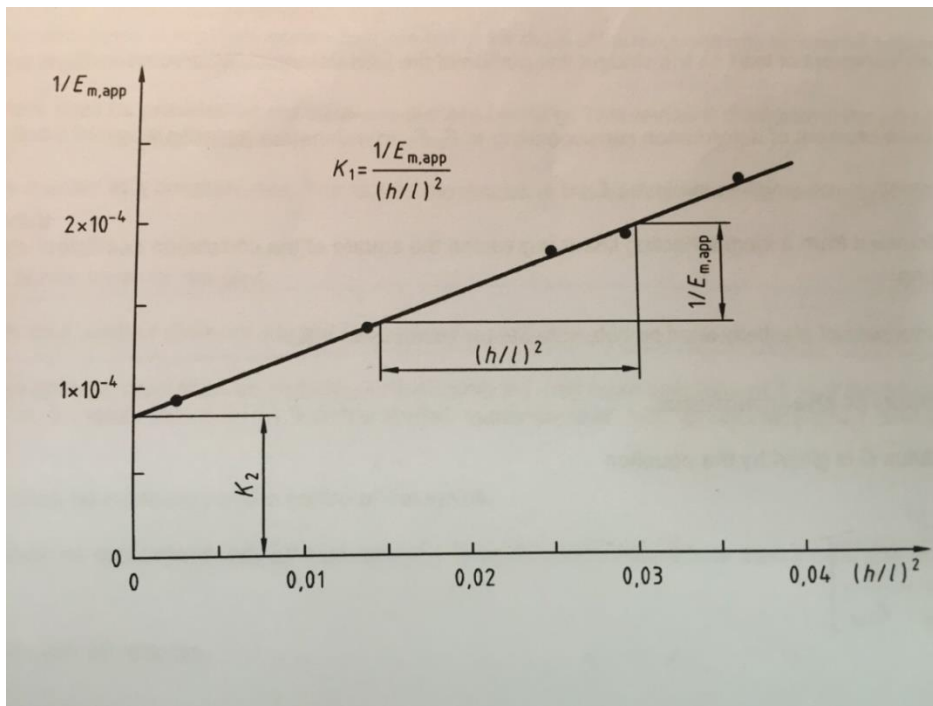
b = šířka vzorku (mm)

h = výška vzorku (mm)

a = vzdálenost krajní podpory k nejbližšímu trnu (mm) dle obr. 7

Smykový modul pružnosti se počítá metodou proměnného rozpětí, tedy tak, že zkušební vzorky jsou postupně zkoušeny tříbodým ohybem, pouze však silou, která zjevně nepoškodí vzorek, aby mohla být zkouška opakována se změnou rozponu podpor. V našem případě byla zkušební tělesa podrobena zkoušce při rozponu 900, 800, 700 a 600 mm. Pro každý rozpon je vypočítán zdánlivý smykový modul pružnosti a sestaven graf, jako na obr. 8. Z grafu vyjádříme sklon dané přímky (rovnici přímky), který udává hodnotu K_1 , ze které pak dosazením do rovnice získáme skutečný smykový modul pružnosti.

Výpočet smykového modulu pružnosti:



Obr. 8 Graf pro výpočet smykového modulu pružnosti

Smykový modul pružnosti vypočítáme jako:

$$G = \frac{k_g}{K_1}$$

Kde k_g je koeficient = 1,2 a K_1 vypočteme dle následujícího vzorce (obr.)

$$K_1 = \frac{1}{\frac{E_{m,app}}{\left(\frac{h}{l}\right)^2}}$$

h = výška vzorku (mm)

l = rozpon podpěr (mm)

a $E_{m,app}$ je zdánlivý smykový modul pružnosti, vypočítaný dle následujícího vzorce:

$$E_{m,app} = \frac{l_1^3(F_2 - F_1)}{48I(w_2 - w_1)}$$

$L_1 = l$ = rozpon podpěr (mm)

I = moment setrvačnosti (mm⁴)

4.3 Vyhodnocení naměřených dat

Naměřené a vypočtené hodnoty pevnosti v ohybu, smykového modulu pružnosti, globálního a lokálního modulu pružnosti v ohybu, získané z experimentálního měření, budou zpracované, ve výsledkové části této práce, do tabulek a grafů tak, aby bylo možné snadno interpretovat výsledky a porovnávat s hodnotami získanými s odborné literatury.

5 MATERIÁL

5.1 Výroba panelů

Pro účely zkoušení mechanických vlastností bylo vyrobeno celkem sedm panelů o plošných rozměrech 1000 x 1000 milimetrů rozdělených do dvou skupin. První skupinou byly panely třívrstvé, které byly zhotoveny tři. Druhou skupinu tvořily panely pětivrstvé, které byly čtyři.

Povrchové vrstvy všech panelů tvořily lamely vyšší kvality, které byly vybrány na základě měření modulů pružnosti, nedestruktivní metodou. Vnitřní lamely byly vyrobeny z řeziva nižší kvality. Dřevěné lamely byly kladeny křížem (obr. 9) do připraveného rámu (obr. 10), který držel lamely, aby nedocházelo k posunu. Po postupném uložení všech vrstev, byl panel provrtán sítí děr (obr. 11) o průměru 10 mm, do kterých byly následně vtlačeny vysušené bukové kolíky (obr. 12). Hotový panel byl následně klimatizován, aby se vyrovnala vlhkost prken a kolíků, čímž došlo k dosažení požadované pevnosti tohoto spoje.



Obr. 9 Kladení lamel do připraveného rámu



Obr. 10 Zajištění lamel proti pohybu při vrtání



Obr. 11 Vrtání děr pro bukové kolíky



Obr. 12 Vtloukání kolíků do panelu



Obr. 13 Klimatizace hotových panelů

5.1.1 Výroba prken

Pro výrobu jednoho panelu bylo potřeba třicet, nebo padesát smrkových lamel, v závislosti na tom, z kolika vrstev se panel skládal. Tyto lamely bylo potřeba vyřezat z dovezeného omítaného řeziva v délce čtyř metrů. Řezivo nebylo vysušené, proto bylo nutné při jeho zkracování počítat s nadměrkem pro možné seschnutí. Po zkrácení bylo řezivo uloženo do sušárny, kde bylo teplovzdušně vysušeno na konečnou vlhkost 12%.(obr. 14)

Po vyjmutí ze sušárny, byla prkna zkrácena na zkracovací pile na konečnou délku jednoho metru. Takto zkrácené lamely vykazovaly stejnou tloušťku, nebylo tedy nutné sjednocování na tloušťkovací frézce.

U takto připravených prken byla měřena rychlost šíření zvuku přístrojem Ultrasonic. Prkna byla poté rozdělena na povrchová a středová, právě podle vypočítaného modulu pružnosti z rychlosti šíření zvuku ve dřevě. Roztříděná prkna již byla připravena k výrobě panelů.



Obr. 14 Klimatizace prken

5.1.2 Výroba kolíků

Kolíky potřebné pro spojení panelu, byly vyrobeny z bukové tyče o průměru 10 mm. Tato kolíková tyč byla v horkovzdušné sušárně sušena při teplotě 103°C na nulovou vlhkost. (obr. 15) Následně byla zkrácena na požadovanou délku, v závislosti na tloušťce panelu. U pětivrstvých panelů se jednalo o délku zhruba 125 mm a u třívrstvých 75 mm. Po zkrácení byly kolíky okamžitě vtlačovány do panelů, aby se zabránilo zvýšení jejich vlhkosti a nabobtnání mimo panel.



Obr. 15 Sušení kolíků na nulovou vlhkost

5.2 Výroba zkušebních těles

Z hotových panelů bylo potřeba vyrobit zkušební tělíska, pro vybrané zkoušky mechanických vlastností. Pro zkoumání pevnosti a modulů pružnosti v ohybu bylo z každé skupiny panelů, tj. z třívrstevných a pětivrstevných, byly vyřezány vzorky podle požadované šířky, tedy počtu lamel ve svrchní vrstvě, podél které probíhal řez tohoto panelu. Tímto vznikly čtyři skupiny vzorků pro každý druh panelu. Každá skupina vzorků obsahovala vzorky tři, jak naznačuje tab. 8 a 9. Jsou zde uvedeny i rozměry a názvy jednotlivých vzorků.

Tab. 8 5 - ti vrstvé vzorky

5 - ti vrstvé vzorky			
Počet lamel (šířka)	číslo vzorku	Výška (mm)	Šířka (mm)
1	1)1	119,4	89,65
	2)1	118,75	91,6
	3)1	118,45	92,1
2	1)2	117,9	180,45
	2)2	117,65	191,55
	3)2	118	192,05
3	1)3	118,35	287,5
	2)3	116,75	284,5
	3)3	118,25	290,75
4	1)4	118,5	385
	2)4	117,75	383,7
	3)4	117,5	380,5

Tab. 9 3 - vrstvé vzorky

3 vrstvé vzorky			
Počet lamel (šířka)	číslo vzorku	Výška (mm)	Šířka (mm)
1	1)1	72,5	94,5
	2)1	72,5	94,5
	3)1	72,5	91,5
2	1)2	71,75	193
	2)2	74	194
	3)2	71,5	190
3	1)3	74	294
	2)3	70	287,5
	3)3	71,5	282,5
4	1)4	74	384
	2)4	72	388
	3)4	73	380

Pro zkoumání smykového modulu pružnosti byly vyrobeny vzorky stejným způsobem, pouze však z panelů pětivrstevných a o šířce jedné a dvou lamel. Rozměry jsou uvedeny v tab. 10

Tab. 10 Vzorky zkoumané na smyk

5-ti vrstvé vzorky			
Počet lamel (šířka)	číslo vzorku	Výška (mm)	Šířka (mm)
1	1)1	117,5	93,5
	2)1	117	89,5
	3)1	118	89,5
2	1)2	118	188,5
	2)2	118	193
	3)2	118	192

6 VÝSLEDKY

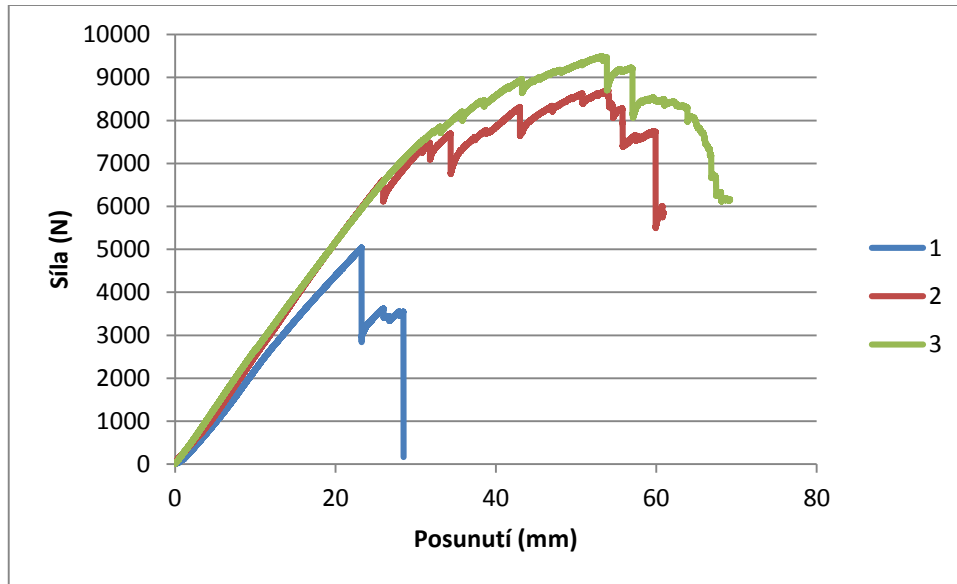
V této části budou uvedeny naměřené hodnoty a budou vyjádřeny grafem či tabulkou. Grafy budou vhodně komentovány.

6.1 Ohyb

Po odzkoušení vzorků na ohyb, byl sestrojen pracovní diagram, ze kterého byly výpočtem dle normy EN 408 zjištěny lokální a globální moduly pružnosti a pevnost v ohybu. Pracovní diagramy a vypočtené hodnoty budou uvedeny dle skupin vzorků, čili dle počtu vrstev a šířky jednotlivých vzorků.

6.1.1 Třívrstvé panely

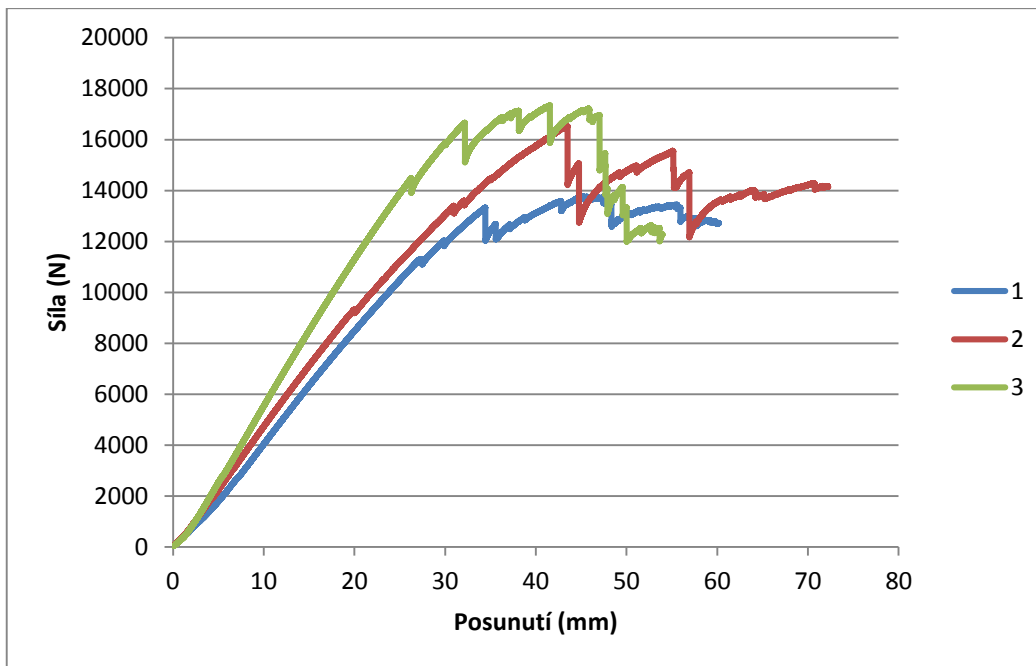
Na následujících grafech (obr. 16 - 19) jsou uvedeny pracovní diagramy zkušebních tělísek třívrstvých panelů, tedy závislost síly na posunutí tlačného trnu (deformace zkoušeného tělíska). Tabulky 11 – 14 udávají hodnoty zkoumaných mechanických vlastností vypočtené z pracovních diagramů.



Obr. 16 Pracovní diagram vzorků třívrstvého panelu o šířce jedné lamely

Tab. 11 Hodnoty lokálního, globálního modulu pružnosti a pevnosti v ohybu třívrstvého panelu o šířce jedné lamely

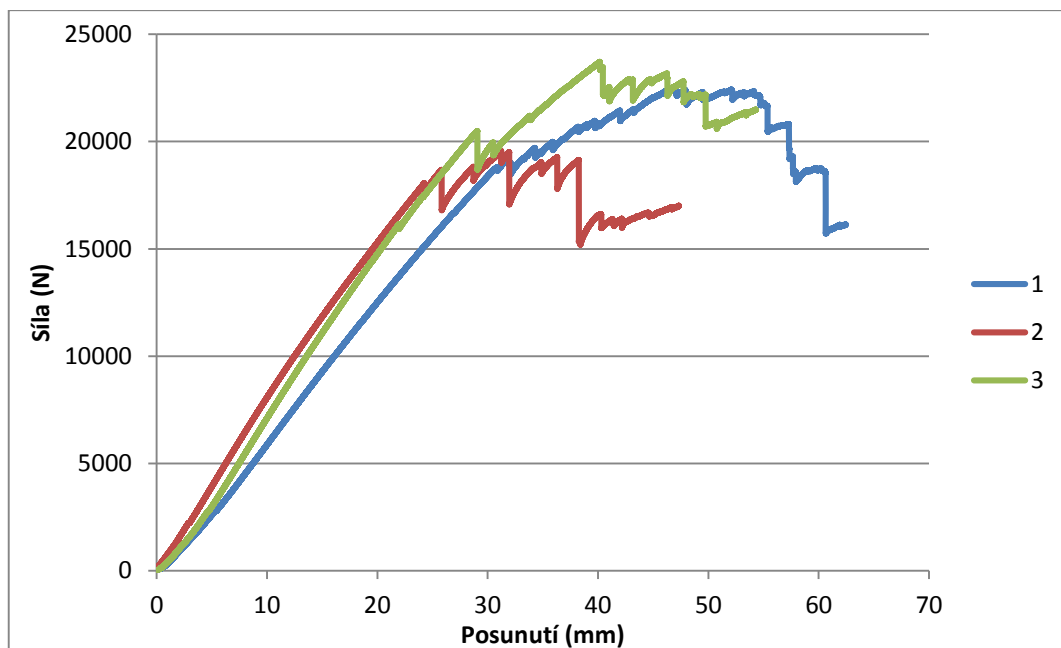
Vzorek	$E_{m,l}$ (MPa)	$E_{m,g}$ (MPa)	f_m (MPa)
1	139,782	1071,662	9,13561
2	154,2147	1182,313	15,77804
3	154,8669	1187,313	17,77556
Průměr	149,6212	1147,096	14,22974



Obr. 17 Pracovní diagram vzorků třívrstvého panelu o šířce dvou lamel

Tab. 12 Hodnoty lokálního, globálního modulu pružnosti a pevnosti v ohybu třívrstvého panelu o šířce dvou lamel

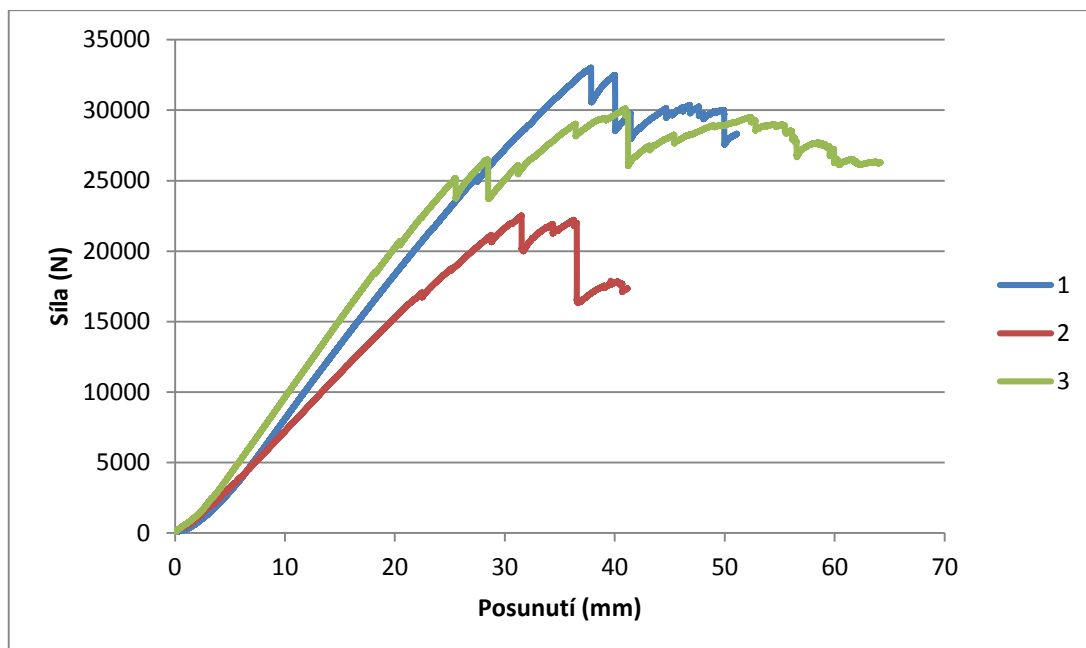
Vzorek	$E_{m,l}$ (MPa)	$E_{m,g}$ (MPa)	f_m (MPa)
1	128,5331	985,4202	12,47358
2	128,4268	984,6052	13,99801
3	177,9314	1364,141	16,07177
Průměr	144,9638	1111,386	14,18112



Obr. 18 Pracovní diagram vzorků třívrstvého panelu o šířce tří lamel

Tab. 13 Hodnoty lokálního, globálního modulu pružnosti a pevnosti v ohybu třívrstvého panelu o šířce tří lamel

Vzorek	$E_{m,l}$ (MPa)	$E_{m,g}$ (MPa)	f_m (MPa)
1	107,8975	827,2139	12,53447
2	172,6521	1323,666	12,4997
3	156,417	1199,197	14,78053
Průměr	145,6555	1116,692	13,27157

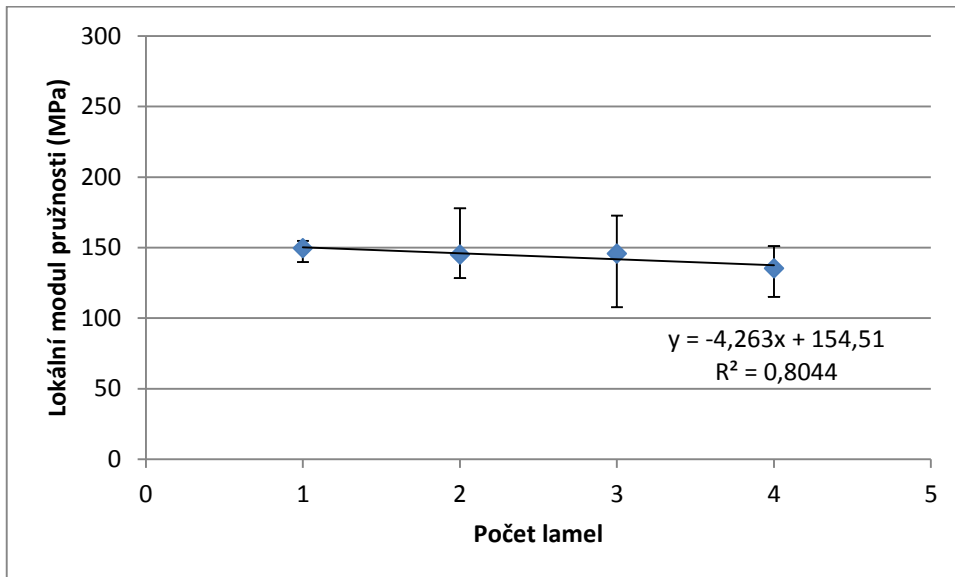


Obr. 19 Pracovní diagram vzorků třívrstvého panelu o šířce čtyř lamel

Tab. 14 Hodnoty lokálního, globálního modulu pružnosti a pevnosti v ohybu třívrstvého panelu o šířce čtyř lamel

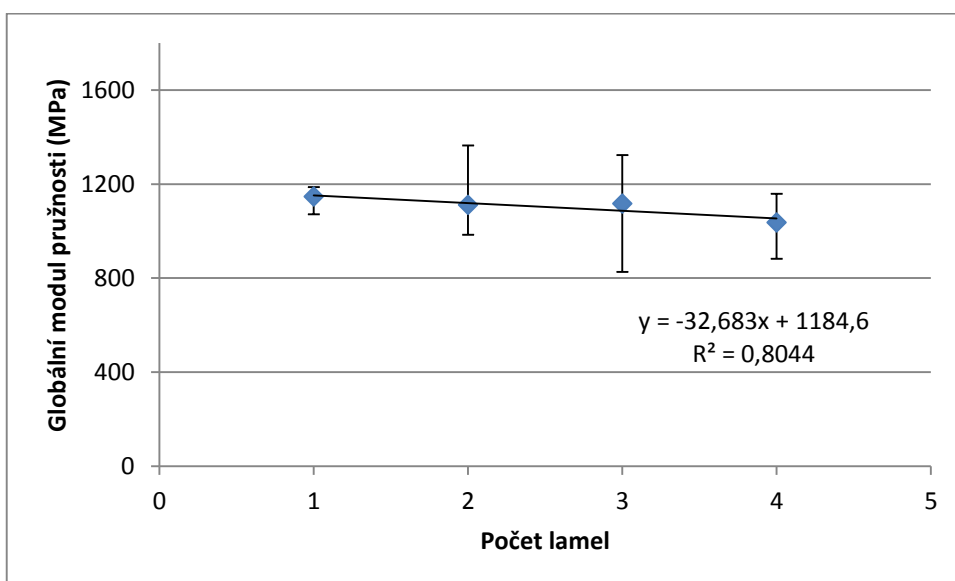
Vzorek	$E_{m,l}$ (MPa)	$E_{m,g}$ (MPa)	f_m (MPa)
1	139,1752	1067,01	14,13291
2	115,161	882,9007	10,07839
3	151,2057	1159,244	13,38742
Průměr	135,1806	1036,385	12,53291

Vyhodnocení a grafické srovnání výsledku jednotlivých mechanických vlastností v závislosti na šířce zkoumaného vzorku, respektive na počtu lamel třívrstvého vzorku:



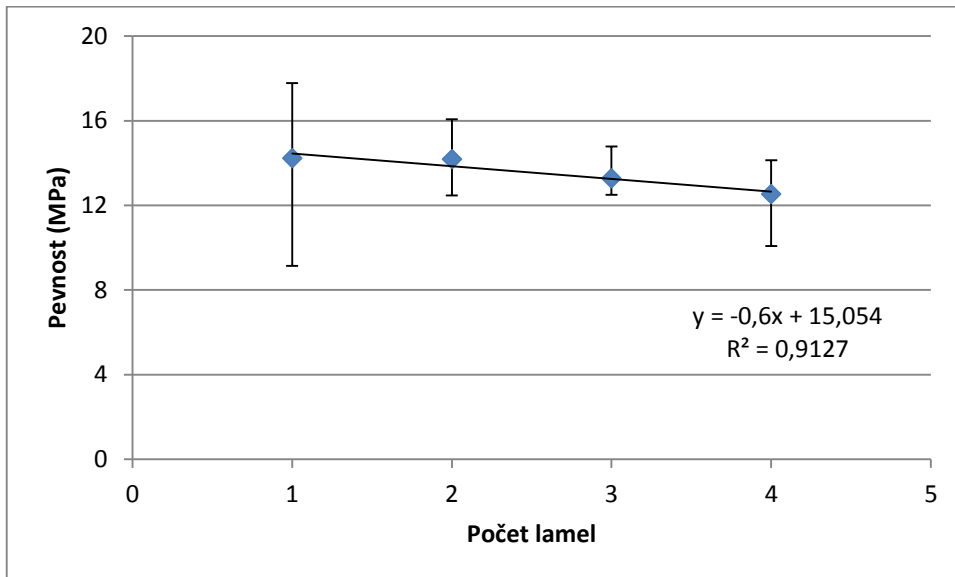
Obr. 20 Závislost lokálního modulu pružnosti na počtu lamel třívrstvého panelu

Na grafu (Obr.20) jsou vyneseny hodnoty vypočteného průměrného lokálního modulu pružnosti v závislosti na počtu lamel zkušebních tělísek třívrstvého panelu. V grafu jsou také vyznačeny maximální a minimální hodnoty pro jednotlivé vzorky. Je patrné, že daný trend lehce klesá, tudíž se zvyšujícím počtem lamel na zkoušených vzorcích panelu se velikost lokálního modulu pružnosti snižuje.



Obr. 21 Závislost globálního modulu pružnosti na počtu lamel třívrstvého panelu

V tomto grafu (Obr.21) jsou znázorněny průměrné hodnoty globálního modulu pružnosti. V grafu jsou také vyznačeny maximální a minimální hodnoty pro jednotlivé vzorky.

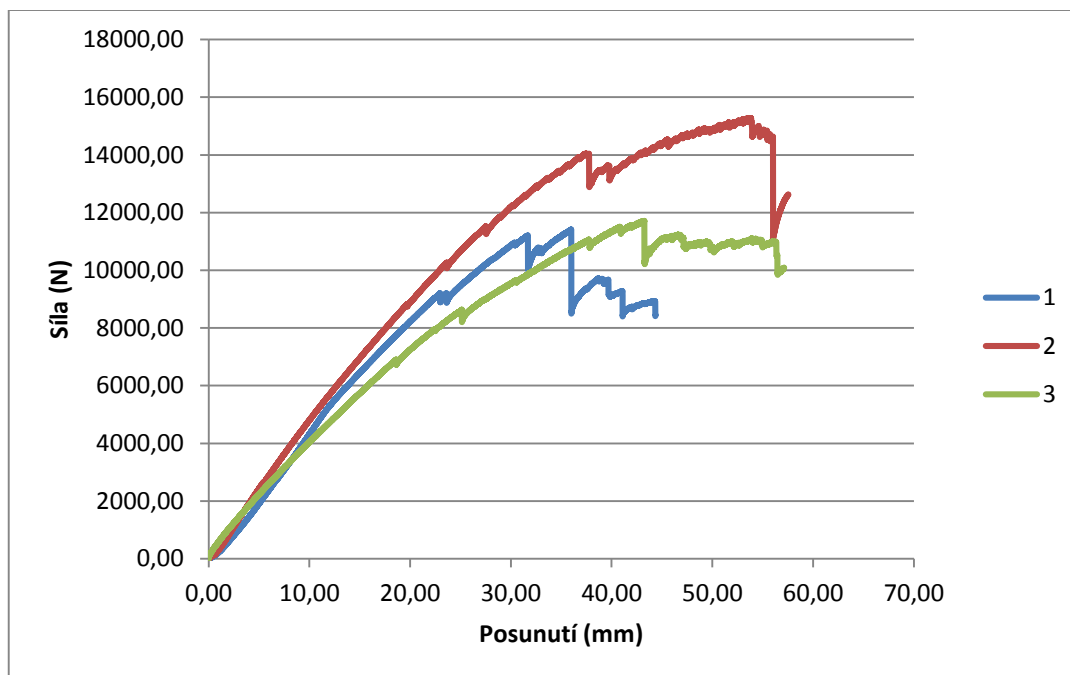


Obr. 22 Závislost maximální pevnosti na počtu lamel třívrstvého panelu

Graf (Obr.22) vyjadřuje závislost průměrné meze pevnosti, tedy maximální pevnosti třívrstvého zkušebního tělíska na počtu jeho lamel. V grafu je také vyznačena maximální a minimální hodnota pevnosti jednotlivých zkušebních těles.

6.1.2 Pětivrstvé panely

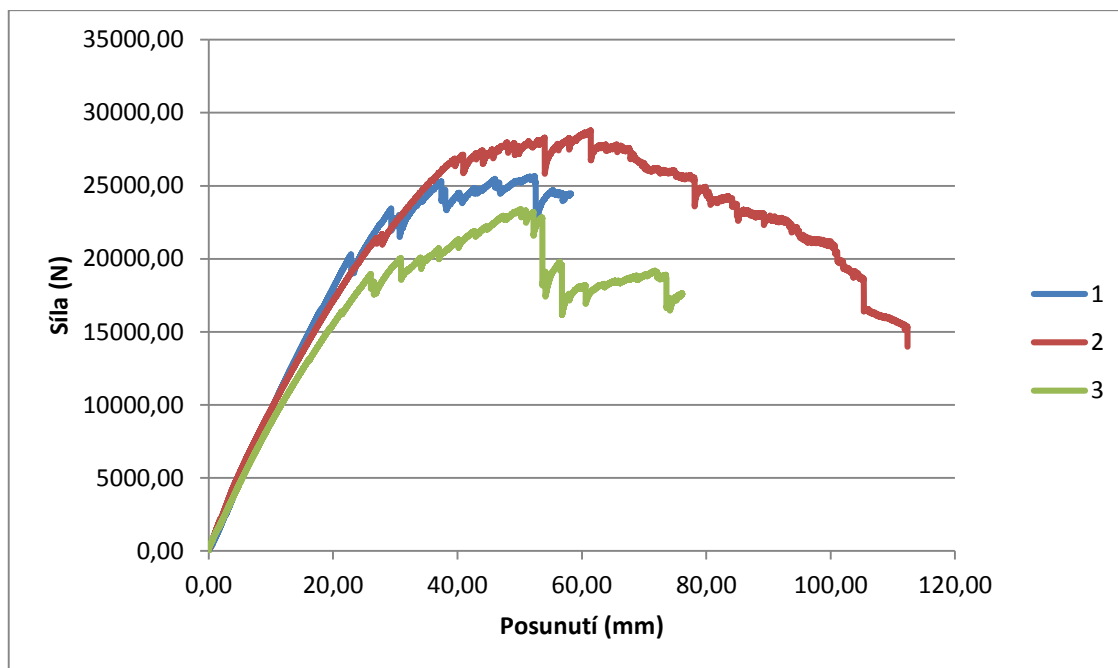
Na následujících grafech (obr. 23-26) jsou uvedeny pracovní diagramy zkušebních tělísek pětivrstvých panelů, tedy závislost síly na posunutí tlačného trnu (deformace zkoušeného tělíska). Tabulky 15 – 18 udávají hodnoty zkoumaných mechanických vlastností vypočtené z pracovních diagramů.



Obr. 23 Pracovní diagram vzorků pětivrstvého panelu o šířce jedné lamel

Tab. 15 Hodnoty lokálního, globálního modulu pružnosti a pevnosti v ohybu pětivrstvého panelu o šířce jedné lamely

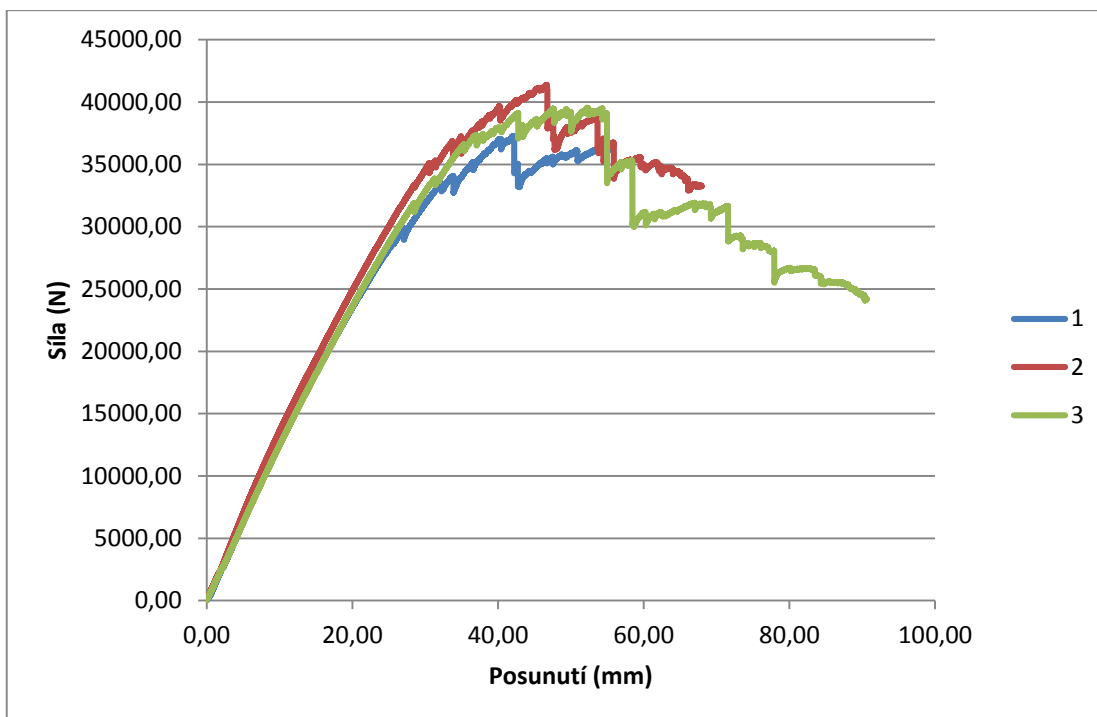
Vzorek	$E_{m,l}$ (MPa)	$E_{m,g}$ (MPa)	f_m (MPa)
1	63,30148	485,3113	8,03786
2	63,94251	490,2259	10,64467
3	49,42976	378,9615	8,157251
Průměr	58,89125	451,4996	8,946594



Obr. 24 Pracovní diagram vzorků pětivrstvého panelu o šířce dvou lamel

Tab. 16 Hodnoty lokálního, globálního modulu pružnosti a pevnosti v ohybu pětivrstvého panelu o šířce dvou lamel

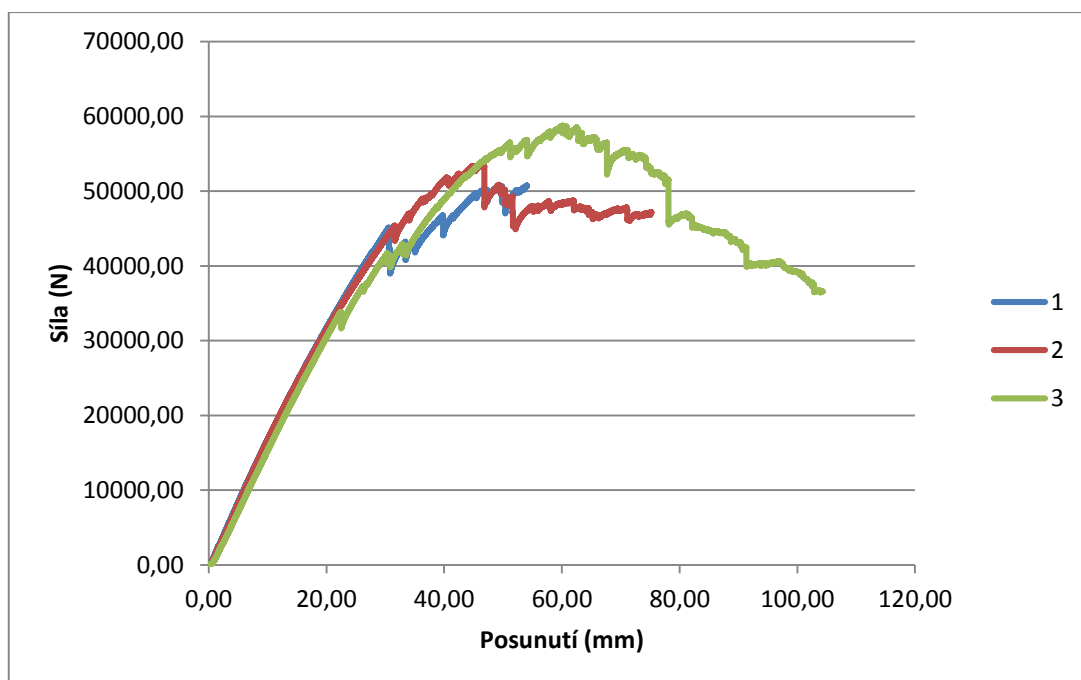
Vzorek	$E_{m,l}$ (MPa)	$E_{m,g}$ (MPa)	f_m (MPa)
1	69,36813	531,8223	9,20585
2	69,19208	530,4726	9,776854
3	58,01988	444,819	7,872842
Průměr	65,5267	502,3713	8,951849



Obr. 25 Pracovní diagram vzorků pětivrstvého panelu o šířce tří lamel

Tab. 17 Hodnoty lokálního, globálního modulu pružnosti a pevnosti v ohybu pětivrstvého panelu o šířce tří lamel

Vzorek	$E_{m,l}$ (MPa)	$E_{m,g}$ (MPa)	f_m (MPa)
1	57,02455	437,1882	8,32743
2	64,72404	496,2177	9,604824
3	54,56465	418,3289	8,754443
Průměr	58,77108	450,5783	8,895566

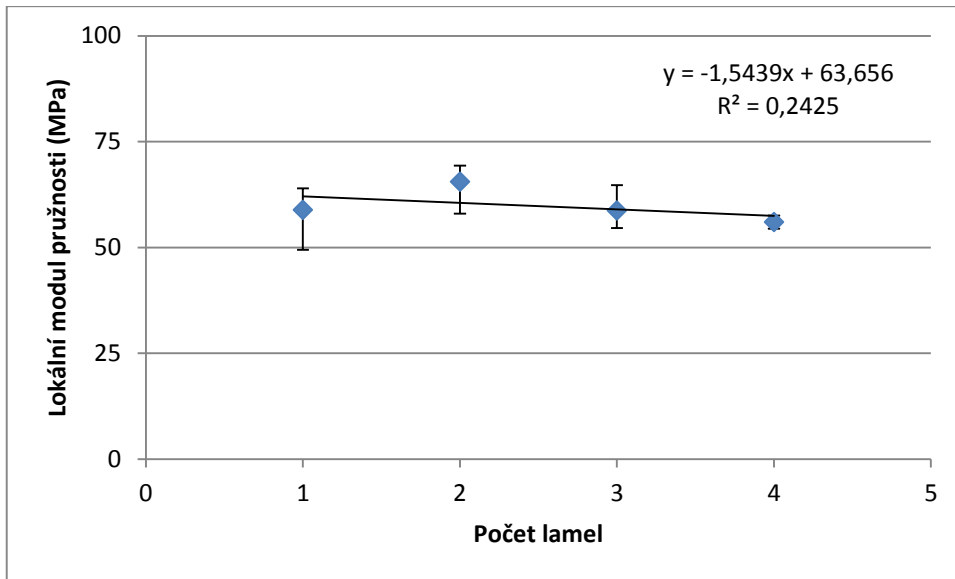


Obr. 26 Pracovní diagram vzorků pětivrstvého panelu o šířce čtyř lamel

Tab. 18 Hodnoty lokálního, globálního modulu pružnosti a pevnosti v ohybu pětivrstvého panelu o šířce čtyř lamel

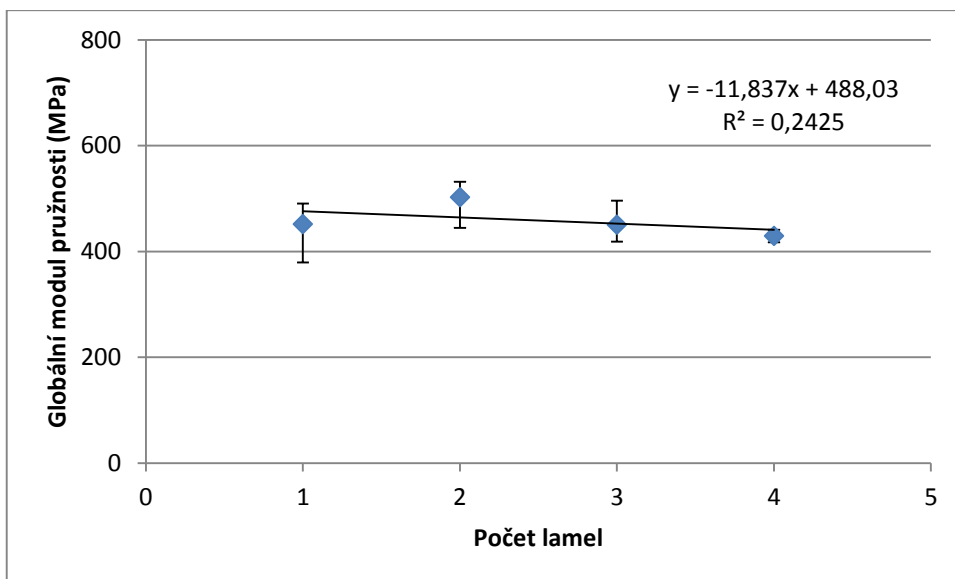
Vzorek	$E_{m,l}$ (MPa)	$E_{m,g}$ (MPa)	f_m (MPa)
1	56,0324	429,5818	8,449778
2	57,51699	440,9636	9,145954
3	54,44082	417,3796	10,0672
Průměr	55,99674	429,3083	9,220977

Vyhodnocení a grafické srovnání výsledku jednotlivých mechanických vlastností v závislosti na šířce zkoumaného vzorku, respektive na počtu lamel:

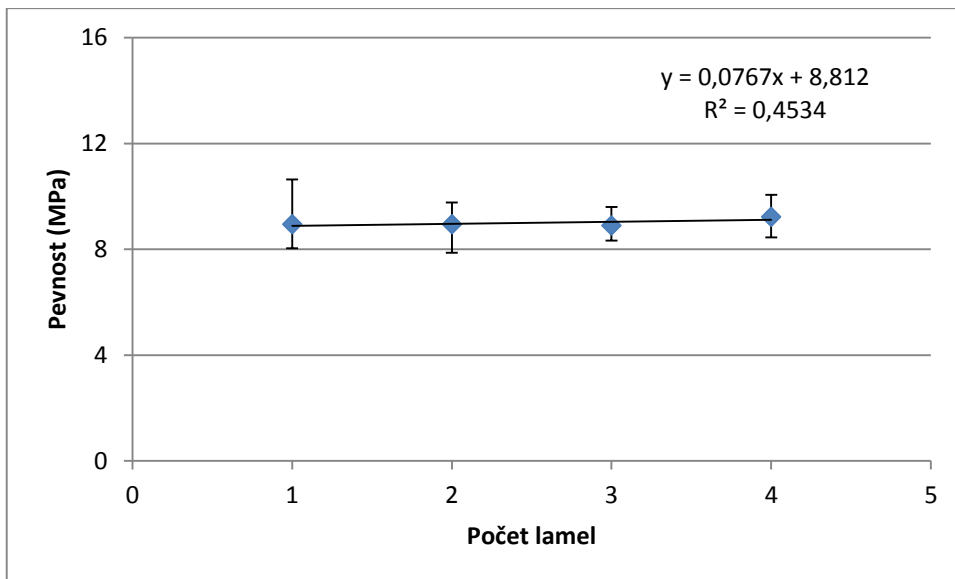


Obr. 27 Závislost lokálního modulu pružnosti na počtu lamel pětivrstvého panelu

Na grafu (Obr. 27) jsou vyneseny hodnoty vypočteného průměrného lokálního modulu pružnosti v závislosti na počtu lamel zkušebních tělísek třívrstvého panelu. V grafu jsou také vyznačeny maximální a minimální hodnoty pro jednotlivé vzorky. Je patrné, že daný trend lehce klesá, tudíž se zvyšujícím počtem lamel na zkoušených vzorcích panelu se velikost lokálního modulu pružnosti snižuje.



Obr. 28 Závislost globálního modulu pružnosti na počtu lamel pětivrstvého panelu

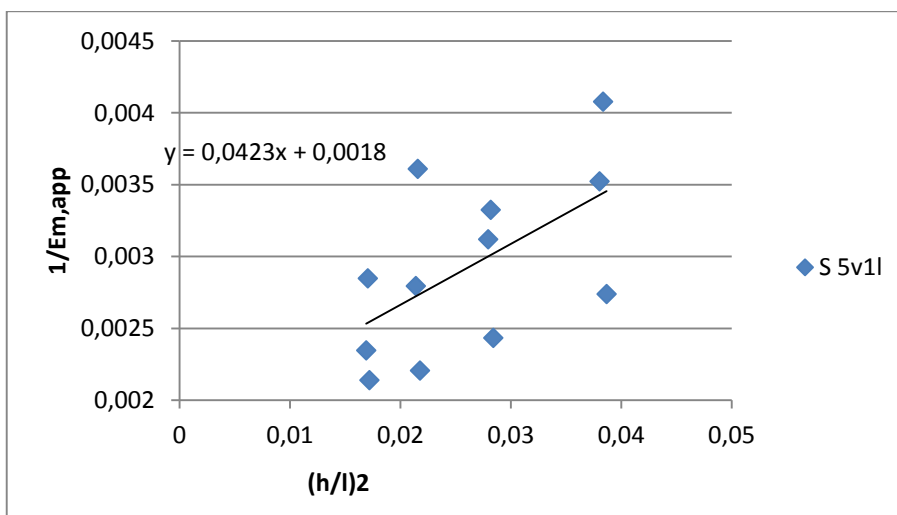


Obr. 29 Závislost maximální pevnosti pětivrstvého panelu na počtu lamel

Graf (Obr. 29) vyjadřuje závislost průměrné meze pevnosti, tedy maximální pevnosti třívrstvého zkušební tělíska na počtu jeho lamel. V grafu je také vyznačena maximální a minimální hodnota pevnosti jednotlivých zkušebních těles.

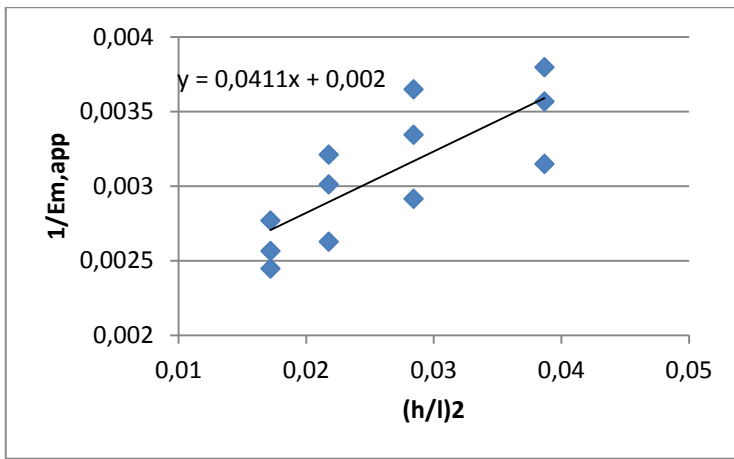
6.2 Smyk

6.2.1 1 lamela



Obr. 30 Graf pro výpočet smykového modulu pružnosti vzorku o šířce jedné lamely

6.2.2 2 lamely

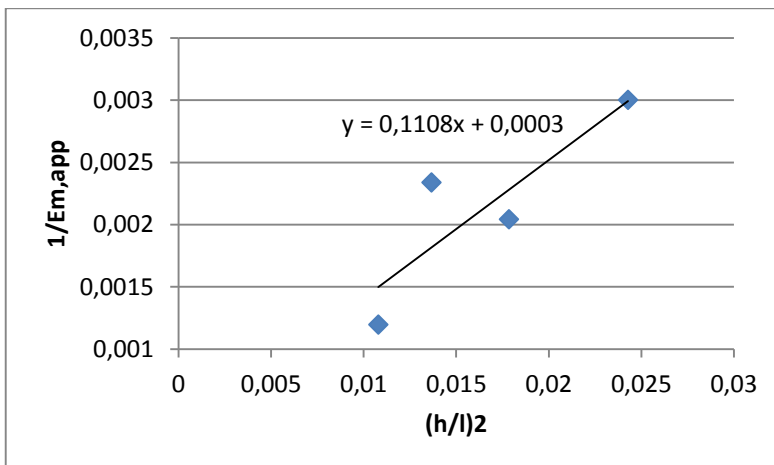


Obr. 31 Graf pro výpočet smykového modulu pružnosti vzorku o šířce dvou lamel

Tab. 19 Vypočtené průměrné hodnoty smykového modulu pružnosti

Počet lamel	Smykový Mod. Pružnosti (MPa)
1	28,36879
2	29,19708

6.2.3 Bokem



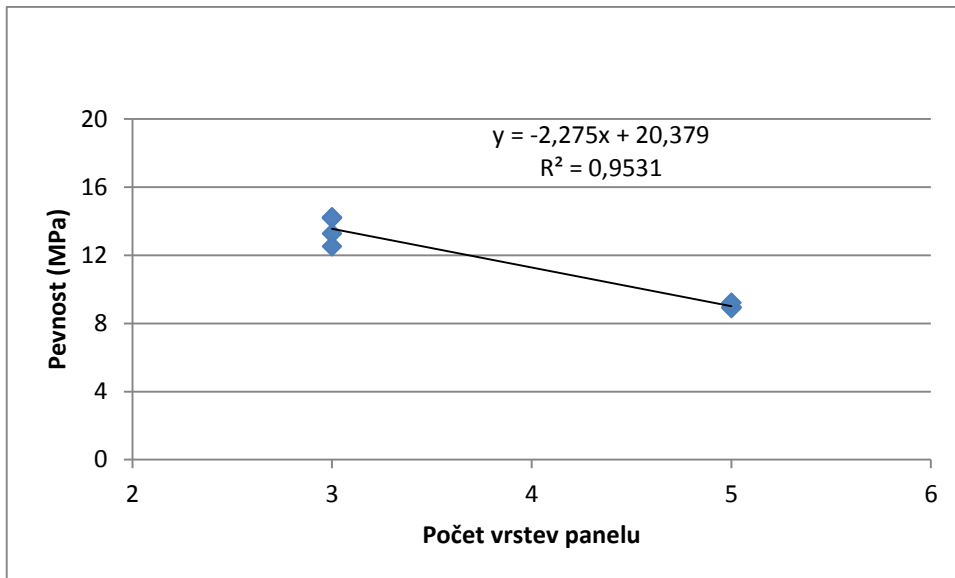
Obr. 32 graf pro výpočet smykového modulu pružnosti bokem namáhaného vzorku

Tab. 20 Vypočtená průměrná hodnota smykového modulu pružnosti

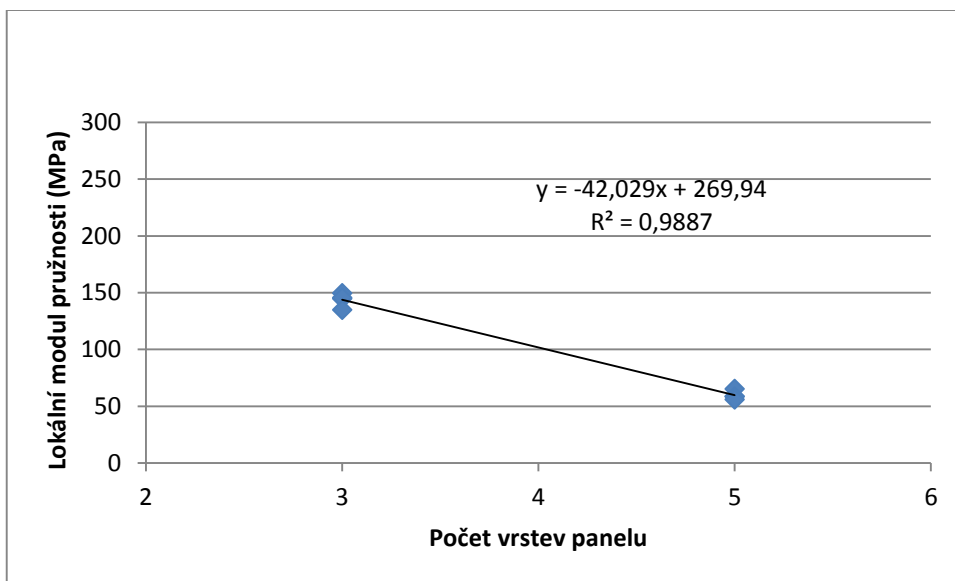
Počet lamel	Smykový Mod. Pružnosti (Mpa)
1	10,909

6.2.4 Srovnání panelů dle počtu vrstev

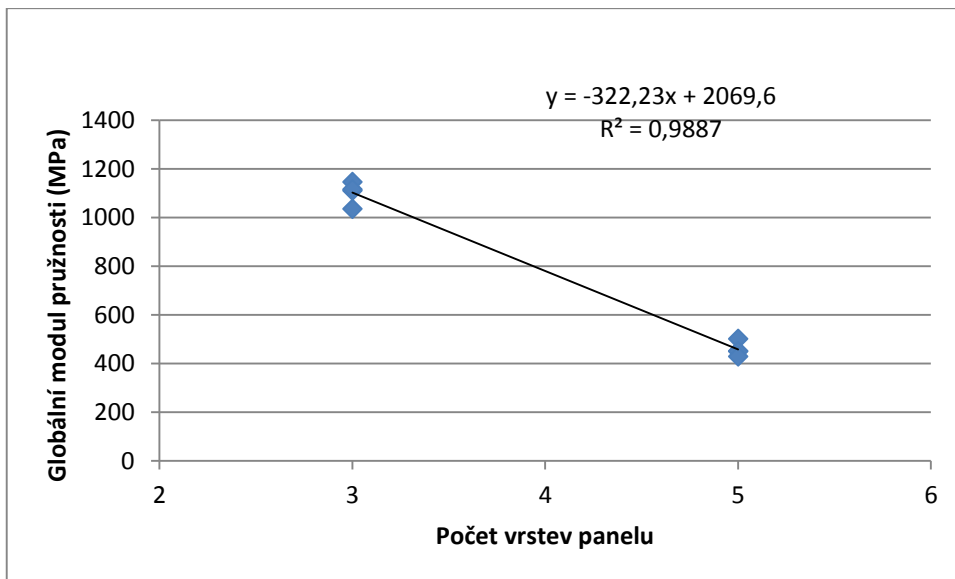
V grafech (obr. 33-35) lze pozorovat srovnání mechanických vlastností zkoumaných panelů v závislosti na počtu jejich vrstev. U všech těchto vlastností je vidět klesající trend s přibývajícím počtem vrstev.



Obr. 33 Závislost pevnosti na počtu vrstev panelu



Obr. 34 Závislost lokálního modulu pružnosti na počtu vrstev panelu



Obr. 35 závislost globálního modulu pružnosti na počtu vrstev panelu

6.2.5 Obrázky porušení



Obr. 36 Vytažení kolíku deformace spodní desky panelu



Obr. 37 Střih kolíku při ohybové zkoušce



Obr. 38 Podélné rozštípnutí lamely panelu při ohybové zkoušce

7 DISKUZE

Panely ze smrkového dřeva, spojovaného pouze bukovými kolíky vyrábí firma Thoma-Holz. Tato firma je první a zatím asi i jediná, která vyrábí panely tímto způsobem, bez použití lepidla. Není tedy zatím sestavená norma, která by se věnovala přímo panelům, či nosníkům vyrobených tímto způsobem. Ani samotná firma Thoma-Holz neuvádí informace o mechanických vlastnostech jejich panelů. Pro zkoumání a výpočet mechanických vlastností tohoto nového materiálu jsem tedy použil normu EN 408, která se zabývá výpočtem vlastností konstrukčního dřeva a lepeného lamelového dřeva. Použitím vzorků s různým počtem lamel se pokusím vymezit závislosti mechanických vlastností panelu na šířce zkušební vzorku. Hodnoty naměřených mechanických vlastností srovnám s konstrukčním řezivem z rostlého dřeva dle EN 338 a lepeným nosníkem dle EN 1194.

První měřenou mechanickou vlastností byla pevnost v ohybu. U třívrstvých panelů se pohybovala pevnost od 14 MPa u vzorku o šířce jedné lamely k zhruba 12 MPa u vzorku o šířce 4 lamel jak ukazuje Obr. 22. Trend je tedy mírně klesající, z hlediska rozdílu hodnot, který je tedy zhruba 2 MPa. U pětivrstvých panelů dosahuje průměrná pevnost všech vzorků hodnoty blízké 9 MPa. (Obr. 29) Na rozdíl od třívrstvých panelů jsou hodnoty pevnosti u všech šířek vzorků konstantní. Pětivrstvé panely tedy vykazují vyrovnanější výsledky než panely třívrstvé, z čeho soudím, že šířka zkušební vzorku příliš nezkrsluje pevnost panelu jako celku.

Při srovnání těchto naměřených hodnot pevnosti, při změřené průměrné hustotě kolem 500 kg.m³, s hodnotami pro konstrukční dřevo z normy EN 338, kde rostlé dřevo této hustoty je zařazeno do třídy C40 (Tab. 1), tedy s pevností 40 MPa je vidět že panely pětivrstvé vykazují až čtyřikrát menší pevnost, než rostlé dřevo. Panely třívrstvé dosahují pouze 35% pevnosti rostlého dřeva stejné hustoty. Nosníky, dle normy EN 1194 třídy GL36c (Tab. 3), lepené z lamel o hustotě 510 Kg.m⁻³, což odpovídá hustotě dřeva lamel použitých pro výrobu mých zkušebních panelů, dosahují pevnosti v ohybu 36 MPa. Lepený nosník tedy vykazuje dvakrát vyšší pevnost než třívrstvé panely a více jak třikrát vyšší pevnost než panely pětivrstvé.

Další zkoumanou mechanickou vlastností byl lokální modul pružnosti. U třívrstvých vzorků s jednou lamelou jsem naměřil hodnotu modulu pružnosti 150 MPa. Jak je vidět na Obr. 20 se zvyšujícím počtem lamel zkušebních vzorků se opět velikost naměřených

hodnot snižuje až na 135 MPa u vzorku se čtyřmi lamelami. Průměrná hodnota lokálního modulu pružnosti pětivrstvých vzorků je 60 MPa, tedy zhruba poloviční hodnota vzorků třívrstvých. Jak je vidět na obr. 27 maximální a minimální hodnoty jsou takřka totožné s hodnotami průměrnými, což ukazuje na nepřilíš velké rozdíly u zkoumaných vzorků.

Globální modul pružnosti třívrstvých panelů (Obr. 21) se pohyboval od 1147 MPa u vzorků s šířkou jedné lamely panelu až po 1036 MPa pro vzorky se čtyřmi lamelami. Trend je tedy opět mírně klesající. Stejně je tomu tak i u vzorků pětivrstvých, kde však hodnoty modulu pružnosti dosahují pouze 451 MPa u vzorku s jednou lamelou a 429 MPa u vzorku se čtyřmi lamelami. (Obr. 28) Jako u předchozích dvou zkoumaných mechanických vlastností i u globálního modulu pružnosti tedy pětivrstvé vzorky vykazují nižší hodnoty než vzorky třívrstvé.

Průměrná hodnota modulu pružnosti konstrukčního žeziva třídy dle EN 338 C40, tedy odpovídající třídě lamel použitých pro výrobu panelů je 14000 MPa. Naměřené hodnoty u mých třívrstvých vzorků jsou tedy 12 krát menší. U pětivrstvých je tato hodnota až 30 krát menší. Stejná situace je i v porovnání s pevnostní třídou lepených nosníku GL36c, kde je modul pružnosti v ohybu stanoven na 14700 MPa.

Poslední měřenou mechanickou vlastností byl smykový modul pružnosti, který byl měřen pouze u panelu pětivrstvého a to na vzorcích o šířce jedné a dvou lamel panelu. U jednolamelového vzorku byla naměřena průměrná hodnota smykového modulu pružnosti 28 MPa a u vzorku s dvěma lamelami 29 MPa. U vzorku zkoušeného bokem, byla naměřená hodnota 10,9 Mpa.

Pro srovnání žezivo stejné třídy dle hustoty C40 má hodnotu modulu pružnosti ve smyku 880 MPa dle EN 338 a lepený nosník třídy GL36c 850 Mpa. Rozdíl v hodnotách uvedených v odborné literatuře a hodnotách naměřených je tedy značný.

Když srovnáme panely třívrstvé a pětivrstvé (obr. 33), lze vyzpozorovat, že panely třívrstvé dosahují vyšších hodnot pevnosti a modulů pružností (obr. 34 a 35). Rostlé dřevo dosahuje vyšších pevností ve směru rovnoběžným s vlákny, z toho lze vyvodit, že hlavní nosné vrstvy panelu budou právě ty, ve kterých působí napětí, vyvolané zatížením, ve směru s vlákny. Třívrstvý panel byl složen ze dvou vrstev těchto „nosných“ lamel a jedné vrstvy lamel otočené o 90 stupňů, zatímco panel pětivrstvý obsahoval tři vrstvy

„nosných“ lamel. Z toho vyplývá, že panel třívrstvý obsahoval větší podíl dřeva, které bylo zatěžováno podél vláken, tedy mohl lépe odolávat napětí při ohybové zkoušce.

Při porovnání výsledků s odbornou literaturou a zjištění, že mnou navrhnuté panely vykazují mnohem nižší hodnoty pevnosti a modulů pružnosti než jsem předpokládal, vyvstává otázka, proč je tomu tak.

Použité řezivo, nevykazovalo žádné známky poškození, ani neobsahovalo příliš mnoho vad a pro povrchové vrstvy, které mají u vrstvených materiálů největší význam pro mechanickou odolnost, byly vybrány lamely s vyšším modulem pružnosti, zjištěném nedestruktivní metodou, ultrazvukem. Z toho lze usuzovat, že mechanické vlastnosti samotného smrkového řeziva muselo něco uměle snižovat. Logicky přichází v úvahu spojovací materiál, tedy kolík z bukového dřeva. Buk by měl mít lepší mechanické vlastnosti, než smrk a v panelu jako takovém by byl namáhan na stříh, tedy by mechanické vlastnosti panelu namáhaného ohybem měl spíše zlepšovat.

Hodnoty meze pevnosti jsou nižší než hodnoty uváděné v literatuře. Dle mého názoru má spojovací kolík vliv i na tuto vlastnost. Napětí se na obvodu kruhu, v našem případě kolíku, mění. Dochází zde k transformaci tenzoru napětí a podle Airyho funkce, lze vypočítat, jak velké a v jakém směru budou působit složky tohoto napětí. Z faktu, že dřevo je anizotropní materiál, tudíž má různé vlastnosti v různých směrech anatomické stavby lze předpokládat, že se vyvolané napětí transformovalo z tahu ve směru vláken, kde dřevo vyniká a bylo porušeno ve směru kolmém na vlákna, kde nedosahuje tak dobrých mechanických vlastností.

Při ohybu vznikala ve spodní části panelu tah a kolík místo aby ztužil celý panel, tak vytlačoval měkké dřevo smrku v okolí, či dokonce působil jako klín. Při srovnání modulu pružnosti naměřeného na vzorcích je nápadná podobnost s hodnotou modulu pružnosti dřeva nikoli v podélném ale v příčném směru a z obrázku (Obr. 38) je patrné, že některé lamely byly podélně rozštípnuty, tedy byly namáhané v příčném směru, právě díky kolíku, který muselo vyvolané napětí obtékat a působil tedy i ve směru příčném, kde dřevo nedosahuje tak dobrých mechanických vlastností jako ve směru podélném.

Jak je vidět z obr. 36, příčná trhlinka v lamelě vždy probíhala v místě, kde byl kolík, což je logické, protože lamela byla v tomto místě oslabena právě otvorem vyvrtaným pro umístění kolíku.

Z obrázku 37 je zřejmé, že byl daný kolík namáhán na stříh, ve kterém došlo i k jeho porušení. Ve většině případů však kolík vydržel, a k poškození docházelo spíše ve smrkových lamelách. U třívrstvých panelů nebyl zaznamenán ani jeden případ stříhu kolíku.

8 ZÁVĚR

Byly vyrobeny celkem čtyři panely pětivrstvé a tři třívrstvé. Pro zkoušku pevnosti lokálních a globálních modulů pružnosti v ohybu byly z obou skupin panelů vyřezány tři vzorky o šířce jedné až čtyř lamel. Pro zjišťování smykového modulu pružnosti byly použity vzorky pouze pětivrstvé o šířce jedné a dvou lamel.

Experimentálně zjištěné a vypočítané průměrné hodnoty pevnosti v ohybu třívrstvých panelů byly 14,22 MPa pro vzorky o šířce jedné lamely, 14,18 MPa o šířce dvou, 13,27 MPa o šířce tří a 12,53 MPa pro panely o šířce čtyř lamel. U panelů pětivrstvých dosahovala pevnost hodnot 8,95 MPa pro vzorky o šířce jedné lamely. U vzorků se dvěma lamelami 8,95 MPa, 8,89 MPa u čtyř a 9,22 MPa u vzorků se čtyřmi lamelami.

Hodnoty lokálních modulů pružnosti v ohybu třívrstvých panelů byly 149,62 MPa pro vzorky o šířce jedné lamely. Vzorky o šířce dvou lamel 144,96 MPa, tři 145,66 MPa a čtyř lamel 135,18 MPa. Hodnoty těchto modulů pružnosti pro pětivrstvé panely byly 58,89 MPa pro vzorky o šířce jedné lamely. Vzorky o šířce dvou lamel 65,52 MPa, tři 58,77 MPa a čtyř lamel 55,99 MPa.

Poslední zjišťovanou ohybovou mechanickou vlastností byl globální modul pružnosti. Ten dosahoval u třívrstvých panelů průměrných hodnot 1147,10 MPa u vzorků se jednou lamelou, 1111,39 MPa u vzorků se dvěma lamelami, 1116,69 MPa pro vzorky se třemi lamelami a 1036,39 MPa se čtyřmi lamelami. U pětivrstvých panelů byly změřeny tyto průměrné hodnoty. 451,50 MPa pro vzorky s jednou lamelou, 502,37 MPa se dvěma, 450,58 MPa se třemi a 429,31 MPa se čtyřmi lamelami.

Průměrné hodnoty smykového modulu pružnosti pětivrstvého panelu o šířce 1 lamely byly naměřeny 28,37 MPa a 29,20 u vzorku o šířce dvou lamel. Smykový modul pružnosti pětivrstvého vzorku zkoušeného bokem o výšce jedné lamely byl 10,91 MPa.

9 SUMMARY

The main aim of the thesis was an experimental determination of mechanical properties of laminated panels made of construction spruce wood by destructive methods according to EN 408. Panels were made of crosswise stacked spruce lumber connected with beech pins without the use of adhesives. Two versions were produced - three and five-layer panels.

Manufactured panels were cut into test specimens which were gradually loaded with 4 points bending to determine maximal bending strength which was and modulus of elasticity. To determine the shear modulus 3 points bending were used. Test procedures and calculations of the properties were carried out as prescribed in EN 408. Maximal strength was 14 MPa for 3 - layer and 9 MPa for five layer panel. Local modulus of elasticity were approximately 140 Mpa for 3 – layer and MPa in panel that has five lamels. Global modulus of elasticity in three layer panel was calculated as 1100 MPa and 450 Mpa in five layer panel. Shear modulus of elasticity were determined only on file layer panels and was 28 MPa i one section specimen and 29 Mpa in specimens with two lamels. Shear modulus of elasticity of specimen tested on side was 10 Mpa.

Comparing the measured values of mechanical properties with the literature, I find that the designed panels are not well suited for use in timber construction and need to be redesigned or found new solutions for such panels, which would have better resistance to mechanical damage in bending.

10 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

POŽGAJ, A. -- CHOVANEC, D. -- KURJATKO, S. -- BABIAK, M. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. vyd. Bratislava: Príroda, 1993. 485 s. ISBN 80-07-00600- 1

MATOVÍČ, Anton. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva: určeno pro posl. lesnické fak., obor dřevařský a lesnický*. 1. vyd. Překlad Bohumil Koželouh. Brno: Vysoká škola zemědělská, 1993, 212 s. ISBN 80-715-7086-9.

KOLB, Josef. *Dřevostavby: systémy nosných konstrukcí, obvodové pláště*. 2., aktualiz. vyd. v České republice. Překlad Bohumil Koželouh. Praha: Grada, 2011, 317 s. ISBN 978-80-247-4071-3.

KUKLÍK, Petr, Anna KUKLÍKOVÁ. *Dřevěné konstrukce: určeno pro posl. lesnické fak., obor dřevařský a lesnický*. 1. vyd. Překlad Bohumil Koželouh. Praha: Vysoká škola zemědělská, 1993, 212 s. ISBN 978-80-01-04132-1.

GANDELOVÁ, Libuše, Petr HORÁČEK a Jarmila ŠLEZINGEROVÁ. *Nauka o dřevě*. Vyd. 3., nezměn. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2009, iv, 176 s. ISBN 978-80-7375-312-2.

HORÁČEK, P., 2008: *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. Brno, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně.

ČSN EN 338 (2010). *Konstrukční dřevo - Třídy pevnosti*.

ČSN EN 408 (2003). *Dřevěné konstrukce - Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo*

-

Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností.

ČSN EN 1194 (1999). *Dřevěné konstrukce - Lepené lamelové dřevo - Třídy pevnosti a stanovení charakteristických hodnot*

Dřevo, fyzikální a mechanické vlastnosti, vady dřeva, vlhkost a sušení dřeva. [online]
[cit. 2016-04-15] Dostupné z:

http://drevari.humlak.cz/data_web/Data_skola/HUdreva/2.pdf

NOVÁK, P., 2013. Mechanické vlastnosti dřeva domácích dřevin. [online]] [cit. 2016-04-15] Dostupné z: <http://www.drevostavitel.cz/clanek/mechanicke-vlastnosti-dreva-domacich-drevin>

Dřevostavby. [online]. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://www.drevostavby.cz/>

Interiér a stavby. [online]. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://www.bydleni.cz/>