

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF BUILDING TESTING

KONSTRUKČNÍ LAMELOVÉ DŘEVO VYZTUŽENÉ KOMPOZITNÍMI MATERIÁLY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

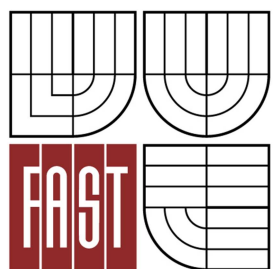
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PAVEL KOVÁCS

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF BUILDING TESTING

KONSTRUKČNÍ LAMELOVÉ DŘEVO VYZTUŽENÉ KOMPOZITNÍMI MATERIÁLY

STRUCTURAL LAMINATED WOOD REINFORCED WITH COMPOSITE MATERIALS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PAVEL KOVÁCS

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR ŽÍTT

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavebního zkušebnictví

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Pavel Kovács
Název	Konstrukční lamelové dřevo vyztužené kompozitními materiály
Vedoucí diplomové práce	Ing. Petr Žítt
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2011
Datum odevzdání diplomové práce	13. 1. 2012
V Brně dne 31. 3. 2011	

.....
prof. Ing. Leonard Hobst, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

- [1] ČSN 73 2030 Zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí
- [2] ČSN EN 1995-1-1 Navrhování dřevěných konstrukcí
- [3] ČSN EN 408 Dřevěné konstrukce - Lepené lamelové dřevo - Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností
- [4] ČSN EN 1194 Dřevěné konstrukce - Lepené lamelové dřevo - Třídy pevnosti a stanovení charakteristických hodnot
- [5] Ostatní související normové předpisy
- [6] Dřevěné konstrukce, Doc. Ing. Petr Kuklík, CSc., ČVUT v Praze, Česká technika – nakladatelství ČVUT, Praha, říjen 2005
- [7] odborné články, vědecké časopisy, sborníky konferencí

Zásady pro vypracování

Rešerše dostupné literatury a podkladů zabývajících se obdobnými problémy v rámci řešení zadané diplomové práce. Znalost teoretických postupů výroby konstrukčního lamelového dřeva. Stanovení fyzikálně - mechanických vlastností použitých materiálů. Ideové návrhy zesílení konstrukčních lamelových prvků. Komplexní vypracování metodiky laboratorních zkoušek včetně interpretace výsledků. Statický výpočet dle příslušných normových předpisů. Souhrnné srovnání hodnot získaných laboratorními zkouškami s teoretickými předpoklady.

Předepsané přílohy

1. Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací
2. Ideové návrhy zkušebních prvků
2. Výkresová dokumentace
3. Vyhodnocení dat zatěžovacích zkoušek a doplňkových laboratorních zkoušek
4. Numerická analýza konstrukčních prvků
5. Fotodokumentace

.....
Ing. Petr Žítt
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Diplomová práce popisuje experimentální program, který zkoumá zesílení nosníků z lepeného lamelového dřeva pomocí kompozitní výztuže. Práce porovnává chování nosníků zesílených kompozitní výztuží s nosníkem nevyztuženým a s nosníkem z rostlého dřeva. Práce se dále zabývá určováním a vyhodnocováním fyzikálně-mechanických vlastností použitých materiálů.

Klíčová slova

lepené lamelové dřevo, kompozitní výztuž, zesilování, čtyřbodová zatěžovací zkouška v ohybu, fyzikálně-mechanické vlastnosti

Abstract

This master's thesis describes an experimental program investigating the strengthening of beams of glued laminated timber with composite reinforcement. The work compares the behavior of beams reinforced with composite reinforcement with unreinforced beam and with solid timber beam. The work also deals with identifying and evaluating the physic-mechanical properties of materials.

Keywords

glued laminated timber, composites reinforcement, strengthening, four point flexure testing, physic-mechanical properties

Bibliografická citace VŠKP

KOVÁCS, Pavel. *Konstrukční lamelové dřevo vyztužené kompozitními materiály*. Brno, 2011. 92 s., 21 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Petr Žítt.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně, a že jsem uvedl všechny použité, informační zdroje.

V Brně dne 12.1.2012

.....
podpis autora

Děkuji prof. RNDr. Ing. Petru Štěpánkovi, CSc. za ochotu podílet se na řešení projektu *GAČR P104/10/2153 – Kompozitní konstrukce na bázi vysokohodnotných silikátů a dřeva – environmentální optimalizace a experimentální ověření.*

Mé poděkování patří všem, kteří mi s diplomovou prací pomáhali jakýmkoliv způsobem a měrou, zejména pak vedoucímu mé diplomové práce Ing. Petru Žíttovi za čas, který mi věnoval a za trpělivost, kterou se mnou měl. Jeho rady a zkušenosti mi byly velkým přínosem. Dále bych chtěl poděkovat svým spolužákům, kteří mi nesčetněkrát pomohli, a také své rodině, která mě podporovala po celou dobu studia.

OBSAH

1. ÚVOD	8
2. CÍLE	9
3. REŠERŠE	10
4. MATERIÁLY A JEJICH FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ VLASTNOSTI	24
4.1 Materiály	24
4.1.1 Dřevo	24
4.1.2 Lepené lamelové dřevo	27
4.1.3 Syntetická výztuž	29
4.1.4 Lepení	31
4.2 Fyzikálně-mechanické vlastnosti	32
4.2.1 Stanovení pevnosti v ohybu rovnoběžně s vlákny	32
4.2.2 Stanovení globálního modulu pružnosti v ohybu	35
4.2.3 Stanovení pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny	39
4.2.4 Stanovení modulu pružnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny	41
4.2.5 Stanovení hustoty lepeného lamelového dřeva	43
4.2.6 Stanovení pevnosti CFRP lamely v tahu	44
4.2.7 Stanovení pevnosti lepeného spoje	45
5. VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	47
6. EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA	49
6.1 Měřené veličiny	49
6.2 Princip použitých snímačů	53
6.3 Zatěžovací zkouška čtyřbodovým ohybem	55
6.3.1 Nevztužený nosník	56
6.3.2 Nosníky vyztužené CFRP lamelou	57
6.3.3 Nosník z rostlého dřeva	63
7. NUMERICKÁ ANALÝZA	64
7.1 Teoretické předpoklady	64
7.2 Únosnost a použitelnost	64
8. POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ	78
8.1 Zatěžovací zkouška čtyřbodovým ohybem	78
8.2 Fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálů	83
9. ZÁVĚR	87

1. ÚVOD

Dřevo je u nás i ve světě jedním z nejvšestrannějších a nejpoužívanějších přírodních stavebních materiálů. Patří mezi nejstarší stavební materiály vůbec. Má celou řadu předností, ale i nedostatků.

Mezi přednosti patří, že je to materiál pevný a přitom lehký, má dobré tepelně izolační vlastnosti, je lehce opracovatelný, je možné ho lepit, je esteticky působivý, má dobré rezonanční vlastnosti, je recyklovatelný atd.

Nedostatky jsou způsobeny změnou vlastností dřeva, k nimž dochází v průběhu času. To je důsledek nestejněměrné struktury – anizotropie (dřevo má v různých směrech různé vlastnosti), přítomností vad, sesychání, bobtnání, borcení, praskání, hnití, hoření atd. [7]

Nevýhodou dřeva je jeho nízká tuhost. Pro zlepšení tuhosti se nabízí možnost spojení dřeva s materiálem s vysokou pevností v tahu, jako je například syntetická výztuž. Pokud výztuž vhodně umístíme do tažené oblasti průřezu a docílíme dokonalého spojení mezi výztuží a samotným dřevem, zlepšíme pevnost v ohybu a tuhost daného průřezu, a tím dojde k efektivnějšímu využití tlačných vláken průřezu.

2. CÍLE

Hlavním cílem diplomové práce je experimentálně ověřit možné zesílení konstrukčního lamelového dřeva pomocí kompozitních materiálů. V první řadě je snaha shromáždit dostupné informace o způsobech zesilování dřevěných prvků a konstrukcí, použitých materiálech při zesilování, použitých experimentálních metodách zkoušení, prováděných numerických analýzách atd. Dalším cílem práce je na základě zkoušek pevnosti lepeného spoje vybrat vhodné lepidlo pro spojení syntetické výztuže a dřeva.

Nejčastějším materiálem pro zesílení dřevěných prvků byla v minulosti ocel. Ta zvyšovala únosnost prvků v podobě táhel a vzpěr, různých úhelníků či I profilů. Tyto metody zesilování však mají několik nevýhod. Například koroze oceli při styku s vlhkostí dřeva, hmotnost ocelových prvků a v neposlední řadě jejich viditelnost na zesilovaném prvku či konstrukci, což velkou měrou snižuje estetickou hodnotu dřeva.

V posledních 15 letech se v moderním stavitelství stále více využívá syntetických výztuží. Jejich největší výhodou je vysoká pevnost v tahu a modul pružnosti vzhledem k jejich hmotnosti. Další výhodou je efektivní zesílení konstrukce v krátkém časovém období při minimálních požadavcích na prostorovou náročnost řešení. Nejčastěji se tyto materiály používají jako externě lepená výztuž na povrch konstrukce v podobě lamel či tkanin. Využití FRP materiálů pro zesílení dřevěných prvků má velký potenciál. Na rozdíl od ocelové výztuže kompozitním materiálům nevadí vlhkost dřeva, jejich nízká hmotnost nijak neovlivňuje stávající konstrukci a při vhodně zvolené aplikaci nenarušuje estetickou stránku konstrukce. Zejména u rekonstrukcí památkově chráněných či jinak významných objektů je kladen důraz na maximální zachování původních dřevěných prvků konstrukce, což je s využitím běžných metod obtížné. [9]

Jelikož zesilování dřevěných konstrukcí pomocí syntetické výztuže nepatří v České Republice k probádaným tématům, je vypracována rešerše daného problému, na jejímž základě se dále postupuje při výrobě a zkoušení prvků.

3. REŠERŠE

V dnešní době je ve stavebnictví stále více kladen důraz na používání materiálů z obnovitelných zdrojů, jako je například dřevo. Velmi oblíbeným materiálem je v poslední době lepené lamelové dřevo, ze kterého jsou vyráběny různé konstrukční prvky, či celé konstrukce.

Velikost těchto dílců je však omezena technologií výroby. Hlavní výhodou zesilování těchto prvků je možnost použití menších průřezů při stejném zatížení nebo překlenutí většího rozpětí při zachování původního průřezu. V tomto článku jsou popsány experimentální programy, které zkoumají zesílení dřevěných prvků v ohybu za použití recyklovatelných syntetických výztuží.

Informace o problematice zesilování lepeného lamelového dřeva byly čerpány z následujících článků:

Článek č. 1: *Low-grade glued laminated timber reinforced with FRP plate*

(Gary M. Raftery, Annette M. Harte)

Článek č. 2: *Creep response of glued-laminated beam reinforced with pre-stressed*

sub-laminated composite (M. Yahyaei-Moayyed, F. Taheri)

Článek č. 3: *Modeling of timber beams strengthened with various CFRP composites*

(Yail J. Kima,_, Kent A. Harries)

Článek č. 4: *Experimental and computational investigations into creep response of*

AFRP reinforced timber beams (M. Yahyaei-Moayyed, F. Taheri)

• **Dřevo**

K volbě dřeviny každý z experimentálních programů přistupoval různě. V některých experimentálních programech byl použit pouze jeden typ dřeviny, v jiných dva a více. Nejčastějšími dřevinami pro výrobu zkušebních těles byly smrk, borovice a jedle. V článku č. 3 byla provedena studie porovnávající mechanické vlastnosti pěti různých dřevin:

- *Jedle (Douglas Fir)*
- *Bříza (Yellow Birch)*
- *Smrk (Stika Spruce)*
- *Topol (Yellow Poplar)*
- *Cedr (Northern White Cedar)*

Tabulka 3.1 – Mechanické vlastnosti jednotlivých dřevin

Species properties used for present study.

Properties ^a	Douglas Fir	Yellow Birch	Sitka Spruce	Yellow Poplar	Northern White Cedar
E_R (GPa)	0.87	1.08	0.77	0.77	1.00
E_L (GPa)	12.83	13.90	9.90	8.40	5.50
E_T (GPa)	0.05	0.70	0.43	0.36	0.08
G_{RL} (GPa)	0.82	1.03	0.63	0.63	1.16
G_{LT} (GPa)	1.00	0.95	0.60	0.58	1.03
G_{RT} (GPa)	0.09	0.24	0.03	0.09	0.08
μ_{TR}	0.29	0.43	0.25	0.33	0.35
μ_{RL}	0.02	0.04	0.04	0.03	0.00
μ_{LT}	0.02	0.02	0.03	0.02	0.00
MOR (MPa)	43	114	65	41	45

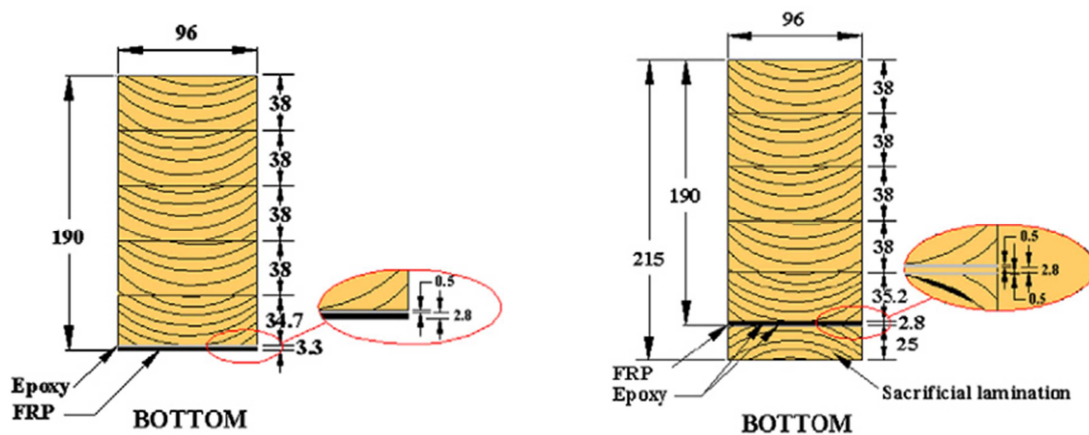
^a E_R , E_L , and E_T = elastic moduli in radial, longitudinal, and tangential directions, respectively; G = shear modulus in various directions; μ = Poisson's ratio in various directions; and MOR = modulus of rupture.

Dřevo pro výrobu zkušebních těles bylo povětšinou získáváno z jedné lokality, aby se zmenšila variabilita vlastností dřeviny. Vytěžené dřevo bylo uměle sušeno na pilách přibližně na hodnotu 18 % vlhkosti. Poté bylo nařezáno na jednotlivé lamely požadovaných rozměrů. Tyto lamely byly následně uloženy po dobu cca tří měsíců v klimatizovaném prostředí s 65 % relativní vlhkostí a teplotou 20 °C, kde se dosáhlo vlhkosti dřeva kolem 12 %. Na konci procesu byla vypočtena objemová hmotnost dřeva a zaznamenána do zkušebního protokolu.

- **Syntetická výztuž**

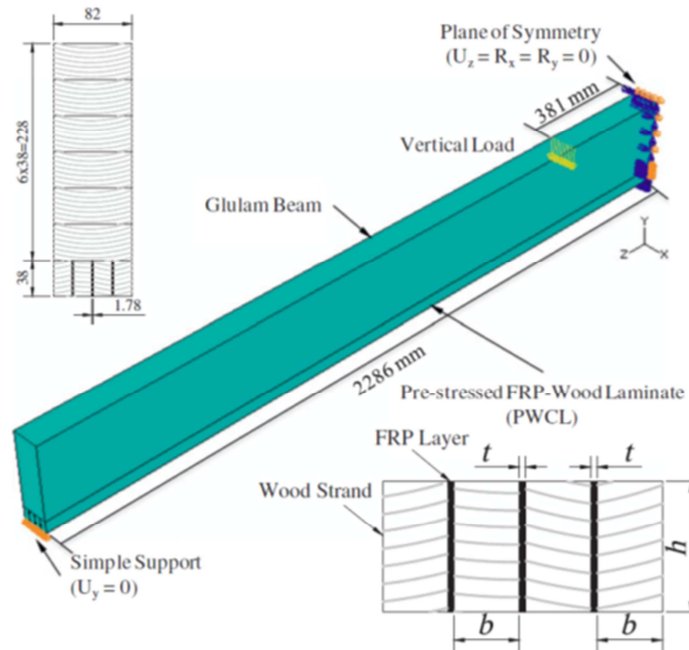
Při výběru výztuže se hodnotili její mechanické vlastnosti, dostupnost a ekonomická výhodnost pro posílení druhořadého dřeva. Pro zesílení dřevěných prvků bylo použito výztuží z uhlíkových, skelných a aramidových vláken. Výztuž byla umístěna buď na spodní vlákna nosníku, nebo mezi dvě spodní dřevěné lamely.

V článku č. 1 bylo k zesílení prvku použito dvou lamel ze skelných vláken tloušťky 1,2 mm slepených vrstvou lepidla tloušťky 0,4 mm. Modul pružnosti lamely byl 45 GPa a pevnost lamely v tahu byla 1000 MPa. U jednoho zkušebního nosníku byla výztuž nalepena na jeho spodní vlákna a v druhém případě byla výztuž nalepena mezi dvě spodní dřevěné lamely viz obr. 3.1.



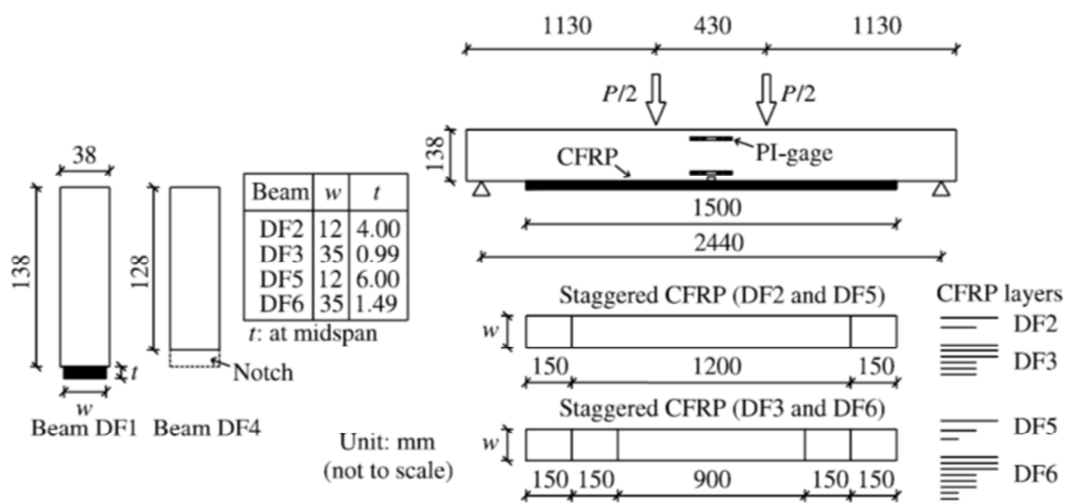
Obr. 3.1 – Umístění výztuže u nosníku z lepeného lamelového dřeva

V článku č. 2 je k vyztužení prvku použito předpjatých kompozitních výztuží vlepených na stojato mezi dřevěné lamely viz obr. 3.2. Jde o nedávno patentovanou technologii, kdy je lepidlo vysoké pevnosti aplikováno na předpjatá vlákna výztuže a dřevěné prvky. Spojením dojde k vnesení tlakových sil do prvku, který je umístěn na spodní straně nosníku. Tato technologie se uvádí pod zkratkou PWCL. Podle tloušťky použité výztuže se odvíjí stupeň vyztužení prvku.



Obr. 3.2 – Nosník z lepeného lamelového dřeva vyztužený pomocí PWCL

V článku č. 3 bylo k zesílení prvků použito lišt a pásů z uhlíkových vláken. CFRP lišty tloušťky 2 mm a šířky 16 mm měly modul pružnosti 227 GPa a pevnost v tahu 3800 MPa. CFRP pásy tloušťky 0,165 mm a šířky 35 mm měly modul pružnosti 124 GPa a pevnost v tahu 2068 MPa. Vrstvené výztuže byly lepeny na spodní vlákna nosníků v délce 1500 mm, viz obr. 3.3.



Obr. 3.3 – Zesílení nosníků pomocí vrstvené CFRP výztuže

V posledním článku bylo pro vyztužení dřevěného průřezu použito pruhů výztuže z aramidových vláken tloušťky 1,12 mm a šířky odpovídající šířce nosníku, které byly nalepeny na jeho spodní vlákna. Modul pružnosti výztuže byl 52 GPa a pevnost v tahu 970 MPa.



Obr. 3.4 – Pruh výztuže z aramidových vláken

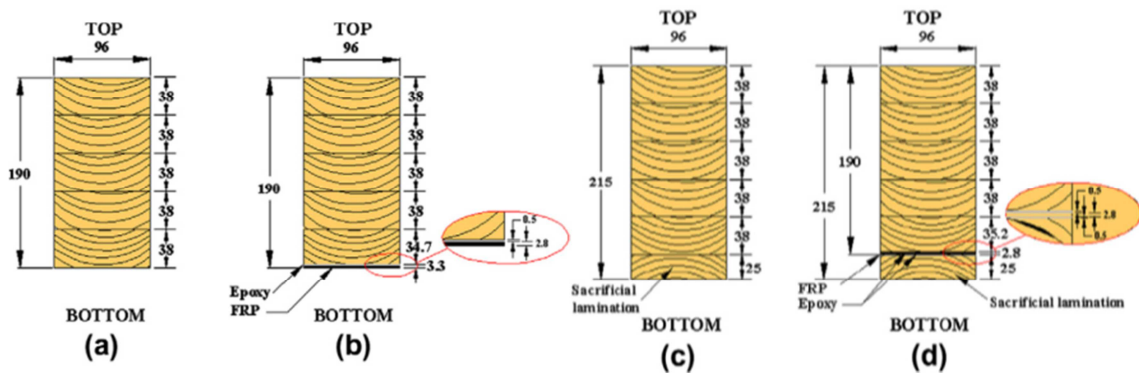
- **Lepidla**

Pro výběr vhodného lepidla byla provedena samostatná studie, která testovala smykové parametry několika druhů lepidel. Pro spojení jednotlivých dřevěných lamel bylo například podle článku č. 1 použito fenol-resorcinol-formaldehydové lepidlo. V jiné literatuře se uvádí melamin-formaldehydové lepidlo.

Pro spojení syntetické výztuže s dřevěným povrchem bylo ve všech případech použito lepidlo na epoxidové bázi. Jednalo se například o epoxidové melaminové pryskyřice nebo o epoxidové dvousložkové tixotropní lepidlo.

- **Experimentální program a testování**

Experimentální program v článku č. 1 zahrnoval výrobu a zkoušení trámů z lepeného dřeva. Dvěma hlavními testovanými parametry byl modul pružnosti a pevnost v ohybu. Pro experiment byly vyrobeny dva odlišné průřezy. Rozměry a způsob vyztužení jednotlivých průřezů je znázorněn na obrázku 3.5.



Obr. 3.5 – Rozměry průřezů zkoušených nosníků

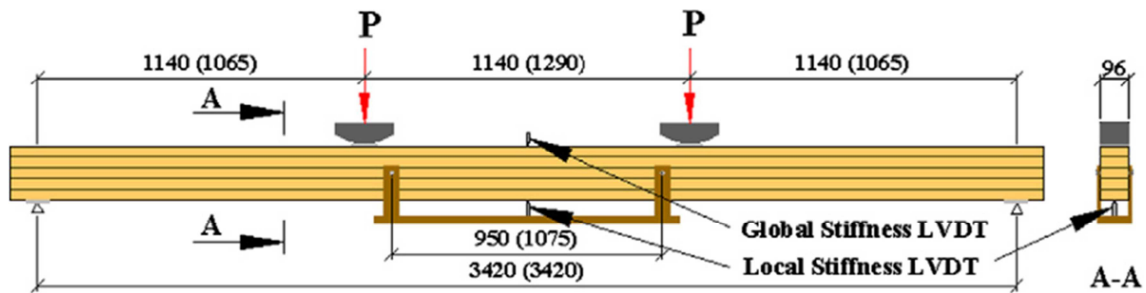
V tabulce 3.2 jsou uvedeny počty vyrobených průřezů a jejich číslování.

Tabulka 3.2 – Počet a číslování jednotlivých průřezů

Test programme.

Phase	Arrangement	Depth (mm)	Repetitions	Beam numbers
A	Unreinforced	190	6	1, 2, 3, 36, 37, 38
B	Reinforced	190	5	5, 11, 18, 24, 31
C	Unreinforced	215	10	4, 9, 10, 16, 17, 22, 23, 29, 30, 33
D	Reinforced	215	5	8, 15, 21, 28, 35

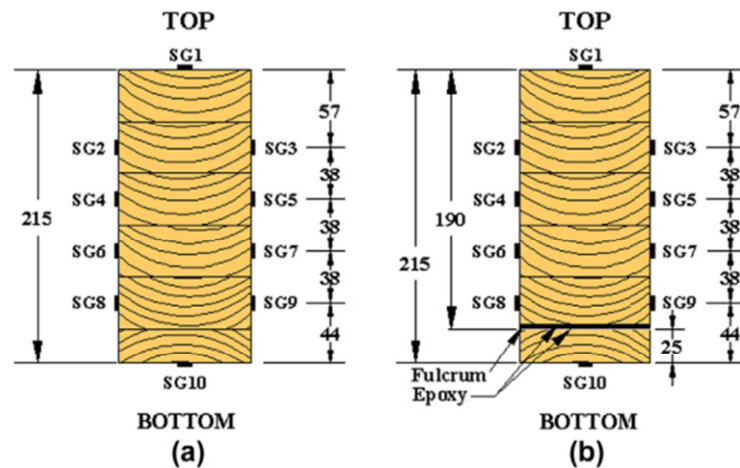
Všechny trámy (A-D) byly z počátku testovány čtyřbodovým ohybem, kdy byl zjišťován globální a lokální modul pružnosti v ohybu. Zkouška probíhala v souladu s normou EN 408. Testování bylo provedeno pomocí zařízení Dartec 500 kN. Lokální průhyb byl měřen pomocí LVDT snímače dráhy umístěném v rámu. Umístění rámu na nosníku je ve vzdálenosti pětinasobku výšky průřezu od osy nosníku viz obr. 3.6. Průhyb je tak měřen v místě maximálního ohybového momentu a není ovlivněn deformací ve smyku nebo zatlačením podpor nosníku. Globální průhyb je měřen pomocí LVDT snímače, který měří průhyb nosníku po celé délce mezi podporami.



Obr. 3.6 – Schéma zatěžovací zkoušky a rozmístění LVDT snímačů

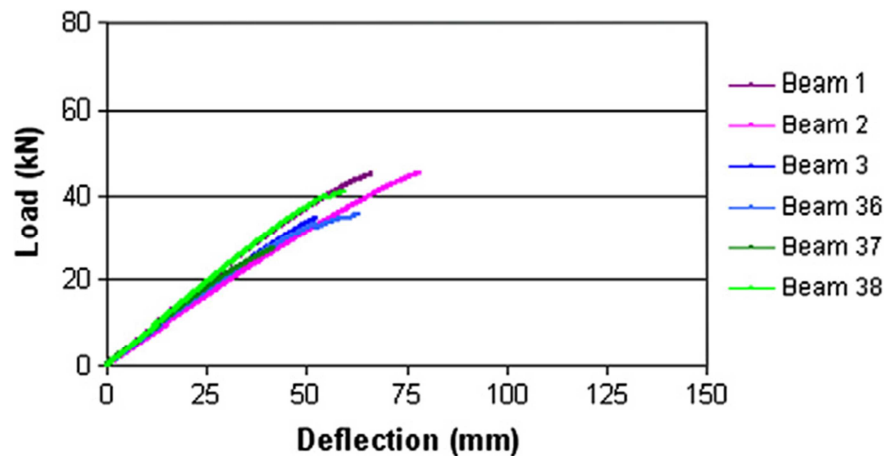
Zatěžování trámů probíhalo konstantní rychlostí a bylo zajištěno, že aplikované zatížení nepřekročí 40 % z maximálního zatížení nebo nedojde k překročení meze pružnosti.

Pevnostní zkoušky byly provedeny po odstranění LVDT snímačů. Porušení vzorků bylo provedeno v souladu s normou EN 408, v časovém rozmezí 300 ± 120 s. Chování vláken nosníku při zatěžování bylo pozorováno na průřezech výšky 215 mm. Deset tenzometrů s délkou základny 60 mm bylo rozmístěno po výšce nosníku viz obr. 3.7.

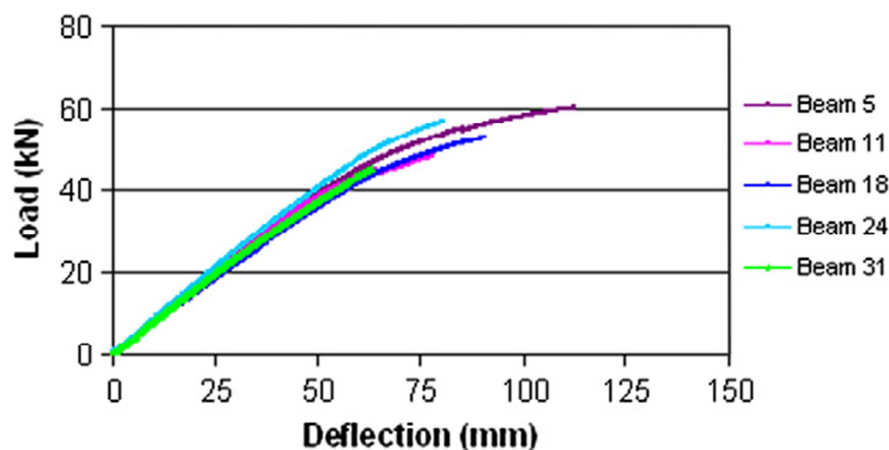


Obr. 3.7 – Rozmístění tenzometrů

V grafu 3.1 je vidět, že nevyztužený průřez (fáze A) se choval takřka lineárně, až do svého porušení. Oproti tomu vyztužený průřez (fáze B) vykazoval takřka lineární chování cca do dvou třetin maximálního zatížení, poté lze pozorovat pružné chování až do chvíle, kdy došlo k porušení nosníku, viz graf 3.2.



Graf 3.1 – Závislost průhybu na zatížení nevyztuženého nosníku (fáze A)

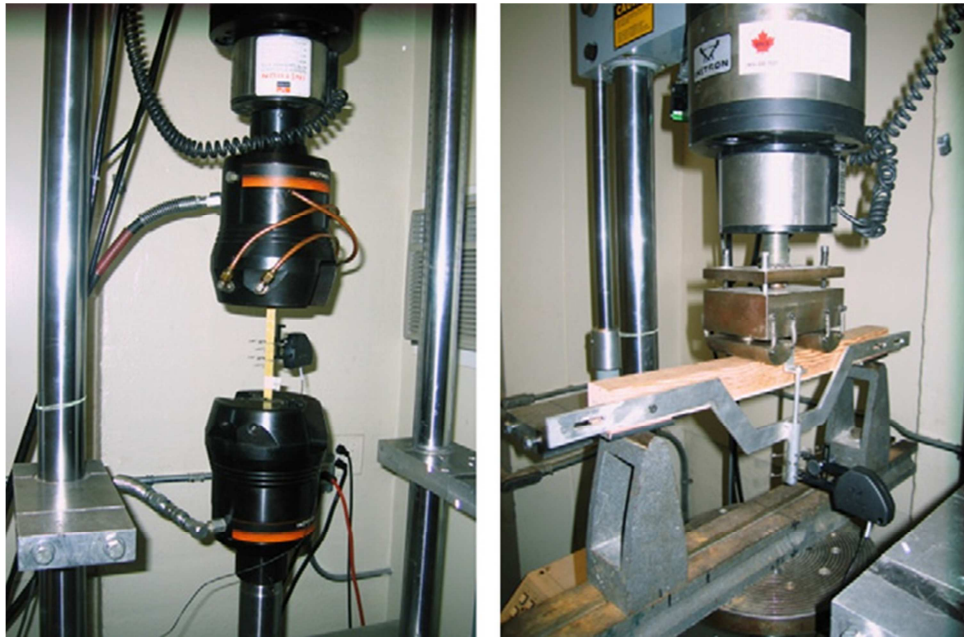


Graf 3.2 – Závislost průhybu na zatížení vyztuženého nosníku (fáze B)

V článku č. 2 a 4 bylo testováno tzv. tečení prostého dřeva a jednotlivých syntetických materiálů použitých k zesilování dřevěných prvků. Byl zkoumán krátkodobý a dlouhodobý vliv zesílení prostého dřeva kompozitními materiály.

V článku č. 2 byly testovány syntetické výztuže z aramidových a skelných vláken a výztuže z kombinací těchto dvou vláken. V druhém článku byla testována pouze výztuž z aramidových vláken.

Druh dřeva použitého na výrobu zkušebních těles pro dlouhodobé zatěžovací testy byl v obou případech stejný. Jednalo se o žlutou borovici (SYP) a jedli Douglas (DF).

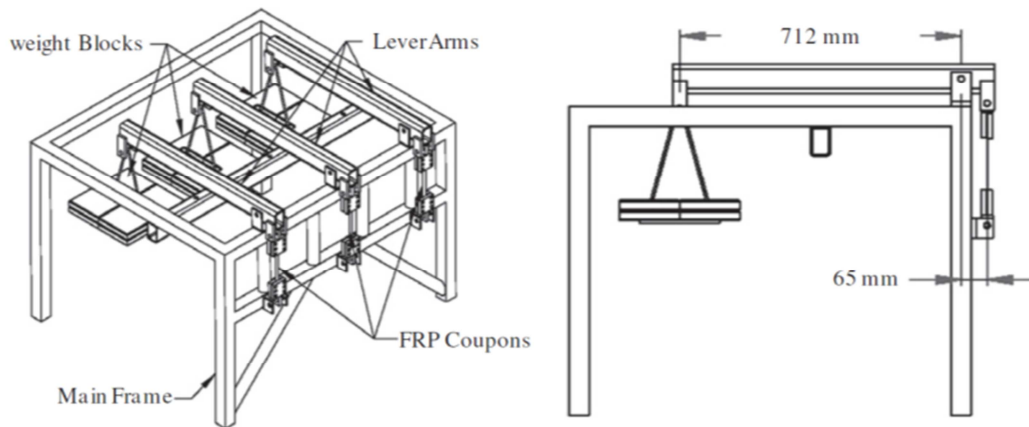


Obr. 3.8 – Krátkodobé statické zkoušky jednotlivých materiálů

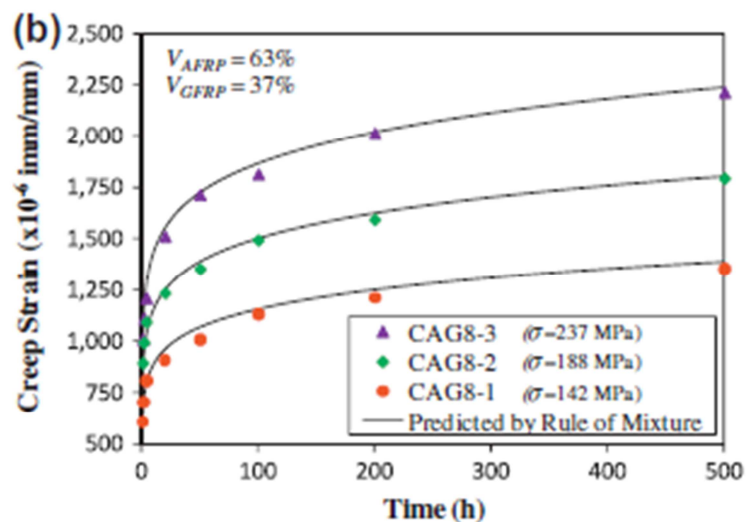
Na obrázku 3.10 je schéma zařízení vyvolující dlouhodobé zatížení na AFRP výztuže. Zařízení je schopno zatěžovat tři výztuže najednou, každou jinou konstantní zátěží. V článku č. 4 byly zatěžovány AFRP výztuže různých pevností (200 – 620 MPa).



Obr. 3.9 – Tahová zkouška tečení AFRP výztuží



Obr. 3.10 – Schéma pákového zařízení pro zkoušky tečení AFRP kompozitů

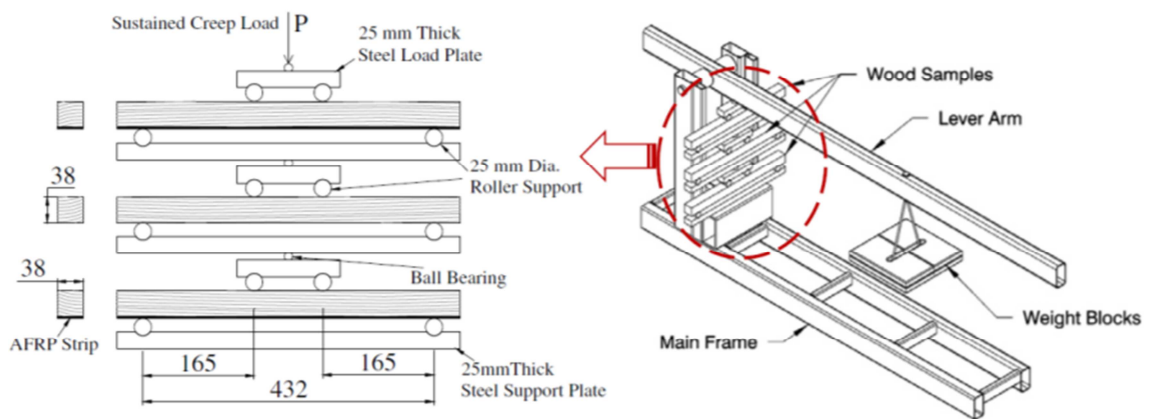


Graf 3.3 – Průběh testu tečení hybridní AGFRP výztuže

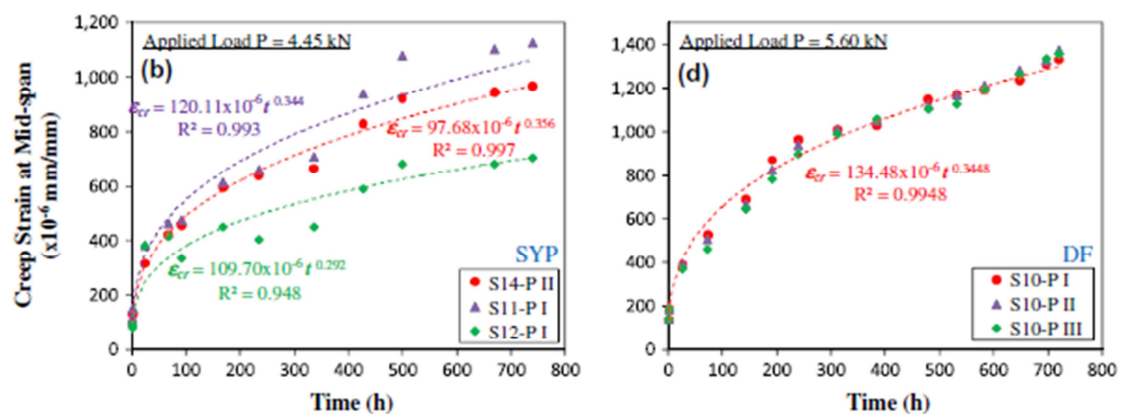
Dlouhodobé chování nosníků z prostého dřeva a nosníků vyztužených AFRP výztuží bylo zkoumáno na pákovém přístroji, který je schopný zatěžovat tři prvky najednou takřka konstantní zátěží. Zatěžování zkušebních prvků probíhalo několik měsíců při konstantní teplotě a relativní vlhkosti.



Obr. 3.11 – Dlouhodobá zatěžovací zkouška čtyřbodovým ohybem

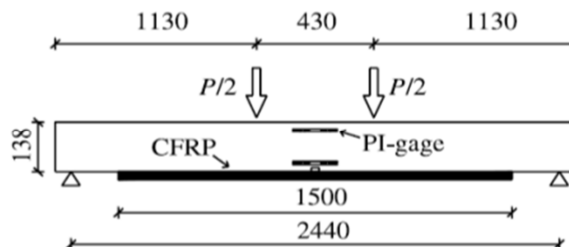


Obr. 3.12 – Schéma pákového zařízení pro dlouhodobé zatěžování čtyřbodovým ohybem



Graf 3.4 – Průběh testu tečení (SYP) a (DF) dřeva

Podle článku č. 3 bylo testováno šest zkušebních těles vyrobených z jedle Douglas. Nosníky měly šířku 38 mm, výšku 138 mm a délku 2690 mm. U třech nosníků bylo simulováno poškození drážkou 10 x 10 mm na spodní straně. Všechny nosníky byly podrobeny zkoušce čtyřbodovým ohybem. Schéma zatěžovací zkoušky je zobrazeno na obrázku 3.13.



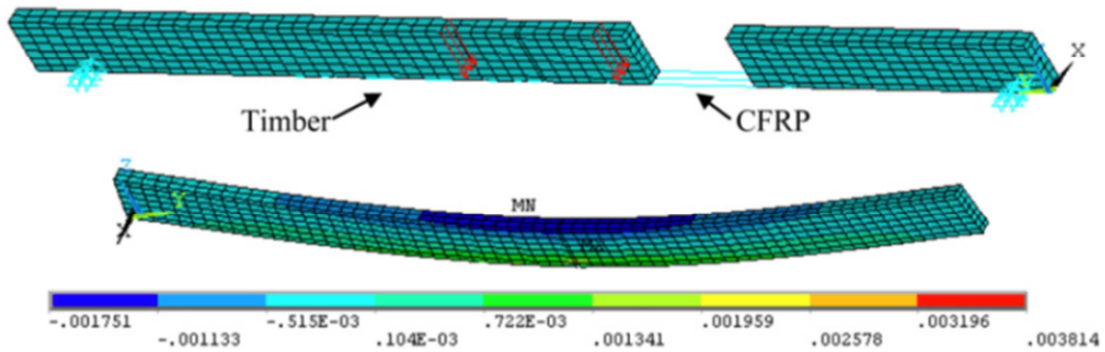
Obr. 3.13 – Schéma zatěžovací zkoušky čtyřbodovým ohybem

Dále tento článek zkoumal mechanické vlastnosti pěti různých dřevin a vhodnost jejich použití pro výrobu zesíleného prvku. Modul pružnosti v ohybu jednotlivých dřevin se pohyboval od 5,5 do 13,9 GPa a pevnost v ohybu se pohybovala v rozmezí 41 až 114 MPa.

- **Numerické modelování**

Pro předvídání chování konstrukcí se zhotovují výpočtové modely. Výsledky z těchto modelů jsou poté porovnávány s výsledky z experimentálních měření.

V článku č. 3 byl sestaven výpočtový model pro předvídání chování dřevěného nosníku zesíleného CFRP výztuží. Trojrozměrný počítačový model byl vytvořen v programu ANSYS, který je založen na metodě konečných prvků. Na obr. 3.14 je vyvinutý FEA model. Dřevo bylo reprezentováno trojrozměrnými prvky (Solid 45). Osmiuzlový element zahrnoval tři translační stupně volnosti na uzel, tak aby odpovídal ortotropním vlastnostem dřevěných trámů. Jednosměrné CFRP kompozity byly modelovány pomocí trojrozměrných prutových prvků (LINK 8). Prvek se skládal ze dvou uzlů, z nichž každý obsahoval tři translační stupně volnosti.



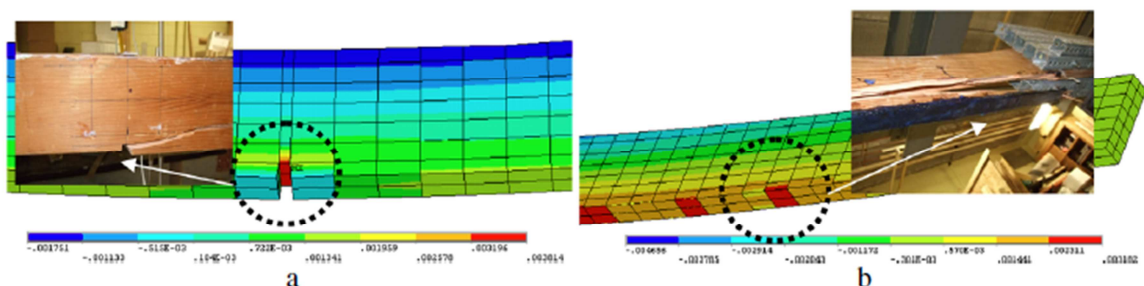
Obr. 3.14 – FEA model dřevěného nosníku zesíleného CFRP výztží

- **Závěry**

Autoři článku č. 1 poukazují na zlepšení pevnosti v ohybu při vhodně umístěné výztuži v tažené oblasti průřezu. Velký vliv na pevnost v ohybu má také kvalita použitého dřeva v oblasti největších tahových namáhání. Poté dojde k efektivnějšímu využití pevnosti dřeva v tlaku. U zkoušených nosníků nebyl zaznamenán výrazný pokluz mezi výztuží a dřevem.

Výsledky experimentu v článku č. 2 ukázaly, že začlenění PWCL systému do lepených nosníků výrazně zlepší jeho únosnost ve srovnání s lepenými nosníky vyztuženými nepředpjatou výztuží FRP. Jako nevýhoda se ukázala ztráta předpětí základního systému PWCL, která dosáhla až 17 %.

Výpočetní model vytvořený v článku č. 3 byl schopen simulovat dva rozdílné druhy porušení zkušebních nosníků. K porušení nosníku došlo buď v polovině rozpětí (a) nebo u konce lepené výztuže (b), kde došlo ke koncentraci napětí viz obr. 3.15.



Obr. 3.15 – Způsoby porušení vyztuženého nosníku

Výsledky z výpočetního modelu se od experimentálních nelišily o víc jak 10 %. Zesílení CFRP výztužemi mělo za následek posunutí neutrální osy a tím k přerozdělení napětí.

Studie v článku č. 4 řešila krátkodobou a dlouhodobou výkonnost dřevěných trámů zesílených aramidovou výztuží (AFRP). Zesílení dřevěných trámů mělo veliký vliv na pevnost v ohybu a modul pružnosti. U nosníků ze žluté borovice bylo zaznamenáno průměrné zlepšení pevnosti v ohybu o 74 % a modulu pružnosti o 20 %. U nosníků z jedle Douglas byla pevnost v ohybu zvýšena v průměru o 31 % a modul pružnosti byl zvýšen v průměru o 11 %. U nosníků vyrobených z jedle Douglas bylo pozorováno selhání v oblasti tlačných vláken.

4. MATERIÁLY A JEJICH FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ VLASTNOSTI

4.1 Materiály

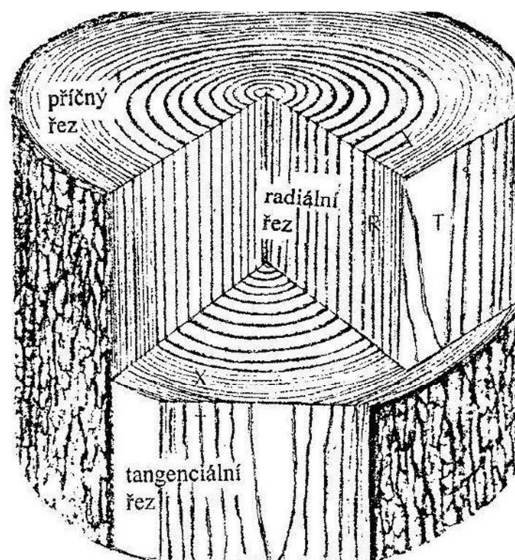
4.1.1 Dřevo

Dřevo je u nás i ve světě jedním z nejstarších a nejoblíbenějších přírodních stavebních materiálů. Mezi jeho výhody patří pevnost při relativně malé objemové hmotnosti, recyklovatelnost, dobré tepelně izolační vlastnosti, je lehce opracovatelný, je možné ho lepit, je esteticky velice působivý atd.

Nevýhody jsou způsobeny změnou vlastností dřeva, k nimž dochází v průběhu času. To je zapříčiněno anizotropií dřeva, to znamená, že má dřevo v různých směrech velice odlišné vlastnosti. Mezi nevýhody patří přítomnost vad, sesychání, bobtnání, borcení, praskání, hnití, hoření, atd.

U dřeva rozeznáváme stavbu makroskopickou a mikroskopickou. Makroskopickou stavbu můžeme pozorovat pouhým okem. Nejdůležitějšími makroskopickými znaky jsou letokruhy, dřev, jádro, cévy, pryskyřičné kanálky apod. Uspořádání těchto znaků pozorujeme na třech základních řezech:

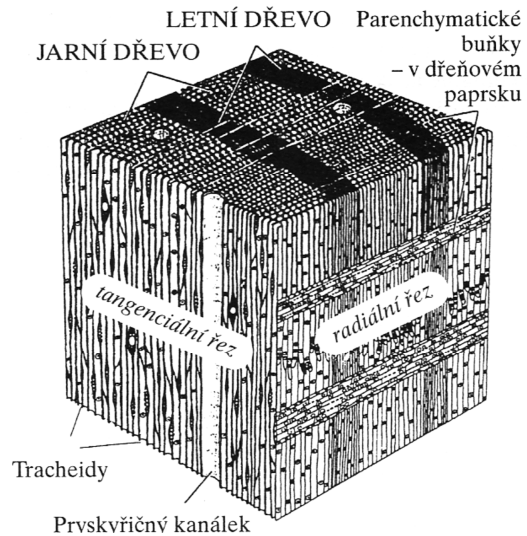
- *Příčný řez*
- *Radiální řez*
- *Tangenciální řez*



Obr. 4.1 – Řezy dřevem [16]

Mikroskopickou stavbu můžeme pozorovat drobnou lupou nebo pod mikroskopem. Dřevo je složeno z buněk, které dělíme do tří typů:

- *Libriformní vlákna*
- *Tracheje a tracheidy*
- *Parenchymatické buňky*



Obr. 4.2 – Mikroskopická struktura jehličnatého dřeva [16]

U dřeva jsou nejdůležitější jeho mechanické vlastnosti, to je schopnost dřeva odolávat účinkům vnějších mechanických sil. Dřevo má v různých směrech odlišné mechanické vlastnosti, které ovlivňuje například směr vláken, vlhkost, objemová hmotnost a anatomická stavba.

Mezi mechanické vlastnosti dřeva patří:

- *Pružnost*
- *Pevnost*
- *Tvrдость*
- *Štípatelnost*
- *Ohýbatelnost*

Pevností dřeva rozumíme jeho nevratnou deformaci nebo celkové porušení dřeva působením vnějších sil. Rozlišujeme několik typů pevností, mezi které patří:

Pevnost v tahu je odolnost dřeva proti působení síly, která se jej snaží prodloužit, při překročení meze pevnosti dřevěný prut praská.

Pevnost v tlaku je odpor, který klade dřevo vnější síle, jež se snaží dřevo stlačit.

Pevnost ve smyku je odolnost dřeva proti působení vnějších sil, které se snaží posunout jednu část tělesa po druhé.

Pevnost v ohybu je schopnost dřeva odolávat zatížení, je-li materiál podepřen a síla působí mimo tyto podpory.

Pevnost ve zpěru je zvláštní případ tlakové pevnosti, kde částečně působí pevnost ov ohybu.

Houževnatost je schopnost dřeva odolávat síle, která působí v pohybu po určité dráze a zatěžuje prvek rázově.

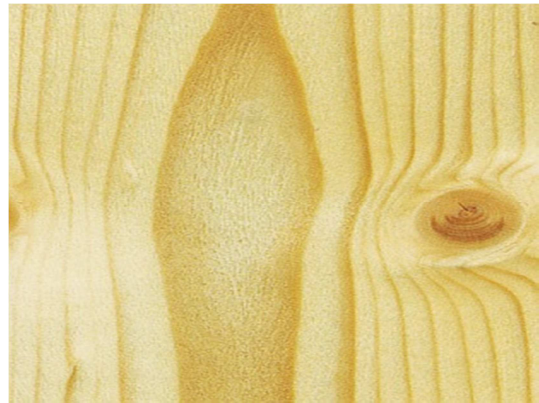
Tabulka 4.1 – Charakteristické hodnoty pro konstrukční dřevo dle EN 338

		Topol a jehličnaté dřeviny													Listnaté dřeviny					
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D30	D35	D40	D50	D60	D70	
Pevnostní vlastnosti v N/mm ²																				
Ohyb	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	30	35	40	50	60	70	
Tah rovnoběžně s vlákny	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	18	21	24	30	36	42	
Tah kolmo k vláknům	$f_{t,90,k}$	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	
Tlak rovnoběžně s vlákny	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	223	25	26	29	32	34	
Tlak kolmo k vláknům	$f_{c,90,k}$	2	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	8	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5	
Smyk	$f_{v,k}$	1,7	1,8	2	2,2	2,4	2,5	2,8	3	3,4	3,8	3,8	3,8	3	3,4	3,8	4,6	5,3	6	
Tuhostní vlastnosti v N/mm ²																				
Průměrná hodnota modulu pružnosti rovnoběžně s vlákny	$E_{0,mean}$	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16	10	10	11	14	17	20	
5% kvantil modulu pružnosti rovnoběžně s vlákny	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6	6,4	6,7	7,4	7,7	8	8,7	9,4	10	10,7	8	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8	
Průměrná hodnota modulu pružnosti kolmo k vláknům	$E_{90,mean}$	0,23	0,27	0,3	0,32	0,33	0,37	0,38	0,4	0,43	0,47	0,5	0,53	0,64	0,69	0,75	0,93	1,13	1,33	
Průměrná hodnota modulu pružnosti ve smyku	G_{mean}	0,44	0,5	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1	0,6	0,65	0,7	0,88	1,06	1,25	
Hustota v kg/m ³																				
Hustota	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	530	560	590	650	700	900	
Průměrná hodnota hustoty	ρ_{mean}	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	640	670	700	780	840	1080	
POZNAMKY:	a) Výše uvedené hodnoty pro pevnost v tahu, pevnost v tlaku, pevnost ve smyku, 5%kvantil modulu pružnosti, průměrný modul pružnosti kolmo k vláknům a průměrný modul pružnosti ve smyku byly vypočteny na základě vztahů, uvedených v příloze A. b) Tabelované vlastnosti odpovídají dřevu s vlhkostí při teplotě 20°C a relativní vlhkosti 65%. c) Dřevo vyhovující třídám C45 a C50 nemusí být snadno dostupné																			

Nevýhody dřeva, které negativně ovlivňují jeho mechanické vlastnosti, jsou růstové vady, mezi které patří například:

- *Vady tvaru kmene*
- *Nepřavidelnosti struktury*
- *Suky*
- *Trhliny*
- *Poškození dřeva dřevokazným hmyzem*

Ve stavebnictví nejpoužívanější smrkové dřevo patří do skupiny jehličnatých dřevin, které u nás tvoří 76 % zalesněného území. Smrkové dřevo je lesklé, poměrně lehké, mírně smolnaté, měkké, přitom velice pružné a pevné s dobře zarostlými suký, poměrně málo se bortí a sesychá, dobře se opracovává, atd. [7]



Obr. 4.3 – Řez smrkovým dřevem [17]

4.1.2 Lepené lamelové dřevo

Jde o průmyslově vyrobený produkt pro nosné konstrukce, který díky technologii výroby vykazuje vyšší hodnoty mechanických vlastností, homogennější skladbu průřezu, vyšší odolnost proti vzniku trhlin a vyšší požární odolnost. [14]

Stavební prvky se vyrábí jako homogenní, z jednoho druhu dřeva nebo jako kombinované, většinou ze dvou druhů dřeva. Norma ČSN EN 1194 rozlišuje v závislosti na pevnosti v ohybu čtyři třídy pevnosti pro homogenní a čtyři pro kombinované lepené lamelové dřevo, viz tabulky 4.2 a 4.3.

Tabulka 4.2 – Charakteristické hodnoty pevnosti a tuhosti homogenního LLD dle ČSN EN 1194

Třída pevnosti lepeného lamelového dřeva		homogenní			
		GL 24h	GL 28h	GL 32h	GL 36h
Pevnost v ohybu	$f_{m,g,k}$	24	28	32	36
Pevnost v tahu	$f_{t,0,g,k}$	16,5	19,5	22,5	26
	$f_{t,90,g,k}$	0,4	0,45	0,5	0,6
Pevnost v tlaku	$f_{c,0,g,k}$	24	26,5	29	31
	$f_{c,90,g,k}$	2,7	3,0	3,3	3,6
Pevnost ve smyku	$f_{v,g,k}$	2,7	3,2	3,8	4,3
Modul pružnosti	$E_{0,g,mean}$	11600	12600	13700	14700
	$E_{0,g,05}$	9400	10200	11100	11900
	$E_{90,g,mean}$	390	420	460	490
Modul pružnosti ve smyku	$G_{g,mean}$	720	780	850	910
Hustota	$\rho_{g,k}$	380	410	430	450

Tabulka 4.3 – Charakteristické hodnoty pevnosti a tuhosti kombinovaného LLD dle ČSN EN1194

Třída pevnosti lepeného lamelového dřeva		kombinované			
		GL 24c	GL 28c	GL 32c	GL 36c
Pevnost v ohybu	$f_{m,g,k}$	24	28	32	36
Pevnost v tahu	$f_{t,0,g,k}$	14	16,5	19,5	22,5
	$f_{t,90,g,k}$	0,35	0,4	0,45	0,5
Pevnost v tlaku	$f_{c,0,g,k}$	21	24	26,5	29
	$f_{c,90,g,k}$	2,4	2,7	3	3,3
Pevnost ve smyku	$f_{v,g,k}$	2,2	2,7	3,2	3,8
Modul pružnosti	$E_{0,g,mean}$	11600	12600	13700	14700
	$E_{0,g,05}$	9400	10200	11100	11900
	$E_{90,g,mean}$	320	390	420	460
Modul pružnosti ve smyku	$G_{g,mean}$	590	720	780	850
Hustota	$\rho_{g,k}$	350	380	410	430

Na výrobu lepených vazníků se nejčastěji používá smrkové dřevo. Jednotlivé lamely mají tloušťku do 45 mm. Šířka vazníků je standardně 60 – 240 mm, výška 80 – 1200 mm a délka do 24 m. Nosníky lze vyrábět i jako obloukové, díky použití různě silných lamel je možné docílit poloměrů od cca 2 do 6,5 m. [14]



Obr. 4.4 – Obloukové nosníky z LLD [14]

Jednotlivé lamely jsou nejdříve podrobeny vizuálnímu třídění, kde se hodnotí sklon vláken, sukovitost a šířka letokruhů. Poté dojde ke strojnímu třídění, kde se hodnotí modul pružnosti v ohybu, sukovitost a objemová hmotnost. Na základě třídění je pak rozhodnuto o umístění dané lamely v průřezu. Lamely s horšími vlastnostmi jsou umístěné do oblasti s menším namáháním, tedy do oblasti neutrální osy. [10]



Obr. 4.5 – Dřevěné lamely [14]



Obr. 4.6 – Výrobní linka vazníků [14]

Spojování lamel po délce pomocí zubovitých spojů dovoluje výrobu nosníků potřebných délek a vyloučení vad dřeva. Zubovitý spoj musí splňovat určitou pevnost v tahu a v ohybu. Lamely jsou na sebe lepeny do potřebných rozměrů. Jako lepidlo se většinou používá melaminová pryskyřice. [10]



Obr. 4.7 – Zubovitý spoj lamely [14]

4.1.3 Syntetická výztuž

Jedná se o vysoko pevnostní vlákna obalená v polymerovém pojivu, která vykazují vysokou pevnost a tuhost při namáhání v tahu. Výrobek z vláken vyztužených polymery FRP (Fiber Reinforced Polymers) obsahuje několik miliónů vláken, spojených polymerním pojivem, které také zajišťuje jejich ochranu a roznesení zatížení jednotlivých vláken v laminátu. Pryskyřice je vybírána na základě prostředí, kterému bude laminát vystaven a podle způsobu výroby. Vlákna jsou vybírána podle pevností, tuhosti a trvanlivosti pro daný způsob využití. [15]

- **Pryskyřice**

Jako matrice jsou nejčastěji používány termosetické matrice. Nejlevnější jsou nenasyčené polyesterové pryskyřice (UP), jsou vhodné pro nenáročné aplikace. Dalším typem jsou vinylesterové pryskyřice (VE), jsou chemicky i tepelně odolnější. Nejlepší mechanické vlastnosti s dostatečnou chemickou i teplotní odolností mají epoxidové pryskyřice (EP). [13]

- **Vlákna**

Skelná vlákna jsou prvním typem používaným ve stavebnictví. Mají silikátový základ (SiO_2). Vyrábějí se tažením taveniny směsi oxidů Si s velmi malým podílem oxidů kovů Na a K . Výztuže obsahující skelná vlákna mají obvykle modul pružnosti kolem 60 GPa a pevnost v tahu kolem 1000 Mpa.



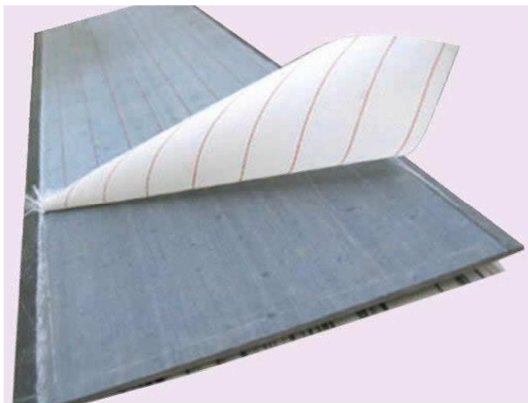
Obr. 4.8 – Výztuž ze skelných vláken [9]

Druhým typem využívaném ve stavebnictví jsou vlákna aramidová. Jedná se o aromatické polyamidy, mezi nejznámější patří Kevlar. Hlavní výhodou je malá hustota ($\rho=1440 \text{ kg/m}^3$), velká odolnost proti abrazi a schopnost plasticky se deformovat při působení síly kolmo na osu vlákna. Výztuže obsahující tento typ vláken mají obvykle modul pružnosti kolem 100 GPa a pevnost v tahu kolem 2000 MPa.

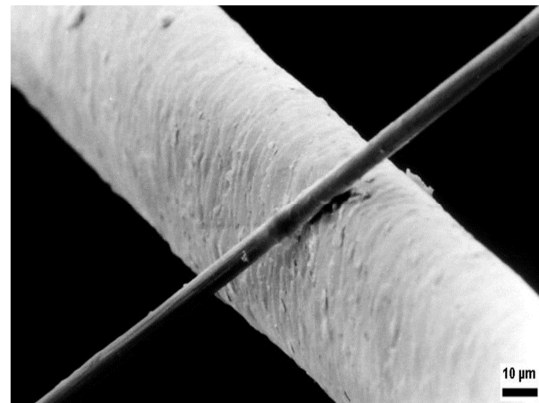


Obr. 4.9 – Výztuž z aramidových vláken [9]

Posledním typem jsou vlákna uhlíková. Jde o vlákna obsahující uhlík v různých modifikacích. Jedná se o dlouhý a tenký pramen materiálu o průměru 5-8 μm složeného převážně z atomu uhlíku. Krystalové uspořádání atomů uhlíku způsobuje, že vlákno je svou tloušťku velmi pevné. CFRP výztuže patří z hlediska pevnostních parametrů na první místo, disponují modulem pružnosti až 600 GPa a pevností v tahu až 4000 Mpa. [11]



Obr. 4.10 – CFRP lamela [18]



Obr. 4.11 – Uhlíkové vlákno vs. lidský vlas [19]

4.1.4 Lepení

Lepení znamená spojení dvou různých ploch prostřednictvím lepidla, které má dobrou přilnavost k oběma plochám. Každé lepidlo je v okamžiku lepení v kapalném stavu, protože jedině tak můžeme zajistit dokonalé přilnutí k povrchům lepeného materiálu.

Pevnost lepeného spoje závisí na čtyřech parametrech:

- *Adheze* – přilnavost lepidla k lepenému povrchu
- *Koheze* – vnitřní pevnost lepidla
- *Smáčivost* lepeného povrchu kapalným lepidlem
- *Pevnost* lepeného materiálu

Typ lepidla se volí podle chemického druhu lepených materiálů, fyzikálních vlastností lepených materiálů, požadavku na kvalitu spoje a podle požadavku na technologii nanášení lepidla.

Pro lepení dřeva rozdělujeme lepidla na:

- *Reaktivní dvousložková* – vytvrzují chemickou reakcí dvou složek
- *Reaktivní jednosložková* – vytvrzují vulkanizací vzdušnou vlhkostí
- *Rozpouštědlová* – vytvrzují odpařením rozpouštědel

Ze skupiny reaktivních dvousložkových se nejčastěji používá lepidlo epoxidové a polyuretanové. Druhou skupinu zastupují lepidla polyuretanová jednosložková, fenol-formaldehydová, resorcinol-formaldehydová, močo-formaldehydová a melamin-formaldehydová. Z poslední skupiny lepidel jde například o chloroprenová lepidla. [12]

4.2 Fyzikálně-mechanické vlastnosti

Fyzikální a mechanické vlastnosti lepeného lamelového dřeva byly získány v souladu s normou ČSN EN 408.

4.2.1 Stanovení pevnosti v ohybu rovnoběžně s vlákny

- **Zkušební těleso**

Pro stanovení pevnosti v ohybu musí být nejmenší délka zkušebního tělesa 19násobek výšky průřezu. Pokud to není možné, rozpětí nosníku se musí zaznamenat do zkušebního protokolu.

- **Zkušební postup**

Zkušební těleso se musí zatěžovat symetricky dvěma břemeny při rozpětí rovnající se 18násobku výšky průřezu. Vzdálenost mezi břemeny a podporami se může změnit nejvýše o hodnotu odpovídající 1,5násobku výšky tělesa. Rozpětí a délka

zkušební tělesa se mohou změnit nejvýše o hodnotu odpovídající trojnásobku výšky tělesa. Uspořádání zkoušky je znázorněno na obrázku 4.12.

Zkušební těleso musí být uloženo na prostých podporách. Mezi zkušební těleso a zatěžovací body nebo podpory mohou být vloženy malé ocelové podložky, aby se omezilo lokální zatlačení.

V případě potřeby se musí zabezpečit příčné vyztužení pro zamezení torzního vybočení. Toto vyztužení musí umožňovat průhyb zkušební tělesa bez významného odporu třením.

Rychlost zatěžování musí být konstantní až do porušení zkušební tělesa. Porušení nosníku jiným způsobem než ohybem se musí zaznamenat. Dále se musí zaznamenat nejvyšší působící zatížení F_{max} .

- **Vyjádření výsledků**

Pevnost v ohybu se musí vypočítat s přesností 1 %. Charakter porušení se musí pro každé zkušební těleso zaznamenat ve zkušebním protokolu.

Pevnost dřeva v ohybu je dána vztahem:

$$f_m = \frac{3Fa}{bh^2}$$

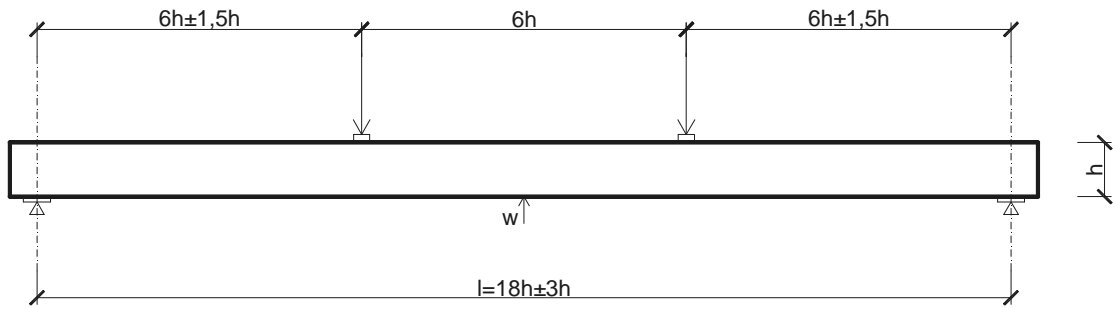
kde

a je vzdálenost mezi působištěm zatížení a podporou, v mm

b šířka průřezu, v mm

h výška průřezu, v mm

F zatížení, v N



Obr. 4.12 – Uspořádání zkoušky dle EN 408

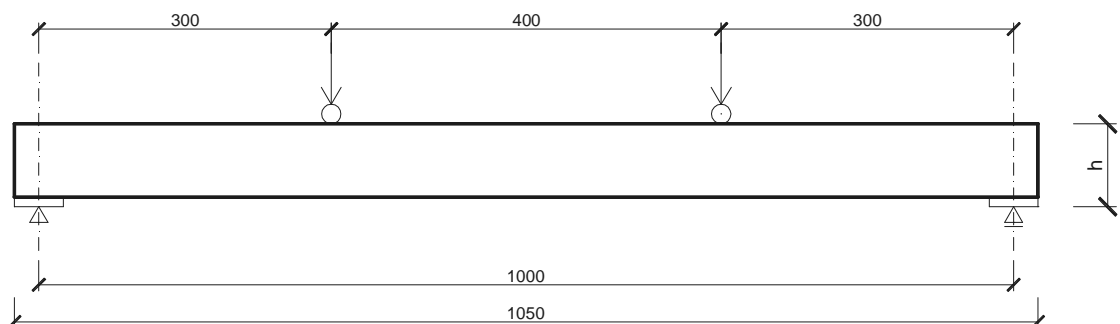
- **Modifikovaná zkouška v laboratoři**

Rozměry zkušebních těles pro zjištění pevnosti lepeného lamelového dřeva v ohybu byly vzhledem k našim možnostem 65 x 75 x 1050 mm. Zkušební tělesa byla zatěžována přístrojem HECKERT FPZ 100/1.

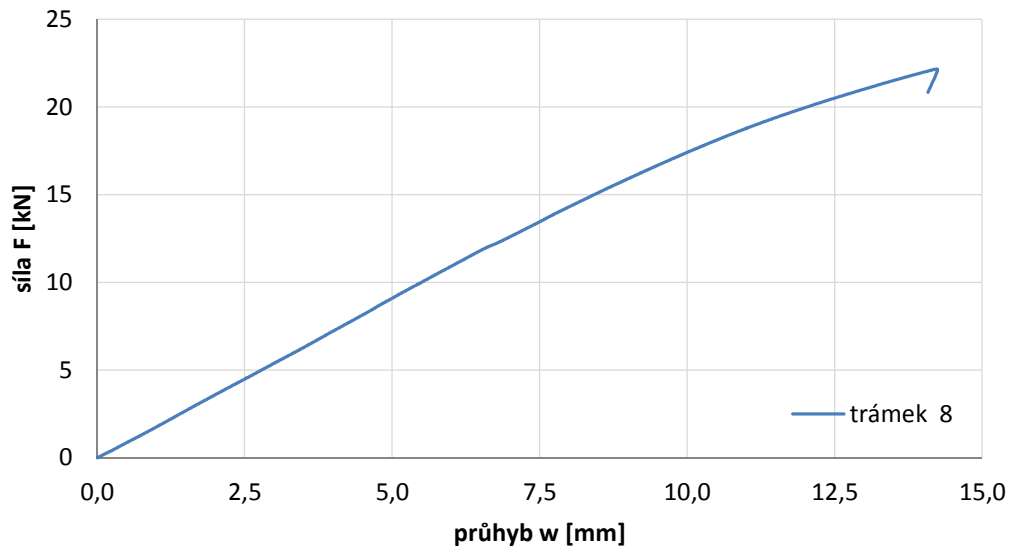
Zkušební tělesa byla uložena na prostých podporách s rozpětím 1000 mm. Vzdálenost zatěžovacích břemen byla 400 mm.

Pro zjištění kritické síly F_{max} byly tři trámky zatěžovány do porušení čtyřbodovým ohybem. Na obou koncích trámku byly osazeny snímače měřící pokles podpor a uprostřed trámku byl z každé strany osazen snímač průhybu. Výsledná síla F_{max} byla průměrem ze tří získaných hodnot.

$$F_{max} = 29,0 \text{ kN}$$



Obr. 4.13 – Uspořádání modifikované zkoušky v laboratoři



Graf 4.1 – Závislost průhybu na zatěžovací síle



Obr. 4.14 – Modifikovaná zkouška



Obr. 4.15 – Porušený trámek

4.2.2 Stanovení globálního modulu pružnosti v ohybu

- **Zkušební těleso**

Pro stanovení globálního modulu pružnosti musí být nejmenší délka zkušebního tělesa 19násobek výšky průřezu. Není-li to možné, rozpětí nosníku se musí zaznamenat ve zkušebním protokolu.

- **Zkušební postup**

Zkušební těleso se zatěžuje na ohyb dvěma symetrickými břemeny při rozpětí rovnajícím se 18násobku výšky. Vzdálenost mezi břemeny a podporami se může změnit nejvýše o hodnotu odpovídající 1,5násobku výšky tělesa. Rozpětí a délka zkušebního tělesa se mohou změnit nejvýše o hodnotu odpovídající trojnásobku výšky tělesa. Zkušební těleso musí být uloženo na prostých podporách. Mezi zkušební těleso a zatěžovací body nebo podpory mohou být vloženy malé ocelové podložky, aby se omezilo lokální zatlačení.

V případě potřeby se musí zabezpečit příčné vyztužení pro zamezení torzního vybočení. Toto vyztužení musí umožňovat průhyb zkušebního tělesa bez významného odporu třením.

Rychlost zatěžování musí být konstantní. Největší působící zatížení nesmí překročit $0,4 F_{max}$ ani způsobit poškození zkušebního tělesa. Odhadnuté maximální zatížení $F_{max,est}$ zkoušeného materiálu se musí stanovit buď ze zkoušek nejméně 10 zkušebních těles příslušné dřeviny, velikosti a třídy nebo z příslušných existujících zkušebních hodnot.

Použité zatěžovací zařízení musí umožňovat měření zatížení s přesností 1 % zatížení působícího na zkušební těleso. Deformace w se musí měřit uprostřed rozpětí a od středu vnějšího taženého nebo tlačného okraje. Pokud se w měří v neutrální ose, musí být průměrem z měření provedených na obou stranách zkušebního tělesa. Deformace se musí stanovit s přesností 1 %.

- **Vyjádření výsledků**

Pro regresní analýzu se použije úsek křivky mezi $0,1 F_{max}$ a $0,4 F_{max}$. Určí se nejdelší část tohoto úseku, jehož součinitel korelace je 0,99 nebo lepší. Za předpokladu, že tento úsek zahrnuje nejméně rozmezí $0,2 F_{max}$ až $0,3 F_{max}$ se vypočte globální modul pružnosti $E_{m,g}$ z následujícího vztahu:

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} \right) - \frac{6a}{5Gb}} h$$

kde

$F_2 - F_1$ je přírůstek zatížení na regresní přímce, v N

$w_2 - w_1$ přírůstek deformace odpovídající $F_2 - F_1$, v mm

G modul pružnosti ve smyku, lze uvažovat $G = 650 \text{ N/mm}^2$

a vzdálenost mezi působištěm zatížení a podporou, v mm

b šířka průřezu, v mm

h výška průřezu, v mm

l rozpětí v ohybu, v mm

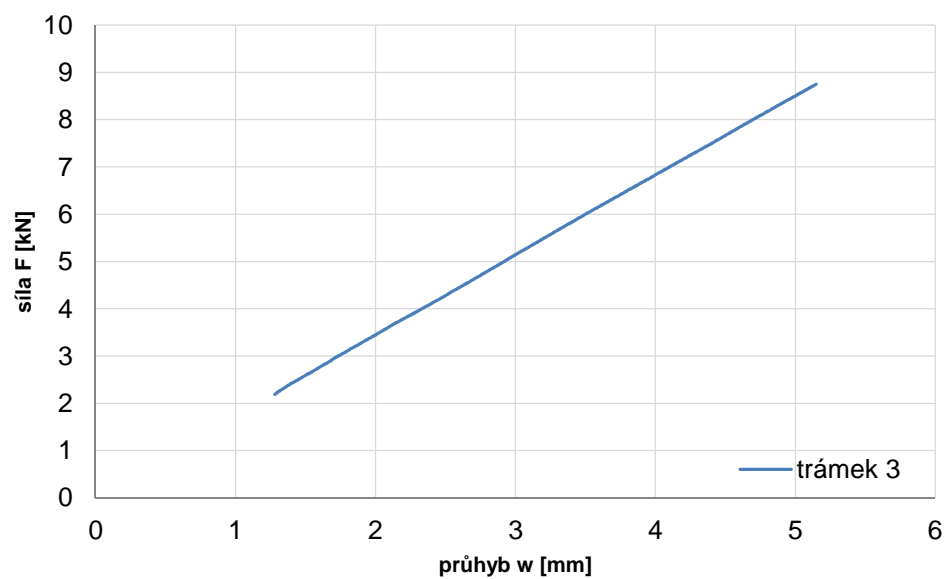
- **Modifikovaná zkouška v laboratoři**

Rozměry zkušebních těles pro zjištění globálního modulu pružnosti v ohybu byly vzhledem k našim možnostem 65 x 75 x 1050 mm. Zatěžování probíhalo v přístroji HECKERT FPZ 100/1.

Zkušební tělesa byla uložena na prostých podporách s rozpětím 1000 mm. Vzdálenost zatěžovacích břemen byla 400 mm.

Pro získání hodnoty globálního modulu pružnosti v ohybu jsme tři trámky zatěžovaly do hodnoty $0,4 F_{max}$. Pro regresní analýzu jsme poté použili úsek křivky mezi $0,1 F_{max}$ až $0,4 F_{max}$. Hodnota globálního modulu pružnosti v ohybu $E_{m,g}$ byla poté vypočtena z výše uvedeného vztahu jako průměr ze tří hodnot.

$$E_{m,g} = 11\ 600 \text{ MPa}$$



Graf 4.2 – Část zatěžovací křivky pro regresní analýzu



Obr. 4.16 – Zkoušený trámek



Obr. 4.17 – Průhyb zkoušeného trámku

4.2.3 Stanovení pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny

- **Zkušební těleso**

Zkušební těleso musí mít plný průřez a délku odpovídající 6násobku menšího průřezového rozměru. Čelní plochy musí být rovinné, vzájemně rovnoběžné a kolmé k ose tělesa.

- **Zkušební postup**

Zkušební těleso se musí zatěžovat dostředně prostřednictvím kulově uložených zatěžovacích hlav nebo jiného zařízení, umožňující zavedení tlakové síly bez vyvození ohybu. Použité upínací zařízení a skutečné podmínky zatěžování se musí zaznamenat ve zkušebním protokolu.

Použité zatěžovací zařízení musí umožňovat měření zatížení s přesností 1 % zatížení působícího na zkušební těleso. Zatěžuje se při konstantní rychlosti posunutí zatěžovací hlavy, která se nastaví tak, aby se dosáhlo největšího zatížení v průběhu (300 ± 120) s. Doba do porušení každého zkušebního tělesa se musí zaznamenat a průměr těchto dob se musí zaznamenat ve zkušebním protokolu. Každé zkušební těleso s odchylkou doby větší než 120 s od jmenovité doby 300 s se musí zaznamenat ve zkušebním protokolu.

- **Vyjádření výsledků**

Pevnost v tlaku $f_{c,0}$ je dána vztahem:

$$f_{c,0} = \frac{F_{max}}{A}$$

kde

F_{max} je největší zatížení, v N

A plocha průřezu, v mm²

Pevnost v tlaku musí být vypočtena s přesností 1 %. Charakter porušení se pro každé zkušební těleso zaznamená ve zkušebním protokolu.

- **Modifikovaná zkouška v laboratoři**

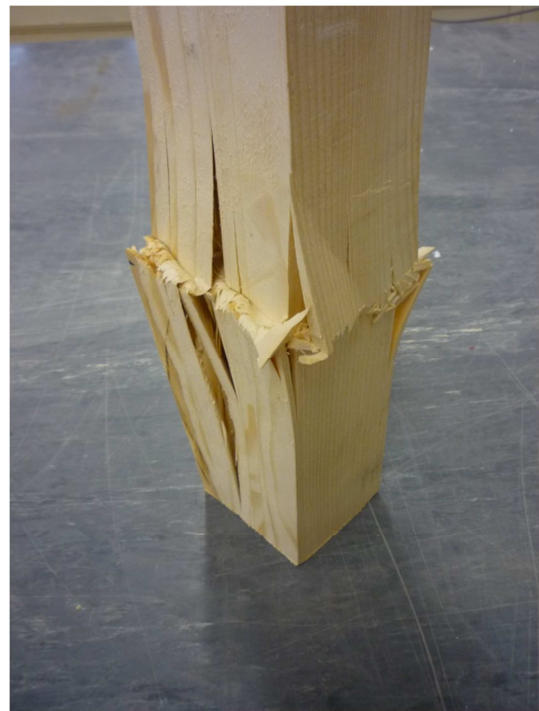
Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny pro lepené lamelové dřevo jsme stanovili na šesti zkušebních tělesech o rozměrech 65 x 75 x 400 mm pomocí přístroje FORM TEST ALPHA 3-300S.

Každé zkušební těleso bylo nejdříve upraveno tak, aby jeho čelní plochy byly navzájem rovnoběžné a kolmé na osu prvku. Poté byl každý prvek zatížen osovým tlakem až do porušení s konstantní rychlostí zatěžování 2,5 kN/s. Výsledná pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny $f_{c,0}$ byla stanovena jako průměr z naměřených hodnot.

$$F_{c,0} = 45,7 \text{ MPa}$$



Obr. 4.18 – Zkouška pevnosti v tlaku



Obr. 4.19 – Porušený hranol

4.2.4 Stanovení modulu pružnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny

- **Zkušební těleso**

Zkušební těleso musí mít plný průřez a délku odpovídající 6násobku menšího rozměru průřezu. Čelní plochy musí být rovinné, vzájemně rovnoběžné a kolmé k ose tělesa.

- **Zkušební postup**

Zkušební těleso se musí zatěžovat dostředně pomocí kulově uložených zatěžovacích hlav nebo jiného zařízení, umožňujícího zavedení tlakové síly bez vyvození ohybu. Použité upínací zařízení a skutečné podmínky zatěžování se musí zaznamenat ve zkušebním protokolu.

Rychlost zatěžování musí být konstantní a nesmí být větší než (0,00005 *l*) mm/s. Použité zatěžovací zařízení musí umožňovat měření zatížení s přesností 1 % zatížení působícího na zkušební těleso.

Deformace se musí měřit uprostřed tělesa na délce odpovídající 4násobku menšího rozměru průřezu tělesa. Musí se používat dva průtahoměry umístěné tak, aby se minimalizoval vliv kroucení. Deformace se musí stanovit s přesností 1 % .

- **Vyjádření výsledků**

Modul pružnosti v tlaku $E_{c,0}$ je dán vztahem:

$$E_{c,0} = \frac{l_1 (F_2 - F_1)}{A (w_2 - w_1)}$$

kde

$F_2 - F_1$ je přírůstek zatížení na přímkové části křivky zatížení-deformace, v N

$w_2 - w_1$ přírůstek deformace odpovídající $F_2 - F_1$, v mm

l_1 měřená délka pro stanovení modulu pružnosti, v mm

A plocha průřezu, v mm^2

- **Modifikovaná zkouška v laboratoři**

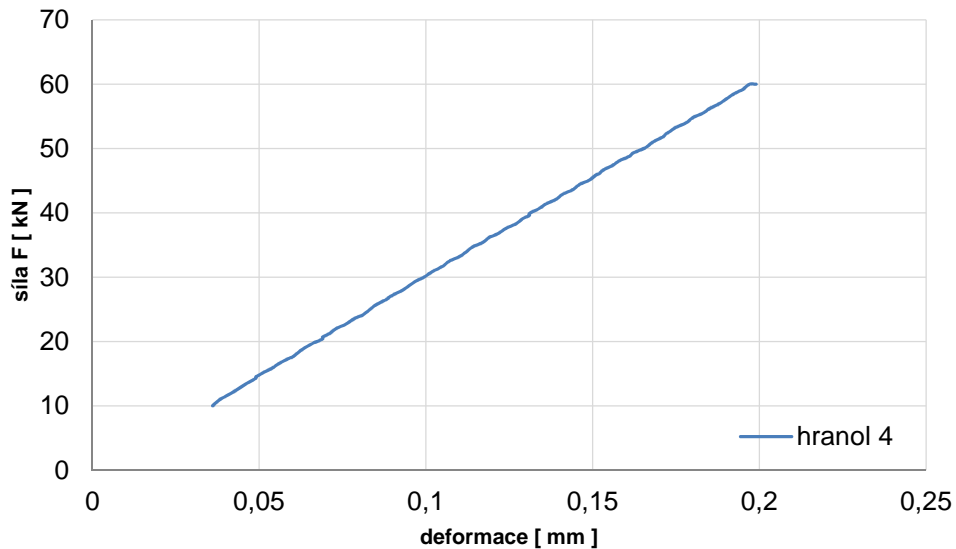
Modul pružnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny jsme stanovovali na třech zkušebních tělesech o rozměrech 65 x 75 x 400 mm zatěžovaných v přístroji FORM TEST ALPHA 3-300S.

Na dvě protilehlé stěny tělesa byly osazeny průtahoměry s délkou základny 220 mm. Každé zkušební těleso bylo zatěžováno ve třech cyklech od 10 do 60 kN konstantní rychlostí 2,5 kN/s. Modul pružnosti byl vypočten dle výše uvedeného vzorce ze zatěžovací křivky třetího cyklu viz Graf 4.3. Výsledný modul pružnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny $E_{c,0}$ byl stanoven jako průměr ze tří hodnot.

$$E_{c,0} = 15\ 100\ \text{MPa}$$



Obr. 4.20 – Osazené průtahoměry



Graf 4.3 – Část zatěžovací křivky pro stanovení modulu pružnosti

4.2.5 Stanovení hustoty lepeného lamelového dřeva

Hustota lepeného lamelového dřeva byla stanovena na zkušebních tělesech pro doplňkové zkoušky. Rozměry průřezu zkušebních těles byly měřeny digitálním posuvným měřítkem.

Hustota lepeného lamelového dřeva byla stanovena podle vzorce:

$$\rho = \frac{M}{V}$$

kde

M je hmotnost zkušebního tělesa, v kg

V objem zkušebního tělesa, v m^3

Výsledná hustota byla stanovena jako průměr z osmi hodnot dle výše uvedeného vztahu.

$$\rho = 452,8 \text{ Kg/m}^3$$

4.2.6 Stanovení pevnosti CFRP lamely v tahu

Pevnost CFRP lamely jsme zkoušeli na zhruba metr dlouhé lamele. Oba konce lamely byly vlepeny mezi dva nerezové plechy. Povrch plechů byl nejdříve zdrsněn, abychom zajistili dostatečnou soudržnost. Pro nalepení lamely byla použita tixotropní lepicí malta na epoxidové bázi. Oba konce lamely, vlepené mezi nerezové plechy, byli upnuty mezi čelisti zkušebního stroje HECKERT EU 100. Poté byla konstantní rychlostí zvyšována zatěžovací tahová síla, až do vyčerpání únosnosti CFRP lamely.



Obr. 4.21 – Lamela vlepená mezi plechy

Pevnost lamely v tahu f_t byla vypočtena ze vztahu:

$$f_t = \frac{F_{max}}{A}$$

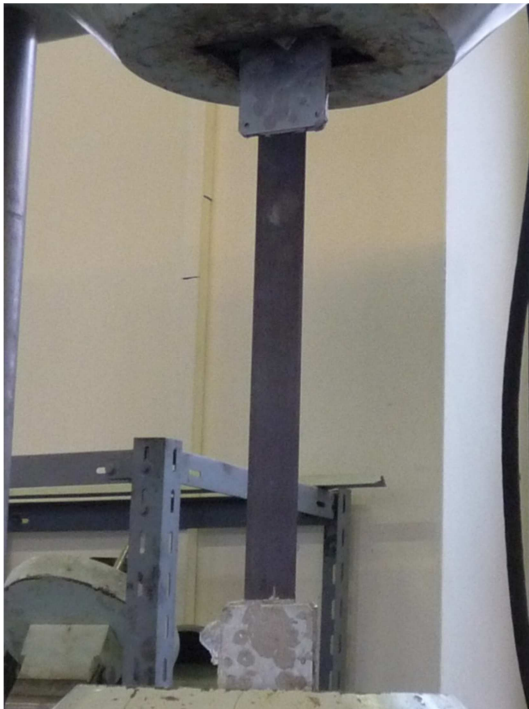
kde

F_{max} je největší zatížení, v N

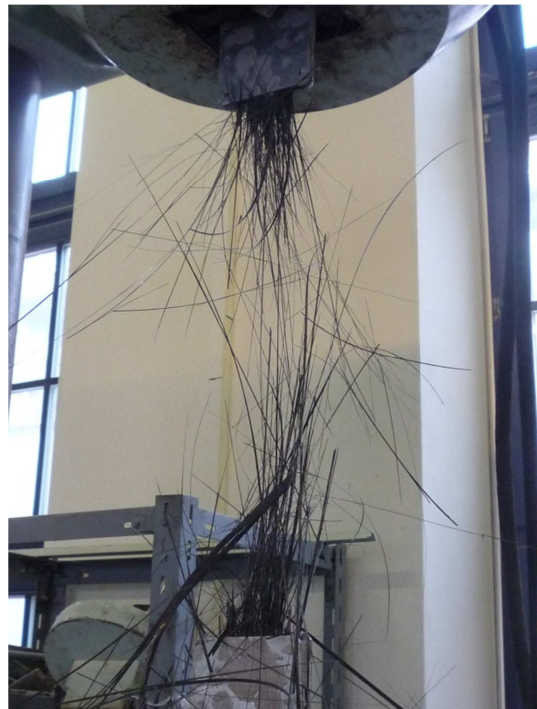
A plocha průřezu, v mm^2

Maximální hodnota zatížení při přetržení lamely dosáhla 166 kN. Odpovídající pevnost lamely v tahu byla stanovena dle výše uvedeného vztahu.

$$f_t = 2\,370 \text{ MPa}$$



Obr. 4.22 – Zkouška pevnosti lamely v tahu



Obr. 4.23 – CFRP lamela po přetržení

4.2.7 Stanovení pevnosti lepeného spoje

Lepidlo pro nalepení CFRP výztuže do dřevěného průřezu bylo vybráno na základě jeho smykových parametrů. Ty byly ověřovány tzv. Pull-out zkouškou. Lamela byla z jedné strany nalepena mezi dva kousky dřevěné lamely příslušným lepidlem a na druhém konci byla nalepena mezi nerezové plechy epoxidovým lepidlem viz obr. 4.25. Takto připravené zkušební těleso bylo upevněno do zkušebního přístroje a postupně zatěžováno tahovou silou. Rozhodujícím parametrem byla maximální tahová síla dosažená při porušení zkušebního tělesa.



Obr. 4.24 – Pull-out zkouška

Druhy zkoušených lepidel:

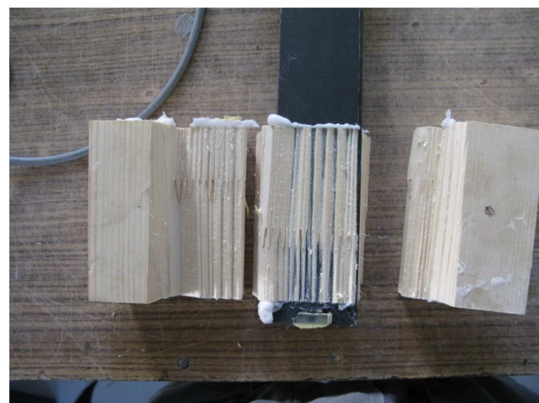
- *Polyuretanové*
- *Tixotropní epoxidové*
- *Močo-formaldehydové*
- *Melamin-formaldehydové*

Tabulka 4.4 – Pull-out zkouška lepidel

lepidlo pro nalepení CFRP lamely	typ lepidla	síla	
		F [kN]	
	polyuretanové	32,5	5,0
22,7		28,1	
29,0		17,7	
tixotropní epoxidové (Sikadur 30)	25,5	3,6	
	19,1	23,3	
	25,3	15,6	
močo-formaldehydové	18,1	3,1	
	12,1	14,8	
	14,1	20,7	
melamin-formaldehydové	13,5	4,9	
	18,0	13,2	
	8,2	37,2	



Obr. 4.25 – Zkušební tělesa



Obr. 4.26 – Porušené zkušební těleso

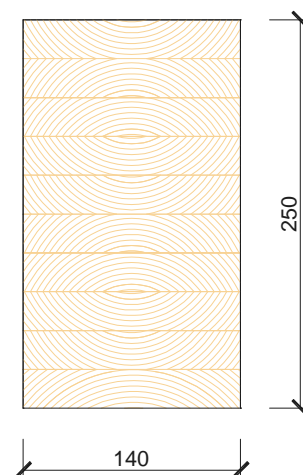
Na základě provedených Pull-out zkoušek jednotlivých lepidel bylo pro nalepení CFRP lamely vybráno polyuretanové lepidlo.

5. NÁVRH A VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Na základě vypracované rešerše, možnostem laboratoře stavebního zkušebnictví a možnostem výrobce zkušebních těles byly vyrobeny nosníky s průřezem šířky 140 mm a výšky 250 mm. Délka nosníků byla 3500 mm. Celkem bylo vyrobeno pět nosníků. Jeden nosník byl vyroben z rostlého smrkového dřeva, jeden nosník z lepeného lamelového dřeva a zbývající tři nosníky z lepeného lamelového dřeva vyztužené CFRP lamelou.

- **Nevyztužený nosník**

Na výrobu nosníku byly použity lamely ze smrkového dřeva. Ještě než byly z dřevěných prken vyrobeny lamely potřebných rozměrů, prošla prkna visuálním a strojním tříděním. Jednotlivé lamely byly nastavovány lepeným zubovitým spojem do potřebné délky a lepeny na sebe melamin-formaldehydovým lepidlem. Průřez byl tvořen deseti lamelami o tloušťce 25 mm a šířce 140 mm.



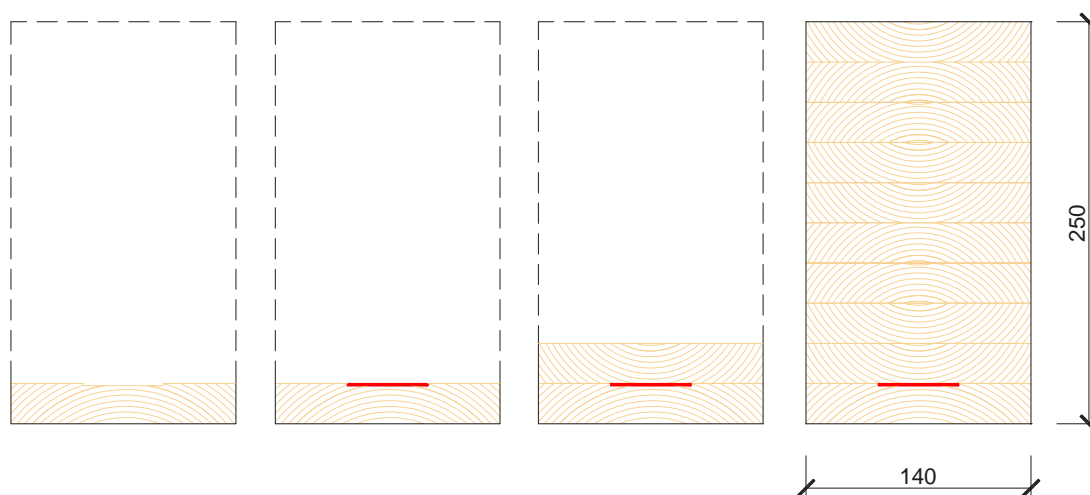
Obr. 5.1 – Nevyztužený nosník

- **Vyztužené nosníky**

Tři vyztužené nosníky byly vyrobeny z lamel ze smrkového dřeva, tloušťky 25 mm a šířky 140 mm, jako nosník nevyztužený. Uhlíková lamela byla umístěna do předem vyfrézované drážky v nejspodnější lamiě viz. obr. 5.2. Umístění CFRP výztuže mezi dvě spodní dřevěné lamely jsme zvolili z estetického hlediska a z hlediska požární odolnosti nosníku.

Lepidlo pro nalepení uhlíkové lamely do průřezu bylo vybráno ze čtyř druhů na základě pevnosti lepeného spoje, která byla ověřována pull-out zkouškami v laboratoři.

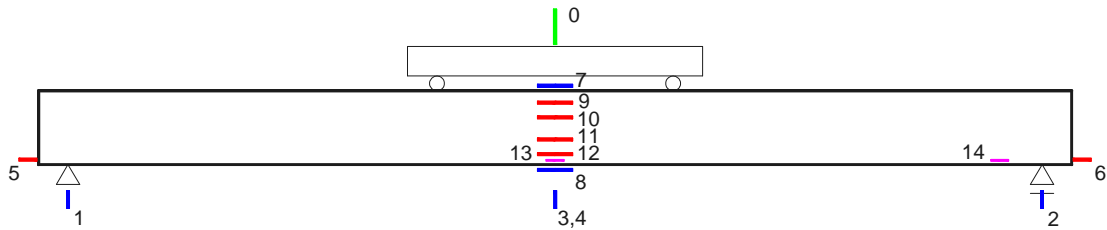
Největší pevnost lepeného spoje mezi uhlíkovou lamelou a dřevem vykazovalo polyuretanové lepidlo. Abychom byli schopni určit napětí ve výztuži během zatěžovací zkoušky, byly ještě před nalepením uhlíkové lamely do průřezu na její povrch v laboratoři umístěny dva odporové tenzometry. Jeden tenzometr byl nalepen v polovině lamely a druhý u konce lamely. Lepení snímačů proběhlo v souladu se zásadami lepení odporových tenzometrů.



Obr. 5.2 – Nosník vyztužený CFRP lamelou

6. EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA

6.1 Měření veličiny



Obr. 6.1 – Schéma rozmístění snímačů

Legenda: 0 – zatěžovací síla

1, 2 – pokles podpor

3, 4 – průhyb nosníku

5, 6 – pokluz lamely

7 – přetvoření horních vláken

8 – přetvoření spodních vláken

9 – přetvoření vláken 1

10 – přetvoření vláken 2

11 – přetvoření vláken 3

12 – přetvoření vláken 4

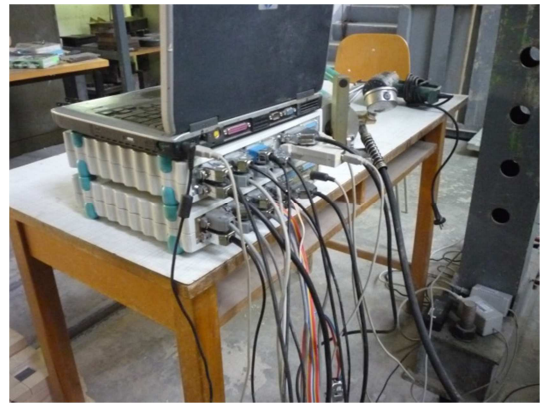
13 – přetvoření CFRP lamely uprostřed rozpětí

14 – přetvoření CFRP lamely v oblasti podpory

Měřená data byla zpracovávána pomocí dvou měřících ústředí HBM Spider 8 propojených s osobním počítačem. Jednotlivými snímači jsou do měřících ústředí vysílány impulzy, které ústředny zpracovávají a posílají dál do osobního počítače. V osobním počítači jsou pomocí kalibračního softwaru zpracovávány a převáděny na požadované veličiny. Data z jednotlivých snímačů byla snímána a ukládána s frekvencí 10 Hz, tzn. 10krát za sekundu.



Obr. 6.2 – Měřicí stanice



Obr. 6.3 – Propojení snímačů s ústřednami

- **Pokles podpor**

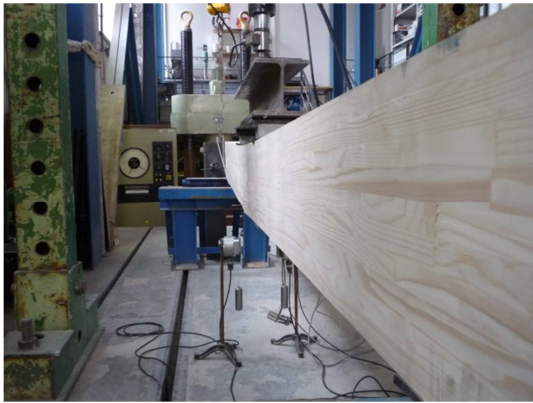
Pokles podpor byl měřen pomocí indukčních snímačů dráhy HBM WA 10 mm.



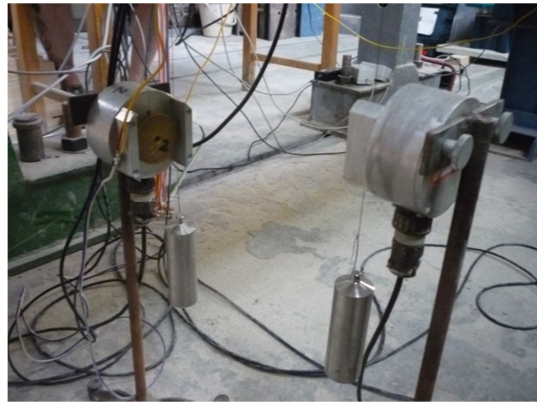
Obr. 6.4 – Snímač poklesu podpory

- **Průhyb nosníku**

Průhyb nosníku byl měřen v polovině rozpětí, a to na každé straně umístěným kruhovým potenciometrickým snímačem MS 04. Použití dvou snímačů by mělo vyloučit případnou chybu měření v důsledku torzního vybočení nosníku.



Obr. 6.5 – Průhyb nosníku



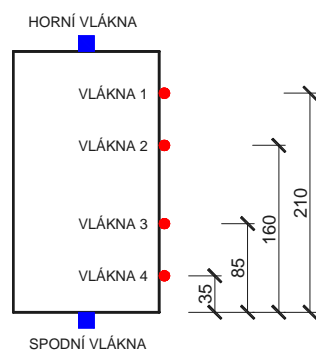
Obr. 6.6 – Snímač průhybu

- **Přetvoření vláken nosníku**

Přetvoření horních a spodních vláken nosníku bylo měřeno v polovině rozpětí pomocí indukčního snímače dráhy TT 1 mm osazeném v Hollanově můstku se základnou 120 mm.

Přetvoření vláken 1 a 4 bylo měřeno za pomoci indukčního snímače dráhy HBM WA 10 mm.

Přetvoření vláken 2 a 3 bylo měřeno indukčnostními snímači dráhy HBM WA 2 mm. Rozmístění snímačů je znázorněno na obr. 5.1.7.



Obr. 6.7 – Rozmístění snímačů



Obr. 6.8 – Osazené snímače na nosníku

- **Přetvoření uhlíkové lamely**

Přetvoření uhlíkové lamely bylo měřeno pomocí odporových tenzometrů nalepených na jejím povrchu. Umístění tenzometrů proběhlo v laboratoři stavebního zkušebnictví ještě před nalepením lamely do nosníku. Snímače byli aplikovány v souladu se zásadami pro jejich lepení na povrch zkoušeného prvku. V každém vyztuženém nosníku byly umístěny dva odporové tenzometry, jeden uprostřed rozpětí a druhý v krajní oblasti nosníku.

- **Pokluz uhlíkové lamely**

Pokluz uhlíkové lamely byl měřen indukčním snímačem dráhy TT 1 mm. Snímače byli osazeny na obou koncích nosníku.



Obr. 6.9 – Snímač pokluzu lamely

- **Zatěžovací síla**

Velikost zatěžovací síly byla měřena tenzometrickým siloměrem CSP M 25t umístěným na zatěžovacím zařízení.



Obr. 6.10 – Zatěžovací zařízení

6.2 Princip použitých snímačů

- **Indukční snímače dráhy**

Jedná se o elektrické snímače založené na změně indukčnosti soustavy cívek, způsobené změnou jejich magnetického odporu. Konstrukčně jsou řešeny jako snímače s malou vzduchovou mezerou, s otevřeným magnetickým obvodem či s potlačeným polem. Zapojeny jsou pak jako jednoduché, diferenční nebo transformátorové.

Pro měření deformací od 0,1 mm do 1 mm se nejčastěji používají snímače s malou vzduchovou mezerou. Snímač se skládá ze dvou cívek, jedné měřicí a druhé pro hrubé vyvážení. Jde o typ tzv. bezdotykového snímače.



Obr. 6.11 – Indukční snímač dráhy

Nejčastějším typem pro měření posunutí od několika po stovky milimetrů je diferenční snímač s otevřeným magnetickým obvodem, u kterého dochází ke změně indukčnosti cívek v důsledku změny polohy feromagnetického jádra v jejich dutině. Jde o snímače označované jako LVDT. [6]

- **Tenzometrické siloměry**

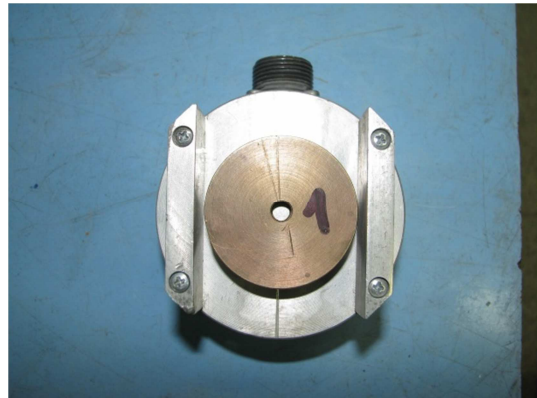
Jedná se o nejčastější elektrický siloměr s vhodně tvarovanou pružnou částí polepenou tenzometry. Tenzometr je odporový snímač, využívající změnu odporu vlivem působení mechanických sil. [8]



Obr. 6.12 – Tenzometrický siloměr

- **Odporové snímače**

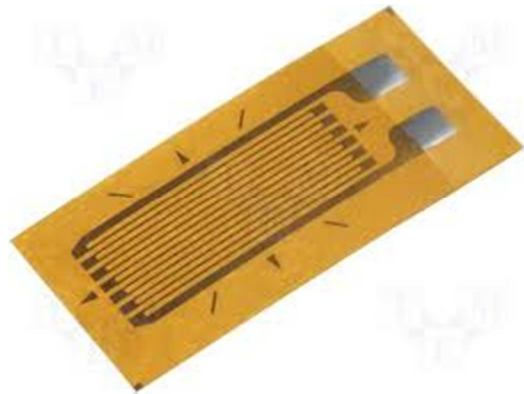
Nejčastějším konstrukčním provedením jsou přímé a kruhové potenciometry. Tyto snímače mají pohyblivý kontakt, jehož poloha je vázána na měřenou veličinu. Změna polohy kontaktu je zajišťována nejčastěji pomocí struny ovinuté kolem kladky. [8]



Obr. 6.13 – Kruhový potenciometr

- **Odporové tenzometry**

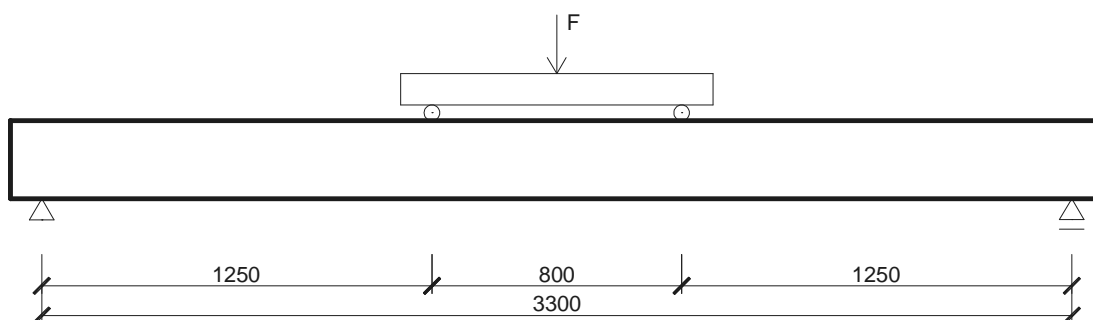
Jsou tenzometrické odporové snímače, využívající změnu odporu vlivem změny geometrických rozměrů nebo vlivem změny mechanických sil. Nejčastěji se používá drátkový tenzometrický snímač. Jde o tenký odporový drátek nalepený na podkladové papírové fólii. Jako odporový materiál se používá kov (chrom, nikl apod.) nebo polovodiče (typ P a N). Polovodičové tenzometry jsou 100 i vícekrát citlivější než kovové. [8]



Obr. 6.14 – Odporový tenzometr [20]

6.3 Zatěžovací zkouška čtyřbodovým ohybem

Všechny zkušební nosníky byly podrobeny zatěžovací zkoušce čtyřbodovým ohybem v laboratoři stavebního zkušebnictví. Zatěžované nosníky byly uloženy na prostých podporách s rozpětím 3300 mm. Vzdálenost zatěžovacích břemen byla 800 mm.



Obr. 6.15 – Schéma zatěžovací zkoušky



Obr. 6.16 – Zatěžovací zkouška



Obr. 6.17 – Porušený nosník

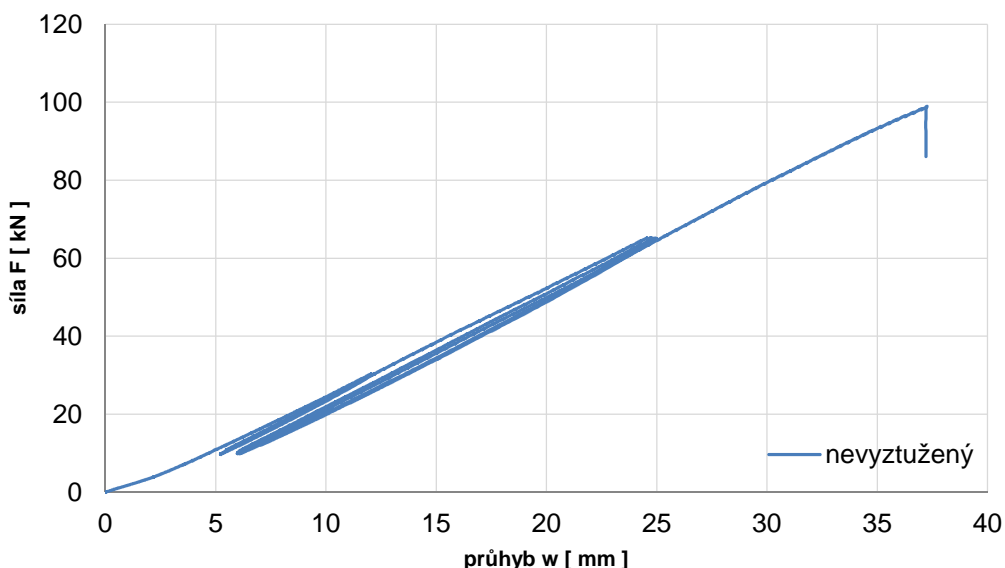
6.3.1 Nevztužený nosník

Měřené veličiny:

- Zatěžovací síla
- Průhyb nosníku
- Pokles podpor
- Přetvoření vláken nosníku

Nevztužený nosník byl zatěžován v několika cyklech. V prvním cyklu byl nosník zatížen po dobu cca 60 sekund hodnotou 30 kN, poté bylo zatížení sníženo na hodnotu 10 kN. Ve druhém a třetím cyklu byl postup opakován se zatěžovacím rozsahem od 10 do 65 kN. Poté byl nosník zatěžován až do jeho porušení, které nastalo při velikosti zatížení 98,9 kN. Maximální hodnota průhybu dosáhla 37,3 mm.

Nosník vykazoval takřka lineárně-pružné chování až do chvíle, kdy bylo dosaženo kritické síly.



Graf 6.1 – Závislost průhybu na zatěžovací síle

6.3.2 Nosníky vyztužené CFRP lamelou

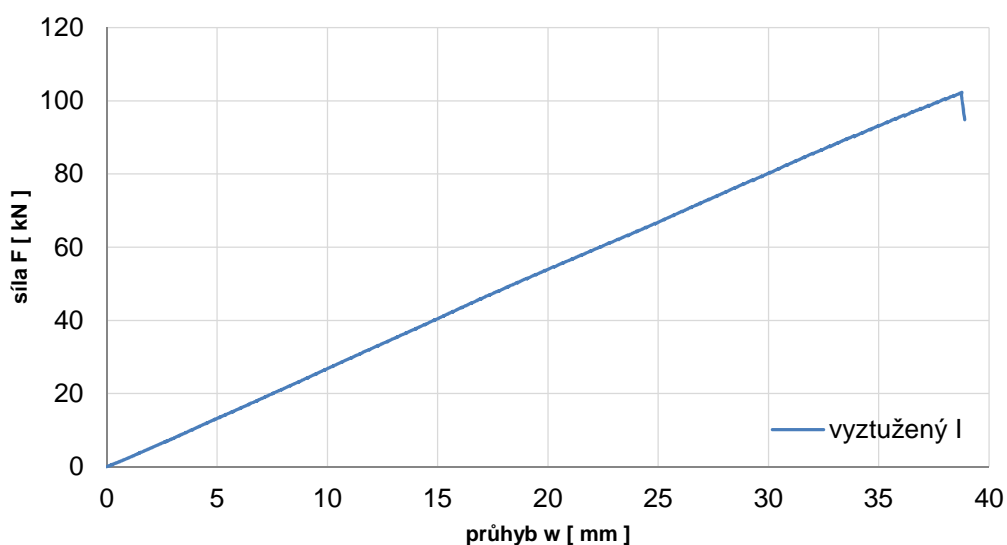
Měřené veličiny:

- Zatěžovací síla
- Průhyb nosníku
- Pokles podpor
- Přetvoření vláken nosníku
- Přetvoření uhlíkové lamely
- Pokluz uhlíkové lamely

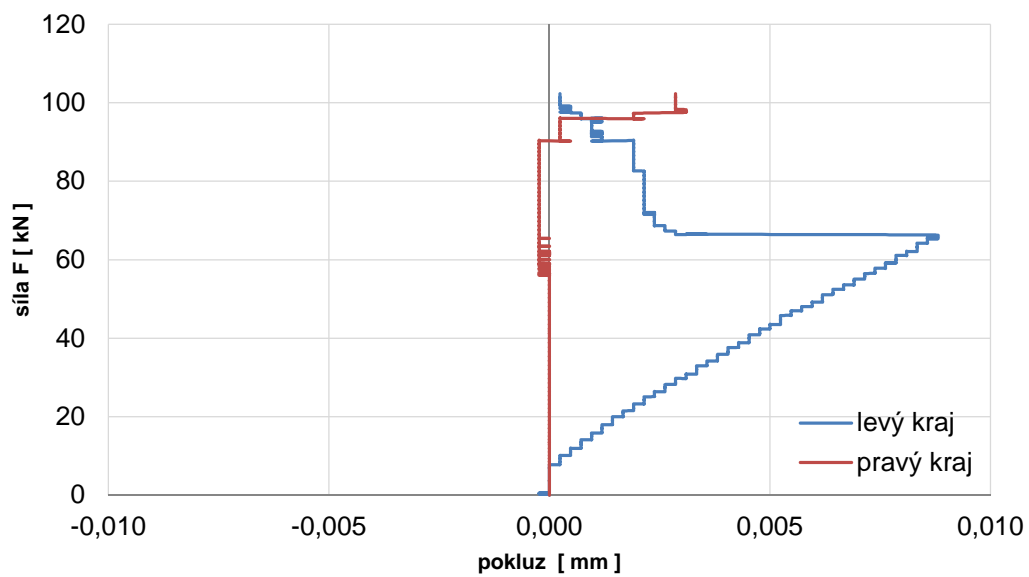
• Nosník I

První vyztužený nosník byl zatěžován bez cyklování až do jeho porušení. Nosník po celou dobu zatěžování vykazoval takřka lineárně-pružné chování. Porušení nosníku nastalo při hodnotě zatížení 102,3 kN. Maximální hodnota průhybu byla 38,8 mm.

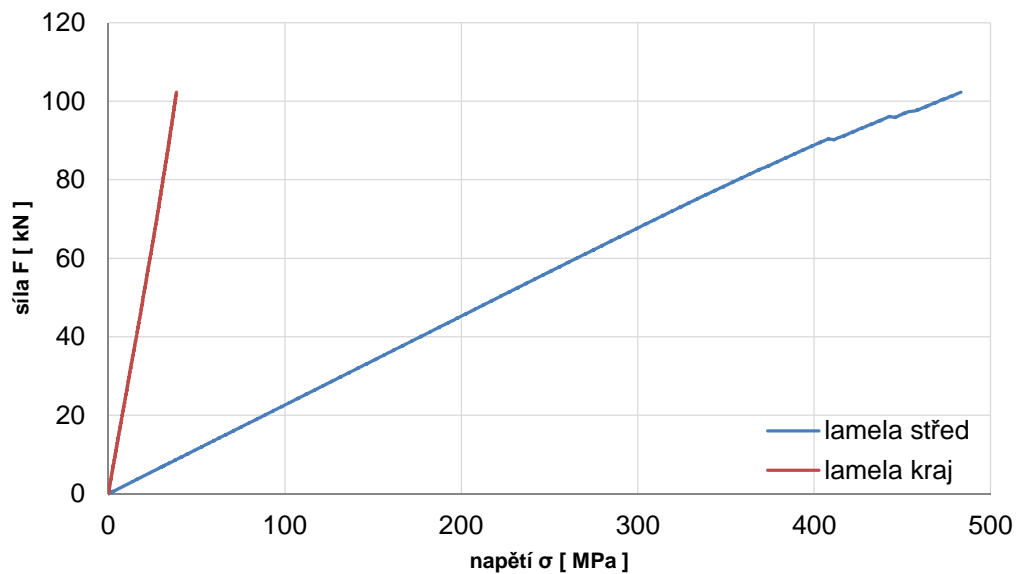
Již při malé hodnotě zatížení byl však zaznamenán pokluz uhlíkové lamely na levé straně nosníku. Maximální naměřené napětí v lamele uprostřed nosníku dosáhlo hodnoty 480 MPa, což je cca 18 % její únosnosti.



Graf 6.2 – Závislost průhybu na zatěžovací síle



Graf 6.3 – Závislost pokluzu lamely na zatěžovací síle

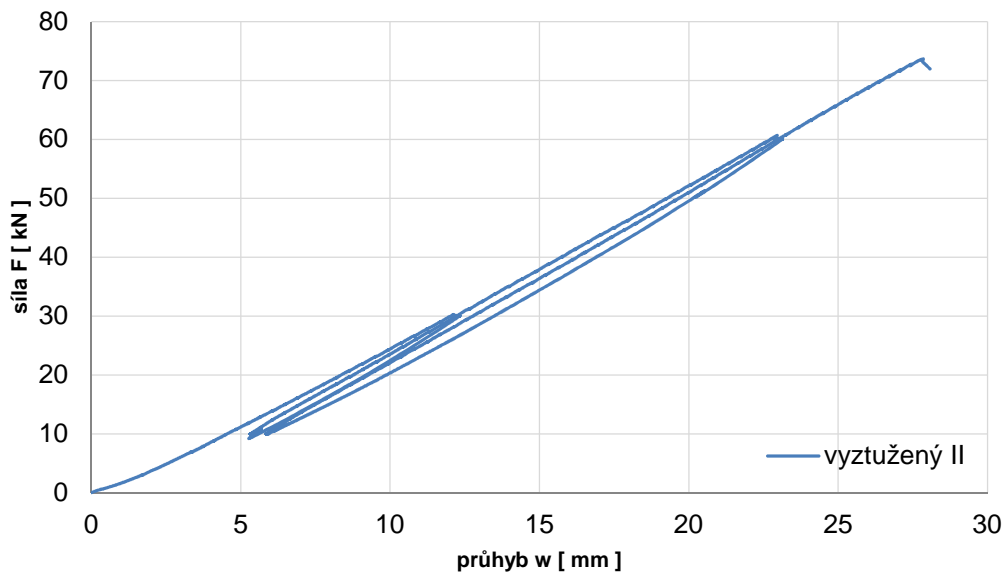


Graf 6.4 – Závislost napětí v lamele na zatěžovací síle

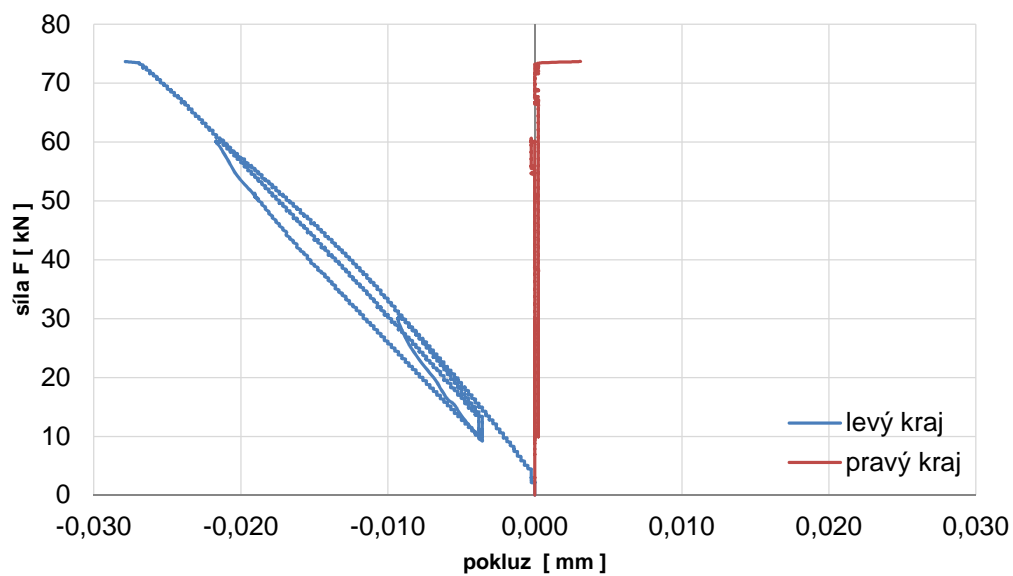
- **Nosník II**

Druhý vyztužený nosník byl zatěžován cyklicky. V prvním cyklu byl nosník po dobu 60 sekund zatížen silou 30 kN, poté se zatěžovací síla zmenšila na hodnotu 10 kN. Ve druhém a třetím cyklu byl postup opakován s rozsahem zatěžované síly od 10 do 60 kN. V poslední fázi zatěžování byla síla zvyšována až do porušení nosníku. Po celou dobu zatěžování nosník vykazoval takřka lineárně-pružné chování. Hodnota kritické síly se v tomto případě rovnala 73,7 kN. Maximální hodnota průhybu byla 27,9 mm.

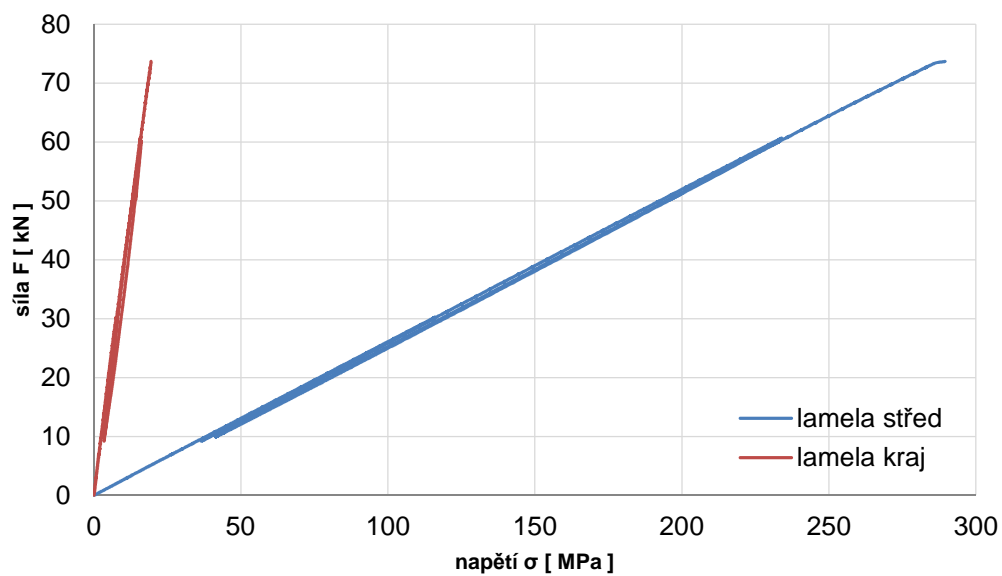
Od počátku zatěžování nosníku byl opět zaznamenán pokluz uhlíkové lamely na levé straně nosníku. Maximální naměřené napětí v lamele uprostřed nosníku dosáhlo hodnoty 289 MPa, což je cca 11 % její únosnosti.



Graf 6.5 – Závislost průhybu na zatěžovací síle



Graf 6.6 – Závislost pokluzu lamely na zatěžovací síle

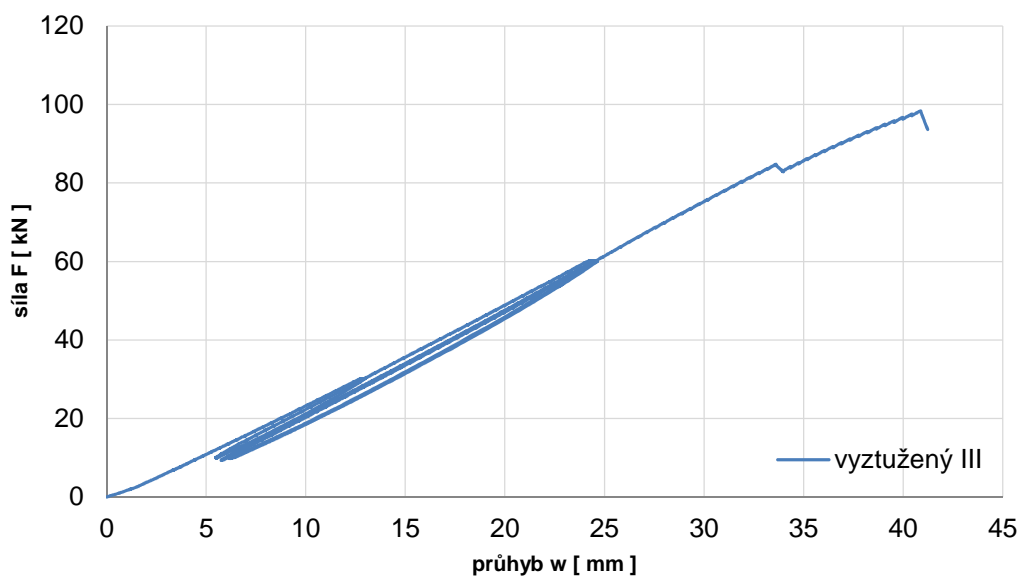


Graf 6.7 – Závislost napětí v lamele na zatěžovací síle

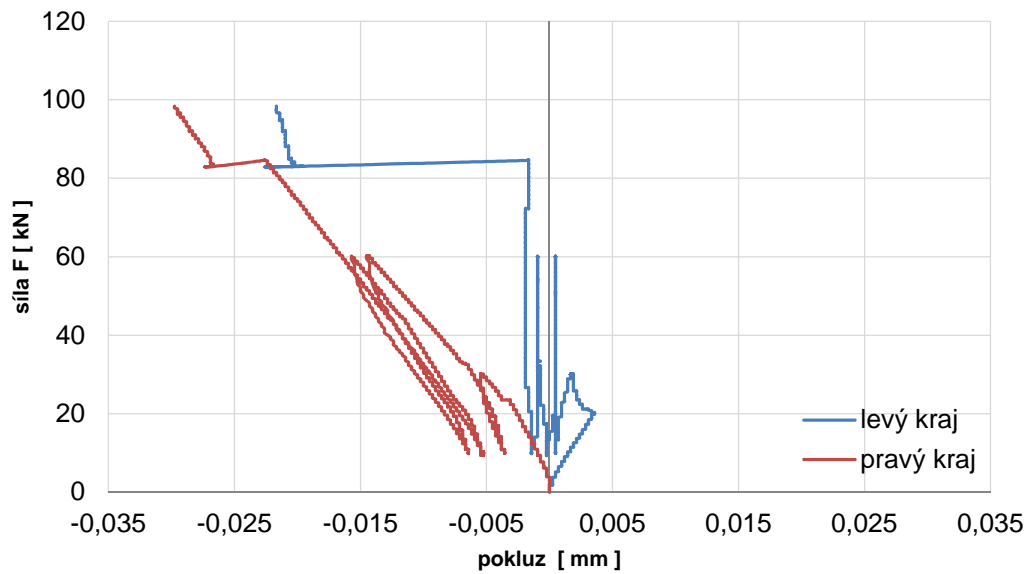
- **Nosník III**

Poslední vyztužený nosník byl zatěžován rovněž cyklicky. V prvním cyklu byl nosník po dobu 60 sekund zatížen silou 30 kN, poté se zatěžovací síla zmenšila na hodnotu 10 kN. Ve druhém a třetím cyklu byl postup opakován s rozsahem zatěžované síly od 10 do 60 kN. V poslední fázi byl nosník zatěžován do porušení, které nastalo při hodnotě zatížení 98,3 kN. Hodnota průhybu v tu chvíli byla 40,9 mm.

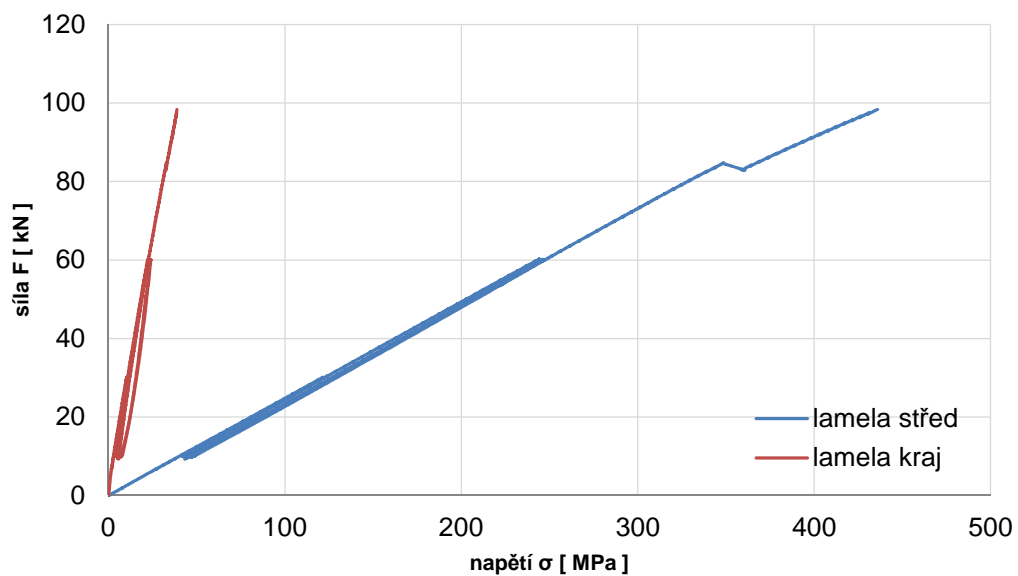
Již od počátku zatěžování byl zaznamenán pokluz lamely na pravém okraji nosníku. Při hodnotě zatížení 82,6 kN byla překročena smyková únosnost mezi uhlíkovou lamelou a dřevem a došlo k usmyknutí lamely, jak je vidět v grafu 6.8. Nejvyšší naměřené napětí v lamele uprostřed nosníku bylo 436 MPa, což je cca 16 % její únosnosti.



Graf 6.8 – Závislost průhybu na zatěžovací síle



Graf 6.9 – Závislost pokluzu lamely na zatěžovací síle



Graf 6.10 – Závislost napětí v lamele na zatěžovací síle

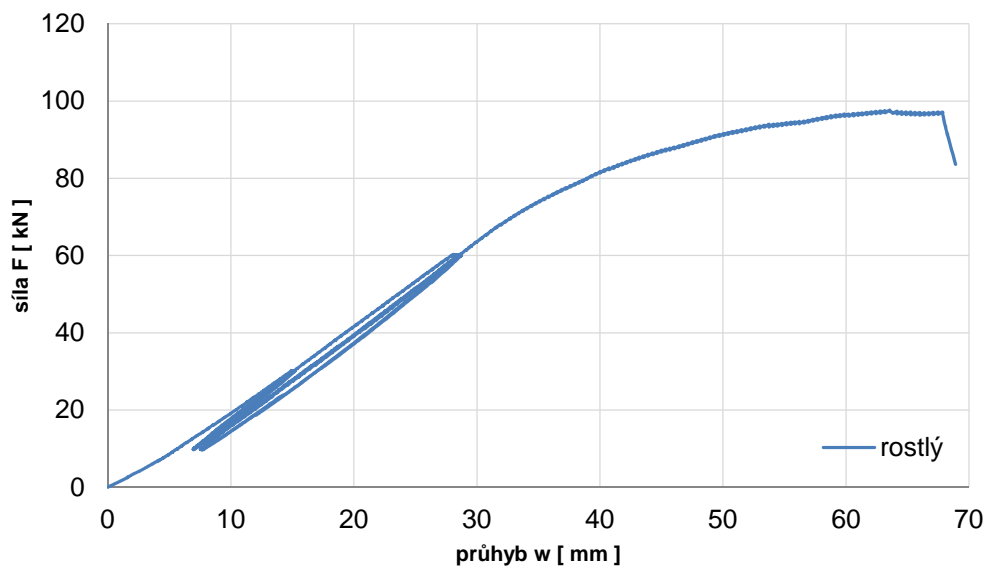
6.3.3 Nosník z rostlého dřeva

Měřené veličiny:

- Zatěžovací síla
- Průhyb nosníku
- Pokles podpor
- Přetvoření vláken nosníku

Nosník z rostlého dřeva byl zatěžován cyklicky. Dvakrát v rozmezí hodnot zatěžovací síly od 10 do 30 kN a dvakrát od 10 do 60 kN. Poté byl nosník zatěžován do porušení. Maximální hodnota zatížení dosáhla hodnoty 97,2 kN. Velikost průhybu v té chvíli dosáhla hodnoty 67,5 mm.

Nosník z rostlého dřeva, jak je vidět v grafu 6.11, během zkoušky vykazoval takřka lineárně-pružné chování zhruba do dvou třetin zatížení, poté se nosník začal chovat pružno-plasticky až do jeho porušení.



Graf 6.11 – Závislost průhybu na zatěžovací síle

7. NUMERICKÁ ANALÝZA

7.1 Teoretické předpoklady

Při výpočtu jednotlivých průřezů na únosnost a použitelnost bylo předpokládáno:

- *Lineární chování dřeva po výšce průřezu*
- *Dokonalá soudržnost mezi CFRP výztuží a dřevem*

Hodnoty mechanických vlastností rostlého dřeva použitých do výpočtu byly převzaty z normy ČSN EN 338, uvažovali jsme třídu pevnosti konstrukčního dřeva C20.

Hodnoty mechanických vlastností pro lepené lamelové dřevo byly použity z normy ČSN EN 1194, uvažovali jsme třídu pevnosti homogenního lepeného lamelového dřeva GL 24h.

Hodnoty mechanických vlastností uhlíkové výztuže byly převzaty od dodavatele Prefakompozity a.s.

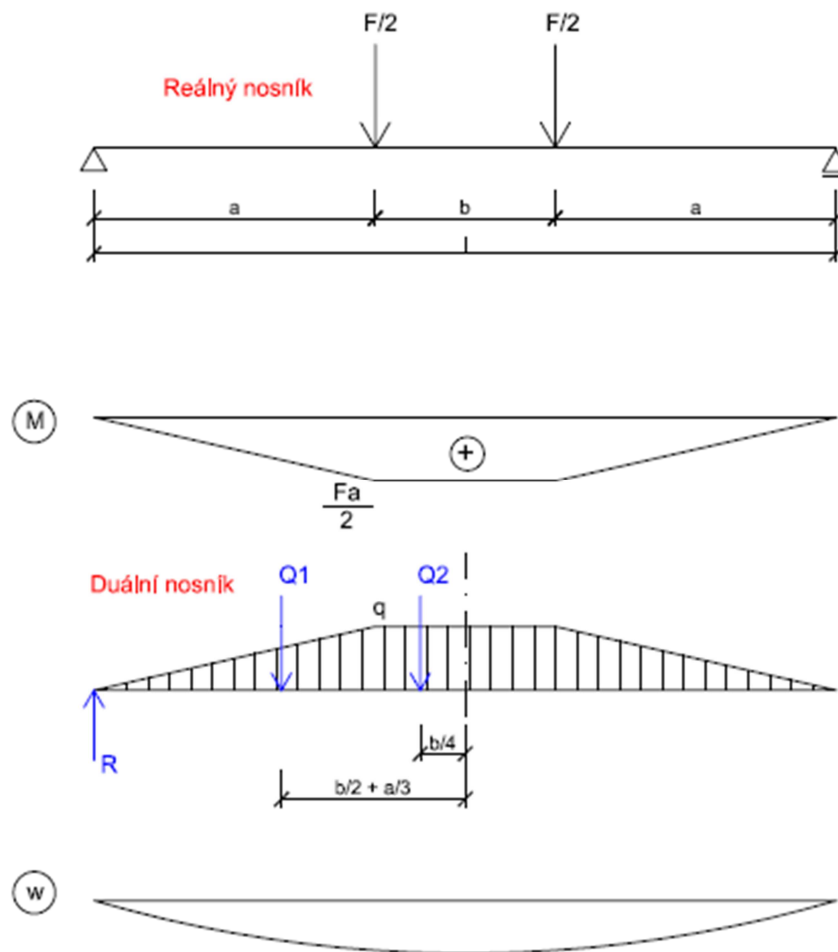
7.2 Únosnost a použitelnost

Pevnost v ohybu a průhyb nosníků byl počítán z charakteristických a návrhových hodnot.

Hodnoty dílčích součinitelů vlastností materiálů pro konstrukční a lepené lamelové dřevo byly převzaty z normy ČSN EN 1995-1-1 Eurokód 5: *Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla – Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*

Hodnotu součinitele spolehlivosti pro syntetickou výztuž jsem nenašel v žádné literatuře. Proto jsem počítal s hodnotou pro tahovou výztuž $\gamma_m = 1,15$

**ODVOZENÍ ROVNICE PRŮHYBU NA PROSTÉM NOSNÍKU
DLE MOHROVY ANALOGIE:**



Spojitě zatížení na duálním nosníku:

$$q = \frac{Fa}{2EI}$$

Náhradní břemena na duálním nosníku:

$$Q_1 = \frac{Fa^2}{4EI}$$

$$Q_2 = \frac{Fab}{4EI}$$

Reakce od duálního nosníku:

$$R = \frac{Fa}{4EI}(a + b)$$

Průhyb uprostřed rozpětí:

$$w_{l/2} = R \frac{l}{2} - Q_1 \left(\frac{a}{3} + \frac{b}{2} \right) - Q_2 \frac{b}{4}$$

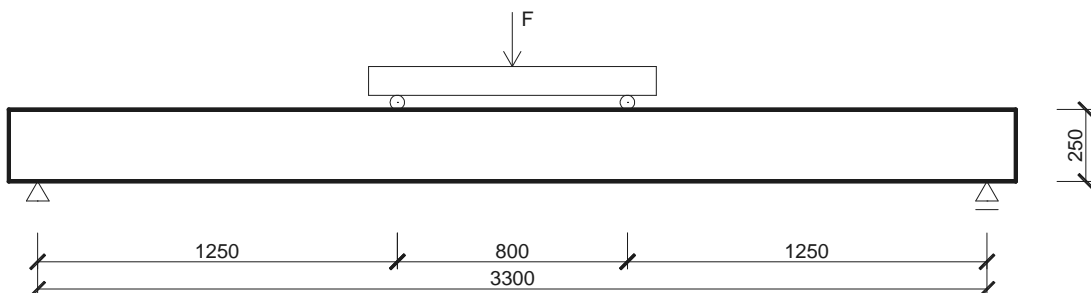
$$w_{l/2} = \frac{F a l}{8 E I} (a + b) - \frac{F a^2}{4 E I} \left(\frac{a}{3} + \frac{b}{2} \right) - \frac{F a b^2}{16 E I}$$

- Hodnoty průhybů vypočtené z odvozené rovnice dle Mohrovy analogie se shodují s výsledky vypočtených podle vzorce ze statických tabulek, proto bude dále počítáno dle níže uvedeného vzorce viz. Statika I.

$$w_{max} = \frac{F}{48 E I} (3 a l^2 - 4 a^3)$$

NOSNÍK Z ROSTLÉHO DŘEVA

Geometrie:



Konstrukční smrkové dřevo C20:

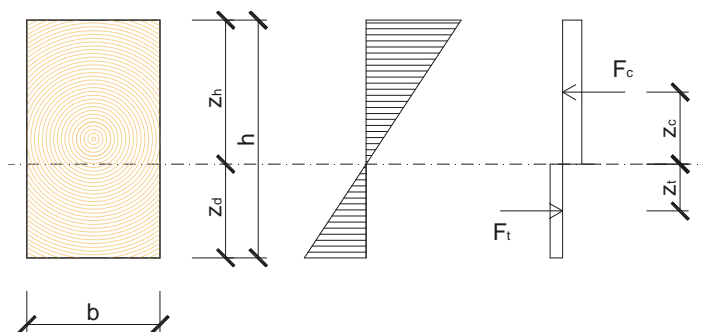
$$E_{g,0} = 10\,000 \text{ MPa}$$

$$f_{t,0,k} = 12 \text{ MPa}$$

$$f_{c,0,k} = 20 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_t = 1,2 \times 10^{-3}$$

$$\epsilon_c = 2,0 \times 10^{-3}$$



Průřezové charakteristiky:

$$b = 0,14 \text{ m}$$

$$h = 0,25 \text{ m}$$

$$A = b \times h = 0,035 \text{ m}^2$$

$$z^h = 0,1625 \text{ m}$$

$$z_d = 0,0875 \text{ m}$$

$$I_y = \frac{1}{12} b \times h^3 = \frac{1}{12} 0,14 \times 0,25^3 = 1,823 \times 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$W_d = \frac{I_y}{z_d} = \frac{1,823 \times 10^{-4}}{0,0875} = 2,083 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Charakteristický moment únosnosti průřezu:

$$F_c = f_{c,0,k} b z_h = 20000 \times 0,14 \times 0,1625 = 455 \text{ kN}$$

$$F_t = f_{t,0,k} b z_d = 12000 \times 0,14 \times 0,0875 = 159,25 \text{ kN}$$

$$M_{Rk} = F_c \times z_c + F_t \times z_t = 455 \times 0,08125 + 159,25 \times 0,04375 = 43,936 \text{ MPa}$$

Charakteristická pevnost v ohybu a průhyb:

$$f_{m,k} = \frac{M_{Rk}}{W_d} = \frac{43,936 \times 10^3}{2,083 \times 10^{-3}} = 21,09 \text{ MPa}$$

$$F = \frac{2M_{rk}}{a} = \frac{2 \times 43,936}{1,25} = 70,298 \text{ kN}$$

$$w_{\max,k} = \frac{F}{48EI} (3al^2 - 4a^3)$$

$$w_{\max,k} = \frac{70,298}{48 \times 10000 \times 1,823 \times 10^{-4}} (3 \times 1,25 \times 3,3^2 - 4 \times 1,25^3) = 26,53 \text{ mm}$$

Návrhový moment únosnosti průřezu:

$\gamma_m = 1,3 \rightarrow$ součinitel spolehlivosti materiálu pro rostlé dřevo

$$F_c = f_{c,0,d} b z_h = \frac{20000}{1,3} \times 0,14 \times 0,1625 = 350 \text{ kN}$$

$$F_t = f_{t,0,d} b z_d = \frac{12000}{1,3} \times 0,14 \times 0,0875 = 113,07 \text{ kN}$$

$$M_{Rd} = F_c \times z_c + F_t \times z_t = 350 \times 0,08125 + 113,07 \times 0,04375 = 33,38 \text{ MPa}$$

Návrhová pevnost v ohybu a průhyb:

$$f_{m,d} = \frac{M_{Rd}}{W_d} = \frac{33,38 \times 10^3}{2,083 \times 10^{-3}} = 16,03 \text{ MPa}$$

$$F = \frac{2M_{rd}}{a} = \frac{2 \times 33,38}{1,25} = 53,41 \text{ kN}$$

$$w_{max,d} = \frac{F}{48EI} (3a^2 - 4a^3)$$

$$w_{max,d} = \frac{53,41}{48 \times \frac{10000}{1,3} \times 1,823 \times 10^{-4}} (3 \times 1,25 \times 3,3^2 - 4 \times 1,25^3) = 26,2 \text{ mm}$$

Pevnost v ohybu a průhyb z experimentálního zkoušení:

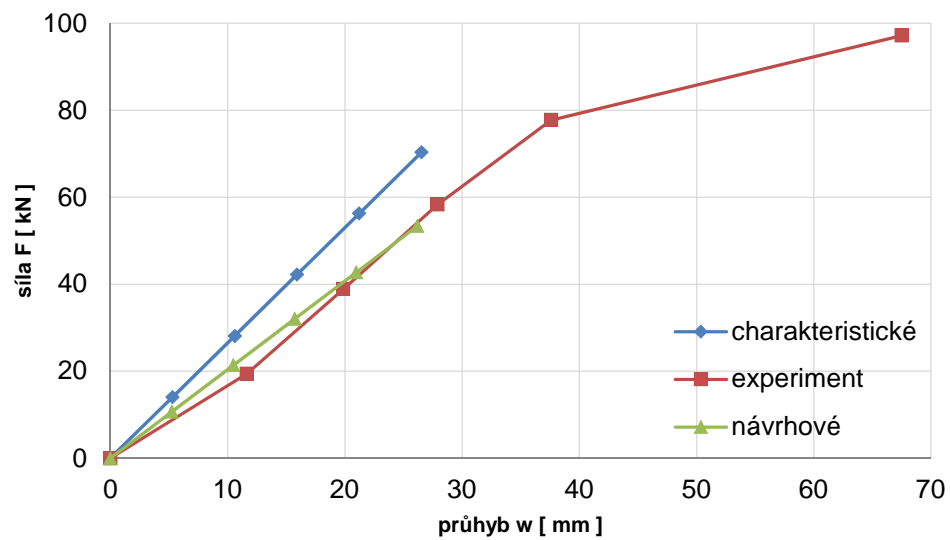
$$M_{R,ex} = \frac{F_x}{2a} = \frac{97,2}{2 \times 1,25} = 38,88 \text{ kNm}$$

$$f_{m,ex} = \frac{M_{Rx}}{W_d} = \frac{38,88 \times 10^3}{2,083 \times 10^{-3}} = 18,66 \text{ MPa}$$

$$w_{max,ex} = 67,5 \text{ mm}$$

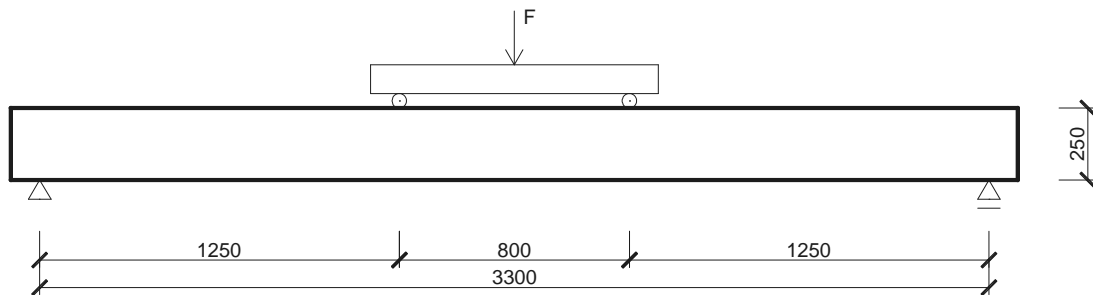
Porovnání výsledků:

Nosník z rostlého dřeva	kritická síla	průhyb
	F [kN]	w [mm]
charakteristická hodnota	70,30	26,53
návrhová hodnota	53,41	26,20
experimentální hodnota	97,20	67,50



NOSNÍK Z LEPENÉHO LAMELOVÉHO DŘEVA

Geometrie:



Lepené lamelové dřevo GL 24h:

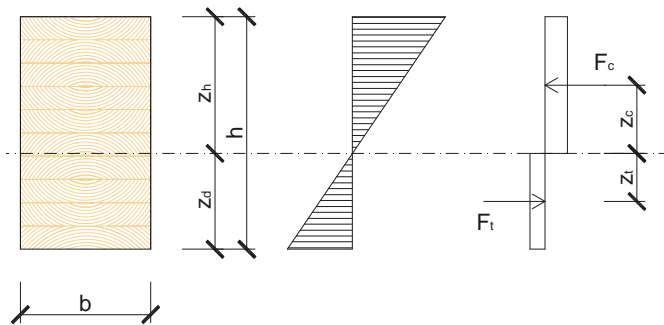
$$E_{g,0} = 11600 \text{ MPa}$$

$$f_{t,0,k} = 16,5 \text{ MPa}$$

$$f_{c,0,k} = 24 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_t = 1,42 \times 10^{-3}$$

$$\epsilon_c = 2,07 \times 10^{-3}$$



Průřezové charakteristiky:

$$b = 0,14 \text{ m}$$

$$h = 0,25 \text{ m}$$

$$A = b \times h = 0,035 \text{ m}^2$$

$$z^h = 0,172 \text{ m}$$

$$z_d = 0,078 \text{ m}$$

$$I_y = \frac{1}{12} b \times h^3 = \frac{1}{12} 0,14 \times 0,25^3 = 1,823 \times 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$W_d = \frac{I_y}{z_d} = \frac{1,823 \times 10^{-4}}{0,078} = 2,337 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Charakteristický moment únosnosti průřezu:

$$F_c = f_{c,0,k} b z_h = 24000 \times 0,14 \times 0,172 = 577,9 \text{ kN}$$

$$F_t = f_{t,0,k} b z_d = 16500 \times 0,14 \times 0,078 = 180,18 \text{ kN}$$

$$M_{Rk} = F_c \times z_c + F_t \times z_t = 577,9 \times 0,086 + 180,18 \times 0,039 = 56,73 \text{ MPa}$$

Charakteristická pevnost v ohybu a průhyb:

$$f_{m,k} = \frac{M_{Rk}}{W_d} = \frac{56,73 \times 10^3}{2,337 \times 10^{-3}} = 24,27 \text{ MPa}$$

$$F = \frac{2M_{rk}}{a} = \frac{2 \times 56,73}{1,25} = 90,768 \text{ kN}$$

$$w_{max,k} = \frac{F}{48EI} (3al^2 - 4a^3)$$

$$w_{max,k} = \frac{90,768}{48 \times 11600 \times 1,823 \times 10^{-4}} (3 \times 1,25 \times 3,3^2 - 4 \times 1,25^3) = 29,53 \text{ mm}$$

Návrhový moment únosnosti průřezu:

$\gamma_m = 1,25 \rightarrow$ součinitel spolehlivosti materiálu pro lepené lamelové dřevo

$$F_c = f_{c,0,d} b z_h = \frac{24000}{1,25} \times 0,14 \times 0,172 = 462,32 \text{ kN}$$

$$F_t = f_{t,0,d} b z_d = \frac{16500}{1,25} \times 0,14 \times 0,078 = 144,14 \text{ kN}$$

$$M_{Rd} = F_c \times z_c + F_t \times z_t = 462,32 \times 0,086 + 144,14 \times 0,039 = 45,38 \text{ MPa}$$

Návrhová pevnost v ohybu a průhyb:

$$f_{m,d} = \frac{M_{Rd}}{W_d} = \frac{45,38 \times 10^3}{2,337 \times 10^{-3}} = 19,42 \text{ MPa}$$

$$F = \frac{2M_{rd}}{a} = \frac{2 \times 45,38}{1,25} = 72,61 \text{ kN}$$

$$w_{\max,d} = \frac{F}{48EI} (3al^2 - 4a^3)$$

$$w_{\max,d} = \frac{72,61}{48 \times \frac{11600}{1,25} \times 1,823 \times 10^{-4}} (3 \times 1,25 \times 3,3^2 - 4 \times 1,25^3) = 29,53 \text{ mm}$$

Pevnost v ohybu a průhyb z experimentálního zkoušení:

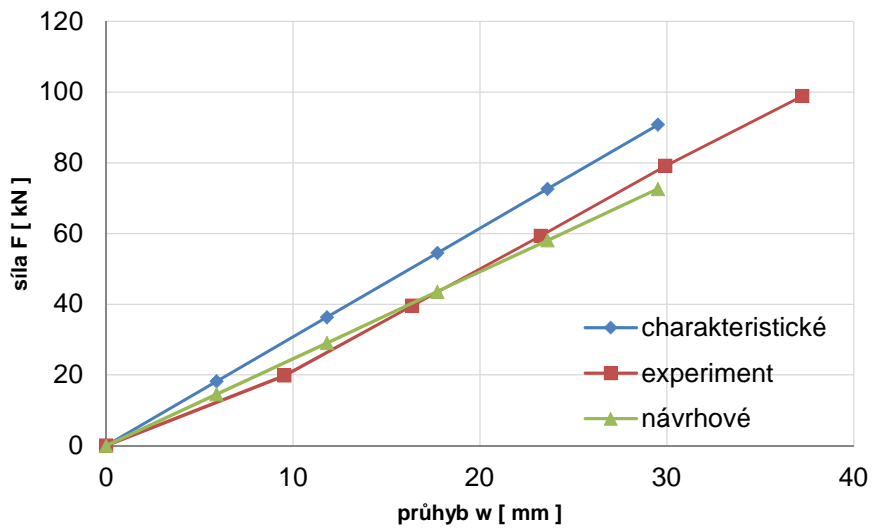
$$M_{R,ex} = \frac{F_x}{2a} = \frac{98,9}{2 \times 1,25} = 39,56 \text{ kNm}$$

$$f_{m,ex} = \frac{M_{Rx}}{W_d} = \frac{39,56 \times 10^3}{2,337 \times 10^{-3}} = 16,93 \text{ MPa}$$

$$w_{\max,ex} = 37,3 \text{ mm}$$

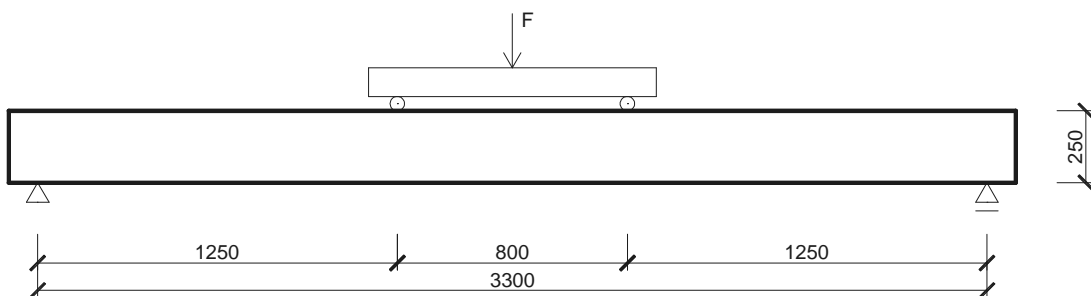
Porovnání výsledků:

Nosník z lepeného lamelového dřeva	kritická síla	průhyb
	F [kN]	w [mm]
charakteristická hodnota	90,77	29,53
návrhová hodnota	72,61	29,53
experimentální hodnota	98,90	37,30



NOSNÍKY Z LEPENÉHO LAMELOVÉHO DŘEVA VYZTUŽENÉ CFRP LAMELOU

Geometrie:



Lepené lamelové dřevo GL 24h:

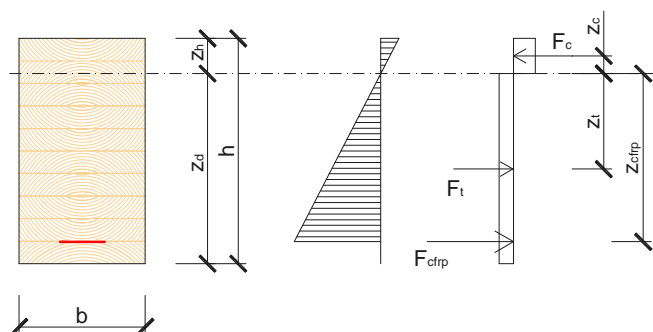
$$E_{g,0} = 11\,600 \text{ MPa}$$

$$f_{t,0,k} = 16,5 \text{ MPa}$$

$$f_{c,0,k} = 24 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_t = 1,42 \times 10^{-3}$$

$$\epsilon_c = 2,07 \times 10^{-3}$$



CFRP lamela:

$$E = 155\,000 \text{ MPa}$$

$$f_{\text{cfrp}} = 3\,000 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_t = 0,0194$$

$$b_{\text{cfrp}} = 50 \text{ mm}$$

$$h_{\text{cfrp}} = 1,4 \text{ mm}$$

Průřezové charakteristiky:

$$b = 0,14 \text{ m}$$

$$h = 0,25 \text{ m}$$

$$A = b \times h = 0,035 \text{ m}^2$$

$$z^h = 0,039 \text{ m}$$

$$z_d = 0,211 \text{ m}$$

$$I_y = \frac{1}{12} b \times h^3 = \frac{1}{12} 0,14 \times 0,25^3 = 1,823 \times 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$W_d = \frac{I_y}{z_d} = \frac{1,823 \times 10^{-4}}{0,211} = 8,639 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$W^h = \frac{I_y}{z^h} = \frac{1,823 \times 10^{-4}}{0,039} = 4,674 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Charakteristický moment únosnosti průřezu:

$$F_c = f_{c,0,k} b z_h = 24\,000 \times 0,14 \times 0,039 = 131,04 \text{ kN}$$

$$F_t = f_{t,0,k} b z_d = 16\,500 \times 0,14 \times 0,211 = 480,41 \text{ kN}$$

$$F_{\text{cfrp}} = f_{\text{cfrp}} b_{\text{cfrp}} h_{\text{cfrp}} = 3\,000\,000 \times 0,05 \times 0,0014 = 210 \text{ kN}$$

$$M_{\text{Rk}} = F_c \times z_c + F_t \times z_t + F_{\text{cfrp}} \times z_{\text{cfrp}}$$

$$M_{\text{Rk}} = 131,04 \times 0,0195 + 480,41 \times 0,1055 + 210 \times 0,1867 = 92,45 \text{ kNm}$$

Charakteristická pevnost v ohybu a průhyb:

$$f_{m,k} = \frac{M_{Rk}}{W_h} = \frac{92,45 \times 10^3}{4,674 \times 10^{-3}} = 19,78 \text{ MPa}$$

$$F = \frac{2M_{rk}}{a} = \frac{2 \times 92,45}{1,25} = 147,92 \text{ kN}$$

$$w_{max,k} = \frac{F}{48EI} (3al^2 - 4a^3)$$

$$w_{max,k} = \frac{147,92}{48 \times 11600 \times 1,823 \times 10^{-4}} (3 \times 1,25 \times 3,3^2 - 4 \times 1,25^3) = 48,13 \text{ mm}$$

Návrhový moment únosnosti průřezu:

$\gamma_m = 1,25 \rightarrow$ součinitel spolehlivosti materiálu pro lepené lamelové dřevo

$$F_c = f_{c,0,d} b z_h = \frac{24\,000}{1,25} \times 0,14 \times 0,039 = 104,83 \text{ kN}$$

$$F_t = f_{t,0,d} b z_d = \frac{16\,500}{1,25} \times 0,14 \times 0,211 = 384,33 \text{ kN}$$

$\gamma_m = 1,15 \rightarrow$ součinitel spolehlivosti materiálu pro tahovou výztuž

$$F_{cfrp} = f_{cfrp} b_{cfrp} h_{cfrp} = \frac{3\,000\,000}{1,15} \times 0,05 \times 0,0014 = 182,6 \text{ kN}$$

$$M_{Rd} = F_c \times z_c + F_t \times z_t + F_{cfrp} \times z_{cfrp}$$

$$M_{Rd} = 104,83 \times 0,0195 + 384,33 \times 0,1055 + 182,6 \times 0,1867 = 76,68 \text{ kNm}$$

Návrhová pevnost v ohybu a průhyb:

$$f_{m,d} = \frac{M_{Rd}}{W_h} = \frac{76,68 \times 10^3}{4,674 \times 10^{-3}} = 16,40 \text{ MPa}$$

$$F = \frac{2M_{rd}}{a} = \frac{2 \times 76,68}{1,25} = 122,69 \text{ kN}$$

$$w_{\max,d} = \frac{F}{48EI} (3al^2 - 4a^3)$$

$$w_{\max,d} = \frac{122,69}{48 \times \frac{11600}{1,25} \times 1,823 \times 10^{-4}} (3 \times 1,25 \times 3,3^2 - 4 \times 1,25^3) = 49,89 \text{ mm}$$

Pevnost v ohybu a průhyb z experimentálního zkoušení:

Nosník I.

$$M_{R,ex} = \frac{F_x}{2a} = \frac{102,3}{2 \times 1,25} = 40,92 \text{ kNm}$$

$$f_{m,ex} = \frac{M_{Rx}}{W_h} = \frac{40,92 \times 10^3}{4,674 \times 10^{-3}} = 8,75 \text{ MPa}$$

$$w_{\max,ex} = 38,8 \text{ mm}$$

Nosník II.

$$M_{R,ex} = \frac{F_x}{2a} = \frac{73,7}{2 \times 1,25} = 29,48 \text{ kNm}$$

$$f_{m,ex} = \frac{M_{Rx}}{W_h} = \frac{29,48 \times 10^3}{4,674 \times 10^{-3}} = 6,31 \text{ MPa}$$

$$w_{\max,ex} = 27,9 \text{ mm}$$

Nosník III.

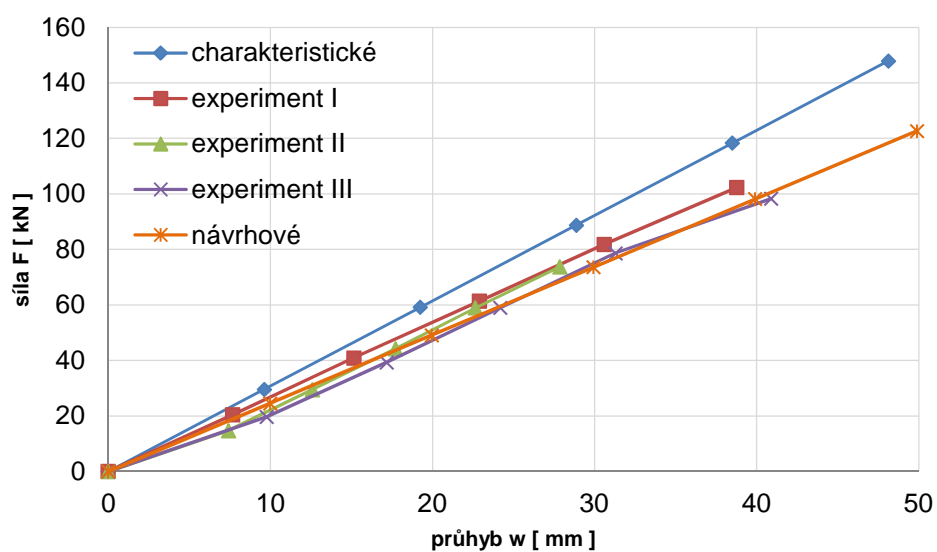
$$M_{R,ex} = \frac{F_x}{2a} = \frac{98,3}{2 \times 1,25} = 39,32 \text{ kNm}$$

$$f_{m,ex} = \frac{M_{R,ex}}{W_h} = \frac{39,32 \times 10^3}{4,674 \times 10^{-3}} = 8,41 \text{ MPa}$$

$$w_{max,ex} = 40,9 \text{ mm}$$

Porovnání výsledků:

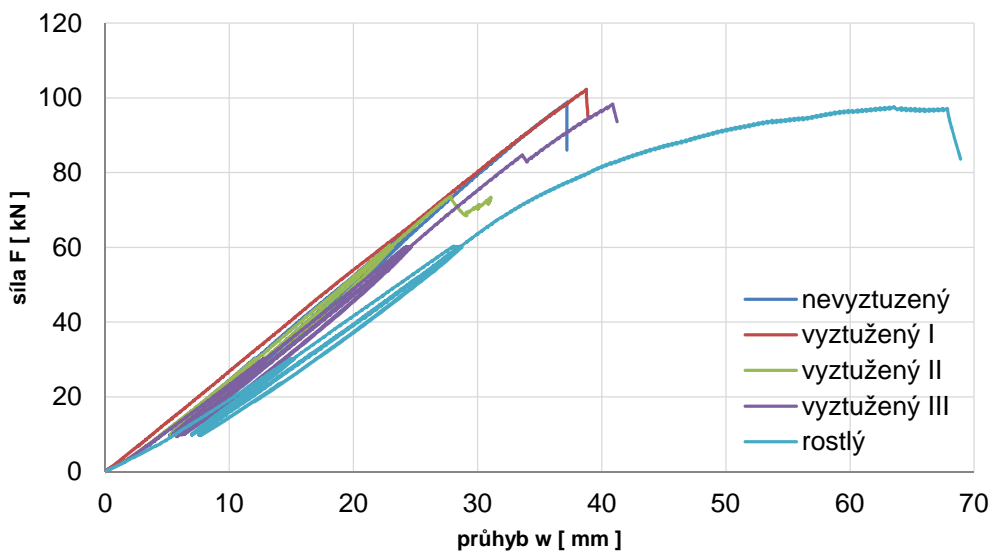
Nosníky z lepeného lamelového dřeva vyztužené CFRP lamelou		kritická síla	průhyb
		F [kN]	w [mm]
charakteristická hodnota		147,92	48,13
návrhová hodnota		122,69	49,89
experimentální hodnota	nosník I	102,30	38,80
	nosník II	73,70	27,90
	nosník III	98,30	40,90



8. POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

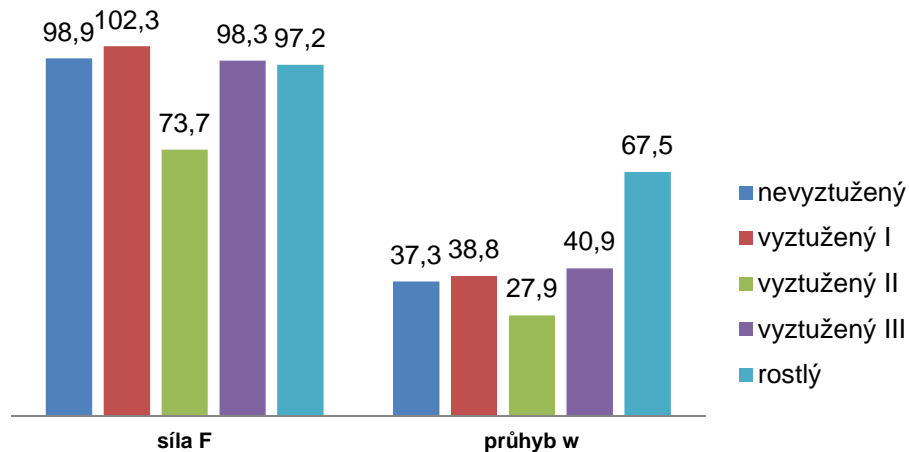
8.1 Zatěžovací zkouška čtyřbodovým ohybem

Chování jednotlivých nosníků během zatěžovací zkoušky čtyřbodovým ohybem je znázorněno v grafu 8.1. Nosníky z lepeného lamelového dřeva vyztužené CFRP lamelou vykazovaly stejné lineárně-pružné chování jako nosník nevyztužený. Jediný nosník z rostlého dřeva se od ostatních lišil svým pružno-plastickým chováním.



Graf 8.1 – Závislost průhybu nosníku na zatěžovací síle

V následujícím grafu 8.2 jsou porovnány hodnoty maximálních zatížení a průhybů jednotlivých nosníků. Až na vyztužený nosník II došlo k vyčerpání únosnosti jednotlivých průřezů takřka při stejných hodnotách zatížení ($\pm 2,55$ kN). Největší hodnota průhybu byla naměřena u nosníku z rostlého dřeva, to je dáno jeho pružno-plastickým chováním. Hodnoty průhybů nosníků vyrobených z lepeného lamelového dřeva, ať už vyztužených nebo nevyztuženého, jsou přímo úměrné velikosti zatížení a nějak výrazně se od sebe neliší.



Graf 8.2 – Hodnoty maximálního zatžení a průhybu jednotlivých nosníků

- **Nosník z rostlého dřeva**

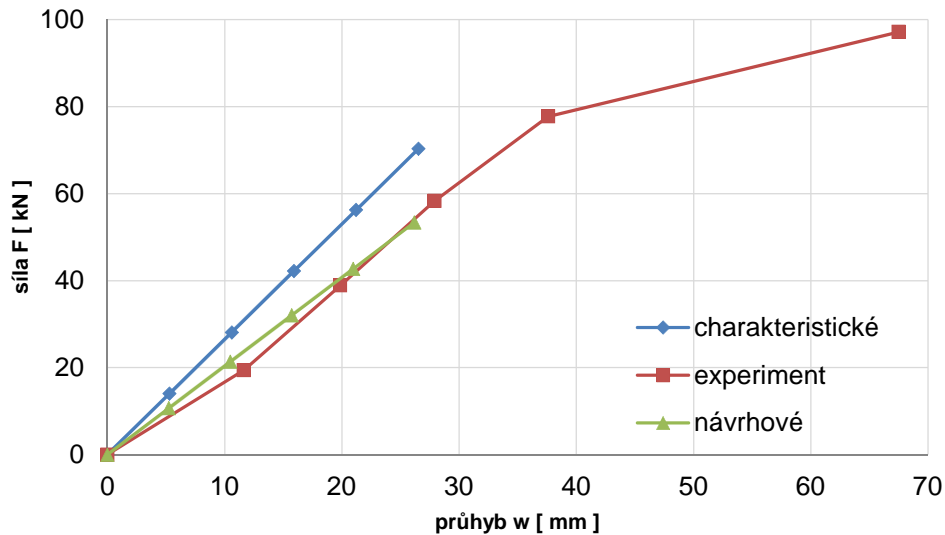
Hodnoty pevnosti v ohybu a průhybu z numerické a experimentální analýzy jsou uvedeny v tabulce 8.1.

Tabulka 8.1 – Hodnoty pevnosti v ohybu a průhybu

Nosník z rostlého dřeva	kritická síla	průhyb
	F [kN]	w [mm]
charakteristická hodnota	70,30	26,53
návrhová hodnota	53,41	26,20
experimentální hodnota	97,20	67,50

Vzhledem k návrhové hodnotě kritické síly je charakteristická hodnota díky součiniteli spolehlivosti materiálu vyšší o 31,6 %. Experimentální hodnota kritické síly je oproti návrhové vyšší o 82%. Charakteristická hodnota průhybu je oproti návrhové vyšší jen o 1,3 %. Experimentální hodnota průhybu byla oproti návrhové větší o 157,6%. To je zapříčiněno tím, že bylo uvažováno lineárně-pružné chování dřevěného průřezu, i když ve skutečnosti se průřez choval pružno-plasticky.

Porovnání závislosti průhybu na zatěžovací síle mezi numerickou a experimentální analýzou je znázorněna v grafu 8.3.



Graf 8.3 – Závislost průhybu na zatěžovací síle

- Nosník z lepeného lamelového dřeva**

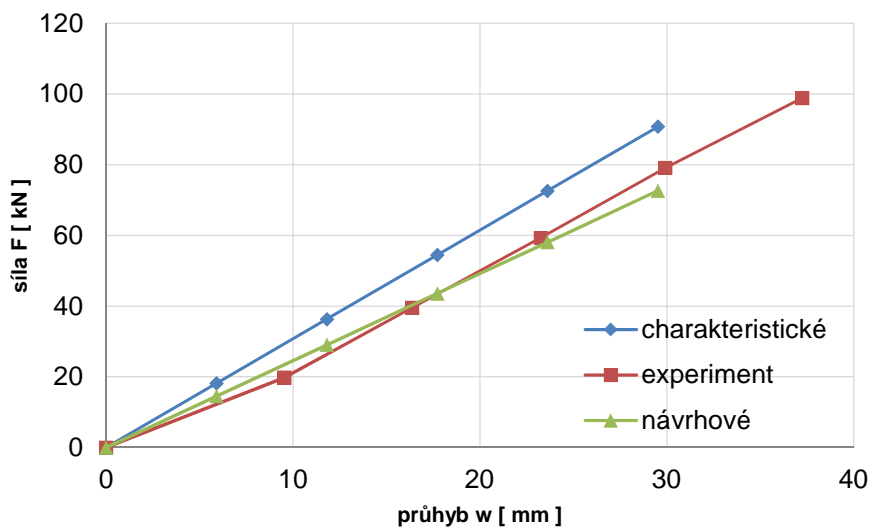
Hodnoty pevnosti v ohybu a průhybu z numerické a experimentální analýzy jsou uvedeny v tabulce 8.2.

Tabulka 8.2 – Hodnoty pevnosti v ohybu a průhybu

Nosník z lepeného lamelového dřeva	kritická síla	průhyb
	F [kN]	w [mm]
charakteristická hodnota	90,77	29,53
návrhová hodnota	72,61	29,53
experimentální hodnota	98,90	37,30

Vzhledem k návrhové hodnotě kritické síly je charakteristická hodnota díky součiniteli spolehlivosti materiálu vyšší o 25 %. Experimentální hodnota kritické síly je oproti výpočtové vyšší o 36,2 %. Návrhová hodnota průhybu je shodná s charakteristickou. Experimentální hodnota průhybu byla oproti návrhové větší o 26,3 %. Odchytky experimentálních hodnot od výpočtových mohou být způsobeny anizotropií lepeného dřeva.

Porovnání závislosti průhybu na zatěžovací síle mezi numerickou a experimentální analýzou je znázorněna v grafu 8.4.



Graf 8.4 – Závislost průhybu na zatěžovací síle

- **Nosníky z lepeného lamelového dřeva vyztužené CFRP lamelou**

Hodnoty pevnosti v ohybu a průhybu z numerické a experimentální analýzy jsou uvedeny v tabulce 8.3.

Tabulka 8.3 – Hodnoty pevnosti v ohybu a průhybu

Nosníky z lepeného lamelového dřeva vyztužené CFRP lamelou		kritická síla	průhyb
		F [kN]	w [mm]
charakteristická hodnota		147,92	48,13
návrhová hodnota		122,69	49,89
experimentální hodnota	nosník I	102,30	38,80
	nosník II	73,70	27,90
	nosník III	98,30	40,90

Vzhledem k návrhové hodnotě kritické síly je charakteristická hodnota díky součiniteli spolehlivosti materiálu vyšší o 20,6 %. Experimentální hodnoty kritické síly jsou oproti výpočtové nižší o 16,6 %; 39,9 % a 19,9 %. Tyto veliké odchylky hodnot jsou způsobeny nedokonalou soudržností CFRP lamely s lamelovým dřevem. Charakteristická hodnota průhybu je nižší oproti návrhové o 3,5%. Experimentální hodnoty průhybu byly oproti návrhové nižší o 22,2 %; 44,1 % a 18 %.

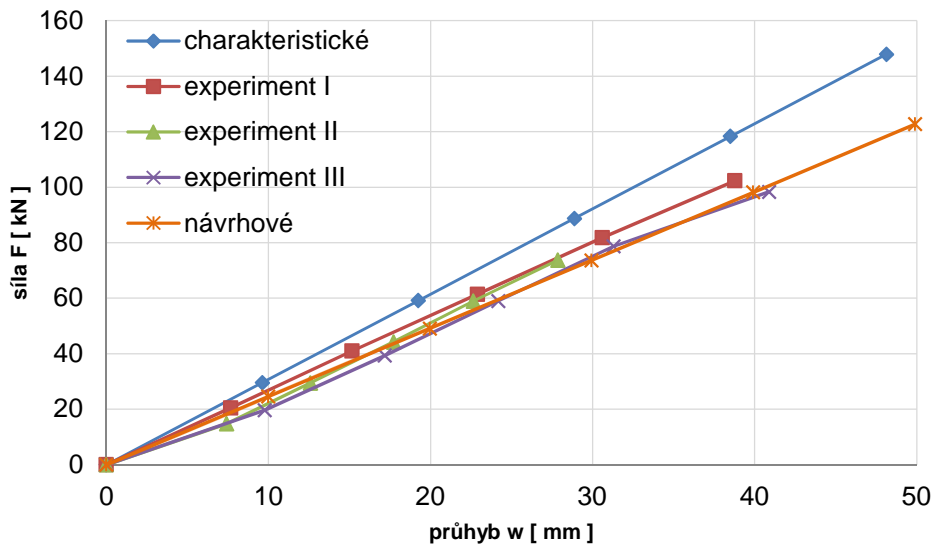


Obr. 8.1 – Porušený nosník s CFRP lamelou



Obr. 8.2 – Usmýknutá výztuž i s dřevěnou lamelou

Porovnání závislosti průhybu na zatěžovací síle mezi numerickou a experimentální analýzou je znázorněna v grafu 8.5.



Graf 8.5 – Závislost průhybu na zatěžovací síle

8.2 Fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálů

- **Pevnost v ohybu rovnoběžně s vlákny pro lepené lamelové dřevo**

Pevnost v ohybu rovnoběžně s vlákny byla stanovena na třech zkušebních tělesech viz. Tabulka 8.4.

Tabulka 8.4 – Stanovení pevnosti v ohybu rovnoběžně s vlákny

lepené lamelové dřevo	vzorek	rozměr vzorku			hmotnost	hustota	kritická síla	pevnost v ohybu	
		b [mm]	h [mm]	L [mm]	m [g]	ρ [kg/m ³]	F _{max} [kN]	f _m [MPa]	
lepené lamelové dřevo	1	68,1	77,9	1050	2711,9	487	není	není	29,0
	2	67,4	75,7		2506,8	468	není	není	
	3	68,4	75,8		2444,4	449	není	není	
	4	67,2	78,2		2604,2	472	23,8	31,3	
	5	67,5	78,0		2462,5	445	19,7	25,9	
	6	66,0	77,7		2304,0	428	22,1	29,9	

Norma ČSN EN 1194 udává pro třídu lepeného lamelového dřeva GL 24h hodnotu pevnosti v ohybu 24 MPa. Průměrná hodnota pevnosti v ohybu stanovená v laboratoři byla 29 Mpa.

- **Globální modul pružnosti v ohybu lepeného lamelového dřeva**

Globální modul pružnosti v ohybu byl stanoven na třech zkušebních tělesech viz. Tabulka 8.5.

Norma ČSN EN 1194 udává pro třídu lepeného lamelového dřeva GL 24h hodnotu modulu pružnosti v ohybu 11 600 MPa. Průměrná hodnota modulu pružnosti v ohybu stanovená v laboratoři byla shodná s normovou hodnotou.

Tabulka 8.5 – Stanovení globálního modulu pružnosti v ohybu

lepené lamelové dřevo	vzorek	rozměr vzorku			hmotnost	hustota	kritická síla	modul pružnosti v ohybu	
		b [mm]	h [mm]	L [mm]	m [g]	ρ [kg/m ³]	F _{max} [kN]	E _{m,g} [MPa]	
	1	68,1	77,9	1050	2711,9	487	není	11478,2	442,4 11600 3,8
	2	67,4	75,7		2506,8	468	není	12113,2	
	3	68,4	75,8		2444,4	449	není	11262,1	
	4	67,2	78,2		2604,2	472	23,8	není	
	5	67,5	78,0		2462,5	445	19,7	není	
	6	66,0	77,7		2304,0	428	22,1	není	

- **Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny pro lepené lamelové dřevo**

Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny byla zjišťována na šesti zkušebních tělesech viz. Tabulka 8.6.

Norma ČSN EN 1194 udává pro třídu lepeného lamelového dřeva GL 24h hodnotu pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny 24 MPa. Průměrná hodnota pevnosti v tlaku stanovená v laboratoři byla 45,7 Mpa. To je o 90,4 % víc než udává norma.

Tabulka 8.6 – Stanovení pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny

lepené lamelové dřevo	vzorek	rozměry vzorku			hmotnost	hustota	pevnost v tlaku	
		b [mm]	h [mm]	L [mm]	m [g]	ρ [kg/m ³]	f_{c,0} [MPa]	
	1	68,1	77,9	400	1025,0	483	47,0	2,4
2	68,1	77,9	1027,2		484	43,0		
3	68,3	75,8	895,2		432	49,6	45,7	
4	68,3	75,8	937,3		452	46,0		
5	69,7	74,5	894,1		431	43,8		5,2
6	69,7	74,5	953,8		459	45,0		

- Hustota lepeného lamelového dřeva**

Hustotu lepeného lamelového dřeva jsme stanovovali na osmi zkušebních tělesech viz. Tabulka 8.7.

Norma ČSN EN 1194 udává pro třídu lepeného lamelového dřeva GL 24h hustotu 390 kg/m³. Průměrná hustota stanovená v laboratoři byla 452,8 kg/m³. Tato hodnota je o 16,1 % vyšší než hodnota udávaná normou.

Tabulka 8.7 – Stanovení hustoty

lepené lamelové dřevo	vzorek	rozměry vzorku			hmotnost	hustota
		b [mm]	h [mm]	L [mm]	m [g]	ρ [kg/m ³]
	1	68,1	77,9	1050	2711,9	486,9
2	67,4	75,7	2506,8		467,9	
3	68,4	75,8	2444,4		449,1	452,8
4	67,2	78,2	2604,2		471,9	
5	69,7	74,5	2429,6		445,7	
6	68,0	75,1	2291,2		427,4	
7	67,5	78,0	2462,5		445,4	4,7
8	66,0	77,7	2304,0		427,8	

- Pevnost CFRP lamely v tahu**

Pevnost uhlíkové lamely jsme stanovovali na jednom zkušebním tělese. Rozměry lamely jsou uvedeny v tabulce 8.8.

Tabulka 8.8 – Stanovení pevnosti CFRP lamely v tahu

CFRP lamela	vzorek	rozměry vzorku		kritická síla	pevnost v tahu
		b [mm]	h [mm]	F [kN]	ft [MPa]
	1	50	1,4	166	2370

Výrobce kompozitních výztuží udával pevnost CFRP lamely v tahu 3 000 MPa. Pevnost v tahu naměřená v laboratoři byla 2 370 MPa. Tato hodnota je o 21 % nižší než hodnota udávaná výrobcem. To mohlo být zapříčiněno nechtěným poškozením CFRP lamely při manipulaci v laboratoři.

- **Pevnost lepeného spoje**

Pevnost lepeného spoje byla testována pro čtyři druhy lepidel pomocí tzv. pull-out zkoušek. Druhy lepidel a hodnoty sil dosažené při zkouškách jsou uvedeny v tabulce 8.9.

Tabulka 8.9 – Stanovení pevnosti CFRP lamely v tahu

lepidlo pro nalepení CFRP lamely	typ lepidla	síla	
		F [kN]	
polyuretanové		32,5	5,0
		22,7	28,1
		29,0	17,7
tixotropní epoxidové		25,5	3,6
		19,1	23,3
		25,3	15,6
močo-formaldehydové		18,1	3,1
		12,1	14,8
		14,1	20,7
melamin-formaldehydové		13,5	4,9
		18,0	13,2
		8,2	37,2

Nejllepší výsledky v pull-out zkouškách prokázalo polyuretanové lepidlo. Průměrná hodnota síly při porušení zkušebních těles byla 28,1 kN. Tixotropní lepidlo dosáhlo o 17% nižší hodnoty, močo-formaldehydové lepidlo dosáhlo o 47,3 % nižší hodnoty a melamin-formaldehydové lepidlo dosáhlo o 53 % nižší hodnoty.

9. ZÁVĚR

Tato práce byla vypracována za podpory projektu *GAČR P104/10/2153 – Kompozitní konstrukce na bázi vysokohodnotných silikátů a dřeva – environmentální optimalizace a experimentální ověření.*

Informace o problematice zesilování dřevěných prvků pomocí kompozitních materiálů jsou shrnuty v kapitole „Rešerše“. Na základě Pull-out zkoušek provedených v laboratoři bylo vybráno nejvhodnější lepidlo pro spojení CFRP výztuže se dřevem.

Zesilující účinek kompozitní výztuže na průřez z lepeného lamelového dřeva, jak se ukázalo při experimentální analýze, však nebyl dostačující. Dalo by se konstatovat, že zesilující efekt byl takřka nulový. Z výsledků zatěžovacích zkoušek, uvedených v kapitole „Porovnání výsledků“, je vidět, že k selhání vyztužených prvků došlo při téměř stejných hodnotách zatížení jako u prvku nevyztuženého. Také hodnoty průhybů jednotlivých nosníků se výrazně nelišily. Tyto neuspokojivé výsledky jsou způsobeny nedostatečnou smykovou únosností lepeného lamelového dřeva, kdy v průběhu zatěžování došlo k pokluzu uhlíkové lamely. V průřezu v tu chvíli došlo ke zmenšení ramene vnitřních sil, a tím pádem ke snížení únosnosti.

Docílení lepšího spolupůsobení mezi kompozitní výztuží a lepeným dřevem by se dalo docílit, kdybychom výztuž na obou koncích nosníku opatřili vhodným kotevním zařízením, které by zamezilo opětovnému pokluzu výztuže.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Normy a literatura

- [1] ČSN 73 2030. *Zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí: Společná ustanovení*. Praha: Český normalizační institut, 1994.
- [2] ČSN EN 1995-1-1. *Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí: Část 1-1: Obecná pravidla - Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [3] ČSN EN 408. *Dřevěné konstrukce: Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2004.
- [4] ČSN EN 1194. *Dřevěné konstrukce: Lepené lamelové dřevo - Třídy pevnosti a stanovení charakteristických hodnot*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [5] KUKLÍK, Petr. *Dřevěné konstrukce*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-86769-72-0.
- [6] SCHMID, Pavel. *Modul BI02-M02, Zkušebnictví a technologie: Stavební zkušebnictví*. Brno, 2001. Studijní opory. Vysoké učení technické v Brně.
- [7] ŠMAK, Milan. *Modul BO06, Dřevěné konstrukce (S): Vlastnosti dřeva*. Brno, 2001. Studijní opory. Vysoké učení technické v Brně.
- [8] SCHAUER, Pavel. *Automatizace měření*. Brno, 2010. Studijní opory. Vysoké učení technické v Brně.

Internetové články

[9] ŠILHAN, Ondřej. Příklady využití dodatečně lepené syntetické FRP výztuže. In: *Http://www.asb-portal.cz* [online]. 2009 [cit. 2012-01-09]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyrobky/priklady-vyuziti-dodatecne-lepene-synteticke-frp-vyztuze-1314.html>

[10] Dřevěné konstrukce. In: [online]. [cit. 2012-01-09]. Dostupné z: http://concrete.fsv.cvut.cz/esf/presentace/2225_DREVO.pdf

[11] *Vlákna pro kompozity* [online]. [cit. 2012-01-09]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>

[12] *Základy teorie lepení* [online]. 2005 [cit. 2012-01-09]. Dostupné z: http://www.abclepidla.cz/pdfs/Zaklady_teorie_lepeni.pdf

[13] *Aplikace vláknových polymerních kompozitů ve stavebnictví* [online]. [cit. 2012-01-09]. Dostupné z: <http://www.csm-kompozity.wz.cz/stav.pdf>

[14] *Lepené lamelové dřevo* [online]. [cit. 2012-01-09]. Dostupné z: <http://www.nordlam.com/>

[15] Speciální stavební systémy: Kompozitní materiály FRP. [online]. 2007 [cit. 2012-01-09]. Dostupné z:

Http://www.stado.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=73&Itemid=155

Internetové zdroje

[16] <http://dreviny.kbx.cz>

[17] <http://www.delta-panel.cz>

[18] <http://www.grena.cz>

[19] <http://cs.wikipedia.org>

[20] <http://www.tme.eu/cz/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	plocha průřezu, v mm^2
a	vzdálenost mezi působištěm zatížení a nejbližší podporou, v mm
b	šířka průřezu, v mm
$E_{c,0}$	modul pružnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny, v N/mm^2
$E_{m,g}$	globální modul pružnosti v ohybu, v N/mm^2
F	zatížení, v N
F_{max}	největší zatížení, v N
$f_{c,0}$	pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny, v N/mm^2
f_m	pevnost v ohybu, v N/mm^2
f_t	pevnost v tahu, v N/mm^2
G	modul pružnosti ve smyku, v N/mm^2
h	výška průřezu, v mm
l	rozpětí v ohybu, nebo délka zkušebního tělesa při tlaku, v mm
l_1	měřená délka pro stanovení modulu pružnosti, v mm
ρ	hustota, v kg/m^3

PŘÍLOHY

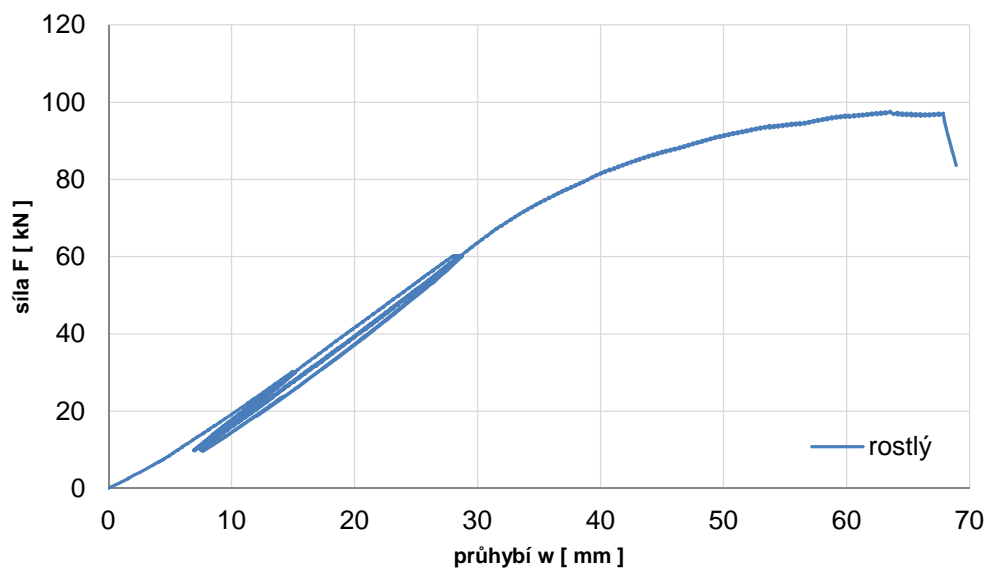
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: Výstupy z provedených laboratorních zkoušek

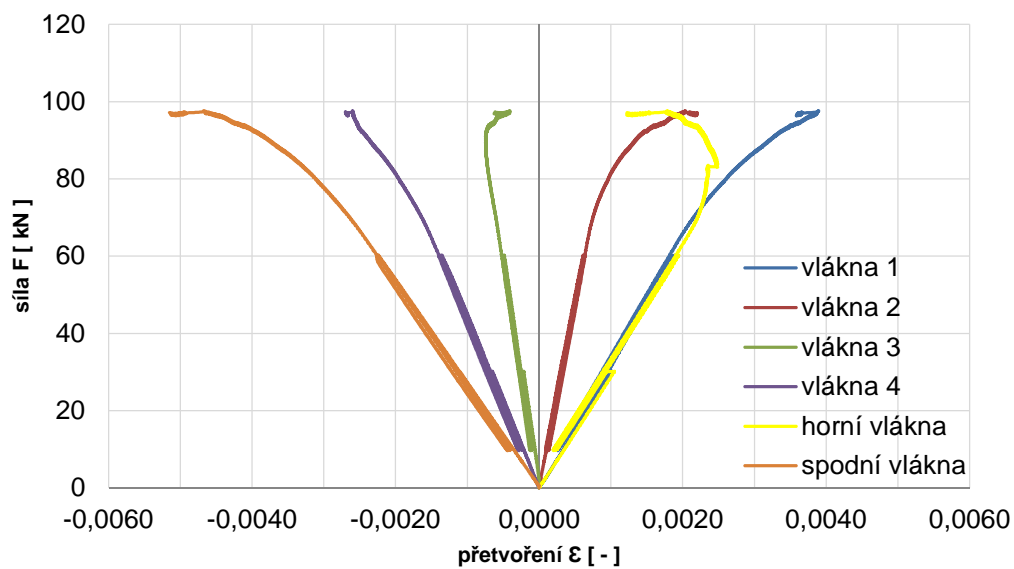
Příloha B: Fotodokumentace

VÝSTUPY Z PROVEDENÝCH LABORATORNÍCH ZKOUŠEK

Nosník z rostlého dřeva

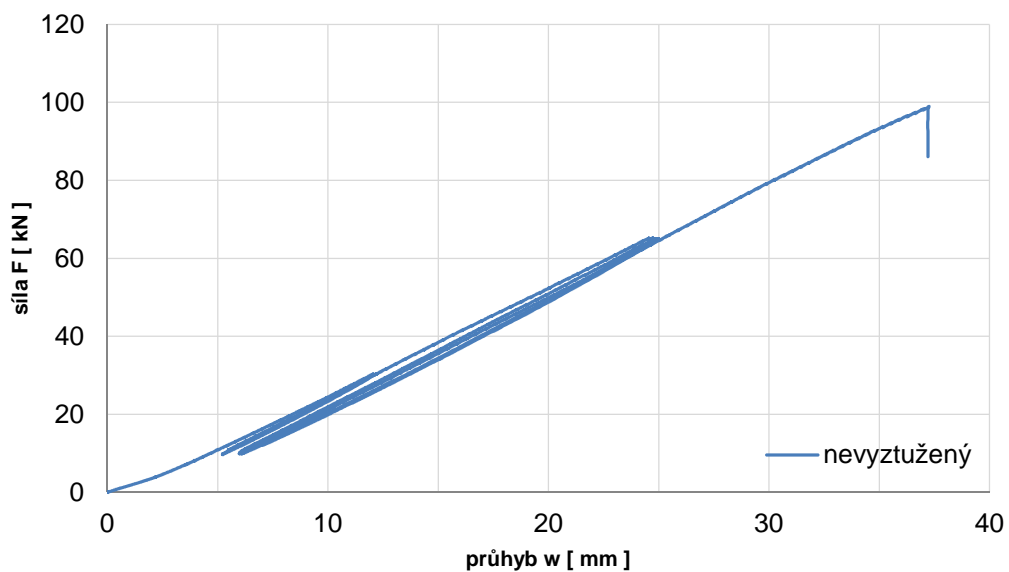


Graf 1 – Závislost průhybu na zatěžovací síle

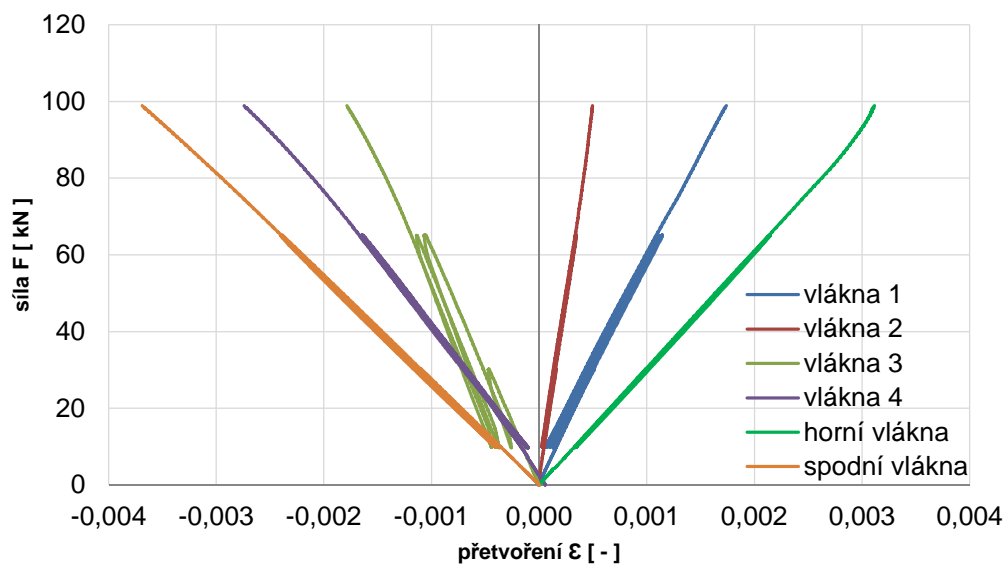


Graf 2 – Závislost přetvoření vláken na zatěžovací síle

Nosník z lepeného lamelového dřeva



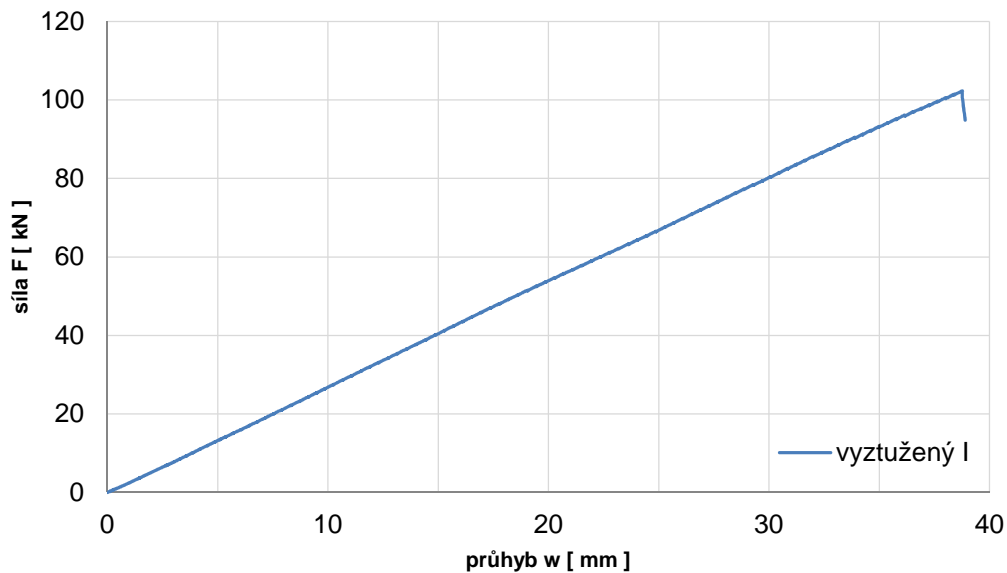
Graf 3 – Závislost průhybu na zatěžovací síle



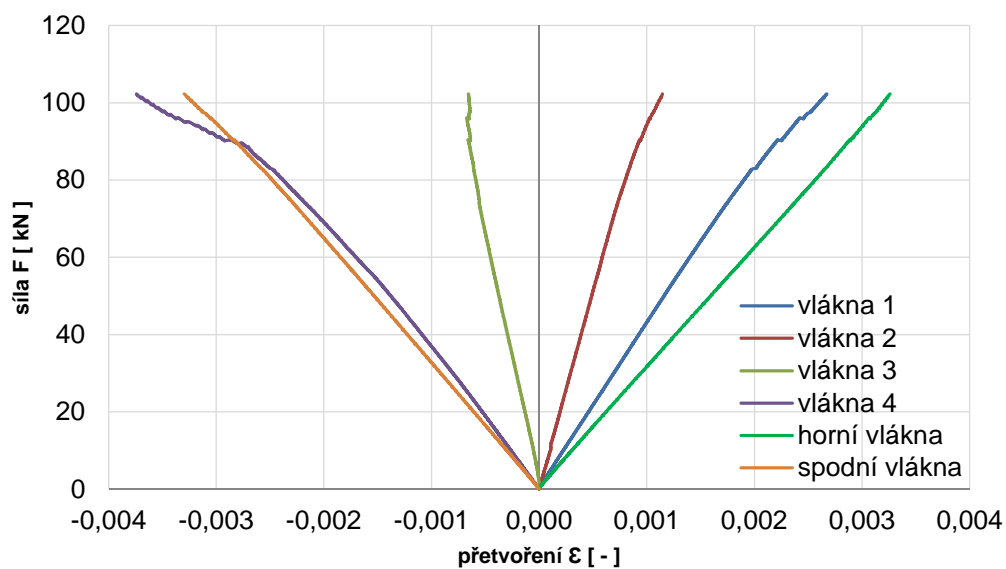
Graf 4 – Závislost pretvoření vláken na zatěžovací síle

Nosníky z lepeného lamelového dřeva vyztužené CFRP lamelou

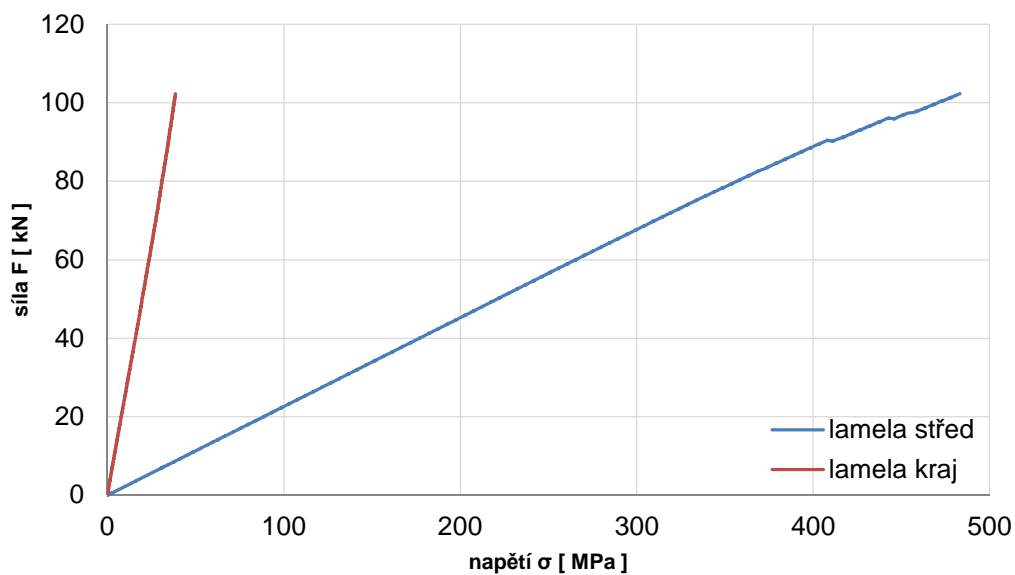
Nosník I:



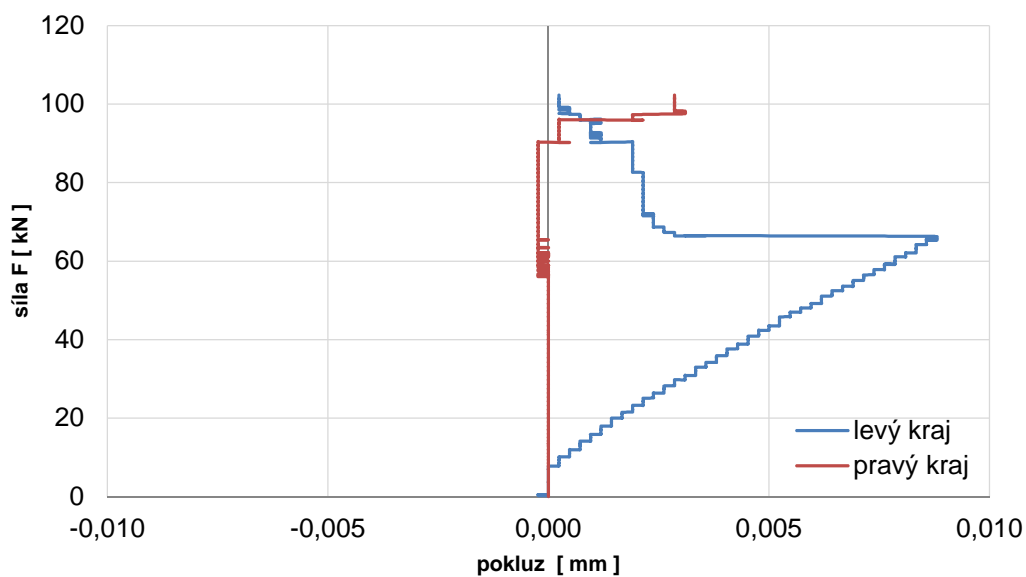
Graf 5 – Závislost průhybu na zatěžovací síle



Graf 6 – Závislost přetvoření vláken na zatěžovací síle

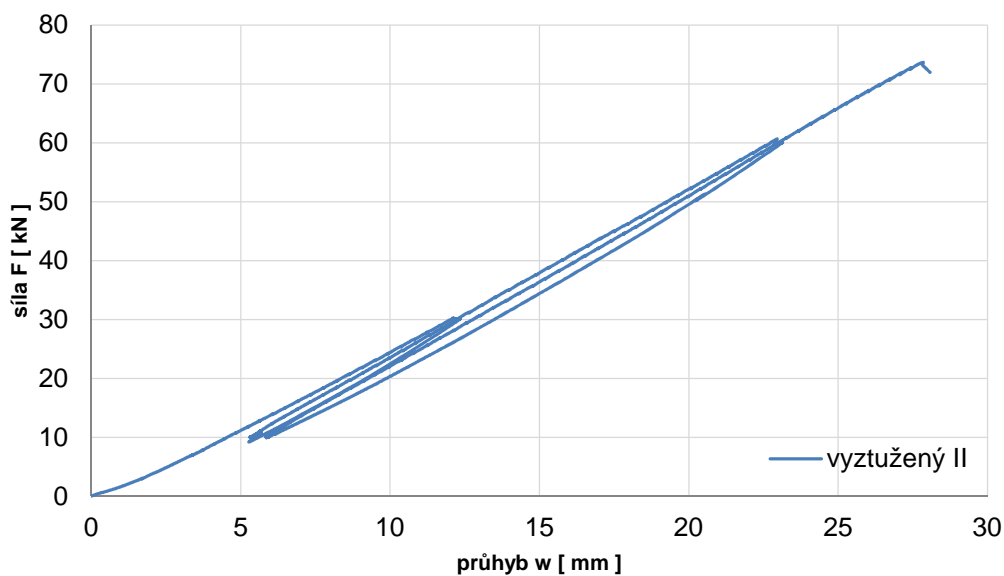


Graf 7 – Závislost napětí CFRP lamely na zatěžovací síle

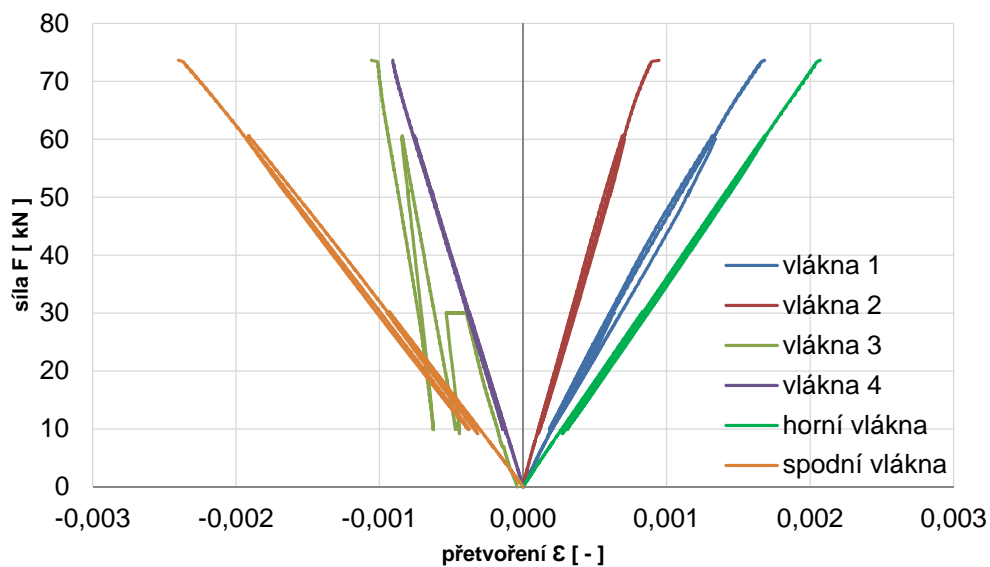


Graf 8 – Závislost pokluzu CFRP lamely na zatěžovací síle

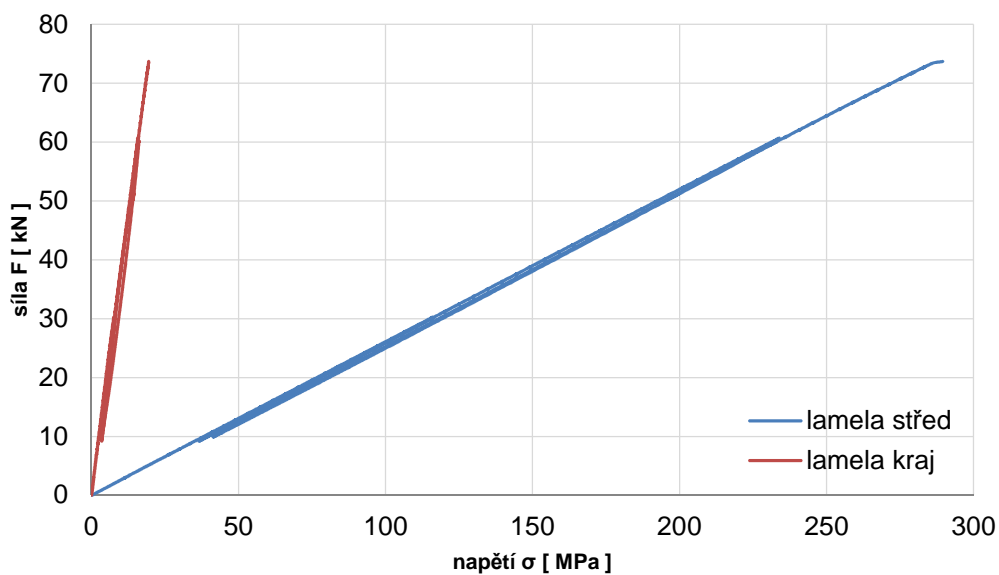
Nosník II:



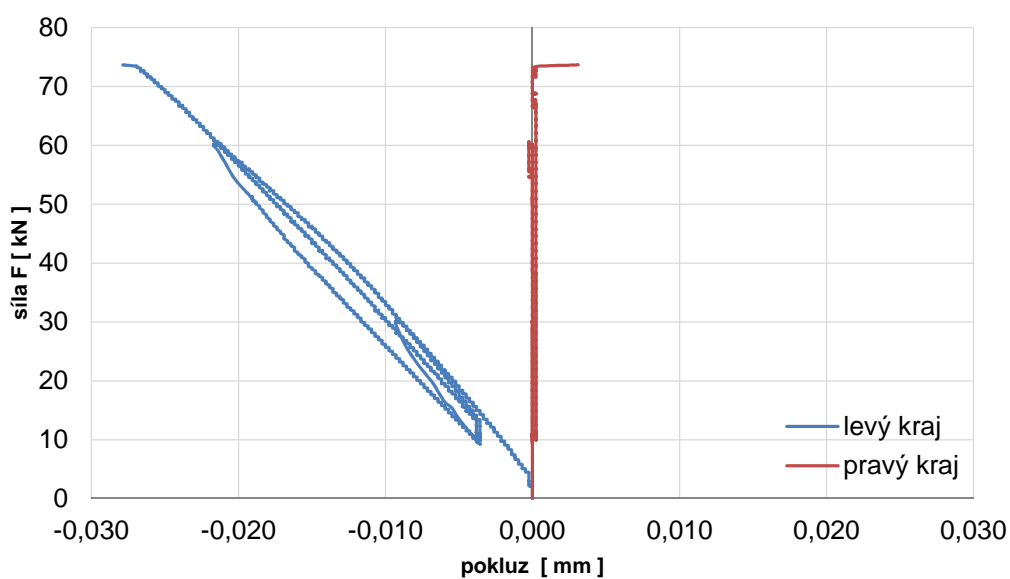
Graf 9 – Závislost průhybu na zatěžovací síle



Graf 10 – Závislost přetvoření vláken na zatěžovací síle

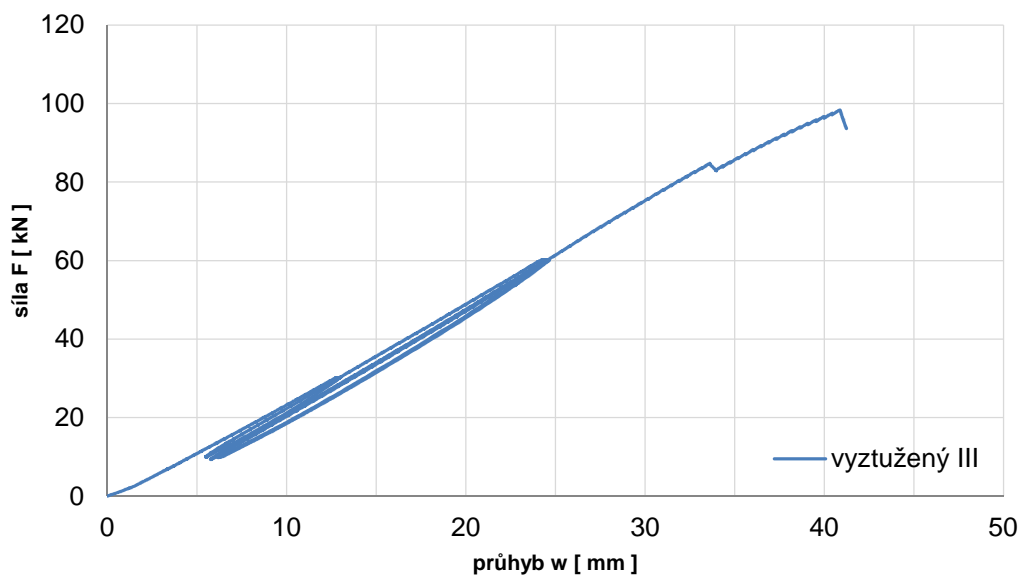


Graf 11 – Závislost napětí CFRP lamely na zatěžovací síle

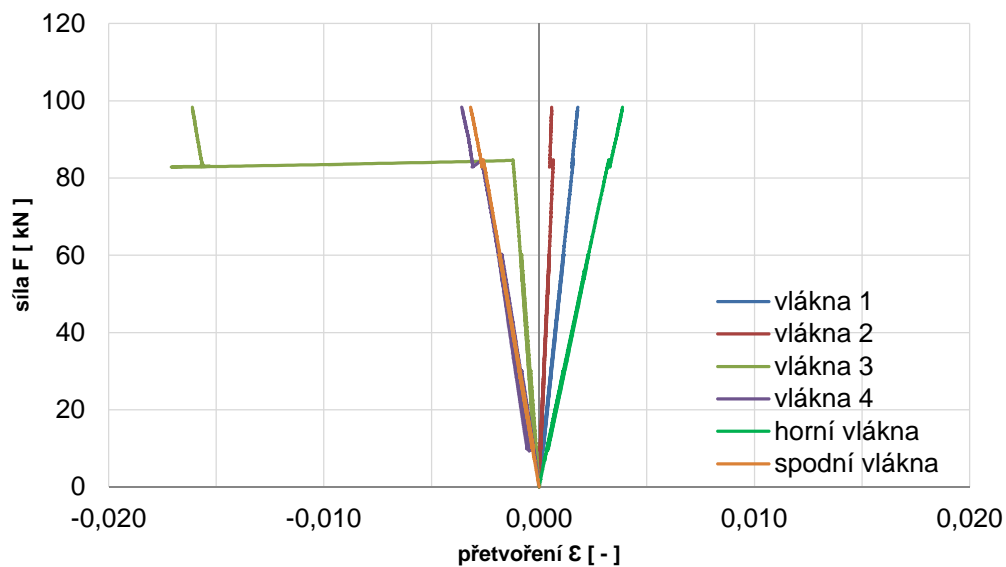


Graf 12 – Závislost pokluzu CFRP lamely na zatěžovací síle

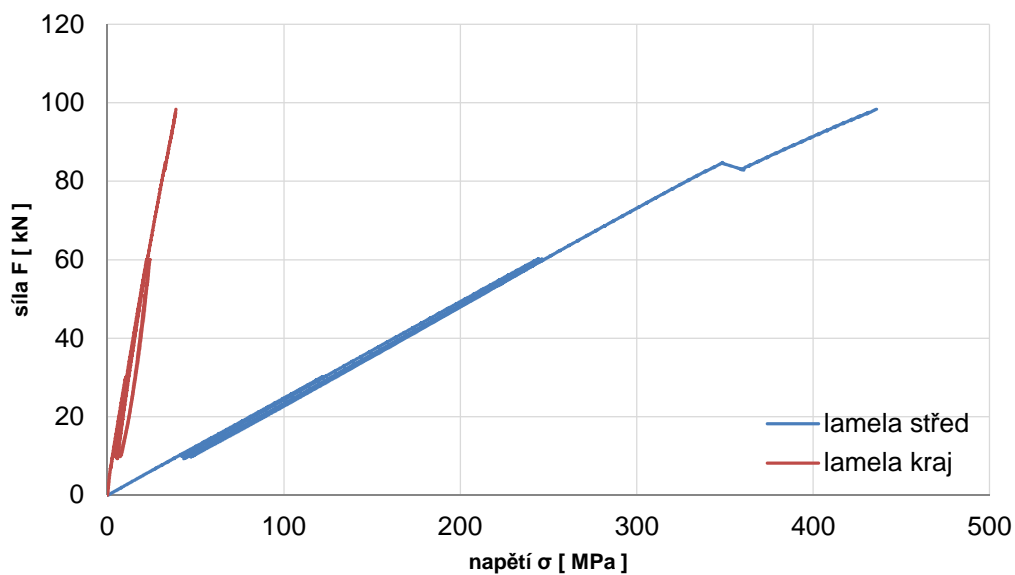
Nosník III:



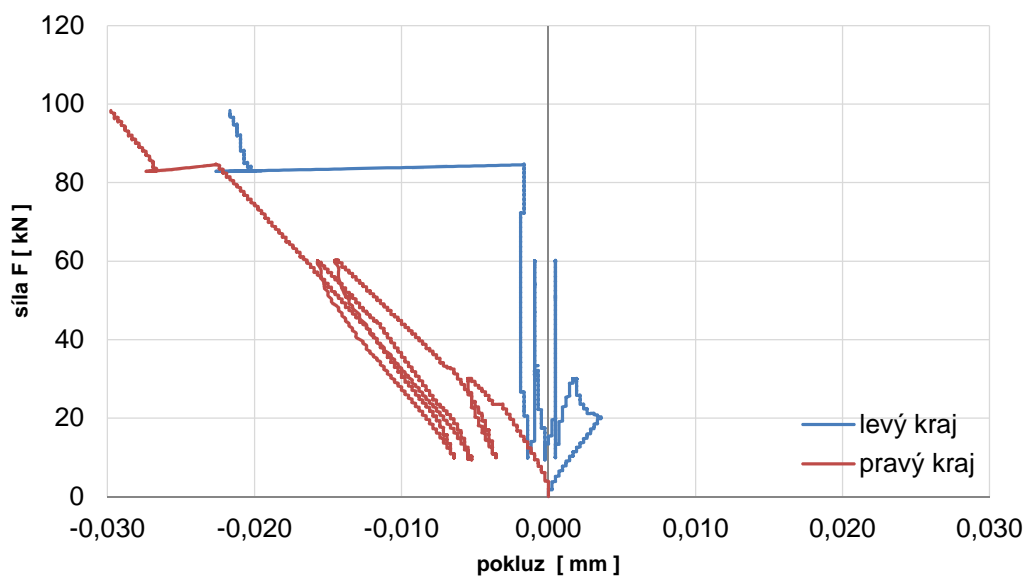
Graf 13 – Závislost průhybu na zatěžovací síle



Graf 14 – Závislost přetvoření vláken na zatěžovací síle



Graf 15 – Závislost napětí CFRP lamely na zatěžovací síle

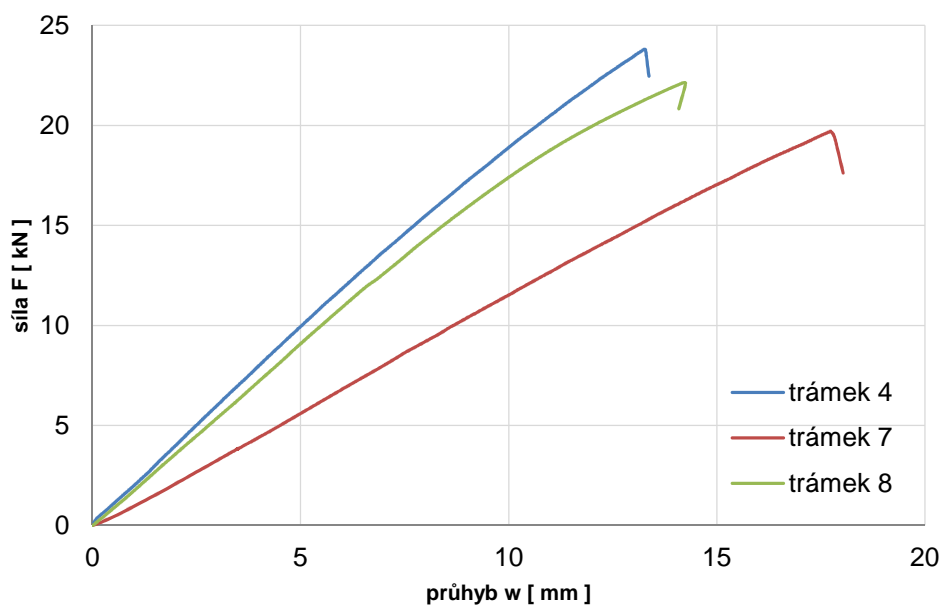


Graf 16 – Závislost pokluzu CFRP lamely na zatěžovací síle

Doplňkové zkoušky

Tabulka 1 – Pevnost v ohybu lepeného lamelového dřeva

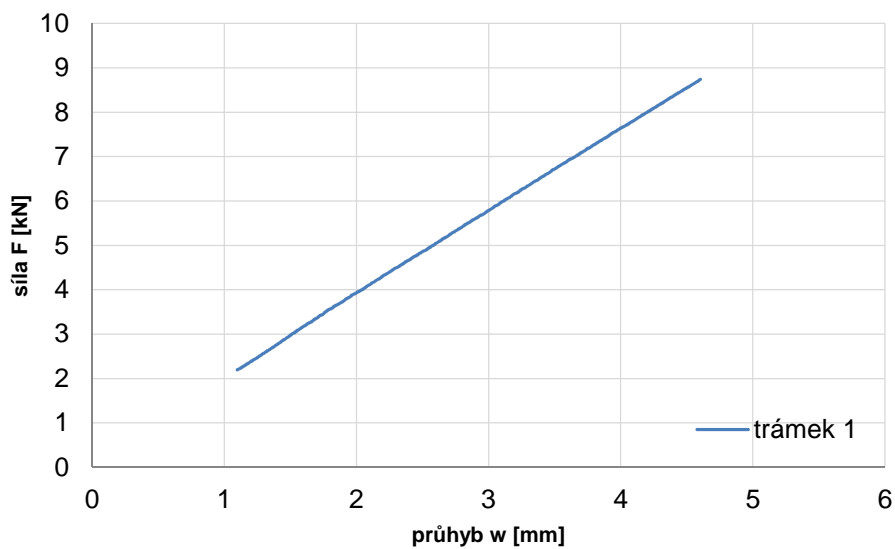
lepené lamelové dřevo	vzorek	rozměr vzorku			hmotnost	hustota	kritická síla	pevnost v ohybu	
		b	h	L	m	ρ	F_{max}	f_m	
		[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	
	1	68,1	77,9	1050	2711,9	487	není	není	2,8 29,0 9,6
	2	67,4	75,7		2506,8	468	není	není	
	3	68,4	75,8		2444,4	449	není	není	
	4	67,2	78,2		2604,2	472	23,8	31,3	
	5	67,5	78,0		2462,5	445	19,7	25,9	
	6	66,0	77,7		2304,0	428	22,1	29,9	



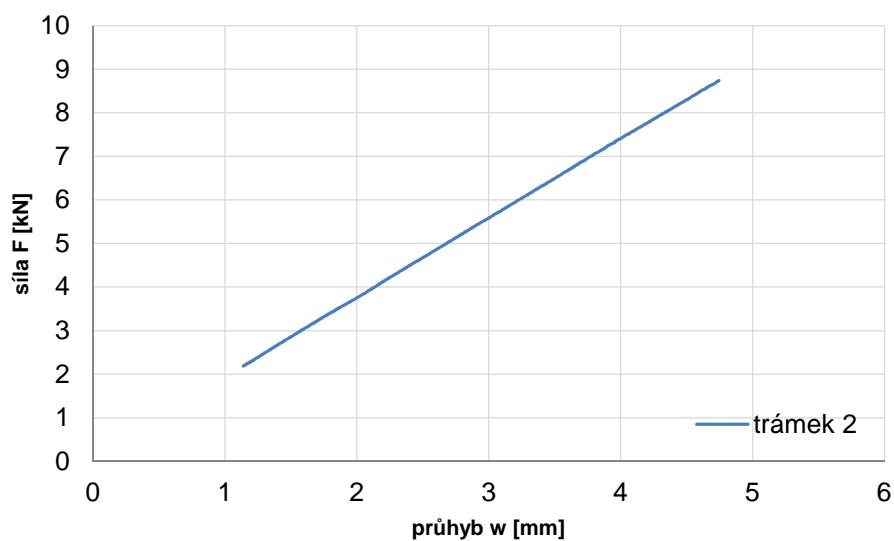
Graf 17 – Závislost průhybu na zatěžovací síle

Tabulka 2 – Modul pružnosti v ohybu lepeného lamelového dřeva

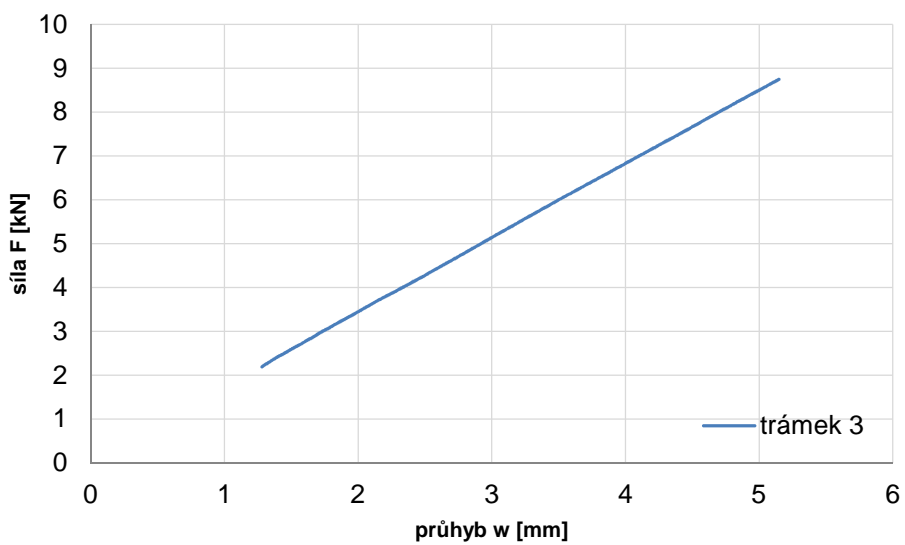
lepené lamelové dřevo	vzorek	rozměr vzorku			hmotnost	hustota	kritická síla	modul pružnosti v ohybu	
		b	h	L	m	ρ	F_{max}	E_{m,g}	
		[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	
	1	68,1	77,9	1050	2711,9	487	není	11478,2	11600
	2	67,4	75,7		2506,8	468	není	12113,2	
	3	68,4	75,8		2444,4	449	není	11262,1	
	4	67,2	78,2		2604,2	472	23,8	není	
	5	67,5	78,0		2462,5	445	19,7	není	
	6	66,0	77,7		2304,0	428	22,1	není	



Graf 18 – Závislost průhybu na zatěžovací síle



Graf 19 – Závislost průhybu na zatěžovací síle



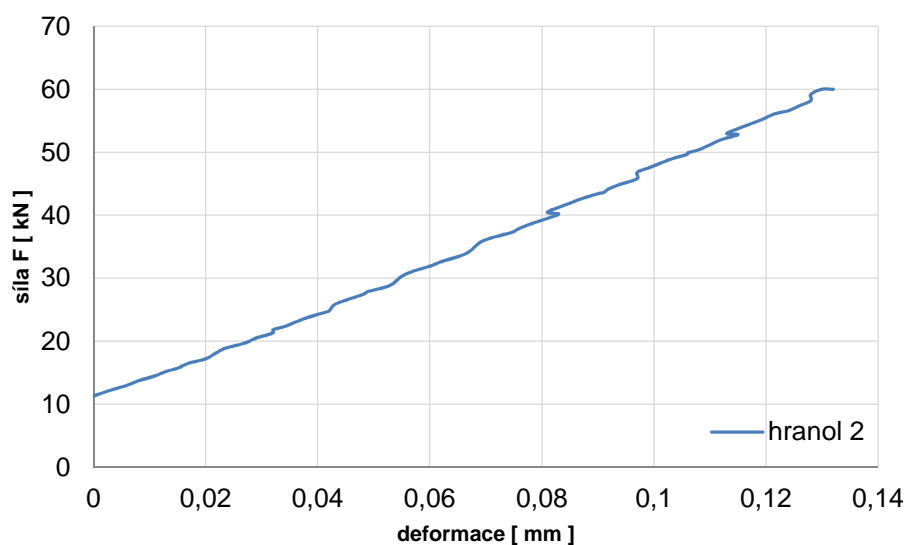
Graf 20 – Závislost průhybu na zatěžovací síle

Tabulka 3 – Pevnost v tlaku lepeného lamelového dřeva

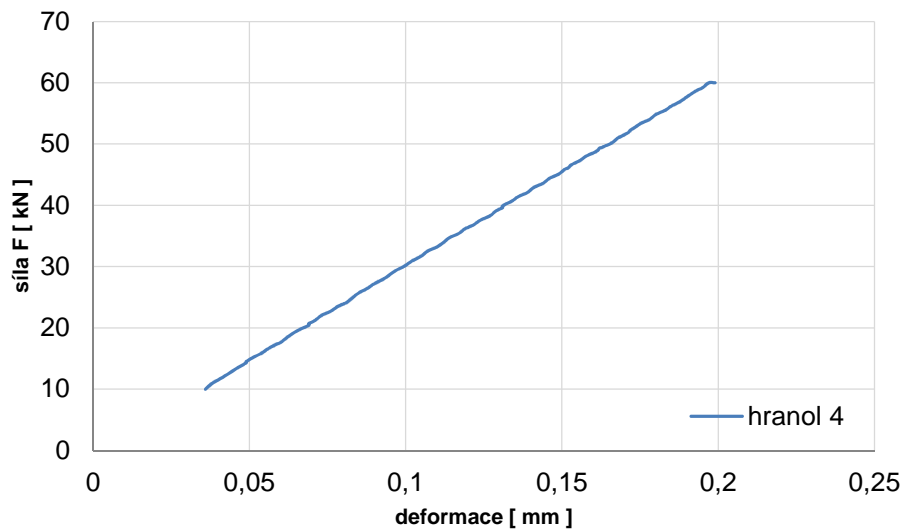
lepené lamelové dřevo	vzorek	rozměry vzorku			hmotnost	hustota	pevnost v tlaku	
		b	h	L	m	r	f_{c,0}	
		[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[MPa]	
	1	68,1	77,9	400	1025,0	483	47,0	2,4 45,7 5,2
	2	68,1	77,9		1027,2	484	43,0	
	3	68,3	75,8		895,2	432	49,6	
	4	68,3	75,8		937,3	452	46,0	
	5	69,7	74,5		894,1	431	43,8	
	6	69,7	74,5		953,8	459	45,0	

Tabulka 4 – Modul pružnosti v tlaku lepeného lamelového dřeva

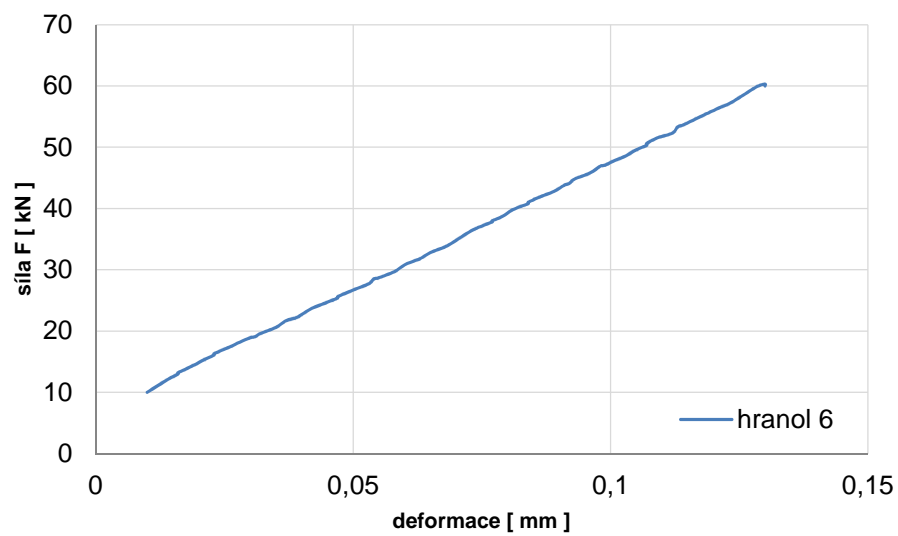
lepené lamelové dřevo	vzorek	rozměry vzorku			hmotnost	hustota	cyklování		přetvoření	modul pružnosti v tlaku	
		b	h	L	m	r	min	max	ε	E_{c,0}	
		[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]		[-]	[MPa]	
	1	68,1	77,9	400	1025,0	483	10	60	0,0031	15250	2284,2 15000 15,2
	2	68,1	77,9		1027,2	484	10	60	0,0031	12724	
	3	68,3	75,8		895,2	432	10	60	0,0029	17284	
	4	68,3	75,8		937,3	452	není				
	5	69,7	74,5		894,1	431	není				
	6	69,7	74,5		953,8	459	není				



Graf 21 – Závislost přírůstku deformace na zatěžovací síle



Graf 22 – Závislost přírůstku deformace na zatěžovací síle



Graf 23 – Závislost přírůstku deformace na zatěžovací síle

Tabulka 5 – Hustota lepeného lamelového dřeva

lepené lamelové dřevo	vzorek	rozměry vzorku			hmotnost	hustota	
		b	h	L	m	ρ	
		[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	
	1	68,1	77,9	1050	2711,9	486,9	21,2
	2	67,4	75,7		2506,8	467,9	
	3	68,4	75,8		2444,4	449,1	
	4	67,2	78,2		2604,2	471,9	452,8
	5	69,7	74,5		2429,6	445,7	
	6	68,0	75,1		2291,2	427,4	4,7
	7	67,5	78,0		2462,5	445,4	
	8	66,0	77,7		2304,0	427,8	

Tabulka 6 – Pull-out zkouška pevnosti lepeného spoje

lepidlo pro nalepení CFRP lamely	typ lepidla	síla	
		F [kN]	
polyuretanové		32,5	5,0
		22,7	28,1
		29,0	17,7
tixotropní epoxidové (Sikadur 30)		25,5	3,6
		19,1	23,3
		25,3	15,6
močo-formaldehydové		18,1	3,1
		12,1	14,8
		14,1	20,7
melamin-formaldehydové		13,5	4,9
		18,0	13,2
		8,2	37,2

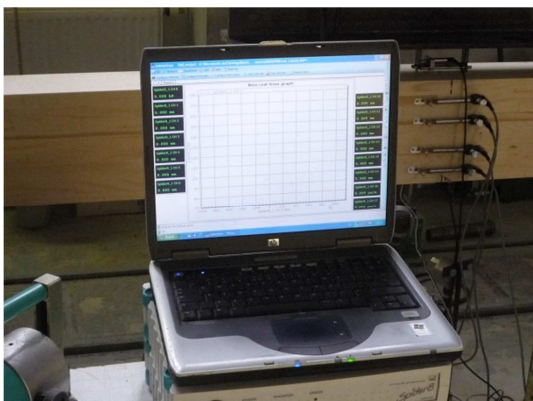
FOTODOKUMENTACE



Foto 1 – Pohled na zatěžovací zkoušku



Foto 2 – Základna zatěžovací zkoušky s obsluhou



*Foto 3 – Osobní počítač zpracovávající
měřená data*

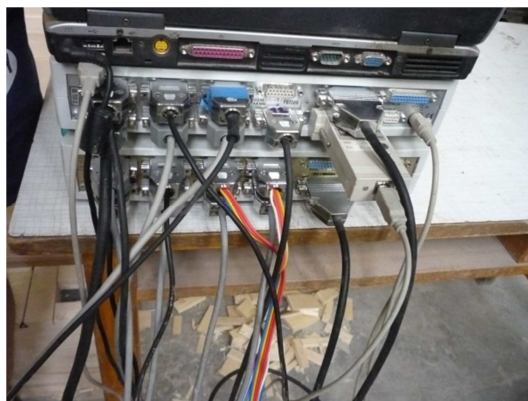


Foto 4 – Zapojení snímačů do měřících ústředěn



Foto 5 – Snímač poklesu podpory



Foto 6 – Snímač pokluzu CFRP lamely



Foto 7 – Měřič průhybu nosníku

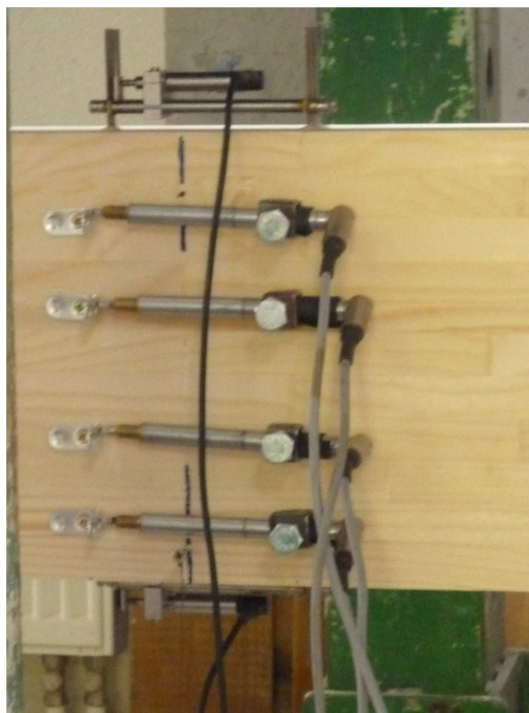


Foto 8 – Snímače přetvoření jednotlivých vláken nosníku

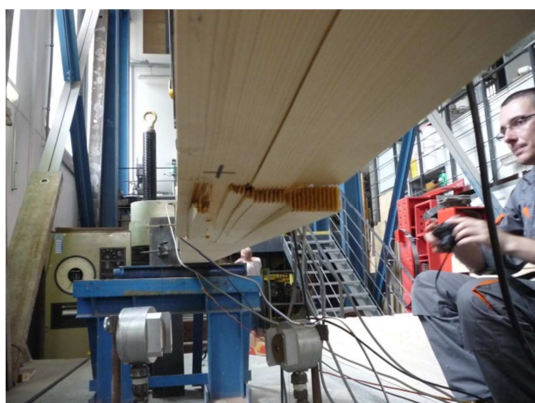


Foto 9 – Spodní vlákna porušeného nosníku



Foto 10 – CFRP lamela v porušeném nosníku



Foto 11 – Usmyknutá výztuž i s dřevěnou lamelou



Foto 12 – Porušený nosník



*Foto 13 – Zkušební těleso pro stanovení
pevnosti v ohybu*



Foto 14 – Zatěžovací zkouška pevnosti v ohybu



Foto 15 – Porušený trámek



*Foto 16 – Porušení trámku v lepeném zubovitém
spoji*

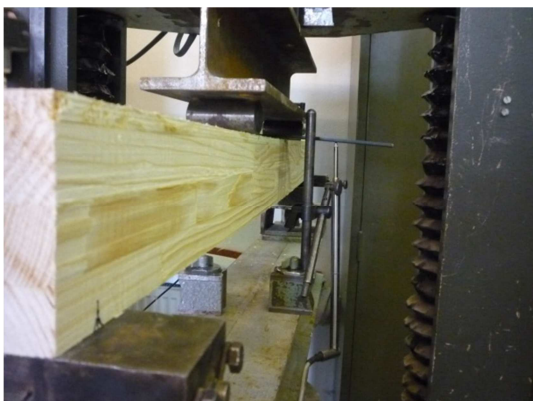


Foto 17 – Průhyb zatěžovaného trámku

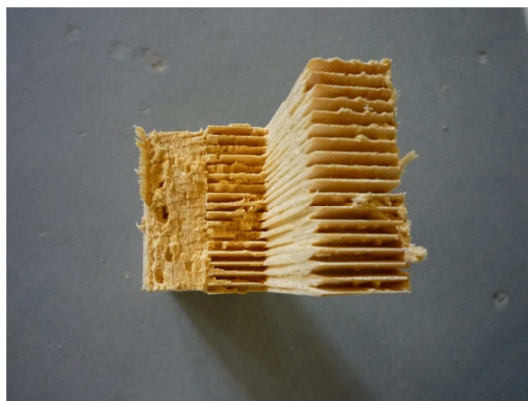


Foto 18 – Porušený lepený zubovitý spoj



*Foto 19 – Zkušební těleso pro zkoušku
pevnosti v tlaku*



*Foto 20 – Zkušební těleso po zkoušce pevnosti
v tlaku*



Foto 21 – Porušený hranol



*Foto 22 – Osazené snímače deformací pro
zkoušku modulu pružnosti v tlaku*



Foto 23 – Zkušební těleso pro zkoušku pevnosti CFRP lamely v tahu

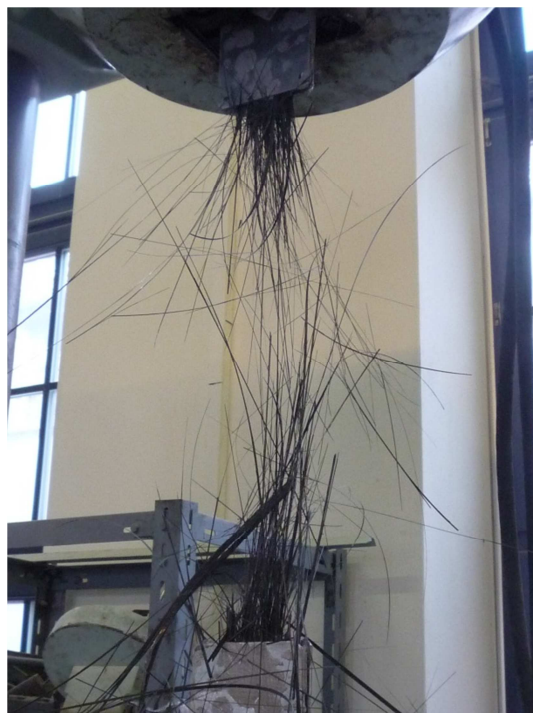


Foto 24 – Porušená CFRP lamela



Foto 25 – CFRP lamela

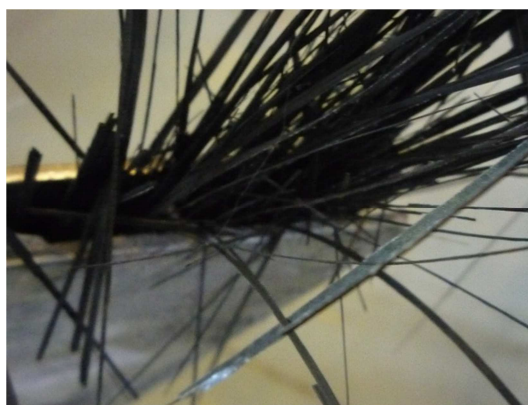


Foto 26 – Detail porušené CFRP lamely



Foto 27 – Zkušební tělesa pro Pull-out zkoušky pevností lepeného spoje

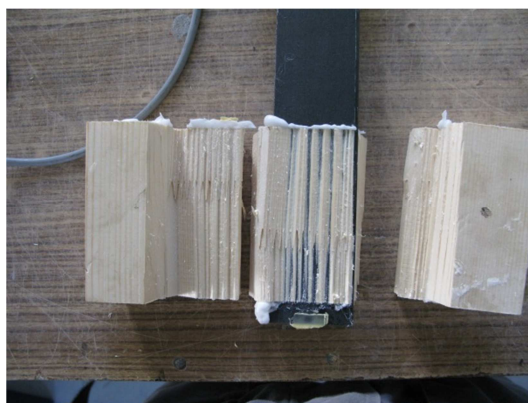


Foto 28 – Zkušební těleso porušené Pull-out zkouškou