



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta stavební  
Katedra mechaniky K132**

**MOŽNOSTI DODATEČNÉHO VYZTUŽOVÁNÍ NOSNÍKŮ Z  
LEPENÉHO LAMELOVÉHO DŘEVA**

**POSSIBILITIES OF ADDITIONAL REINFORCEMENT OF GLUED  
LAMINATED TIMBER BEAMS**

**DISERTAČNÍ PRÁCE**

**Ing. Pavel Klapálek**

Doktorský studijní program: Stavební inženýrství (P 3607)

Studijní obor: Fyzikální a materiálové inženýrství (3911V005)

Školitel: Ing. Lenka Melzerová, Ph.D.

**Praha, 2019**





## **PROHLÁŠENÍ**

Jméno doktoranda: Pavel Klapálek

Název disertační práce: MOŽNOSTI DODATEČNÉHO VYZTUŽOVÁNÍ NOSNÍKŮ Z  
LEPENÉHO LAMELOVÉHO DŘEVA

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracoval/a samostatně pod vedením  
školitele Ing. Lenky Melzerové, Ph.D..

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektů: LD 12023, SGS  
14/122/OHK1/2T/11, SGS16/201/OHK1/3T/11 a SGS17/168/OHK1/3T/11

V Praze dne 1. 1. 2019

.....  
podpis



## **Poděkování**

Děkuji Ing. Lence Melzerové, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady, věcné připomínky a pomoc při tvorbě této práce. Dále bych chtěl poděkovat firmám GRM Systems s.r.o. a Stavebniny DEK a.s. za poskytnutí materiálů ke zkoušení.

Pavel Klapálek



## Abstrakt

Cílem této práce je prozkoumat možnosti dodatečného vyztužování nosníků z lepeného lamelového dřeva. Kromě úvodního popisu historie, způsobů výroby a použití lepeného lamelového dřeva jsou popsány i možné a používané způsoby vyztužování tohoto materiálu. Práce je zaměřena na vyztužení nosníků pomocí tenkovrstvé uhlíkové tkaniny. Sada vyztužených nosníků z lepeného lamelového dřeva je následně podrobena destruktivnímu i nedestruktivnímu zkoušení. Tyto materiálové zkoušky jsou podrobně vyhodnoceny a porovnány. Výsledky zkoušek jsou použity jako vstupy do konečně prvkových modelů nosníků. Ty jsou vytvořeny tak, aby co nejvíce odpovídaly skutečnému chování nosníků. Shoda mezi nosíky a jejich modely je také podrobně vyhodnocena. V závěru je konstatováno, že samotný vliv výztužné tkaniny na zvýšení únosnosti a snížení průhybů nosníků je nepatrný. Tkanina má však zásadní vliv v závěrečné fázi zatěžování při destrukci nosníků, protože je schopna oddálit kolaps nosníků až o desítky sekund. Podařilo se vytvořit odpovídající konečně prvkové modely nosníků, které se blíží jejich reálnému chování. V závěru jsou učiněna určitá doporučení pro další rozvoj vyztužování nosníků z lepeného lamelového dřeva.

## Klíčová slova

Lepené lamelové dřevo; uhlíková tkanina; vyztužování; destruktivní zkoušení; nedestruktivní zkoušení; konečně prvkový model





## Abstract

The aim of this work is to investigate the possibilities of additional reinforcement of glued laminated timber beams. In addition to an introductory description of history, methods of production and use of glued laminated timber, the possible and used methods of reinforcing of this material are described. The work focuses on reinforcement of beams using thin carbon fiber fabric. Reinforced glued laminated timber beams are subsequently subjected to destructive and non-destructive testing. These material tests are thoroughly evaluated and compared. The results from these tests are used as inputs to the finite element models of timber beams. These are designed to match the real behavior of beams as much as possible. The models are compared with the results from the destructive tests of real beams. In conclusion, the influence of the thin reinforcing fabric alone on increasing the bearing capacity and reducing the deflections of the beams is negligible. However, the fabric has a fundamental effect in the final phase of loading during the destruction of the beams, where it is able to delay the collapse of the beams for up to several minutes. Finite element models of beams were created which approach the behavior of real beams, and recommendations for further focus in future works were made.

## Keywords

Glued laminated timber; carbon fiber fabric; reinforcement; destructive testing; non-destructive testing; finite element model



## Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>LEPENÉ LAMELOVÉ DŘEVO (LLD)</b> .....	<b>17</b>
2.1	Historie .....	17
2.2	Lepidla .....	18
2.2.1	Lepidla založená na polykondenzaci .....	19
2.2.2	Lepidla založená na polyadici .....	21
2.3	Výroba LLD .....	22
2.3.1	Zpracování řeziva, třídění a sušení .....	23
2.3.2	Lepení .....	24
2.3.3	Finální úprava .....	25
2.4	Použití LLD .....	26
2.5	Charakteristiky a návrh LLD .....	27
<b>3</b>	<b>TESTOVANÝ MATERIÁL</b> .....	<b>30</b>
3.1	Lepené lamelové dřevo.....	30
3.2	Tkanina z uhlíkových vláken.....	32
<b>4</b>	<b>NEDESTRUKTIVNÍ METODY ZKOUŠENÍ DŘEVA</b> .....	<b>34</b>
4.1	Úvod .....	34
4.2	Používané nedestruktivní metody.....	35
4.2.1	Vizuální metoda.....	35
4.2.2	Elektrická metoda .....	35
4.2.3	Ultrazvuková metoda.....	36
4.2.4	Radiační metoda .....	37
4.2.5	Metoda zarážení trnu .....	38
4.2.6	Metoda odporového mikrovtání .....	39

4.2.7	Metoda odebrání mikrovzorků .....	40
4.2.8	Rezonanční metoda.....	41
4.2.9	Shrnutí.....	42
<b>5</b>	<b>POUŽITÉ NEDESTRUKTIVNÍ METODY .....</b>	<b>43</b>
5.1	Rezonanční metoda.....	43
5.1.1	Teorie měření.....	44
5.1.2	Měření a výpočet .....	49
5.1.3	Porovnání výsledků .....	53
5.2	Metoda zarážení trnu – Pilodyn.....	54
5.2.1	Měření a výsledky.....	55
5.3	Porovnání výsledků nedestruktivních metod zkoušení.....	61
<b>6</b>	<b>VYZTUŽOVÁNÍ NOSNÍKŮ .....</b>	<b>63</b>
6.1	Základní rozdělení a metody.....	63
6.2	Vyztužení vysokopevnostní lamelou ze dřeva.....	65
6.3	Vyztužení vlepením ocelových tyčí a drátů.....	66
6.4	Vyztužení pomocí kompozitních vláken .....	66
6.5	Vyztužování vlastních nosníků.....	67
<b>7</b>	<b>DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ.....</b>	<b>71</b>
7.1	Vyztužené nosníky.....	71
7.1.1	Teorie a postup měření .....	72
7.1.2	Vyhodnocení dat .....	76
7.1.3	Výsledky měření .....	82
7.2	Tahové zkoušky uhlíkové tkaniny .....	84
7.2.1	Příprava vzorků a zkoušek.....	84
7.2.2	Vyhodnocení.....	90

<b>8</b>	<b>MODELOVÁNÍ</b> .....	<b>92</b>
8.1	Postup při modelování .....	92
8.2	Porovnání modelů s realitou .....	98
<b>9</b>	<b>ZÁVĚRY</b> .....	<b>103</b>
<b>10</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA A ZDROJE</b> .....	<b>104</b>



# 1 ÚVOD

Předkládaná disertační práce se zabývá možnostmi dodatečného vyztužování nosníků z lepeného lamelového dřeva. Lepené lamelové dřevo je stavební materiál, který se používá již od 19. století. Současně s průmyslovým rozvojem v ostatních oblastech stále dochází k jeho rozšířenějšímu používání. Při jeho výrobě se odstraní některé nedostatky surového dřeva a materiál se pak hodí i do náročnějších podmínek než prvky z prostého dřeva. Kromě zdokonalení výrobních postupů se hledají i způsoby, jak vylepšit vlastnosti prvků z lepeného lamelového dřeva za pomoci dalších materiálů. S jejich pomocí lze vytvořit kompozitní prvky, které mohou lépe odolávat extrémním vlivům, případně by mohly být vylepšeny alespoň některé jejich vlastnosti. Proto se předkládaná práce věnuje právě možnostem dodatečného vyztužování nosníků z lepeného lamelového dřeva. V kontextu výzkumného programu je použita tenká tkanina s uhlíkovými vlákny, která je nalepená na spodním okraji ohýbaných prvků.

Obsah předkládané disertační práce je ve své úvodní teoretické části zaměřen na podrobný popis obecných vlastností lepeného lamelového dřeva, a to i v historických souvislostech. Je sem začleněn i výčet a popis vlastností lepidel, používaných při výrobě lepeného lamelového dřeva, která jsou též stručně charakterizována. Úvodní část je zakončena příklady využití lepeného lamelového dřeva ve stavebnictví. Je zmíněno také navrhování konstrukčních prvků.

V další části je popsán materiál, který byl pro řešenou problematiku k dispozici, což je sada šesti nosníků z lepeného lamelového dřeva a výztužná tkanina s uhlíkovými vlákny. Do této části spadá také lepidlo, použité pro aplikaci tkaniny na hotové nosníky. Celý tento proces proběhl v laboratoři fakulty stavební ČVUT v Praze.

Následuje popis různých nedestruktivních metod zkoušení dřevěných prvků, z nichž je proveden výběr metody vhodné pro řešenou úlohu. Dvě zvolené metody, a to metoda zarážení trnu a rezonanční metoda, jsou potom popsány podrobněji, a to včetně konkrétně použitých postupů při vyhodnocení získaných dat.

Další část je již soustředěna na samotné vyztužování nosníků z lepeného lamelového dřeva. Zde jsou rozebrány různé existující metody. Za nimi následuje podrobný popis použité metody aplikace výztužné tkaniny, který je provázen fotodokumentací. Destruktivní zkoušky vyztužených nosníků jsou dále vyhodnoceny. Pozornost je v této části textu věnována také popisu a vyhodnocení destruktivních tahových zkoušek výztužné tkaniny.

Po vyhodnocení všech použitých metod materiálových zkoušek a získání potřebných dat je další část textu věnována modelování konečně prvkových počítačových modelů. Tyto modely pro své nastavení využívají mimo jiné i materiálové charakteristiky získané z předešlých testů. Je popsán způsob tvorby těchto modelů, které jsou následně porovnány se skutečnými vyztuženými nosníky.

Od vyztužování nosníků pomocí uhlíkové tkaniny se očekává zlepšení jejich vlastností vzhledem k únosnosti, snížení průhybů a odolnosti vůči porušení. Tomu je věnována pozornost také v poslední části práce, a to se záměrem ze získaných dat vyvodit závěry a rozhodnout o vhodnosti a použitelnosti tohoto způsobu vyztužování nosníků. V této části práce je obsah textu zaměřen také na využití vytvořených počítačových modelů a určení jejich využití pro navazující práci, neboť v nich lze snadno měnit tloušťku a parametry výztužné tkaniny.

## **Cíle**

Vybrat vhodnou nedestruktivní metodu zkoušení nosníků z lepeného lamelového dřeva, která dodá jeho vstupní parametry pro MKP modely.

Zjistit materiálové parametry použité výztužné tkaniny.

Pomocí destruktivních ohybových zkoušek stanovit klíčové vlastnosti nosníků z lepeného lamelového dřeva s nalepenou fólií s uhlíkovými vlákny.

Vytvořit MKP modely zkoušených nosníků a porovnat závislosti mezi průhybem a zatížením s výsledky ohybových testů.



## 2 LEPENÉ LAMELOVÉ DŘEVO (LLD)

### 2.1 Historie

Rostlé dřevo má určitá omezení, jako jsou velikost průřezu, maximální délka a tvar, což už koncem 19. století přestávalo stačit zvyšujícím se nárokům stavebních inženýrů. Proto vznikla i první myšlenka, jak odstranit tyto nevýhody pomocí lepení dřevěných prvků s cílem vytvořit kompozitní materiál, který bude mít lepší vlastnosti než rostlé dřevo. Prvopočátek lepeného lamelového dřeva (dále jen LLD) sahá do roku 1866 do Anglie, kde Josiah George Poole navrhl a postavil dodnes stojící střešní konstrukci z lepeného lamelového dřeva na univerzitě Krále Edvarda v Southamptonu. Avšak první patentované použití se uskutečnilo až ve městě Weimar v Německu, kde Otto Hetzer roku 1906 získal patent pod číslem DRP 197773 na zakřivené nosníky z lepeného lamelového dřeva, složené ze dvou a více lamel, které byly pod tlakem neoddělitelně slepené. Díky této metodě se již nemusely brát ohledy na délku a průřez prvku rostlého dřeva, který byl udáván průměrem, délkou a rovinností kmene použitého stromu. Otto Hetzer tak vymyslel způsob, jak vytvořit konstrukci s ohledem na statické i desénové hledisko, a to i na velká rozpětí, kde téměř vždy výška průřezu odpovídala jeho statickému namáhání v daném místě. Na spojování jednotlivých lamel také vyvinul lepidlo, jež vykazovalo větší pevnost než dřevo samotné [1].

Významný posun v technologii LLD přišel v roce 1942, kdy bylo představeno první zcela voděodolné lepidlo, jež umožnilo použít LLD ve venkovním prostředí bez nebezpečí degradace lepených spojů [2].

Celkově byla do počátku šedesátých let minulého století produkce LLD nízká, ale díky stále se rozvíjející technologii a vývojem nových lepidel od té doby stále roste. U nás se LLD vyrábí již od roku 1952 a v současnosti jsme schopni vyrobit prvky o šířce 240 mm, výšce 2,0 m a délce 32,0 m. V zemích, které patří k předním výrobcům LLD, jako např. Rakousko a Německo, jsou maximální rozměry nosníků ještě větší, a to o výšce až 2,4 m a délce 40 m.

Výrobou LLD se vytvořil vysokohodnotný stavební materiál, který má výborné vlastnosti a jenž dokáže nahradit rostlé dřevo tam, kde již nejsou tyto prvky dostačující. Je tvořeno vrstvami lamel, které se k sobě lepí pod tlakem voděodolným lepidlem. Tak lze vytvořit prvky s potřebnými rozměry a v téměř libovolném tvaru. Lamely jsou kladeny tak, aby jejich podélná vlákna kopírovala podélný rozměr prvku. V místech většího namáhání,

jako jsou rámové rohy a horní a dolní okraje nosníků, je možné použít kvalitnější a pevnější lamely. Tímto procesem vzniká materiál, jenž vykazuje lepší pevnostní a tuhostní charakteristiky, než mají obdobné prvky z rostlého dřeva. Takto zpracované dřevo navíc vykazuje velice dobrou požární odolnost. Rychlost odhořívání z povrchu LLD je stanovena na 0,5 až 0,7 mm/min. Rostlé dřevo má pro srovnání hodnotu 0,5 až 0,9 mm/min. U LLD se dokonce projevuje tzv. samozhášivý efekt, při němž dřevo bez iniciátoru hoření a vysoké teploty špatně hoří, což je oproti rostlému dřevu další velká výhoda [3].

Slepením menších částí, které jsou kontrolovány a vyráběny podle předepsaných podmínek, vzniká u LLD takzvaný laminační efekt, jenž výrazně zlepšuje pevnost tohoto materiálu. Tento efekt vzniká odstraněním vad, jako jsou suky a jiné menší defekty z lamel již při výrobě, a tím se docílí více homogenního materiálu, než je rostlé dřevo. To obsahuje nepravidelně rozptýlené vady a tím je snížena jeho únosnost. Pokud se přece jen vyskytne v lamelě vada, která by vedla ke snížení tahové únosnosti, projeví se další část laminačního efektu, kdy díky vzájemnému překládání lamel přenesou přilehlé pevnější lamely část tahových napětí, čímž se opět zlepšuje spolehlivost prvků z LLD [3].

## 2.2 Lepidla

Jednu z nejdůležitějších rolí ve výrobě LLD hrají lepidla, která umožňují spojit dvě a více částí dřeva v jeden celek, a to bez pomoci mechanických prostředků a bez zásahu do jejich struktury. Protože existuje velké množství lepidel a tento průmysl se stále vyvíjí, definuje tak lepidla pro použití ve stavebnictví norma EN 301 „Fenolická a aminová lepidla pro nosné díly dřevěných konstrukcí – Klasifikace a technické požadavky“. Ta dělí lepidla na dvě kategorie. Do první kategorie patří lepidla, která jsou trvanlivá a mohou být vystavena venkovnímu prostředí a teplotám nad 50 °C. V druhé kategorii se pak nacházejí lepidla pro použití ve vytápěných a větraných prostorech, venkovních prostorech chráněných před přímým vlivem počasí, případně mohou být pouze krátce vystavena venkovnímu prostředí a teplotám do 50 °C. Na tuto normu je odkazováno v Eurokódu 5 jako na požadavky pro lepidla používaná ve stavebnictví. Hlavním požadavkem na lepidla je schopnost vyplnit spáry mezi jednotlivými prvky a vytvořit adhezní spojení, které bude vykazovat minimálně stejnou pevnost jako dřevo samotné. Důležitá je také trvanlivost, tedy aby lepidlo vydrželo použití v dané třídě provozu po celou dobu životnosti konstrukce, a to bez ztráty spolehlivosti.

Proces lepení se vždy skládá z nanesení lepidla v tekutém stavu, vyplnění spár ve spojovaném prvku, stlačení spojů a následně vytvrzením. Vytvrzení je pak možno docílit pomocí procesu fyzikálního, chemického či jejich kombinací.

*Fyzikální proces* je například tuhnutí taveniny či přeměna roztoku (tavná lepidla a termoplastická lepidla jako PVAC).

*Chemický proces* představuje řízenou chemickou reakci jednotlivých složek lepidla, při níž vznikají molekulární vazby (lepidla na bázi epoxidových pryskyřic a polyuretanu).

*Kombinací* rozumíme přeměnu roztoku a chemickou reakci (fenolická, močovinová, melaminová lepidla).

Lepidla jsou rozdělena na dvě základní skupiny v závislosti na typu chemické stupňovité polymerace, tedy na polykondenzaci a polyadici. Při klasifikaci a charakterizaci jednotlivých lepidel vycházíme z dělení a popisu podle Augustina (2008, 39 s.) a Koželouha (1998, A12).

### 2.2.1 Lepidla založená na polykondenzaci

Při polykondenzaci vzniká chemická reakce, při níž reagují dva stejné nebo různé monomery obsahující dvě nebo více reakčních funkčních skupin. Reakcí nevzniká nejen polymer, ale i nízkomolekulární produkt (voda, amoniak, metanol). Poprvé byla tato reakce použita pro výrobu v roce 1909, kdy byl kondenzací fenolu a formaldehydu vyroben polymer, jenž je dnes známý jako bakelit [4].

*Rezorcínolformaldehydová (RF) a fenolrezorcínolformaldehydová (PRF) pryskyřičná lepidla* jsou podle normy prvním typem lepidel. Do čisté tekuté rezorcínové pryskyřice, která je získávána reakcí rezorcínu s formaldehydem, se přidává tvrdidlo obsahující formaldehyd, čímž se ukončuje tuhnutí. RF i PRF lepidla jsou schopna vytvrdnout při pokojové teplotě, ale i při lehce zvýšených teplotách. Po vytvrzení má lepidlo ve spojích, jež mohou mít tloušťku od 1 do 2 mm, tmavohnědou barvu a již neuvolňuje žádné škodlivé látky. Reakcí se vytvoří velmi pevná a stálá struktura, která je nerozpustná ve vodě, a při případném požáru nedojde k delaminaci. Jsou vhodné pro většinu typů konstrukcí pro venkovní i vnitřní použití.

*Fenolformaldehydová (PF) pryskyřičná lepidla pro lepení za horka* se vyrábějí reakcí fenolu s formaldehydem za alkalických podmínek, při zvýšené teplotě a v alkalickém prostředí. U naneseného lepidla se proces tvrdnutí spouští zvýšením teploty, a to až na 140 °C. Následným ochlazením se proces tvrdnutí ukončí a lepidlo má pak strukturu, která

tmavou barvou i trvanlivostí odpovídá RF a PRF lepidlům. PF lepidlo neodpovídá klasifikaci podle normy EN 301<sup>1</sup>, a proto ho nelze zařadit ani do jedné ze dvou skupin. Přesto při zkoušení splňuje vysoké požadavky, a tak se nejčastěji používá při výrobě překližek a vláknitých desek pro stavební použití. Dodává se buď v tekuté či práškové formě, nebo jako lepící folie.

*Fenolformaldehydová (PF) pryskyřičná lepidla pro lepení za studena* se vytvrzují při pokojové teplotě v kyselém prostředí. Protože je nutné pro spuštění tvrdnutí přidat silnou kyselinu, není možné použít vodorozpustnou formu, ale je zapotřebí lepidlo nejdříve rozpustit v alkoholu. Přestože trvanlivostí odpovídá jiným PF lepidlům a mohla by být podle normy EN 301 zařazena mezi lepidla tvrzená za studena, jsou v současnosti vyřazena z použití pro nosné prvky, protože kyselina přidávaná při tvrzení může poškodit strukturu dřeva. To se projevilo i u staveb z 50. a 60. let minulého století, kdy se tato lepidla hojně používala, ale po určitém čase se začaly objevovat poruchy materiálu, a to právě z důvodu poškození dřeva silnou kyselinou.

*Močovinoformaldehydová (UF) pryskyřičná lepidla* se vyrábějí reakcí močoviny s formaldehydem. Proces tvrzení se může spustit zvýšením teploty a přidáním kyseliny, při dosažení požadované tvrdosti se proces zastaví ochlazením a neutralizací. Spoj má po vytvrnutí světlou barvu. Protože není odolný vůči povětrnostním podmínkám (voda a teplo), řadí se do druhé skupiny normy EN 301, tedy skupiny pro výrobu nosných prvků k vnitřnímu použití, ale s omezeným použitím kyseliny.

*Melaminmočovinoformaldehydová (MUF) pryskyřičná lepidla* jsou v podstatě velice podobná UF lepidlům, pouze je u nich část močoviny nahrazena melaminem, čímž se dosáhne lepší odolnosti vůči vodě a vlivům počasí. Takto modifikovaná lepidla se mohou řadit do první i druhé kategorie podle normy EN 301. I když tato lepidla v první kategorii nedosahují tak dobrých vlastností jako například rezorcínová lepidla, jsou upřednostňována jednak z ekonomických důvodů, ale také vzhledem ke světlé barvě vytvrzeného lepidla.

*Kaseinová lepidla* jsou nejstaršími používanými lepidly v průmyslu (již před rokem 1920) a velice se osvědčila při použití v interiérech. Protože nejsou příliš odolná vůči vodě, je tak použití v exteriéru podmíněno zastřešením, aby se zabránilo přímým povětrnostním vlivům. Lepidlo se dodává v prášku, který se rozmíchá ve vodě. Řadou chemických procesů se pak lepidlo během 4–8 hodin vytvrdí. Spoj mají světlou barvu. Toto lepidlo v sou-

---

<sup>1</sup>EN 301: „Fenolická a aminová lepidla pro nosné díly dřevěných konstrukcí – Klasifikace a technické požadavky“ [32]

časnosti nespĺňuje normu EN 301<sup>2</sup>.

## 2.2.2 Lepidla založená na polyadici

Podle Prokopové [4] se polyadici rozumí chemická reakce, do níž vstupují dva různé monomery, každý s jinou funkční skupinou. Jeden monomer musí obsahovat proton (vodík), jenž může uvolnit ze své funkční skupiny. Reakce je velmi podobná polykondenzaci, ale neuvolňuje se při ní žádný vedlejší produkt. Uvolněný proton se následně přesune na druhý monomer a při tomto stále se opakujícím přesouvání vodíku dojde ke spojení obou monomerů [4].

*Epoxidová lepidla* patří mezi dvousložková lepidla, kde první složkou je epoxidová pryskyřice a druhá pak obsahuje dvě aminové skupiny. Smícháním těchto složek dojde po vytvrzení k vytvoření všestranného lepidla, které se pevností v účinnosti řadí mezi MUF a PRF lepidla. Lepidla jsou většinou používána ve speciálních případech, kdy je nutné spojit dřevo s jiným materiálem, a to kvůli vysoké pořizovací ceně.

*Dvousložková polyuretanová lepidla (2C-PUR)* jsou složena ze dvou složek (polyolu a izokyanátu), které neobsahují rozpouštědla a po smíchání vytvoří PU pryskyřici. Tato lepidla, a to i přes vysokou pevnost a trvanlivost, nejsou všechna dostatečně voděodolná, a proto jsou používána spíše pro speciální případy, stejně jako lepidla epoxidová.

*Jednosložková polyuretanová lepidla (1C-PUR)* jsou velice podobná dvousložkovým lepidlům z hlediska stejné či lehce nižší pevnosti a trvanlivosti, ale není zde nutné míchat více složek dohromady. Vytvrzovací reakce se spouští díky vlhkosti obsažené ve dřevě. Při reakci se uvolňuje CO<sub>2</sub>, které může u tlustších vrstev vytvořit tzv. pěnu, a proto není lepidlo vhodné pro vyplňování spár. Jedná se o pevné, trvanlivé a voděodolné lepidlo, jež se podle normy EN 301 řadí do první skupiny, a proto se tedy může použít i v exteriéru.

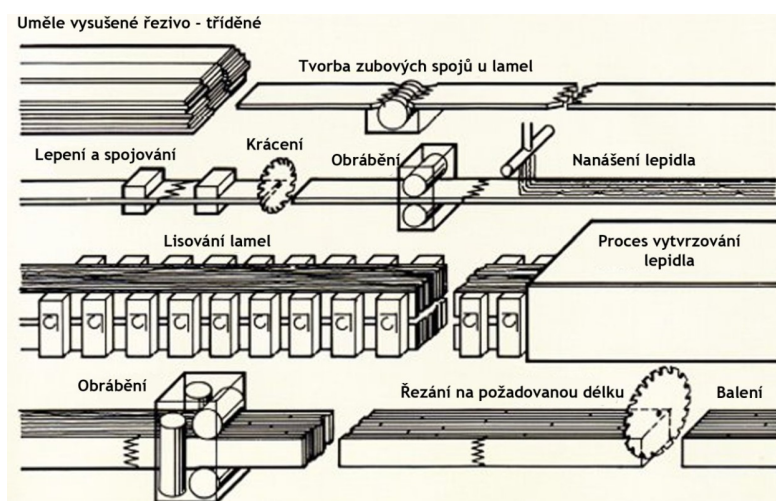
*Emulzní polymerní isokyanatany (EPI)* jsou disperzní lepidla vyrobena pomocí různých polymerů bez použití rozpouštědel. Jedná se opět o dvousložkové lepidlo, které má výbornou pevnost a trvanlivost, spolu s odolností vůči teplu a vodě. To jsou také důvody, proč se toto lepidlo řadí podle normy do první skupiny lepidel používaných ve stavebnictví.

---

<sup>2</sup>EN 301: „Fenolická a aminová lepidla pro nosné díly dřevěných konstrukcí - Klasifikace a technické požadavky“ [32]

## 2.3 Výroba LLD

Základní proces výroby LLD je v podstatě už od počátku víceméně nezměněn. Postupem času pouze procházel modernizací díky novým technologiím (automatizace výroby, vývoj lepidel a jiné) a v současnosti se po celém světě vyrábí podobně. Princip se může lokálně lišit v závislosti na dostupných technologiích, typu použitého lepidla, rozměrech prvků nebo na lokálních národních normách. Celý proces výroby LLD je výrobce povinen kontrolovat, a to interně a externě. V interní části sám výrobce určí principy zkoušení a tyto zkoušky také provede.



Obrázek č. 1 Schéma výroby LLD<sup>3</sup>

V externí části provádí kontrolu třetí nezávislá osoba u výrobce. Proces výroby musí v České republice odpovídat daným normám ČSN EN 301<sup>4</sup>, ČSN EN 385<sup>5</sup> a ČSN EN 386<sup>6</sup>. Finální produkt musí také splňovat všeobecné požadavky na LLD, stanovené v normě ČSN EN 14080<sup>7</sup>, a také být správně zařazen do tříd podle tuhosti a pevnosti, které jsou uvedeny v normě ČSN EN 1194<sup>8</sup>. Celý proces výroby (obrázek č. 1) je možné rozdělit do několika dílčích procesů.

<sup>3</sup><http://www.woodsolutions.com.au/Wood-Product-Categories/Glulam>

<sup>4</sup>ČSN EN 301: „Fenolická a aminová lepidla pro nosné díly dřevěných konstrukcí – Klasifikace a technické požadavky“ [32]

<sup>5</sup>ČSN EN 385: „Konstrukční dřevo nastavované zubovitým spojem – Požadavky na užité vlastnosti a minimální výrobní požadavky“ [34]

<sup>6</sup>ČSN EN 386: „Lepené lamelové dřevo – Požadavky na užité vlastnosti a minimální výrobní požadavky“ [35]

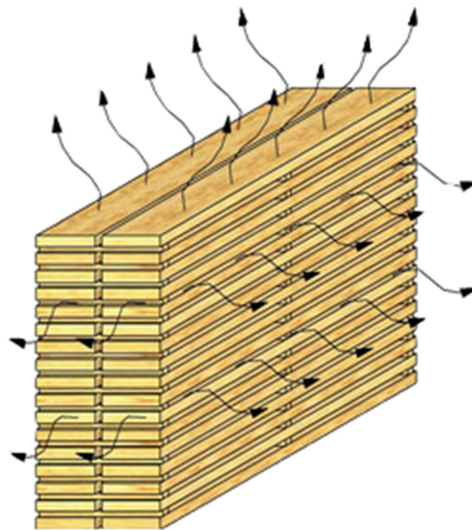
<sup>7</sup>ČSN EN 14080: „Dřevěné konstrukce – Lepené lamelové dřevo – Požadavky“ [17]

<sup>8</sup>ČSN EN 1194: „Dřevěné konstrukce – Lepené lamelové dřevo – Třídy pevnosti a stanovení charakteristických hodnot“ [36]

### 2.3.1 Zpracování řeziva, třídění a sušení

Pro výrobu LLD se může použít jakýkoli typ dřeva, ale upřednostňuje se použití měkkého dřeva, protože tvrdé dřevo se špatně lepí a tvaruje. Nejčastějším druhem používaného stromu je pak tedy smrk, který je měkký, dostupný a dobře se tvaruje a lepí [5].

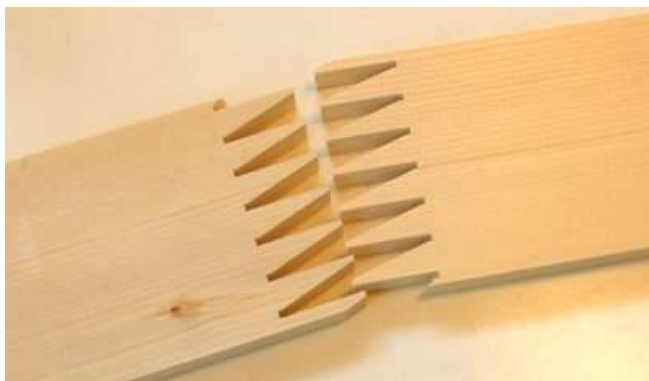
Na začátku celého procesu se z kulatiny vytváří řezivo. Vyrábějí se lamely o maximální šířce 240 mm, s tloušťkou 40–50 mm pro běžné použití a 20–30 mm pro použití v zakřivených nosnících. Z těchto lamel se mohou odřezat větší vady (suky a jiné). Délky takto připravených lamel jsou v rozmezí 1,5–5 m. Tyto lamely se následně z venkovních skladů převážejí do umělých sušáren, v nichž se vysoušejí na vlhkost od 8–15 % (obrázek č. 2).



Obrázek č. 2 Princip uložení lamel při sušení<sup>9</sup>

V tomto rozmezí spodní hodnota vlhkosti zamezí pozdějšímu vzniku trhlin a horní mez je maximální hodnota pro použití lepidel. Takto vysušené řezivo se předběžně frézuje a pak se převáží na třídění. Třídění může být buď vizuální, nebo strojní, které je také přesnější. Takto se mohou jednotlivé lamely rozčlenit do pevnostních tříd a být použity efektivně. U lamel, které jsou vybrány k použití, se na obou kratších stranách vyfrézuje tzv. zubový spoj (obrázek č. 3). Takto upravené lamely se následně přesunou k lepení.

<sup>9</sup>[http://www.hess-timber.com/en/technische\\_infos/herstellung/](http://www.hess-timber.com/en/technische_infos/herstellung/)

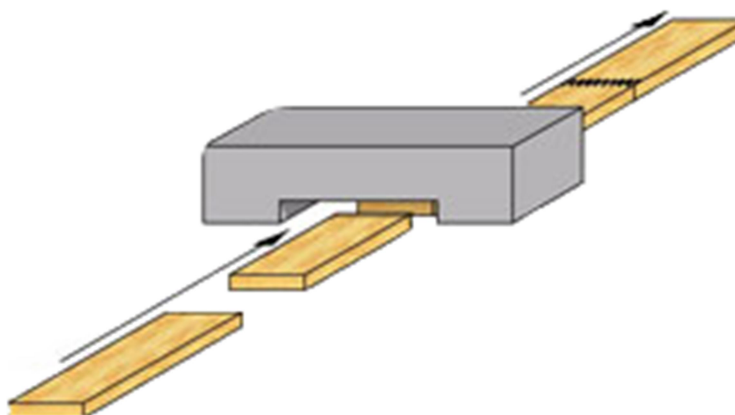


Obrázek č. 3 **Zubový spoj**<sup>10</sup>

### 2.3.2 Lepení

U LLD se lze setkat se dvěma druhy lepených spojů, v nichž každý má své specifikace.

*Podélný spoj* se používá pro napojování jednotlivých lamel a umožňuje vznik tzv. nekonečné lamely (obrázek č. 4). Lepidlo v takovémto spoji musí vykazovat minimální pevnost na úrovni pevnosti spojovaného dřeva v tahu. Zubový spoj se používá, protože umožňuje přenos sil pomocí smykového napětí díky šikmým spojovacím plochám. Přestože je smyková pevnost menší (přibližně desetina tahové), je tak díky zubovitému spoji styčná plocha dostatečně velká, aby odpovídala tahové pevnosti lamel.



Obrázek č. 4 **Výroba nekonečné lamely**<sup>11</sup>

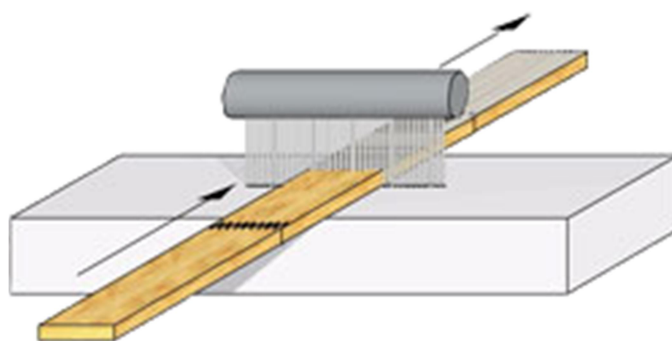
<sup>10</sup>[http://woodgears.ca/box\\_joint/fingerjoint.html](http://woodgears.ca/box_joint/fingerjoint.html)

<sup>11</sup> [http://www.hess-timber.com/en/technische\\_infos/herstellung/](http://www.hess-timber.com/en/technische_infos/herstellung/)



Z takto vytvořené nekonečné lamely se odřezávají lamely požadované délky a uloží se do skladu na dobu nezbytně nutnou pro vytvrzení lepidla ve spojích. Po vytvrzení a před přesunem k poslední fázi lepení projdou lamely frézováním, a to kvůli odstranění přebytečného lepidla a nečistot.

*Spoj rovnoběžně s vlákny (boční spoj)* se používá při tvorbě již finální podoby nosníků z LLD. Pro tento typ spoje musí lepidlo odpovídat pevnosti použitého dřeva ve smyku a tahu kolmo na vlákna. Většina lepidel, která odpovídají normě EN 301<sup>12</sup>, těmto podmínkám vyhovuje. Na horní část lamel se rovnoměrně nanáší lepidlo (obrázek č. 5) a ty jsou pak ukládány do lisovacích prostředků, a to podle požadované výšky, velikosti a tvaru.



Obrázek č. 5 Nanášení lepidla pro podélný spoj<sup>13</sup>

Lisovací prostředky musejí vyvodit dostatečný a stálý tlak pro stažení jednotlivých lamel, a to až do doby úplného vytvrzení lepidla. Tato doba se liší podle typu použitého lepidla a po celou dobu je proces kontrolován, aby splňoval předepsané podmínky.

### 2.3.3 Finální úprava

Po vytvrnutí lepidla se nosník uvolní z lisovacích prostředků a je převezen k finálním úpravám. Jako první nosník projde frézou, která z obou boků odstraní přebytečné lepidlo, zarovná rozměry a celkově vytvoří hladkou pohledovou plochu, jež je typická pro LLD. Následně je možné, a to podle potřeby, vyvrtat otvory potřebné pro montážní spoje či vedení TZB a opatřit nosník ochrannými či barvicími nátěry. Nosník pak projde napo-

<sup>12</sup>EN 301 „Fenolická a aminová lepidla pro nosné díly dřevěných konstrukcí – Klasifikace a technické požadavky“ [32]

<sup>13</sup>[http://www.hess-timber.com/en/technische\\_infos/herstellung/](http://www.hess-timber.com/en/technische_infos/herstellung/)

sledy kontrolou a je zabalen do ochranné fólie. Ta chrání nosník před poškozením při transportu a před vlivem vlhkosti. Výrobek z LLD je pak možné uložit do skladu či převézt přímo k použití.

## 2.4 Použití LLD

Vzhledem ke stále se rozvíjejícím technologiím lepidel a výroby, stejně jako se zvyšováním požadavků na tvar a únosnost prvků z LLD, je v současnosti možné vyrobit nosníky téměř jakéhokoli tvaru a délky při dodržení maximální výšky (2,4 m) a šířky průřezu (0,24 m). Jediným omezujícím faktorem pro rozměry prvků tak zůstává možnost přepravy, kdy se nejčastěji využívá kamionová či železniční doprava [6]. Běžné maximální délky prvků se pohybují do 30 m. Vzhledem k přepravním možnostem je pak lepší vyrobit konstrukci z menších částí a ty napojit pomocí momentových spojů až na stavbě. LLD se dnes může použít i k zastřešení hal o rozpětí 100 m (obrázek č. 6).



Obrázek č. 6 Olympijský ovál 2008 – Richmond<sup>14</sup>

V moderním stavitelství je LLD stále více vyhledávaným stavebním materiálem, a to díky svým jedinečným vlastnostem, jako jsou například pevnost, tvarová variabilita a požární odolnost. Díky těmto a dalším vlastnostem si pak lehce najde cestu do architektonic-

<sup>14</sup> [http://www.sabmagazine.com/blog/wp-content/gallery/17\\_richmondo/17\\_oval\\_ph04.jpg](http://www.sabmagazine.com/blog/wp-content/gallery/17_richmondo/17_oval_ph04.jpg)

kých konstrukcí, kde se využívá hlavně estetických vlastností LLD. Ty pak umožňují použít LLD na odkryté nosné konstrukce, čímž se docílí příjemného prostředí. Hojně jsou tedy prvky z LLD používány k zastřešení akvaparků, sportovních hal, stadionů, výstavišť, nákupních center, výrobních hal, ale i ke stavbě zvláštních mostních konstrukcí či lávek (obrázek č. 7).



Obrázek č. 7 Pěší lávka z LLD (Auckland, Nový Zéland)<sup>15</sup>

## 2.5 Charakteristiky a návrh LLD

Navrhování prvků z LLD má oproti návrhům z rostlého dřeva svá specifika, ať se jedná o součinitele spolehlivosti či rozdílné chování materiálu [7]. Proto je nutné tyto podmínky zahrnout do výpočtů při návrzích. Podmínky a specifika navrhování nosných konstrukcí z lepeného lamelového dřeva jsou v České republice stanoveny v národní příloze Eurokódu 5, tedy v české technické normě ČSN EN 1995-1-1<sup>16</sup> a ČSN EN 1995-1-2<sup>17</sup>. Co se týče navrhování prvků z LLD pro mostní konstrukce, ty jsou popsány v ČSN EN

<sup>15</sup><http://www.woodsolutions.com.au/Inspiration-Case-Study/FishBones-in-the-Mangroves>

<sup>16</sup> ČSN EN 1995-1-1: „Národní příloha – Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 1–1: Obecná pravidla – Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby“ [37]

<sup>17</sup> ČSN EN 1995-1-2: „Národní příloha – Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 1–2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru“ [38]

1995-2<sup>18</sup>. Pevnostní charakteristiky lepeného dřeva jsou pak stanoveny v ČSN EN 1194<sup>19</sup> (tabulka č. 1) [8].

LLD tak vykazuje lepší pevnostní charakteristiky než stejně rozměrný prvek ze dřeva rostlého, a to hlavně díky odstranění větších suků, laminačnímu efektu a tříděnému řezivu. Vzhledem k řízené a kontrolované výrobě je materiál i spolehlivější, a proto jsou při navrhování použity dílčí součinitele pro vlastnosti materiálu a únosnosti, které toto zohledňují. Dílčí součinitel  $\gamma_M$  pro rostlé dřevo má hodnotu 1,3, zatímco součinitel pro LLD, který je redukován, má hodnotu 1,25.

Tabulka č. 1 Pevnost materiálu – charakteristické hodnoty pro LLD<sup>20</sup>

Popis	Značka	Velič.	GL 24h	GL 28h	GL 32h	GL 36h
Pevnost v ohybu	$f_{m,g,k}$	[MPa]	24	28	32	36
Pevnost v tahu rov. s vlákny	$f_{t,0,g,k}$		16,5	19,5	22,5	26
Pevnost v tahu kol. k vláknům	$f_{t,90,g,k}$		0,4	0,45	0,5	0,6
Pevnost v tlaku rov. s vlákny	$f_{c,0,g,k}$		24	26,5	29	31
Pevnost v tlaku kol. k vláknům	$f_{c,90,g,k}$		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 (stř. h. 0°)	$E_{0,g,mean}$		11600	12600	13700	14700
Modul pružnosti (5 % kv.)	$E_{0,g,05}$		9400	10200	11100	11900
Modul pružnosti (stř. h. 90°)	$E_{90,g,mean}$		390	420	460	490
Hustota	$\rho_{g,k}$		[kg/m <sup>3</sup> ]	380	410	430

Dalším rozdílem při navrhování prvků z LLD je zohlednění takzvaného rozměrového efektu. Ten vychází z toho, že pokud je výška (pro ohyb) nebo šířka (pro tah) průřezu menší než 600 mm, můžeme zvětšit pevnost materiálu v ohybu ( $f_{m,k}$ ) a tahu rovnoběžně s vlákny ( $f_{t,0,k}$ ) pomocí součinitele  $k_h$  (rovnice č. 1). Je v něm zohledněna velikost průřezu, která má vliv na pevnost. U menších průřezů je totiž menší pravděpodobnost výskytu nehomogenní části, která by mohla vést k náhlému porušení při zatížení. S větším průřezem pravděpodobnost výskytu těchto oblastí stoupá, a proto je většinou únosnost takového průřezu menší než u malých průřezů [9].

<sup>18</sup> ČSN EN 1995-2: „Národní příloha – Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 2: Mosty“ [38]

<sup>19</sup> ČSN EN 1194: „Dřevěné konstrukce – Lepené lamelové dřevo – Třídy pevnosti a stanovení charakteristických hodnot“ [36]

<sup>20</sup> ČSN EN 1194: „Dřevěné konstrukce - Lepené lamelové dřevo – Třídy pevnosti a stanovení charakteristických hodnot“ [36]

$$k_h = \min \left\{ \left( \frac{600}{h} \right)^{0,1} \right. \\ \left. 1,1 \right\} \quad (1),$$

kde:

$k_h$  = součinitel velikostního efektu

$h$  = výška průřezu

Ostatní posuzování a navrhování je pak velice obdobné jako u rostlého dřeva. Velmi důležité je však posouzení (zejména vyšších průřezů) na tah kolmo k vláknům. U větších průřezů totiž může být ohybová únosnost dostačující, ale tah kolmo na vlákna nemusí vyhovět, takže většinou bývá rozhodujícím faktorem pro celkovou únosnost. Při posuzování na průhyb pak také můžeme, a to díky přesné zakázkové výrobě prvků z LLD, eliminovat okamžitý průhyb od stálého zatížení a vlastní tíhy nadvýšením prvku.

## 3 TESTOVANÝ MATERIÁL

### 3.1 Lepené lamelové dřevo

Hlavním materiálem, který je podstatnou součástí tohoto výzkumu, jsou prvky vyrobené z lepeného lamelového dřeva. Přesněji se jedná o nosníky s obdélníkovým průřezem vyrobené ze smrkového dřeva, původem z České republiky. Celkem se podařilo pro výzkum získat 6 velkých nosníků. Nosníky mají délku 4,6 m, šířku 0,1 m a výšku 0,32 m.

Sada nosníků pak byla dodána firmou Stavebniny DEK a.s., která se zabývá obchodem se stavebními materiály a má velmi rozšířenou síť poboček po celé České republice. S výrobou nosníků z LLD má tato firma také dlouholeté zkušenosti a je velkým dodavatelem tohoto materiálu pro stavební účely. Celkem 6 nosníků z LLD (obrázek č. 8), s identickými průřezovými rozměry bylo poskytnuto pro potřeby tohoto výzkumu a disertační práce, a to formou sponzorského daru.



Obrázek č. 8 Zkoušená sada nosníků<sup>21</sup>

<sup>21</sup> Vyfoceno v laboratořích ČVUT, vlastní fotobanka

Hlavním důvodem pro podporu výzkumu byl velký zájem o rozvoj možností vyztužení prvků z LLD. Firma také poskytla dva menší trámký z rostlého smrkového dřeva, z něhož byly vyrobeny nosníky za účelem pro provedení kontrolních měření.

Sada nosníků je vyráběna certifikovaným a normovaným procesem výroby a jejich pevnostní charakteristiky odpovídají typu GL24 (tabulka č. 1).

Před počátkem veškerých měření bylo samozřejmě nutné podrobně zaměřit a popsat všechny nosníky. U všech nosníků jsme v první řadě určili hrany, k nimž bude přilepena uhlíková tkanina. Tyto hrany jsme vybrali tak, aby například nevykazovaly poškození od převozu nebo manipulace a aby byl povrch celistvý. Tyto strany byly označeny šipkami po bocích nosníků (obrázek č. 8). Následně byly nosníky očíslovány a označeny pravé a levé boky vůči vybrané hraně, viz obrázek č. 8 a nosník č. 1. Tímto způsobem bylo zajištěno, že nosníky byly při dalších pracích orientovány vždy správně a všechna měření zapisována podle nastavených pravidel. Například při destruktivních zkouškách byly nosníky orientovány vždy pravým bokem k měřicí stanici apod.

Po označení nosníků bylo provedeno podrobné měření samotných rozměrů nosníků a na nosnicích byly vyznačeny a zaměřeny polohy zubových spojů jednotlivých lamel (tabulka č. 2 s popisem jednoho vybraného nosníku). Tato měření byla provedena kontrolně z obou konců a obou stran nosníku kvůli zajištění správných poloh spojů.

Tabulka č. 2 Polohy zub spojů v jednotlivých lamelách

Polohy zubových spojů v jednotlivých řadách			
Nosník č.	Řada č. (od horního okraje k vyztužené straně)	Poloha spojů [mm] (strana P, směr zleva doprava)	
4	1	1 450	×
	2	1 300	×
	3	1 200	×
	4	830	×
	5	1 040	×
	6	830	4 495
	7	860	4 360
	8	1 455	×

## 3.2 Tkanina z uhlíkových vláken

Dalším velmi důležitým materiálem, který je součástí toho výzkumu, je tkanina vyrobená z uhlíkových vláken. Tento materiál bude použit pro dodatečné vyztužení nosníků z lepeného lamelového dřeva při spodní hraně a k následnému zjišťování účinků na vlastnosti nosníků.

Tento materiál byl zvolen především proto, že uhlíková vlákna mají nejširší spektrum mechanických vlastností při poměrně malé hustotě. Lamináty z uhlíkových vláken se vyznačují vysokou tuhostí a velmi vysokou pevností. Jejich vytrvalost pod dynamickou zátěží je výborná a jsou elektricky vodivá. Nejčastěji se sice používají při výrobě částí letadel, závodních vozidel, sportovního vybavení, listů větrných generátorů a dalších součástí, ale pro své výborné vlastnosti mohou být použity prakticky kdekoliv. Vhodnost použití uhlíku pak závisí na konstrukci uhlíkové tkaniny, přičemž rozhodujícím faktorem je finiš.

Uhlíková tkanina použitá pro tento výzkum byla dodána společností GRM Systems, s.r.o., která se zabývá výrobou a prodejem kompozitních materiálů používaných pro konstrukci závodních lodí, ultralehkých letadel, automobilových a motocyklových kapotáží, surfařských a windsurfových desek, vodáckých pádel, hokejek, tiskařských válců, zdravotnických prostředků a celou řadu dalších aplikací. Společnost GRM Systems soustavně rozvíjí způsoby výroby a použití materiálu na bázi uhlíkových vláken. Použití uhlíkových tkanin pro vyztužení nosníků z LLD ve stavebnictví ji velmi zaujalo, a proto nám poskytla tkaniny i lepidlo formou sponzorského daru.

Poskytnuty byly dva druhy tkanin tvořených z jednosměrných vláken s PES mřížkou, a to typ Carbon unidirectional UD CST 200 a typ Carbon unidirectional UD CST 250 (tabulka č. 3).

Tabulka č. 3 **Tabulka vlastností tkanin**

Název	Gramáž [g/m <sup>2</sup> ]	Styl	Materiál/Lineární hustota	Tloušťka [mm]
UD CST 200	200	1 mřížka	uhlík 800 - 3600 tex	0,40
UD CST 250	250	1 mřížka	uhlík 800 - 3600 tex	0,36

Tyto tkaniny byly zvoleny po konzultaci s odborníkem ze společnosti GRM Systems jako nejvhodnější pro naše využití. K dispozici je nyní od každého typu jedna role s tkaninou o šířce 0,6 m a délce 4,7 m (obrázek č. 9).





Obrázek č. 9 Tkaniny z uhlíkových vláken<sup>22</sup>

Firma GRM Systems také dodala po konzultaci i lepidlo pro připevnění samotných tkanin k nosníkům z LLD. Toto lepidlo je na bázi pryskyřice s tužidlem. Jmenovitě se jedná o Epoxid LG 100, což je středně viskózní pryskyřice na bázi směsi pryskyřic typu bisfenol A (Vyrobena z bisfenolu A a epichlorhydrinu), obsahující určité množství vícefunkčního reaktivního rozpouštědla. Tužidlo Flex 40 je nahnědlá kapalina na bázi směsi polyamidů a aminoamidu, vyznačující se charakteristickým aminovým zápachem. Tento typ lepidla byl zvolen proto, že laminační lepidlo LG 100 + Flex 40 slouží ke slepování kovů, dřeva, ABS, keramiky i jiných materiálů. Primárně však bylo vyvinuto pro pevnostní lepení dřevěných nebo pěnových jader do kompozitních skořepin tak, že lepidlem se prosytí materiály, které mají být nalepeny na jádro, a lepidlo tak přímo tvoří součást kompozitu. Vytvrzený systém se vyznačuje vysokou flexibilitou spoje a stabilitou kompozit i při zcela extrémních namáháních (lyže, skateboardy apod.)

<sup>22</sup> Vyfoceno v laboratořích ČVUT, vlastní fotobanka

# 4 NEDESTRUKTIVNÍ METODY ZKOUŠENÍ DŘEVA

## 4.1 Úvod

Použití nedestruktivních metod pro posuzování kvality a vlastností stavebního dřeva má své mnohé výhody, hlavně co se týče použití na již stojících konstrukcích, z nichž není možné odebrat části konstrukce pro pozdější zkoušení v laboratořích, a tak zjistit přesné hodnoty požadovaných vlastností. Další výhodou je rychlost získání výsledných hodnot, které jsou u některých metod k dispozici téměř okamžitě. Je pravdou, že u některých metod je zapotřebí další vyhodnocení získaných dat, ale to může vyvážit relativně nízká pořizovací cena zkušebních přístrojů a jednoduchost použití. Velkou nevýhodou nedestruktivních zkoušek se jeví možnost získat nepřesné výsledky, a to vlivem nesprávného způsobu měření. Tomu se dá ale snadno zabránit tím, že se s danou metodou seznámíme a zvolíme správnou metodiku měření.

Pokud chceme kvalitně a co nejpřesněji posuzovat vlastnosti stavebního dřeva, pak je nutné mít přehled o většině běžně používaných metod. Znalost principů různých metod a vlastností dřeva, které díky nim můžeme hodnotit, pak pomůže rozhodnout, jakou metodu je nejlepší v dané situaci použít. Téma posuzování stavebního dřeva se stává stále aktuálnější s růstem popularity dřevostaveb a dalších dřevěných konstrukcí. Jako příklad můžeme uvést rekonstrukce starých půdních prostor na obytné prostory, které jsou v současnosti často využívány pro navýšení počtu bytů v centrech měst. Pokud chceme použít stávající konstrukci, tak nedestruktivní metody jsou většinou jediným způsobem, jak zjistit vlastnosti stávající konstrukce.

Existuje hned několik různých metod, jež lze použít, ale každá je ve svém principu jiná a vhodná pro různé použití. Nedestruktivním testováním můžeme efektivně měřit mechanické a fyzikální vlastnosti, jakou jsou hustota, pevnost, vlhkost, modul pružnosti a další. Navíc lze určit polohu různých defektů (suky, plíseň a jiné) a dokonce určit místo, kde poškozená část nosníku končí a kde zdravá začíná. Existuje několik metod, jež jsou levné a rychlé, přičemž výsledky můžeme získat ihned, ale také drahé a časově náročné, které se musejí později vyhodnotit speciálně zaměřeným softwarem [10,11].

## 4.2 Používané nedestruktivní metody

### 4.2.1 Vizuální metoda

Vizuální metoda představuje základní způsob, jak ohodnotit kvalitu a vlastnosti dřeva. Relativně lehce tak můžeme určit druh, přibližné stáří a polohu organických a neorganických defektů dřeva pouhým pohledem (obrázek č. 10).



Obrázek č. 10 Poruchy rozpoznatelné pouhým pohledem<sup>23</sup>

Metoda je nejdůležitější z hlediska určení nejvhodnějšího postupu pro další a podrobnější měření. Pro správné posouzení stavu konstrukce je nutné mít základní znalosti o stavebním dřevu a jeho vlastnostech. Tato metoda by měla vždy předcházet dalším nedestruktivním metodám hodnocení vlastností dřevěných konstrukcí, a to nejen proto, že k tomu nejsou potřebné žádné drahé přístroje, ale vzhledem k tomu, že po předchozím prozkoumání konstrukce lze snadno určit efektivní způsob dalšího měření [12].

### 4.2.2 Elektrická metoda

Jeden z nejčastěji používaných a dostupných způsobů, jak posoudit kvalitu dřeva, je elektrická metoda. Ta využívá základní fyzikální jev elektrické vodivosti. S použitím kalibrovaných ručních přístrojů může být měřena vlhkost, ba dokonce být detekována přítomnost hniloby ve dřevu (obrázek č. 11). Postup měření je vcelku jednoduchý, stačí přiložit měřicí elektrody zařízení na zkoušené dřevo a přístroj pak změří velikost elektrického odporu mezi vidlicemi. Zadáním známé teploty a typu dřeva může přístroj poskytnout poměrně přesné hodnoty. Zařízení pro elektrické měření vlhkosti se dají pořídit v cenovém rozmezí stovek až tisíců korun českých [12].

<sup>23</sup> <http://uglyhousephotos.com>



Obrázek č. 11 Typy elektrických vlhkoměrů<sup>24</sup>

### 4.2.3 Ultrazvuková metoda

Metoda, která využívá ultrazvukové vlny pro vyšetřování kvality dřeva v pozemním stavitelství, je běžně a velice často používaná. Využívá zvukové senzory k měření rychlosti šíření ultrazvukových vln materiálem (obrázek č. 12). Ultrazvuk může být použit pro určení vlastností dřeva, jako jsou hustota, modul pružnosti, pevnost, a k určení polohy abnormalit (suky, trhliny a další poškození). Sestava zařízení se skládá ze dvou senzorů a měřicího zařízení, jež vyhodnocuje rychlost šíření ultrazvukových vln mezi senzory. Rychlost průchodu vln pak například s vyšší vlhkostí dřeva klesá, s nižší vlhkostí rychlost naopak stoupá. V případě výskytu trhliny je rychlost průchodu skokově vyšší a naopak při výskytu suku se rychlost snižuje. Těmito principy se dají určit vlastnosti dřeva. Pro detailnější průzkum musíme provést měření na několika místech zkoušeného prvku. Samotné měření se pak může provádět buď rovnoběžně s vlákny, či kolmo na vlákna za použití senzorů s různým rozsahem frekvencí v závislosti na rozměrech dřevěného prvku. První způsob, tedy měření rovnoběžně s vlákny, je vhodný pro zjištění přibližných vlastností dřeva a celkového přehledu o prvku. Druhý způsob je pak vhodný pro zjištění detailnějšího přehledu o vlastnostech a k lokalizaci defektů. Zařízení lze pořídit v řádech od tisíců do desetitisíců korun českých podle požadovaných funkcí [10].

<sup>24</sup> <http://mgkg.woehler.de/us/>, <http://www.elbez.cz>



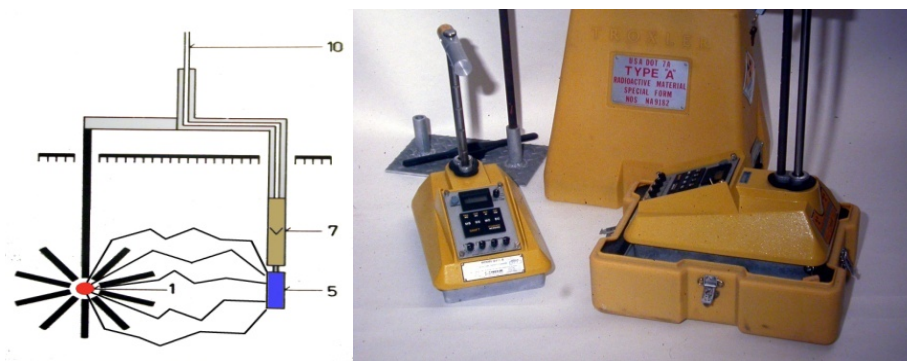
Obrázek č. 12 Různé typy zařízení pro ultrazvukovou metodu<sup>25</sup>

#### 4.2.4 Radiační metoda

Radiační metoda je sice náročná, ale velice vhodná pro historické konstrukce ze dřeva. Metoda využívá ionizující záření a umožňuje „nahlédnout“ dovnitř prvku. Je rozdělena na dvě podkategorie, a to na radiometrii a radiografii. Velkou výhodou této metody je její zcela nedestruktivní povaha. Důležité je však učinit jisté bezpečnostní kroky ke snížení rizika spojeného s vystavením obsluhy přístroje radiaci. Cenový rozptyl takových zařízení se pohybuje v řádech desetitisíců až statisíců korun českých [12].

#### Radiometrie

Radiometrie využívá jevu, kterým je způsob průchodu gama záření skrz stínící materiál (obrázek č. 13). To vede k různé absorpci a rozptylu záření, přičemž tato data jsou shromažďována a následně vyhodnocena.

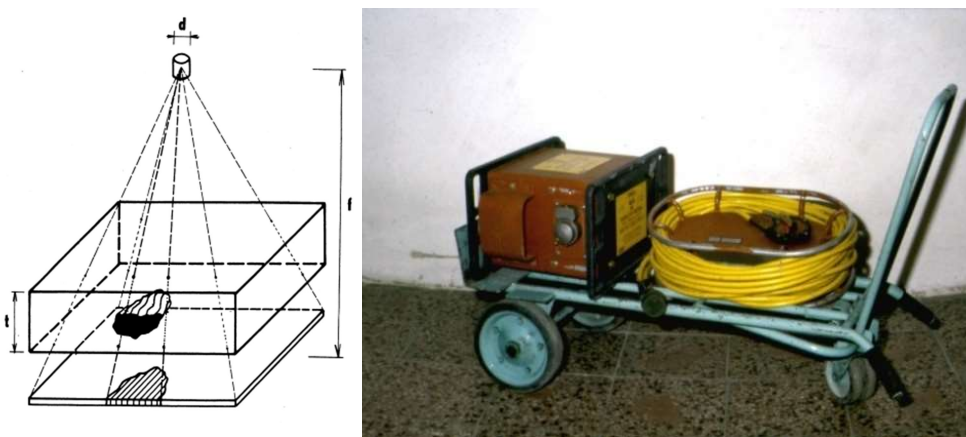


Obrázek č. 13 Princip metody a zařízení pro radiometrii<sup>26</sup>

<sup>25</sup><http://tico.com/>, <http://www.scielo.br/>

## Radiografie

Radiografie využívá rentgenové záření k vytvoření negativního obrazu prvku na rentgenový film. V radiografii je možná také takzvaná radioskopie, kde se nevytváří negativní snímek (obrázek č. 14), ale rentgenové paprsky procházejí prvkem na magnetoskop, jenž následně vytvoří digitální obrázek, dále zpracovatelný například pomocí počítače. Tato metoda je hojně využívána také ve zdravotnictví.



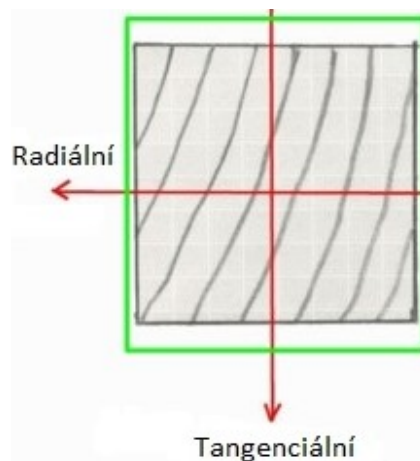
Obrázek č. 14 Princip metody a zařízení pro radiografii<sup>27</sup>

### 4.2.5 Metoda zarážení trnu

Metoda zarážení trnu není zcela nedestruktivní, protože po měření na povrchu zkoušeného prvku zůstávají prohlubně od trnu. Poškození zkoumaného prvku jsou však minimální a nijak neovlivní mechanické vlastnosti materiálu. Ty jsou měřeny pomocí mechanického zařízení, které vystřeluje trny kalibrovanou silou a měří hloubku zarážení trnu do vzorku. Maximální hloubka proniknutí trnu do dřeva je 40 mm. Nejideálnější je takzvané radiální měření (obrázek č. 15), při němž by se naměřené výsledky měly lišit maximálně o 10 %. Pokud měříme tangenciálně (obrázek č. 15), tak je možné narazit na letokruh, kde má dřevo podstatně jiné mechanické vlastnosti, takže naměřené hodnoty se budou značně lišit, a tak můžeme získat zcela nepřesné údaje.

<sup>26</sup> <http://balkanplumbing.com/>

<sup>27</sup> <http://ndt-ed.org/>



Obrázek č. 15 Názorná ukázka radiálního a tangenciálního směru měření<sup>28</sup>

Tímto způsobem může být určena hustota dřeva, stejně jako jeho pevnost a modul pružnosti. Nejčastěji používané zařízení pro toto testování se nazývá Pilodyn 6J (obrázek č. 16). Cena tohoto přístroje se pohybuje v řádech tisíců korun českých [13].



Obrázek č. 16 Princip měření (vlevo), pilodyn a potřebné vybavení (vpravo)<sup>29</sup>

#### 4.2.6 Metoda odporového mikrovrtání

Metoda odporového mikrovrtání umožňuje detekci vnitřních defektů a poruch pomocí hloubkového vrtání mikrovrtákem a vrtačkou vybavenou rezistografem (obrázek č. 17). Zařízení se přiloží kolmo na prvek, který chceme testovat, a rovnoměrnou rychlostí se vrtá do hloubky vrtáku či podle potřeby. Výsledky tohoto měření se zaznamenávají do grafu přímo na vrtačce v rezistografu, jenž zobrazuje závislost na odporu vrtáku a hloubce jeho

<sup>28</sup> <http://www.recreationalflying.com/tutorials/scratchbuilder/timber.html>

<sup>29</sup> <http://www.gsxlslks.com>, <http://www.krsis.dk>

penetrace. Metoda je časově velice náročná a vhodná spíše pro lokální analýzu vlastností dřeva. Cenově se toto zařízení pohybuje v řádek tisíců, až několik desítek tisíc korun českých [14].



Obrázek č. 17 Princip měření (vlevo), mikrovrtáčka s rezistografem (vpravo)<sup>30</sup>

#### 4.2.7 Metoda odebrání mikrovzorků

Tato metoda také není zcela nedestruktivní, ale zásah do struktury je opět minimální. Využívá speciálně upravenou vrtačku, která vyvrtá vzorky o průměru 4,8 mm a minimální délce 20 mm (obrázek č. 18). Otvory vzniklé odběrem vzorku je nutné opětovně zacelit, a to například tmelem tak, aby nemohlo dojít ke vniknutí vody, hmyzu a plísní do nechráněného dřeva. Odebrané vzorky se následně testují v laboratoři a určí se tak mechanické vlastnosti jako jsou pevnost, modul pružnosti a vlhkost. Také pouhým pohledem na vzorky lze zjistit přítomnost hniloby, dřevokazného hmyzu, hloubku napuštění impregnačními nátěry a další. Cena těchto zařízení se pohybuje v řádech tisíců korun českých [13].



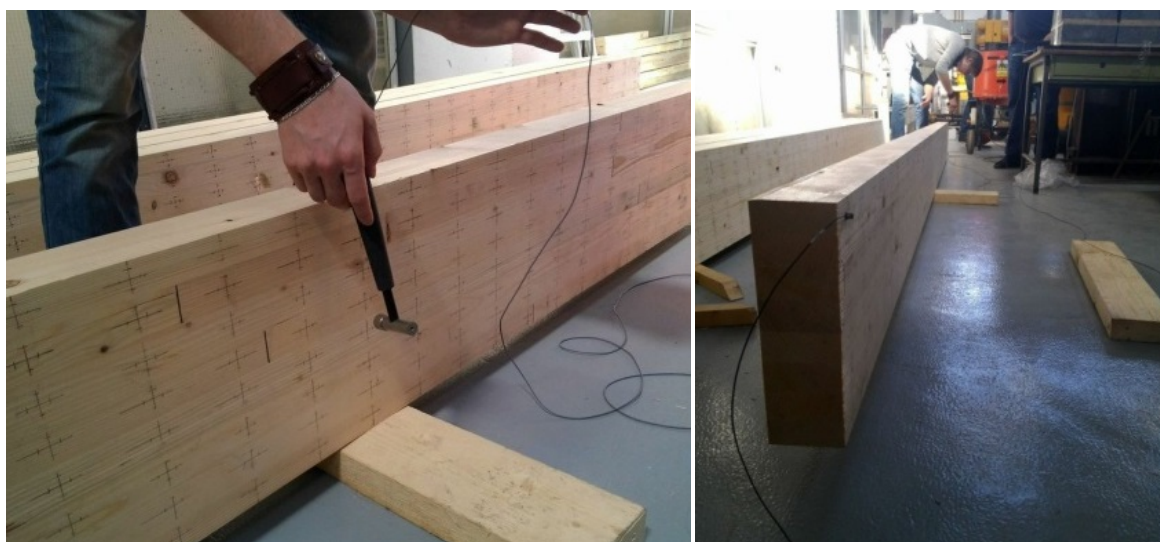
Obrázek č. 18 Vrtačka upravená pro odběr vzorků<sup>31</sup>

<sup>30</sup> <http://www.bam.de/>, [http://www.asb.sk/?article\\_print=5100](http://www.asb.sk/?article_print=5100)



## 4.2.8 Rezonanční metoda

Rezonanční metoda je dynamická metoda, která je zaměřena na měření vlastních frekvencí zkoušeného prvku pomocí setu, skládajícího se z rázového kladívka (budič), senzorů a počítače, který zaznamenává a vyhodnocuje reakci testovaného prvku (obrázek č. 19). Proces měření není složitý, ale protože je nutné měřit v různých polohách prvku i senzorů, může být časově náročný. Uložení prvku na systém podpor, osazení senzorů a poloha budící síly jsou předem dány podle požadovaného typu vybuzených vibrací. Polohy jsou odlišné pro různé vlastní tvary. Rázovým kladívkem se do prvku klepe lehkými rázy na daných místech prvku a měřicí stanice současně zaznamenává budící sílu a reakci zkoušeného prvku. Výsledkem je model odezvy skládající se z přenosových funkcí<sup>32</sup> (dále jen FRF) testovaného prvku. Vlastní frekvence jsou pak vyhodnoceny z FRF a použity k určení dynamického modulu pružnosti, modulu pružnosti ve smyku a určení Poissonova čísla materiálu. Cena sestavy zařízení pro rezonanční metodu podle rozměrů prvku a typu materiálu se pohybuje i v řádech statisíců korun českých [15,16].



Obrázek č. 19 Rázové kladívko (vlevo) a senzor (vpravo) při měření<sup>33</sup>

<sup>31</sup><http://inspectapedia.com/>

<sup>32</sup>Frequency response functions (FRF)

<sup>33</sup>Vyfoceno v laboratořích ČVUT, vlastní fotobanka

## 4.2.9 Shrnutí

Existuje poměrně mnoho způsobů, jak nedestruktivně hodnotit vlastnosti stavebního dřeva, a proto záleží pouze na jedinci, který chce zkoušky provádět, jakou metodu zvolí. Vycházet by se však mělo z výstupních vlastností, jež je zapotřebí získat, a z dostupného vybavení. I když jsou dlouhodobé zkušenosti velice důležité a nápomocné, mohou však s rozhodnutím a následným výběrem vhodné metody pomoci základní znalosti dostupných metod.

## 5 POUŽITÉ NEDESTRUKTIVNÍ METODY

Pro potřeby našeho výzkumu byly z těchto nedestruktivních metod zvoleny ty, které mohou přinést vhodná vstupní data ve formě materiálových vlastností daných vzorků. Ty mohou být dále použity pro porovnání vlastností jednotlivých nosníků z LLD. Hodnoty zjištěné z nedestruktivního testování budou také použity spolu s hodnotami z destruktivního testování do konečně prvkových výpočetních modelů. Vybrány byly dvě metody, a to metoda zarážení trnu a rezonanční metoda.

### 5.1 Rezonanční metoda

Rezonanční metoda je vhodná k určování dynamicko-elastických vlastností pružných materiálů, které jsou nejlépe homogenní a izotropní při teplotách okolního prostředí, v němž je materiál zkoušen. Rezonanční frekvence prvků vyrobených z těchto materiálů jsou závislé na modulu pružnosti, hmotnosti a geometrii zkoušeného prvku. Dynamicko-elastické vlastnosti materiálu tedy mohou být vypočteny, pokud můžeme změřit geometrické rozměry (hranolové nebo válcové geometrie), hmotnost a rezonanční frekvence testovaného prvku. Základem rezonanční metody je měření rezonančních frekvencí testovaných prvků s vhodnou geometrií, které jsou vyvolány mechanickým buzením budičem nebo rázovým kladívkem. Snímač (kontaktní akcelerometr nebo bezkontaktní mikrofon) pak zachytí mechanické vibrace a převede je na elektrický signál. Místa podepření zkoušených prvků, poloha budících sil a polohy snímačů vibrací jsou pak zvoleny tak, aby se navodil a změřil požadovaný typ dynamických vibrací. Ze záznamu odezvy a budící síly přenesených do frekvenční oblasti se stanoví přenosová funkce (FRF) (rovnice č. 2). Z ní je možno určit číselné hodnoty rezonančních frekvencí. Ty jsou následně použity spolu s rozměry a hmotností prvku k výpočtu dynamického modulu pružnosti a dynamického modulu pružnosti ve smyku [15].

$$H_{(f)} = \frac{a(f)}{F(f)} \quad (2),$$

kde:

H = Přenosová funkce (FRF) [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}/\text{N}$ ]

a = Zrychlení [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ]

F = Budící síla [N]

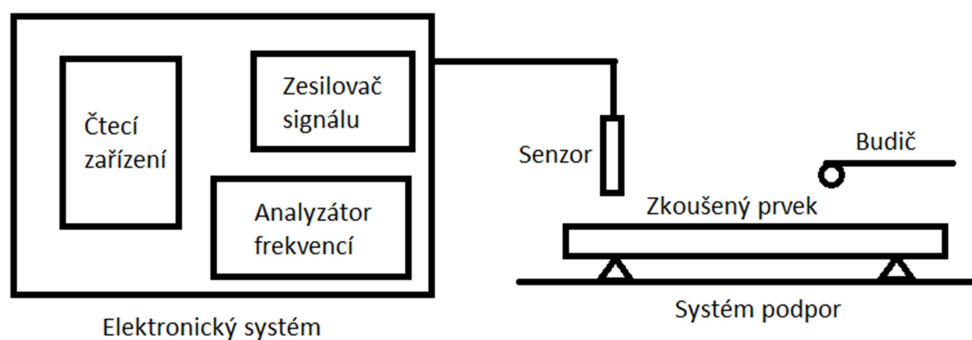
*Dynamický modul pružnosti* je určen za použití rezonančních frekvencí z ohybového nebo podélného typu vibrací. Ohybové vibrace jsou takové, které nastanou tehdy, dochází-li k vibracím ve zkoušeném prvku v rovině kolmé k podélné ose prvku. Podélné vibrace nastanou v případě, je-li oscilace ve zkoušeném prvku ve směru rovnoběžném s podélnou osou.

*Dynamický modul pružnosti ve smyku* je pak určen z torzních rezonančních vibrací. To jsou vibrace, které nastanou tehdy, když jsou oscilace v každém příčném řezu prvku takové, že se rovina krotí kolem podélné osy prvku.

*Poissonovo číslo* materiálu se následně vypočítá z dynamického modulu pružnosti a dynamického modulu pružnosti ve smyku.

### 5.1.1 Teorie měření

Základem pro přesné měření je použití správné sestavy přístrojů. Sestava pro měření rezonančních frekvencí (obrázek č. 20) se skládá z budiče, senzoru pro převod mechanických vibrací na elektrický signál, elektronického systému (usměrňovač/zesilovač signálu, analyzátor signálu a záznamové zařízení) a systému podpor.

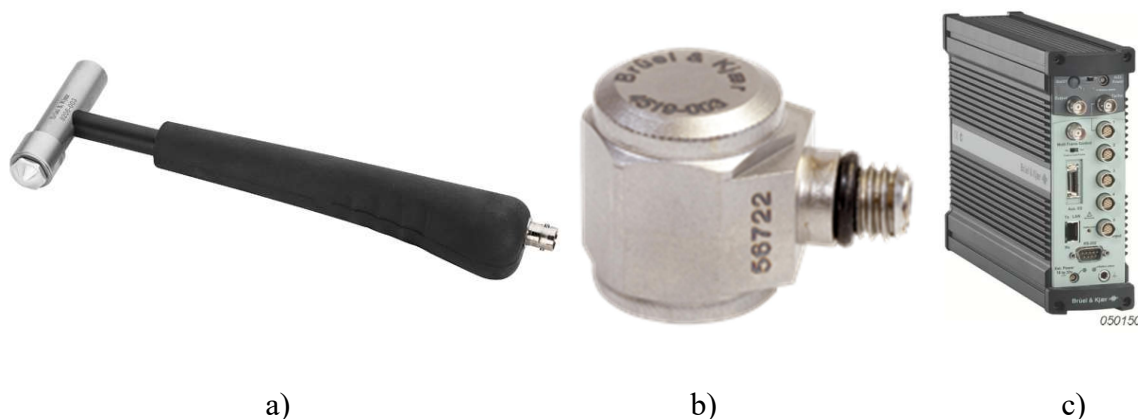


Obrázek č. 20 Diagram typické sestavy pro měření<sup>34</sup>

*Budič* se používá pro vyvození budících sil vibrací na zkoušený prvek. Vibrace se vyvolávají lehkými rázy (klepáním) do prvku. Tento nástroj by měl mít většinu své hmotnosti v místě nárazu, hmotu dostatečnou pro vyvolání měřitelných mechanických vibrací a zároveň takovou, aby nedošlo k mechanickému poškození zkoušeného prvku. Velikost takového nástroje by se tedy měla volit podle rozměrů a druhu materiálu zkoušeného prvku.

<sup>34</sup> <http://www.bksv.com/Products/transducers/vibration/impact-hammers/8206?tab=accessories> [39] – upraveno a přeloženo do ČJ

ku. Při nedestruktivním testování nosníků z LLD bylo k buzení zvoleno univerzální rázové kladívko (obrázek č. 21a) pro malé až střední prvky s citlivostí  $11.4 \text{ mV} \cdot \text{N}^{-1}$ . Kladívko má také zabudovaný kompenzátor zrychlení, který odstraňuje nechtěný šum (vzniklý rezonanční kladívka) z výstupního signálu. Díky tomu je výstupní signál čistý a hladký [17].



Obrázek č. 21 **Nástroje použité pro rezonanční metodu**

- a) Rázové kladívko 8206-001 Brüel&Kjær<sup>35</sup>, b) Piezoelektrický akcelerometr 4519 – 003 Brüel&Kjær<sup>36</sup>, c) Řídící ústředna Front-end Type 3560 – B, Brüel&Kjær<sup>37</sup>

*Senzory* jsou používány k detekci vibrací. Dělí se na dva základní typy, jimiž jsou kontaktní a bezkontaktní senzory. Kontaktní senzory jsou většinou akcelerometry, které využívají piezoelektrické nebo tenzometrické metody měření vibrací. Bezkontaktní senzory jsou pak většinou akustické mikrofony, ale mohou také využívat laserové, magnetické nebo kapacitní metody měření vibrací. Senzory je nutné volit podle předpokládaných rezonančních frekvencí testovaného prvku a s dostatečným rozsahem [14]. Pro testování nosníků z LLD byl zvolen právě typ kontaktního senzoru (obrázek č. 21b), který má rozsah frekvencí od 0,5 do 20 000 Hz. Jedná se o miniaturní akcelerometr o hmotnosti pouze 1,5 g, se zabudovanými předzesilovači a s výbornou nominální citlivostí  $100 \text{ mV} \cdot \text{g}^{-1}$  [18].

*Elektronický systém*, který je většinou v podobě jedné řídicí jednotky, zahrnuje několik podsystémů. Skládá se především z usměrňovače/zesilovače a analyzátoru signálu. Celý systém by měl být dostatečně přesný a účinný, aby dokázal změřit požadované frekvence s přesností na 0,1 %. Úkolem zesilovače je napájet senzory a přenášet dostatečně zesílený

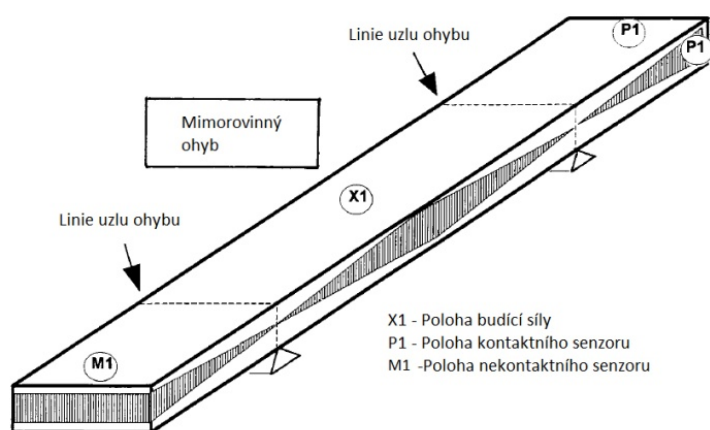
<sup>35</sup><http://www.bksv.com/Products/transducers/vibration/impact-hammers/8206?tab=accessories> [39]

<sup>36</sup><http://www.bksv.com/Products/transducers/vibration/accelerometers/accelerometers/4519003> [40]

<sup>37</sup><http://www.measuretronix.com/files/bruel-and-kjaer/pulse-3560-product-data.pdf> [41]

signál do analyzátoru signálu. Při testování nosníků z LLD byla pro získávání dat použita měřicí ústředna (obrázek č. 21c), která byla spojena s notebookem pomocí síťového kabelu LAN. Tato měřicí ústředna obstarává zpracování signálu, komunikaci s počítačem, umožňuje současné nezávislé připojení až pěti senzorů a v případě potřeby je možnost jejího chodu na baterie (až 5 hodin) [12].

*System podpor* slouží k izolaci zkoušeného prvku od okolního prostředí, čímž se zabraňuje projevení nechtěných rušivých vibrací z okolí na záznamu a zároveň nesmí zamezovat požadovaným vibracím. Je vhodné použít materiály, jež jsou stabilní při teplotách zkoušení. Existují pak různé typy možných podpor. Zatímco při použití měkkých podpor (pásky z PU pěny, polystyren atd.) je vhodnější větší styčná plocha s prvkem, je pro tvrdé podpory (kov, keramické podložky) naopak vhodnější velice úzká styčná plocha. Mohou být také použity podpory závěsné (lana, dráty atd.). Výběr podpor by se měl odvíjet od velikosti, váhy a typu zkoušeného prvku. Celý systém podpor je také (pokud je to možné) vhodné umístit na další izolační podložky pro zamezení záznamu nežádoucích vibrací z okolního prostředí [15]. Pro nosníky z LLD byl použit jednoduchý systém podpor z úzkých pruhů dřeva a celek byl umístěn na masivní betonové podlaze, místa podepření se pak měnila podle uzlových linií předpokládaných vlastních tvarů příslušných k měřeným frekvencím.



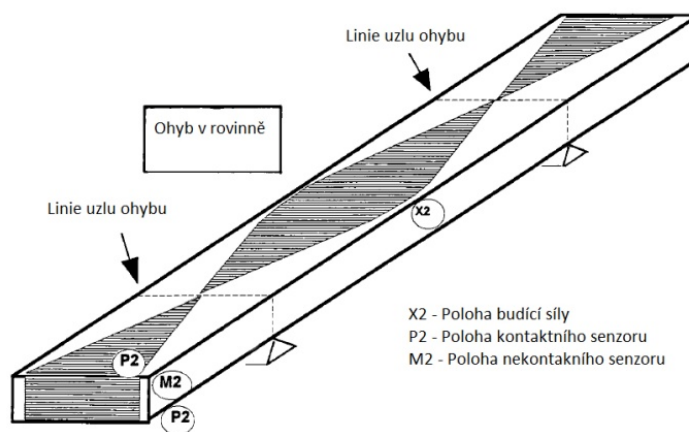
Obrázek č. 22 Schéma měření u obdélníkového prvku pro příčný (mimorovinný) ohyb<sup>38</sup>

Způsoby podepření jsou dány pro každý vlastní tvar. Pro získání *vlastních frekvencí*

<sup>38</sup>Převzato z: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, E 1876 – 01 (Reapproved 2006), str. 6 [15]

*příslušných k ohybovým tvarům u příčného (mimorovinného) ohybu* (obrázek č. 22) se prvek umístí na dvě podpory ve vzdálenosti  $0,224 L$ , kde  $L$  je délka prvku od obou konců, a senzor se umístí co nejdále od linie uzlu ohybu tak, aby co nejlépe snímal právě potřebné frekvence bez rušení vedlejšími vibracemi. Rázovým kladívkem se pak zlehka klepe v požadované poloze budící síly a měření se provede tak, aby se minimálně pět měření v řadě nelišilo více než o 1 %.

K získání *vlastních frekvencí příslušných k příčným ohybovým tvarům v rovině* (obrázek č. 23) se procedura měření a uložení v podstatě neliší od mimorovinného ohybu, kromě směru vibrací v hlavní rovině zkoušeného prvku. Měření ohybu v rovině lze provést dvěma způsoby. První způsob je měření prvku v poloze, jak je vidět na obrázku (obrázek č. 23), kdy můžeme měřit vibrace v hlavní rovině prvku. Druhý způsob pak představuje měření při přetočení prvku o  $90^\circ$  okolo podélné osy. Při tomto měření se ve výpočtech musí zaměřit šířkový a výškový rozměr, avšak hodnoty výsledných modulů by se měly (zejména u homogenních a izotropních materiálů) shodovat. Porovnání výsledků z mimorovinného ohybu a ohybu v rovině tedy může sloužit jako kontrola správnosti měření a výpočtů.

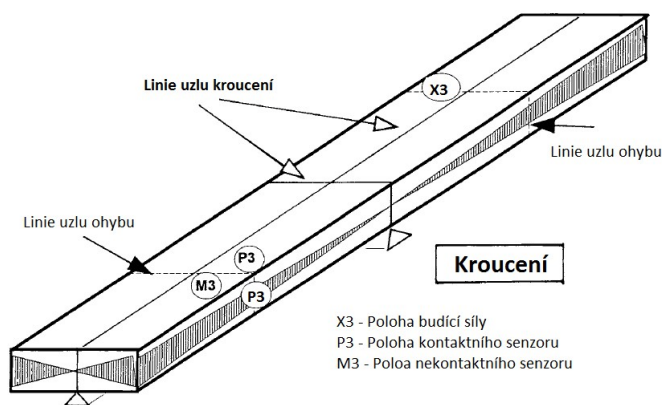


Obrázek č. 23 Schéma měření u obdélníkového prvku pro příčný ohyb v rovině<sup>39</sup>

Měření *vlastních frekvencí příslušných ke tvarům při kroucení* (obrázek č. 24) se provádí s podepřením prvku v polovině délky a šířky. Senzor se umísťuje ve vzdálenosti  $0,224 L$ , kde  $L$  je délka prvku od konce prvku a při okraji. Rázy kladívkem se provádějí na diagonálně protilehlé pozici, než se nachází senzor. Při takovémto postupu měření se mi-

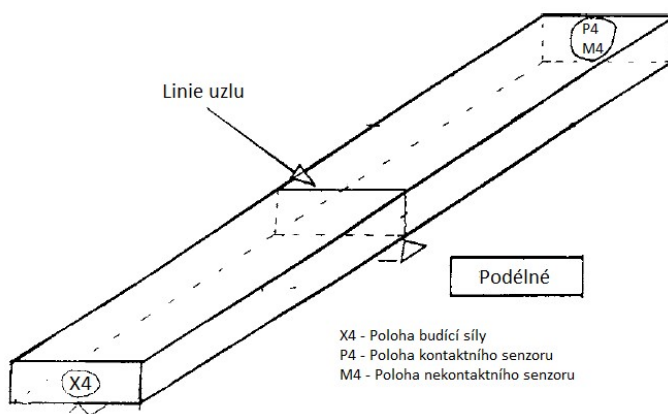
<sup>39</sup> Převzato z: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, E 1876-01 (Reapproved 2006), str. 6 [15]

nimalizuje možnost záznamu falešných ohybových vibrací. Samotný záznam měření se opakuje do té doby, dokud se pět po sobě jdoucích měření neliší více než o 1 %. Z průměru takto naměřených hodnot se pak získá vlastní frekvence v kroucení.



Obrázek č. 24 Schéma měření u obdélníkového prvku pro kroucení<sup>40</sup>

*Vlastní podélné frekvence* se měří ve stejné poloze jako při kroucení, tedy podepřením uprostřed délky a šířky. Rozdíl je v poloze umístění senzorů a budící síly. Senzor se umístí do středu čela jedné strany a budící síla se vnáší na stejném místě (obrázek č. 25), ale na druhém konci prvku. Výsledkem je vlastní podélná frekvence, jež je získána opět z průměru pěti po sobě jdoucích měření, jež se neliší více než o 1 %.



Obrázek č. 25 Schéma měření u obdélníkového prvku pro podélné frekvence<sup>41</sup>

<sup>40</sup> Převzato z: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, E 1876 – 01 (Reapproved 2006), str. 6 [15]

<sup>41</sup> Převzato z: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, E 1876 – 01 (Reapproved 2006), str. 9 [15]



## 5.1.2 Měření a výpočet

Pro měření pomocí rezonanční metody byly k dispozici, jak bylo zmíněno již výše v textu, šest nosníků z LLD. Pro přehlednost byly nosníky z první sady pěti nosníků označeny římskými číslicemi a šest nosníků z druhé sady je označeno pomocí arabských číslic.

K vyhodnocení naměřených výsledků a následnému zjištění hodnot požadovaných modulů bylo také nutné provést, a to pro potřeby výpočtů, měření charakteristik všech nosníků za účelem zjistit jejich přesnou délku, šířku, tloušťku a hmotnost (tabulka č. 4). S naměřenými hodnotami vlastních frekvencí a charakteristik prvku se již mohlo přejít k dopočítání jednotlivých modulů. U sady nosníků se nejdříve měřily vlastní frekvence z ohybového (příčného) kmitání a následně vlastní frekvence podélného kmitání, a to jako kontrolní měření.

Tabulka č. 4 Parametry jednotlivých nosníků

Vzorek	m	l	t	b	Vlhkost	$\rho$
č.:	[kg]	[m]	[m]	[m]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]
1	71,3	4,60	0,32	0,1	12,0 ± 0,5	480
2	70,9	4,60	0,32	0,1		479
3	71,8	4,60	0,32	0,1		485
4	67,2	4,60	0,32	0,1		455
5	67,5	4,60	0,32	0,1		458
6	69,6	4,60	0,32	0,1		470

kde:

m = hmotnost vzorku [kg]

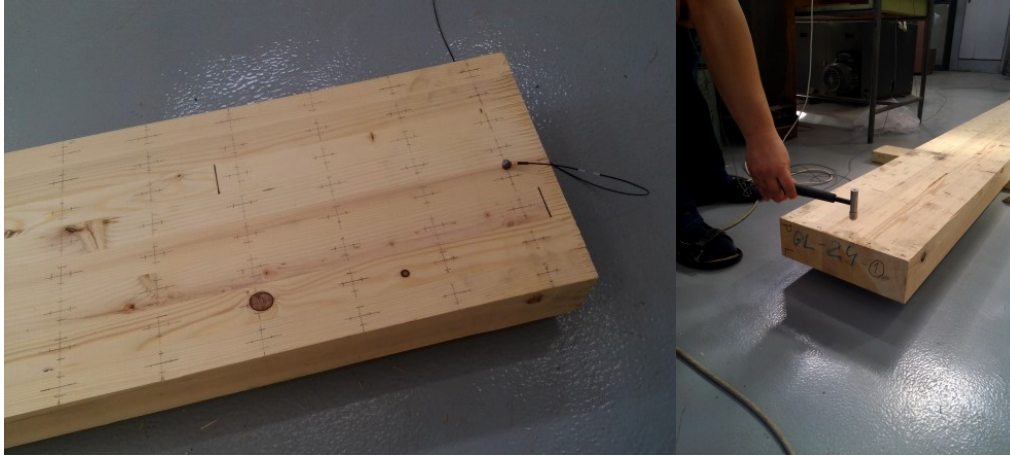
l = délka [m]

t = výška [m]

b = šířka [m]

$\rho$  = objemová hmotnost [kg/m<sup>3</sup>]

*Dynamický modul pružnosti* (rovnice č. 3) se může pro obdélníkový prvek přímo dopočítat z vlastních ohybových (příčných) frekvencí (obrázek č. 26) pro testované nosníky z LLD pouze za předpokladu, že Poissonův součinitel by byl předem znám. Ten vstupuje do výpočtů v korekčním součiniteli  $T_1$  (rovnice č. 4).



Obrázek č. 26 Měření ohybového kmitání<sup>42</sup>

$$E_d = 0,9465 \cdot (m \cdot f_f^2 / b) \cdot (L^3 / t^3) \cdot T_1 \quad (3),$$

kde:

$E_d$  = Youngův modul pružnosti [Pa]

$m$  = hmotnost prvku [kg]

$b$  = šířka [m]

$L$  = délka [m]

$t$  = tloušťka [m]

$f_f$  = základní vlastní frekvence příslušná

k ohybovému kmitání [Hz]

$T_1$  = korekční součinitel [-]

$$T_1 = 1 + 6,585 \cdot (1 + 0,0752\mu + 0,8109 \cdot \mu^2) \cdot (t / L)^2 - 0,868 - \left[ \frac{8,340 \cdot (1 + 0,2023 \cdot \mu + 2,173 \cdot \mu^2) \cdot (t/L)}{1,000 + 6,338 \cdot (1 + 0,1408 \cdot \mu + 1,536 \cdot \mu^2) \cdot (t/L)^2} \right] \quad (4),$$

kde:

$\mu$  = Poissonův součinitel

Poissonův součinitel je tedy nutné odhadnout nebo nejprve dopočítat jiným způsobem. Tím je iterační proces, který se používá k určení hodnoty Poissonova čísla z experi-

<sup>42</sup> Vyfoceno v laboratořích ČVUT, vlastní fotobanka

mentálního Youngova modulu a modulu pružnosti ve smyku. K iteračnímu procesu je zapotřebí znát vlastní ohybové a kroucí frekvence. Ty jsou následně použity pro výpočet dynamického modulu pružnosti ve smyku (rovnice č. 5).

$$G = [(4 \cdot L \cdot m \cdot f_f^2) / (b \cdot t)] \cdot [B / (1 + A)] \quad (5),$$

kde:

G = Dynamický modul pružnosti ve smyku [Pa]

$f_t$  = základní vlastní frekvence v kroucení [Hz]

Součinitele A (rovnice č. 6) a B (rovnice č. 7) jsou pak funkcemi poměrů šířky a výšky prvku. Součinitel A je korekční faktor a používá se jen tehdy, pokud jsou výsledné hodnoty požadovány s přesností větší než 2 %.

$$A = \frac{[0,5062 - 0,8776 \cdot (b/t) + 0,3504 \cdot (b/t)^2 - 0,0078 \cdot (b/t)^3]}{[12,03 \cdot (b/t) + 9,892 \cdot (b/t)^2]} \quad (6),$$

$$B = \left[ \frac{b/t + t/b}{4 \cdot (t/b) - 2,52 \cdot (t/b)^2 + 0,21 \cdot (t/b)^6} \right] \quad (7),$$

Dalším krokem iteračního procesu je dopočítání dynamického modulu pružnosti (rovnice č. 3) za pomoci odhadnutého počátečního Poissonova čísla. Následně jsou hodnoty dynamického modulu pružnosti a modulu pružnosti ve smyku dosazeny do rovnice pro výpočet Poissonova čísla (rovnice č. 8). Tento iterační proces se pak opakuje do té doby, dokud se výsledné hodnoty po sobě jdoucích iteračních kroků neliší o méně než 2 %.

$$\mu = [E / (2 \cdot G)] - 1 \quad (8),$$

Výsledné hodnoty vlastností (tabulka č. 5) zkoušených nosníků z LLD jsou dopočítány pomocí tohoto postupu.

Tabulka č. 5 Vypočtené hodnoty modulu pružnosti z naměřených frekvencí

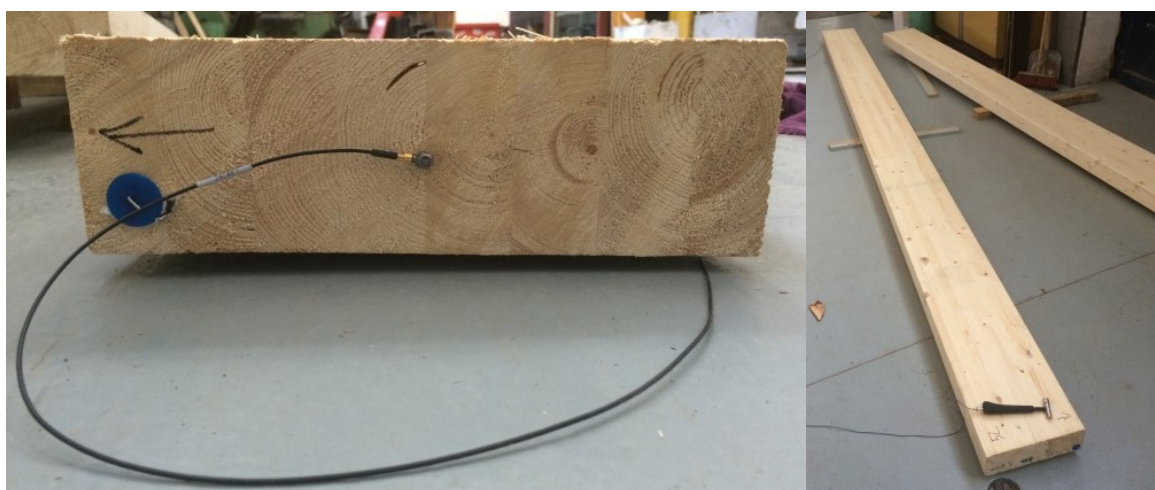
Vzorek	$E_d$
č.:	[GPa]
1	13,9
2	16,1
3	13,8
4	14,3
5	14,1
6	14,4

kde:

$T_1$  = korekční součinitel [-]

$E_d$  = dynamický modul pružnosti [GPa]

Pro kontrolu výsledných modulů pružnosti byl výpočet (9) proveden i z naměřených podélných frekvencí (tabulka č. 6). Dynamický modul pružnosti se z podélných frekvencí (obrázek č. 27) pak počítá jiným způsobem, ale výsledné hodnoty by měly být obdobné jako z příčných frekvencí.



Obr. 27 Měření podélného kmitání<sup>43</sup>

<sup>43</sup> Vyfoceno v laboratořích ČVUT, vlastní fotobanka

$$E_d = 4 \cdot (L / (b \cdot t)) \cdot M \cdot (f')^2 \quad (9),$$

kde:

$E_d$  = dynamický modul pružnosti [Pa]

$L$  = délka prvku [m]

$b$  = šířka prvku [m]

$t$  = výška prvku [m]

$M$  = hmotnost prvku [kg]

$f'$  = základní vlastní frekvence podélného kmitání [Hz]

Tabulka č. 6 **Dynamický modul pružnosti pro první čtyři vlastní frekvence podélného kmitání**

	1. vl. fr.	2. vl. fr.	3. vl. fr.	4. vl fr.	Směrodatná odchyl- ka	-
Vzorek	$E_{d1}$	$E_{d2}$	$E_{d3}$	$E_{d4}$	-	Průměr
č.:	[GPa]	[GPa]	[GPa]	[GPa]	-	[GPa]
1	12,96	12,86	12,72	12,91	0,10	12,86
2	12,35	12,15	12,14	12,5	0,17	12,29
3	12,69	12,98	12,82	12,92	0,13	12,85
4	12,3	12,21	12,19	12,31	0,06	12,25
5	14,29	14,53	14,34	14,39	0,10	14,39
6	12,29	12,39	12,33	12,45	0,07	12,37

### 5.1.3 Porovnání výsledků

Pomocí rezonanční metody byla získána sada naměřených hodnot dynamických modulů pružnosti pro každý nosník (tabulka č. 7). Hodnoty byly získány pro příčné i podélné vlastní frekvence nosníků. Z porovnání výsledků modulů pružnosti z příčných a podélných frekvencí je patrné, že hodnoty nevycházejí podobně a rozdíly jsou mezi jednotlivými způsoby měření v řádech až desítek procent (tabulka č. 7). Protože měření podélných frekvencí není pro nehomogenní materiály příliš směrodatné, tak pro naši další práci budou použity pouze hodnoty získané z příčných frekvencí.

Tabulka č. 7 Porovnání modulů pružnosti vypočtených z příčných a podélných frekvencí

Vzorek	Příčné fr.	Podélné fr.	Rozdíl
č.:	$E_d$ [GPa]	$E_d$ [GPa]	[%]
1	13,9	12,86	8
2	16,1	12,29	31
3	13,8	12,85	8
4	14,3	12,25	17
5	14,1	14,39	2
6	14,4	12,37	17

## 5.2 Metoda zarážení trnu – Pilodyn

Pro další hodnocení vlastností nosníků z LLD byla použita nedestruktivní metoda zarážení trnu, která patří mezi dostupné způsoby hodnocení dřevěných prvků, a to bez většího mechanického poškození prvku, jež by změnilo mechanické vlastnosti celku. Při této metodě byl pro hodnocení použit mechanický přístroj Pilodyn 6J. Ten funguje tak, že po přiložení ke zkoušenému povrchu vzorku vystřelí trn normovanou silou a změří se hloubka zarážení ocelového trnu do dřeva s přesností odhadnutou na půl milimetru (obrázek č. 28).



Obrázek č. 28 Testovaný nosník z LLD a měření s odečítáním hodnot z přístroje Pilodyn 6J<sup>44</sup>

<sup>44</sup> Vyfoceno v laboratořích ČVUT, vlastní fotobanka

Před každým měřením se musí trn zatlačit zpět do přístroje a tím zařízení opět nabít. Maximální měřitelná hloubka zaražení trnu je 40 mm. Z takto naměřených dat je pak následně možné dopočítat hustotu, pevnost a Youngův modul pružnosti (rovnice č. 10), který je pro nás hlavním výsledkem z tohoto měření. Rovnice pro zjištění modulu pružnosti je odvozena experimentálně z předešlých rozsáhlých měření a popisuje závislost modulu pružnosti na hloubce zaražení trnu [19, 20, 21].

$$E = -564,1t_p + 19367 \quad (10),$$

kde:

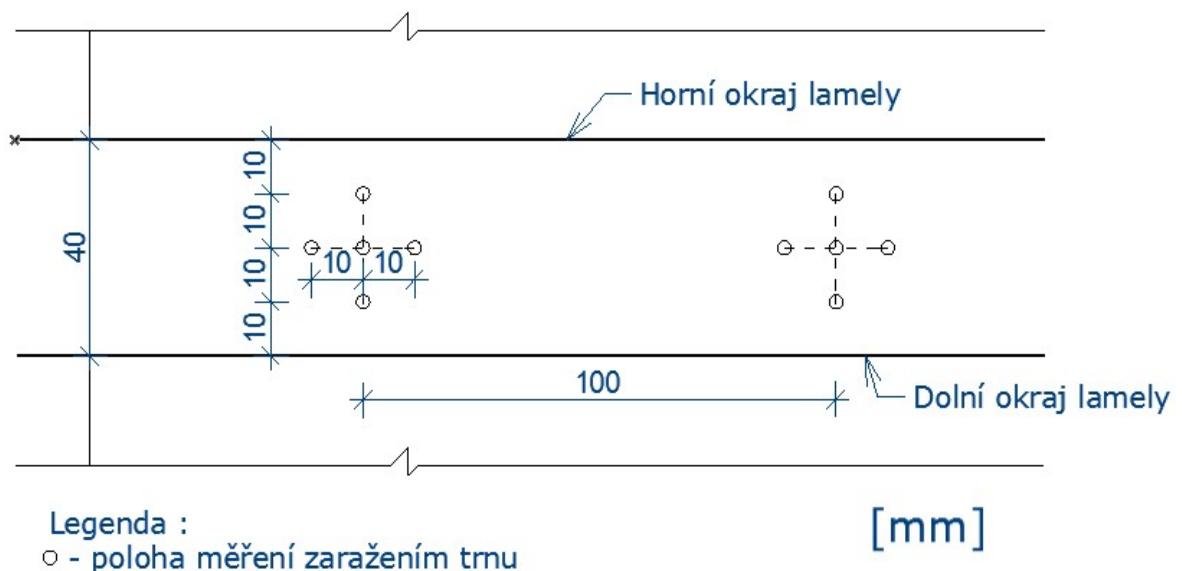
$E$  = hledaný modul pružnosti [MPa]

$t_p$  = hloubka vniknutí trnu [mm]

### 5.2.1 Měření a výsledky

Měření modulů pružnosti nosníků z LLD pomocí přístroje Pilodyn 6J proběhlo na všech šesti nosnících.

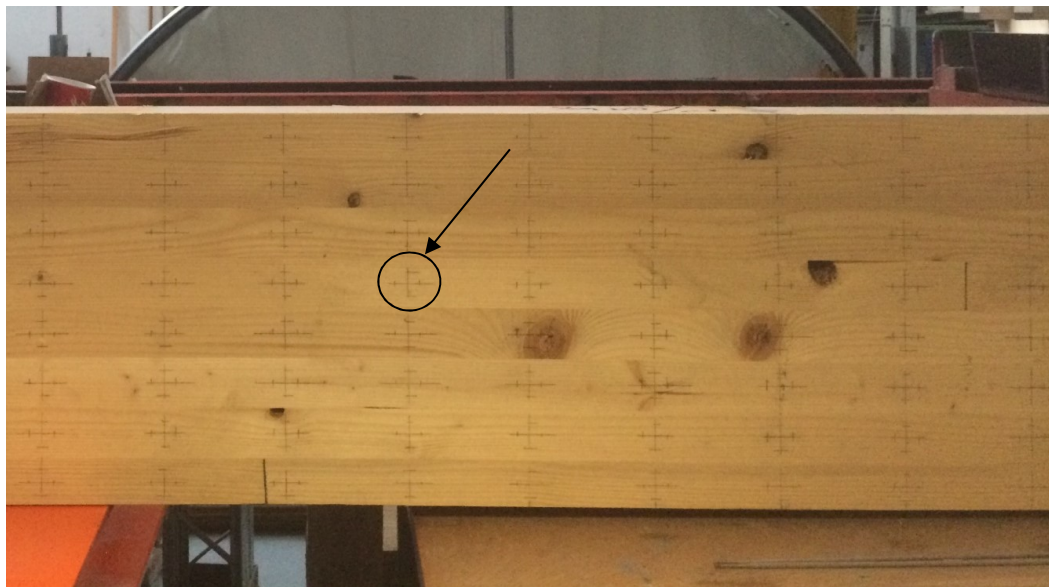
Byla zvolena velmi hustá síť měření podle schématu naznačeného na obrázku č. 29.



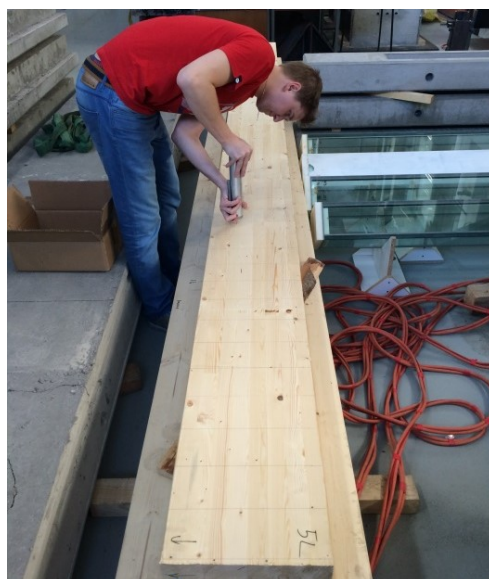
Obrázek č. 29 Schéma zkoušení zaražením trnu<sup>45</sup>

<sup>45</sup> Vlastní tvorba

Na každé řadě lamel se tak provedlo celkem pět vpichů podle schématu každých 100 mm a z obou stran nosníku. Z takto časově velmi náročného měření bylo celkem získáno 450 hodnot pro každou lamelu, pro celý nosník z LLD pak bylo provedeno 3600 vpichů (obrázek č. 30 a 31). Pro všechny nosníky dohromady tak bylo provedeno 21 600 jednotlivých měření.



Obrázek č. 30 Nosník z LLD s vyznačenými polohami měření podle schématu<sup>46</sup>



Obrázek č. 31 Testování sady nosníků pomocí Pilodynu<sup>47</sup>

<sup>46</sup> Snímek pořízen v laboratořích ČVUT při zkoušení, vlastní fotobanka



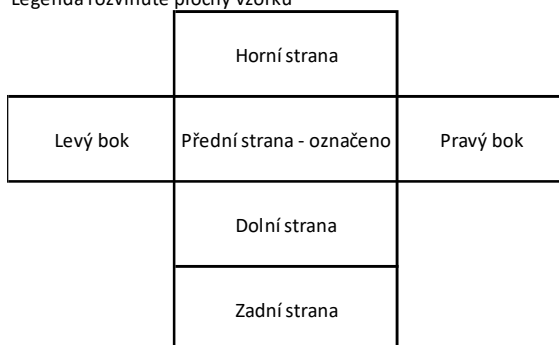
Současně bylo také provedeno měření Pilodynem na trámcích z rostlého smrkového dřeva (obrázek č. 32), které jsme rozřezali na menší trámečky o délce přibližně 150 mm. Z každého trámku tak vzniklo šest kusů vzorků, jež byly následně otestovány pomocí Pilodynu. Tyto vzorky sloužily pro kontrolní porovnání hodnot ze surového dřeva a nosníků z něj vyrobených.



Obrázek č. 32 Trámky z rostlého smrkového dřeva<sup>48</sup>

Na každé ze čtyř obvodových stran se pak provedly čtyři vpichy ve třech řadách, celkem tedy 12 vpichů na každé straně. Boky, které vznikly rozříznutím trámků, pak byly otestovány třemi vpichy ve třech řadách a zaznamenány byly tak (obrázek č. 33), aby bylo možné porovnat hodnoty na stejné poloze u sousedního vzorku v místě, kde byly odděleny. Z každého vzorku tak bylo získáno 66 hodnot hloubky zaražení trnu Pilodynu do rostlého dřeva. Pro každý trámek bylo získáno 396 hodnot, které budou následně vyhodnoceny v porovnání s hodnotami u LLD.

Legenda rozvinuté plochy vzorku



Hloubka vpichu [mm]

	9,2	11,7	11,8	13,5					
	6,9	13,2	14,5	14,2					
	10,2	12,2	10,9	14,5					
13,8	11,9	17,0	13,0	16,0	18,0	12,0	24,0	21,0	25,5
9,0	14,9	18,2	11,0	12,0	11,8	15,3	21,0	21,2	24,5
14,8	15,2	17,2	12,5	11,5	15,8	15,8	18,4	15,2	17,8
	12,2	7,5	10,5	10,0					
	11,5	10,3	11,2	11,8					
	11,3	13,5	10,3	10,8					
	13,2	14,1	11,8	10,2					
	12,1	12,2	10,2	12,2					
	10,2	10,8	12,2	14,5					

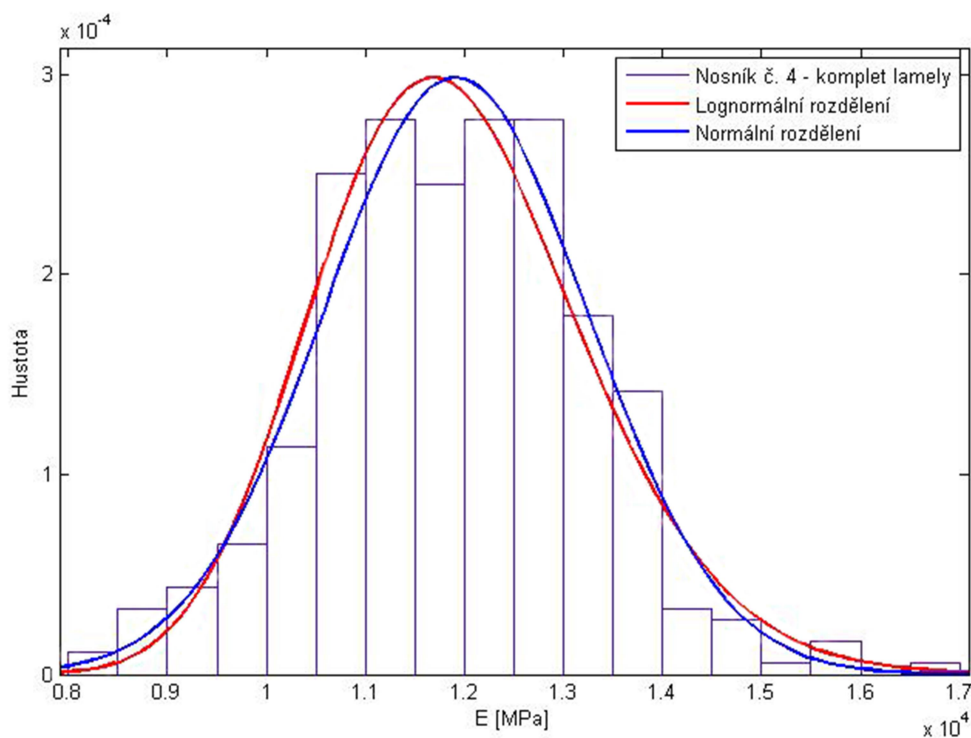
Obrázek č. 33 Ukázka záznamu měření Pilodynem malých vzorků

<sup>47</sup> Pořízeno v laboratoři ČVUT při měření, vlastní fotobanka

<sup>48</sup> Pořízeno při měření, vlastní fotobanka

Ze získaných hodnot hloubky zarážení trnu pro jednotlivé vzorky je možné následně provést výpočet Youngova modulu pružnosti pro jednotlivé části lamel nebo celé řady lamel, ale i pro nosník jako celek. Modul pružnosti se pomocí výpočtu ze vzorce (rovnice č. 10) nejdříve spočítal pro každou naměřenou hodnotu zaražení trnu zvlášť. Takto vypočítané hodnoty byly následně použity k získání průměrné hodnoty modulu pružnosti pomocí počítačového programu Matlab 2014<sup>49</sup>. V tom se modul pružnosti určoval pomocí grafu hustoty pravděpodobnosti. Distribuční křivka byla zvolena pro normální Gaussovské rozdělení a pro porovnání také lognormální rozdělení (graf č. 1).

Graf č. 1 Graf hustoty pravděpodobnosti E (křivka pro normální a lognormální rozdělení) – nosník č. 4 lamely komplet



Na ukázkou způsobu vyhodnocování je níže uveden názorný příklad, kdy byly vyhodnoceny hodnoty modulů pružnosti pro nosník č. 4 (tabulka č. 8).

<sup>49</sup> MathWorks MATLAB a Simulink 2014a

Tabulka č. 8 Porovnání středních hodnot E pro normální a lognormální rozdělení – nosník č. 4

Název	Normální rozdělení	Lognormální rozdělení
	Střední hodnota – E [GPa]	Střední hodnota – E [GPa]
Lamela 1	11,555	11,557
Lamela 2	12,671	12,673
Lamela 3	10,794	10,795
Lamela 4	12,723	12,725
Lamela 5	11,500	11,548
Lamela 6	11,784	11,782
Lamela 7	11,939	11,940
Lamela 8	12,253	12,253
Celý nosník	<b>11,902</b>	<b>11,900</b>

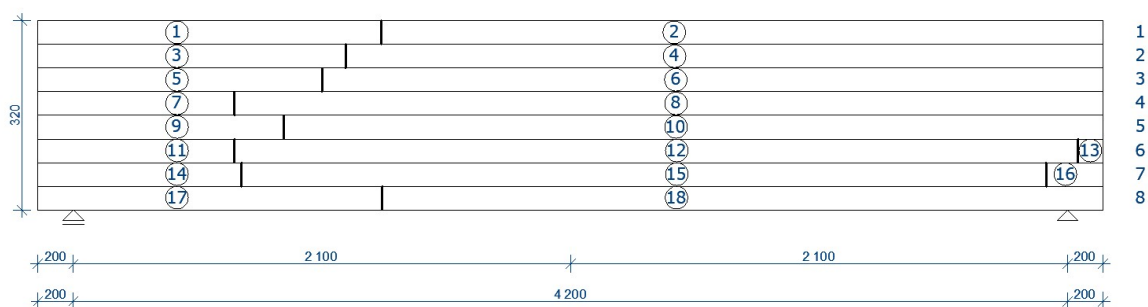
Z tabulky č. 8 je patrné, že střední hodnoty modulů pružnosti pro obě distribuční křivky vycházejí téměř identicky. Pro další použití jsou hodnoty modulů pružnosti zaokrouhlovány na jedno desetinné místo, a tak se hodnoty z obou křivek neliší, a proto pro následné zpracování výsledků našeho šetření bylo použito již jen normální rozdělení.

Střední hodnoty modulů pružnosti byly nejdříve určeny pro každou řadu lamel zvlášť a následně pro nosník jako celek. Z výpočtů hodnot normální distribuční křivky grafů program MatLab určil střední hodnotu modulu pružnosti a směrodatnou odchylku. Tyto hodnoty jsou uvedeny pro každou lamelu jednotlivě a pro všechny lamely dohromady (tabulka č. 9). Číslování lamel je u všech nosníků vzestupně od horní hrany k dolní.

Tabulka č. 9 Hodnoty modulů pružnosti a směrodatných odchylek nosníku č. 4

Označení	Střední hodnota – E [GPa]	Směrodatná odchylka [GPa]
Lamela 1	11,6	1,4
Lamela 2	12,7	1,4
Lamela 3	10,8	1,6
Lamela 4	12,7	1,0
Lamela 5	11,5	0,8
Lamela 6	11,8	1,0
Lamela 7	11,9	1,2
Lamela 8	12,3	1,1
Celý nosník	<b>11,9</b>	<b>1,2</b>

Vzhledem k tomu, že každá řada lamel je u některých nosníků tvořena až ze tří samostatných částí, které jsou spojeny na zubový spoj a slepeny do tzv. nekonečné lamely, bylo provedeno vyhodnocení modulů pružnosti i pro jednotlivé segmenty jednotlivých řad lamel celého nosníku. Polohy zubových spojů jednotlivých lamel byly zaměřeny již při prvotním zaměřování a popisu nosníků (obrázek č. 34). Tak bude možné použít tyto hodnoty do počítačového modelu a vytvořit tak model téměř odpovídající skutečnému rozložení modulů pružnosti po nosníku.



Obrázek č. 34 Polohy zubových spojů a rozdělení na jednotlivé segmenty

Tabulka č. 10 Hodnoty modulů pružnosti a příslušných směrodatných odchylek pro jednotlivé segmenty (barevně rozlišeny) lamel nosníku č. 4

Nosník č. 4 - Pilodyn - modul pružnosti pro jednotlivé segmenty		
Segment č.	$\mu E$ [GPa]	$\sigma_E$ [GPa]
1	12,8	1,0
2	11,0	1,1
3	13,9	0,8
4	12,2	1,3
5	11,5	1,0
6	10,6	1,7
7	12,2	1,4
8	12,8	0,8
9	11,9	1,0
10	11,5	0,8
11	11,6	0,8
12	11,8	1,1
13	11,3	1,2
14	11,9	1,6
15	11,9	1,1
16	13,1	0,1
17	12,0	1,2
18	12,3	1,0

Počet těchto segmentů se u jednotlivých nosníků pohyboval v rozmezí 16 až 19 a v jedné řadě lamel se nacházely nejvíce tři. Každý jednotlivý segment nosníku tak má svou určenou polohu a dopočítáný modul pružnosti (tabulka č. 10).

Takto podrobné vyhodnocení bylo následně provedeno pro všechny nosníky, včetně vzorků z rostlého dřeva (tabulka č. 11). Hodnoty modulů pružnosti pak budou konfrontovány s hodnotami u jednotlivých nosníků a s hodnotami modulů pružnosti u vzorků z rostlého dřeva, z něhož byly nosníky vyrobeny. Hodnoty modulů pružnosti velkých nosníků mohou být následně porovnány i s hodnotami získanými prostřednictvím rezonanční metody a destruktivních zkoušek. U malých vzorků rostlého dřeva toto není možné, protože nebyly ozkoušeny rezonanční metodou a nebyly realizovány destruktivní zkoušky.

Tabulka č. 11 **Hodnoty modulů pružnosti a směrodatných odchylek pro jednotlivé nosníky a kontrolní vzorek dřeva**

Označení	Pilodyn – E [GPa]	Směrodatná odchylka [GPa]
Nosník 1	<b>12,4</b>	1,3
Nosník 2	<b>12,7</b>	1,2
Nosník 3	<b>12,3</b>	1,4
Nosník 4	<b>11,9</b>	1,2
Nosník 5	<b>13,5</b>	0,8
Nosník 6	<b>12,4</b>	1,2
Malé vzorky	<b>12,3</b>	1,5

### 5.3 Porovnání výsledků nedestruktivních metod zkoušení

Porovnáme-li naměřené hodnoty dynamického modulu pružnosti získané prostřednictvím rezonanční metody se statickým modulem pružnosti, tak je mezi nimi patrný rozdíl, a to okolo 20 % (tabulka č. 12).

Tento rozdíl byl ale předpokládán, protože statický modul pružnosti by měl dosahovat 70–80 % dynamického modulu pružnosti. Vycházíme totiž ze samotné povahy dynamického a statického modulu pružnosti, kde dynamický je tečný a statický sečný. Rozdíl v hodnotách je tedy podle očekávání a je možné konstatovat, že měření bylo provedeno správně. Z výsledných hodnot modulů pružnosti je možné konstatovat, že přínos použití rezonanční metody pro zkoušení dřevěných prvků z lepeného lamelového dřeva spočívá

spíše v časové nenáročnosti měření a rychlosti získání výsledných hodnot. Předpokladem je však dodržení správných postupů měření pomocí rezonanční metody. Samotné výsledky získané na základě rezonanční metody jsou spíše orientační. Je vždy nutné počítat s odchylkou 20–30 % vzhledem k povaze dynamického modulu pružnosti.

Tabulka č. 12 **Porovnání naměřených modulů pružnosti jednotlivých nosníků z nedestruktivních zkoušení a jejich rozdíl**

Vzorek	Rezonanční metoda	Zarážení trnu – Pilodyn	Rozdíl
č.:	$E_d$ [GPa]	E [GPa]	[%]
1	13,9	12,4	12
2	16,1	12,7	27
3	13,8	12,3	12
4	14,3	11,9	20
5	14,1	13,5	5
6	14,4	12,4	16

Oproti rezonanční metodě je nedestruktivní metoda zarážení trnu časově náročnější, ale vzhledem k počtu získaných hodnot z jednoho prvku je hodnotnější. Vzhledem k tomu, že k určení hodnoty statického modulu pružnosti je použito i několik tisíc měření z jednoho vzorku, jsou tak více eliminovány nepřesnosti měření a také je možné získat hodnoty modulu pružnosti pro dílčí segmenty zkoušeného vzorku.

## 6 VYZTUŽOVÁNÍ NOSNÍKŮ

Jak bylo zmíněno již v úvodu této práce, jsou v současné době dřevěné prvky z lepeného lamelového dřeva ve stavebnictví velmi populární, a to hlavně díky výbornému poměru hmotnosti k únosnosti. Nejčastěji se používají prvky pro nosné konstrukce střech, jako jsou prosté nosníky obdélníkového průřezu, sedlové nosníky různých typů, oblouky a rámy. Dřevěné konstrukce ale vykazují všeobecně větší průhyby vyvolané dlouhodobým zatížením než obdobné prvky například z oceli nebo betonu. LLD je na tom v tomto ohledu o něco lépe, ale stále o použití v konstrukci podle norem rozhoduje většinou průhyb. LLD má poměrně nízkou pevnost v tahu kolmo na vlákna (delaminace), například obloukové konstrukce je pak často nutné vyztužovat, aby se tato únosnost zvýšila [22]. Lepené lamelové dřevo se vyrábí již od konce 19. století, ale masivněji se používá až od 50. let 20. století. Již v šedesátých letech minulého století se pak technologové a výrobci začali zajímat o možnosti vyztužování LLD [23].

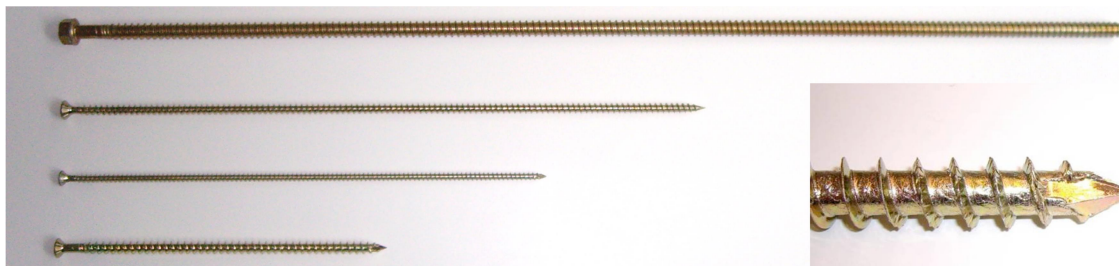
Právě pro zlepšení horších vlastností je vhodné využívat metody vyztužování prvků pomocí dalších přidaných materiálů, což má za následek zvýšení jejich pevnosti. Vyztužení také umožňuje použití rozměrově menších prvků, jež mají stejnou únosnost jako prvky bez výztuže. Z toho plyne také snížení hmotnosti konstrukce a zmenšení obestavěného prostoru. Vyztužování je tedy systém složený ze dvou nebo více materiálů, který má za úkol výslednému prvku dodat nové nebo zlepšit stávající vlastnosti. Úlohou jednoho materiálu v prvku je pak většinou zlepšit některou vlastnost, nejčastěji pevnost/únosnost, druhý pak slouží jako pojivo. Výsledkem takového spojení je produkt, jenž se obecně nazývá kompozitní materiál [24]. Nejznámějším zástupcem kompozitního materiálu je pak železobeton. Dále budou popsány dřevěné prvky vyztužené jinými materiály, např. dřevem jiných druhů, materiály na bázi dřeva, skleněnými nebo uhlíkovými vlákny, nebo ocelí, přilepenými ke dřevu [9].

### 6.1 Základní rozdělení a metody

Při vyztužování dřevěných konstrukcí je nutné v základu rozlišit, zda se vyztužuje prvek již zabudovaný v konstrukci (in-situ) nebo při výrobě.

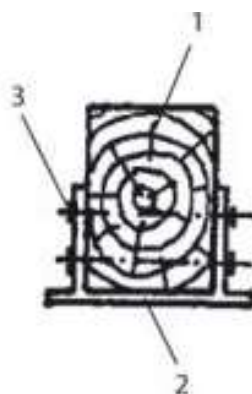
První skupina se používá například při rekonstrukci památkových objektů, pokud je u konstrukce potřeba zvýšit únosnost (změna způsobu využití objektu) nebo při opravách

poškozených prvků. Existuje několik možných způsobů, jak zvýšit únosnost konstrukce in-situ. První možností je použití *dlouhých vrtů* (obrázek č. 35), jež se šroubují kolmo na již vzniklé smykové trhliny, čímž pomohou přenést zatížení na jiná místa nosníku, která ještě nejsou poškozena, nebo zpevní nosník z LLD na působení tahu kolmo na vlákna [25, 26].



Obrázek č. 35 Samořezné šrouby s kontinuálním závitem a závitové tyče různých rozměrů<sup>50</sup>

Druhý způsob představuje tzv. *příložkování* (obrázek č. 36). Používají se příložky ze dřeva (deska, hranol, vrstvené dřevo, překližka), oceli (U-profil, plát) nebo jiných materiálů. Příložky se aplikují nejčastěji z jedné nebo ze dvou stran vyztužovaného prvku, někdy dokonce ze tří nebo i čtyř stran. Prvky namáhané ohybem se doporučuje příložkovat na výšku, tedy z vrchní nebo spodní strany prvku. To však není vždy možné, jako např. u stropů, musí-li být zachována původní výška podlahy, nebo původní pohled. Dřevěné prvky lze zpevnit příložkami po celé jejich délce nebo jen lokálně, např. ve středu, na jednom konci apod. Nevýhodou je pak zvětšení průřezu či změna architektonického pohledu [26].



Obrázek č. 36 Vyztužování dřevěného nosníku pomocí U profilu: 1 – dřevěný nosník, 2 – vyztužný ocelový U profil, 3 – spojení mezi dvěma materiály<sup>51</sup>

<sup>50</sup> <http://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/drevostavby/rekonstrukce-drevenych-prvku-protezovanim-prilozkovanim-a-ukotvenim-do-ocelovych-konzol> [42]

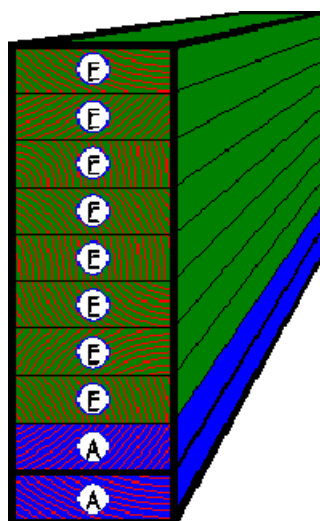
<sup>51</sup> Zdroj - <http://www.asb-portal.cz/>



Druhá skupina je pak ta, které se pro naše účely budeme věnovat podrobněji. Vyztužování nosníků již při výrobě má své opodstatněné výhody, kam mezi hlavní patří kontrolovaná výroba či optimalizace vyztužení. Vyztužování nosníků při výrobě je možné rozdělit na tři základní metody, které se liší především typem použitého materiálu k vyztužování a jeho působením.

## 6.2 Vyztužení vysokopevnostní lamelou ze dřeva

Vyztužení nosníku pomocí vysokopevnostní lamely je jednou z běžně používaných metod u výrobků nosníků z LLD. Nosníky jsou pak opatřeny při spodním, případně i při horním okraji lamelou ze dřeva vyšší pevnosti a kvality než zbytek nosníku. Při běžně zatíženém nosníku (například prostý nosník) je nejvíce namáhán spodní (tah) a horní (tlak) okraj, tlakové zatížení je pro nosník horší. Použité vyztužné lamely jsou pak až o několik pevnostních tříd výše než střed nosníku. Protože se technologický postup výroby nosníků z LLD v podstatě nemění, je toto řešení běžně používáno. Použití méně kvalitního dřeva pro středovou část napomáhá snižovat náklady na výrobu v řádu desítek procent. Nevýhodou pak může být nutnost kontroly kvality vyztužných lamel a kontrola způsobu uložení nosníku v konstrukci tak, aby měl správnou orientaci (zejména při vyztužení nosníku pouze při jedné straně (obrázek č. 37) [27].



Obrázek č. 37 Příklad nosníku z LLD (E) vyztužený dřevěnými lamelami s vyšší pevností (A)<sup>52</sup>

<sup>52</sup> Zdroj - <http://www.americanlaminators.com/firp.html>

### 6.3 Vyztužení vlepením ocelových tyčí a drátů

Vyztužení pomocí ocelových tyčí představuje běžnou metodu (obrázek č. 38), která má dva způsoby využití. Prvním je vlepování ocelových tyčí (i předpínaných) či drátů do spodní nebo i horní lamely. Druhým je pak vlepování ocelových tyčí kolmo na směr vláken tak, aby se zvýšila únosnost materiálu v tahu kolmo na vlákna, což je nejčastěji používáno u vysokých nosníků (až 2,5 m) používaných na velká rozpětí [28]. Tento typ vyztužení však s sebou nese mnoho problémů, jež vyplývají především ze vzájemné nekompatibility mezi dřevem a ocelí. Musí se použít vhodný spojovací materiál (většinou na bázi pryskyřic či polymerů), ale i tak se často vyskytuje koroze ocelových prvků. Ocelí se také značně zvýší hmotnost a sníží se únosnost při účincích požáru. Protážení oceli na mezi kluzu je nižší než u dřeva, čímž nedochází k využití plasticity u dřeva [29].



Obrázek č. 38 Předepjaté ocelové tyče spojené lepidlem s nosníkem z LLD<sup>53</sup>

### 6.4 Vyztužení pomocí kompozitních vláken

Pro vyztužování pomocí vysokopevnostních materiálů, známých jako FRP (Fiber Reinforced Polymers), se používají kompozitní vlákna aramidová, uhlíková, skleněná, azbestová, PVA a další, přičemž první tři z nich se ve stavebnictví používají nejčastěji [23]. Kompozitní vlákna jsou materiál anizotropní, tedy mají značně lepší vlastnosti pouze v jednom směru. Výhodná jsou především díky vysoké pevnosti v tahu ve směru vláken,

<sup>53</sup> Zdroj - <http://www.americanlaminators.com/firp.html>

vysoké tuhosti a nízké hmotnosti. Možné použití pro vyztužení nosníku z LLD závisí na formě, v níž jsou vlákna vyrobena (desky, lamely, tyče nebo tkaniny), a na způsobu, jímž jsou k nosníku připevněna. Pro zajištění spolupůsobení kompozitu a dřeva je nutné co nejdokonalejší spojení, které se provádí různými lepidly (obrázek č. 39). Prosté nalepení k nosníkům však má hlavní nevýhodu v tom, že jsou vlákna využita jen na 40 % jejich únosnosti [27]. Pro lepší využití vláken pro výrobu je možné jejich předepnutí, v současné době se zkouší systém předepnutí dřevěných nosníků v kombinaci s uhlíkovými vlákny [30]. Použití kompozitních vláken pro vyztužení nosníků z LLD není zatím v České republice příliš rozšířené, přičemž důvodem není nefunkčnost řešení, ale spíše neinformovanost odborné veřejnosti. Cena materiálu je sice vysoká, ale protože se technologie výroby stále vyvíjejí a optimalizují, tak se cena postupně snižuje. Již dnes je možné při použití kompozitních vláken pro vyztužení ušetřit až 35 % celkových nákladů. To plyne hlavně z možnosti použití méně kvalitního dřeva a zmenšení rozměrů prvků (úspora nákladů na transport).



Obrázek č. 39 Dřevěné nosníky s přilepenou tkaninou z uhlíkových vláken<sup>54</sup>

## 6.5 Vyztužování vlastních nosníků

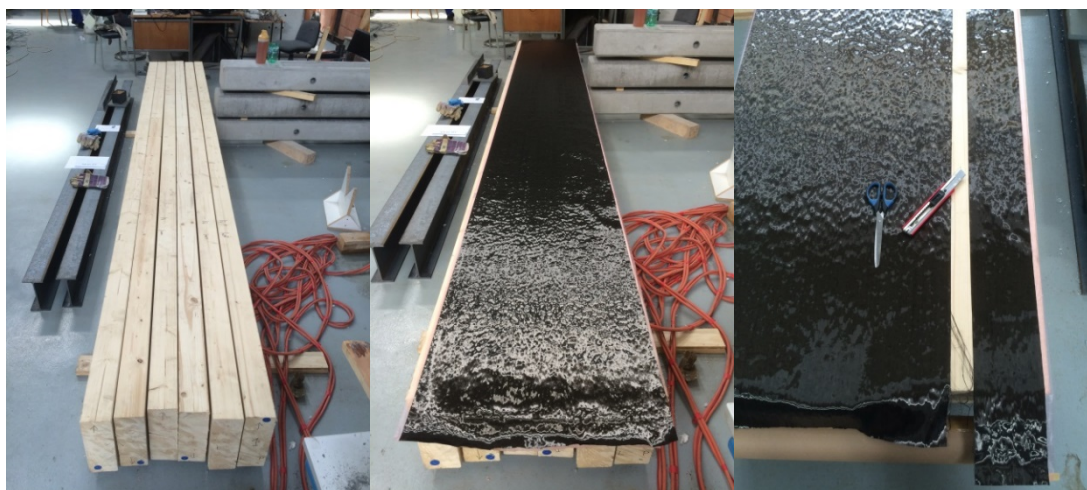
Při výběru vhodné metody pro vyztužování nosníků z lepeného lamelového dřeva jsme se věnovali především možnostem dodatečného vyztužování, například prvků již zabudovaných jak v konstrukci, tak i při výrobě. Předpoklad nad vyztužením nosníků pomocí uhlíkové tkaniny je zvýšení únosnosti nosníků bez navýšení průhybu, který je většinou hlavním parametrem určujícím vhodnost použití prvku v konstrukci. Oblast vyztužování

<sup>54</sup> Zdroj - <http://www.americanlaminators.com/firp.html>

pomocí přikládaných ocelových prvků je již poměrně prozkoumána a často v praxi používána. To je také důvod, proč bylo pro tento náš výzkum zvoleno vyztužování pomocí tkaniny z uhlíkových vláken. Různé varianty uhlíkových vláken jsou v současnosti velmi populárním materiálem a oblast jejich použití se stále rozvíjí, a to nejen ve strojním průmyslu (např. letectví, automobilová výroba apod.), ale i v pozemním stavitelství.

V tomto výzkumu byla pro vyztužení nosníků z LLD použita tkanina s jednosměrně pnutými uhlíkovými vlákny s gramáží 200 g/m<sup>2</sup> (přesný typ tkaniny je popsán v kapitole o zkoušeném materiálu). Tento typ byl zvolen po konzultaci s odborníky z dodavatelské firmy tohoto materiálu a také v návaznosti na předchozí výzkum, který byl realizován ve spolupráci katedry mechaniky a katedry ocelových a dřevěných konstrukcí [27]. V tomto výzkumu byl použit materiál z uhlíkových vláken, vyztužovalo se lamelami o tloušťce 2,4 a 6 mm, což se ukázalo jako příliš silné vyztužení. Proto byla v tomto výzkumu použita tkanina s nižší plošnou hmotností a byl také zvolen jiný postup připevnění na nosníky.

Tkanina byla dodána ve formě role s 4,7 m dlouhou a 0,6 m širokou tkaninou. Tato tkanina byla rozřezána pomocí lámacího nože na jednotlivé pruhy o šířce 11 cm (obrázek č. 40).

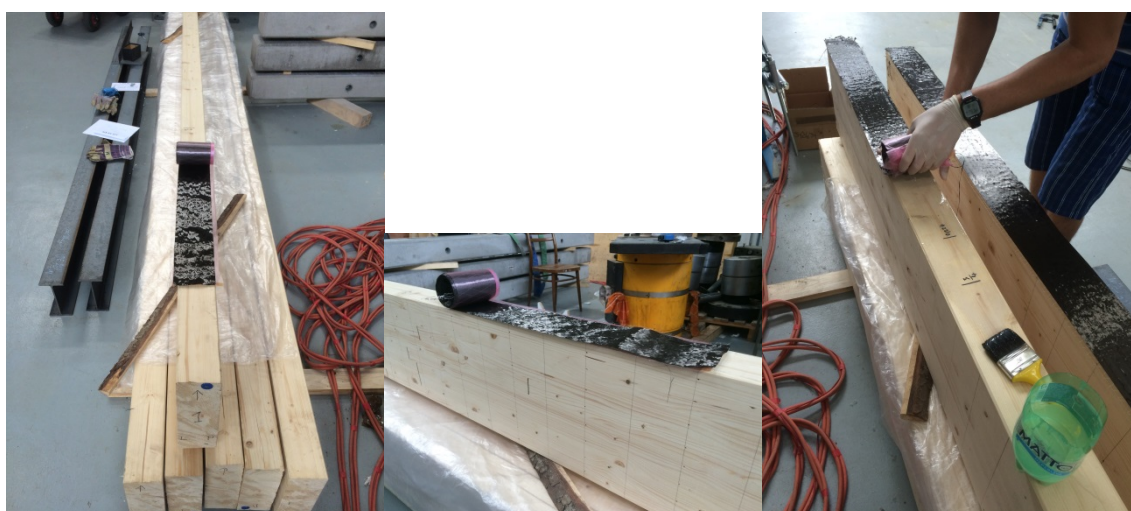


Obrázek č. 40 **Zleva: nosníky, rozvinutý pruh tkaniny a odříznutý pruh tkaniny pro jeden nosník<sup>55</sup>**

Po odříznutí jednotlivých pruhů tkaniny pro konkrétní nosníky se přešlo na připevnění těchto pruhů k vybraným nosníkům z LLD. Pro účely našeho výzkumu byly vybrány

<sup>55</sup> Fotografie pořízena při měření v laboratořích ČVUT, vlastní fotobanka

nosníky s označením 1, 4, 5 a 6, kterým bude věnována v následující části textu pozornost. Nosníky s označením 2 a 3 nebyly pro toto vyztužování použity. Výběr konkrétních nosníků není ničím opodstatněn a byl spíše náhodný. Přilepení tkaniny na nosníky bylo provedeno pomocí lepidla na bázi pryskyřice, které je speciálně určeno pro lepení uhlíkových tkanin k dřevěným prvkům. Toto lepidlo je upraveno tak, aby se částečně vsáklo do dřeva, a tak vytvořilo dokonalejší spojení s povrchem a tkaninou (podrobněji popsáno v kapitole Zkoušené materiály). Adhezní část tedy není pouze mezi tkaninou a povrchem nosníků, ale i částečně v povrchu dřeva a tkanině.



Obrázek č. 41 Postup při lepení pruhů tkaniny k nosníkům z LLD<sup>56</sup>

Lepidlo bylo po předepsaném rozmíchání podle technického listu nanášeno pomocí štětce ve vrstvě odpovídající poměru hmotnosti k hmotnosti použité tkaniny 1,1 : 1, tedy 220 g/m<sup>2</sup>, a do něho následně vkládán pruh tkaniny (obrázek č. 41).

Celkem byla tkanina připevněna na čtyři nosníky a po vytvrzení lepidla při pokojové teplotě, které musí probíhat minimálně 20 hodin, byly nosníky připraveny k destruktivní ohybové zkoušce (obrázek č. 42). K ní bylo přistoupeno v souladu s možnostmi laboratoře v různých časových intervalech od nalepení tkaniny. V jednom případě byl nosník zkoušen skutečně cca po 20 hodinách. U tohoto nosníku nedošlo k odtržení tkaniny od dřeva a bylo prokázáno spolupůsobení obou materiálů, často až do destrukce nosníku.

Uhlíková tkanina je od většiny výrobců dodávána v pruzích o šířce 600 mm, přičemž cena běžného metru se pohybuje v rozpětí mezi 350 až 550 Kč. Finanční náklady na vyztu-

<sup>56</sup> Fotografie pořízena při měření v laboratořích ČVUT, vlastní fotobanka

žení jednoho nosníku se tak, a to i po připočtení ostatních nákladů (lepidlo, prořez a další materiál), pohybují v současných cenách okolo 300 Kč. Při využití velkoobchodních cen a napojení přímo na výrobce se tyto náklady dají ještě snížit.



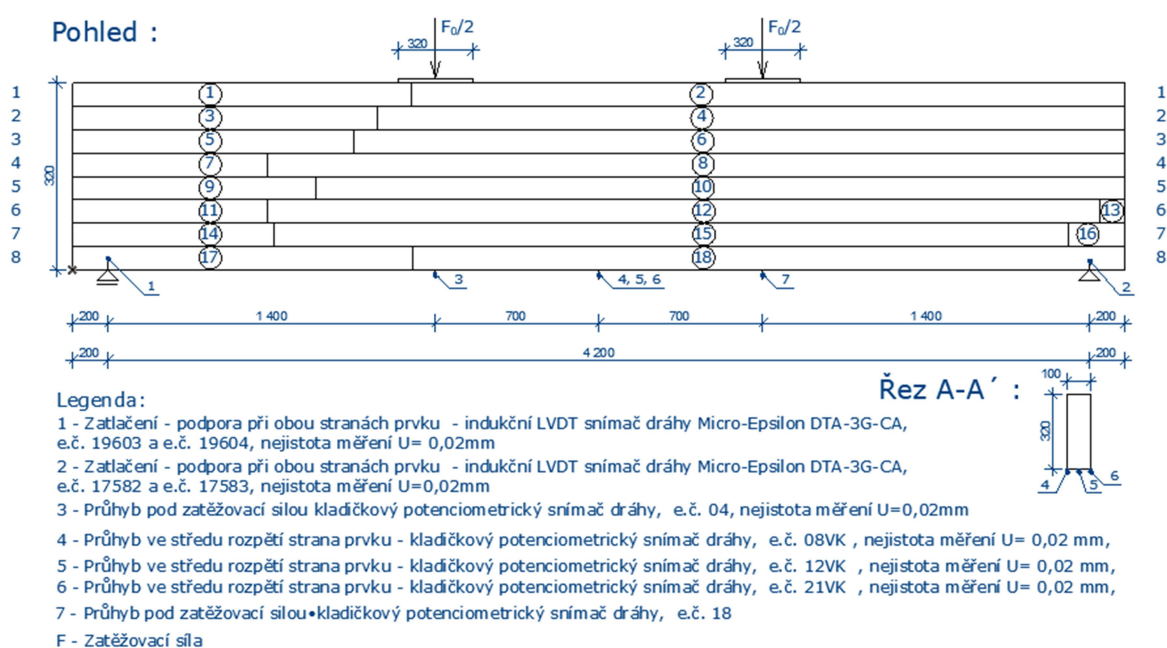
Obrázek č. 42 Nosníky připravené k destruktivnímu zkoušení<sup>57</sup>

<sup>57</sup> Fotografie pořízena při měření v laboratořích ČVUT, vlastní fotobanka

# 7 DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ

## 7.1 Vyztužené nosníky

Pro zjištění materiálových charakteristik a chování nosníků při skutečném zatížení nosníků z LLD byla zvolena a připravena čtyřbodová ohybová zkouška, při níž se nosníky postupně zatěžují až do jejich porušení (obrázek č. 43).



Obrázek č. 43 Schéma zkoušky a polohy měřených oblastí nosník č. 4<sup>58</sup>

Tyto zkoušky byly provedeny v laboratořích Experimentálního centra ČVUT v Praze. Zkušební laboratoř ČVUT v Praze na stavební fakultě slouží k provádění statických zatěžovacích zkoušek, které jsou prováděny podle ČSN 73 2030<sup>59</sup>, akreditována ČIA pod č. 1048 podle ČSN EN ISO /IEC 17025.

<sup>58</sup> Vlastní tvorba

<sup>59</sup> ČSN 73 2030: „Zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí – Společná ustanovení“ [43]

## 7.1.1 Teorie a postup měření

Čtyřbodová ohybová zkouška byla zvolena pro dřevěné nosníky jako nejvhodnější, protože v nejvíce namáhaném místě (tedy v rozmezí mezi zatěžovacími silami) se nevyskytují posouvající síly a průběh maximálního momentu je konstantní. Také při použití roznášecích desek pod každou zatěžovací silou je síla rozložena na větší plochu a nedochází tak k nadměrné deformaci otláčením v místech zatížení. Destruktivní ohybovou zkouškou postupně prošly všechny vyztužené nosníky. Zkoušky také navazují na dlouhodobý výzkumný program a je možné je porovnat a ověřit jejich správnost.

Statická zkouška (obrázek č. 44) byla provedena tak, že nosník z LLD byl uložen na válečkových podporách, aby se skutečné podmínky uložení co nejvíce přiblížily podmínkám uvažovaným v teoretickém výpočtu (prostý nosník). Nosník byl také zabezpečen proti klopení v místě podpor pomocí ocelových objímek. Celková zatěžovací síla  $F_0$  vyvozená hydraulickým válcem byla pomocí vahadla rozdělena na dvě shodné síly  $F$ , které byly rozneseny na větší plochu pomocí ocelových podložek o délce 320 mm a šířce 100 mm, tedy na celé šířce nosníku.



Obrázek č. 44 Pohled na spodní okraj vyztuženého nosníku a měřící zařízení<sup>60</sup>

<sup>60</sup> Fotografie pořízena při měření v laboratořích ČVUT, vlastní fotobanka



Během statické zatěžovací zkoušky byly kromě osově síly měřeny za pomoci snímačů i svislé průhyby a zatlačení podpor.

Měřicí linka byla složena z elektrických odporových snímačů (potenciometrický snímač dráhy) a indukčních snímačů dráhy LVDT<sup>61</sup>. Tento typ přístrojů patří mezi tzv. relativní snímače. Průhyb byl tedy měřen relativně vzhledem k pevnému bodu, v našem případě k podlaze laboratoře. Polohy těchto snímačů, stejně jako jejich typ a přesnost, jsou znázorněny na schématu (obrázek č. 43).

Potenciometrický snímač průhybu pracuje s mechanicko-elektrickým převodníkem. Mechanický převodník převádí svislý průhyb konstrukce pomocí struny a kladky na jiný mechanický pohyb, na posun dotykového bodu jezdce po odporovém vinutí snímače. Elektrický převodník snímače převádí mechanický pohyb jezdce na elektrickou veličinu, elektrický převodník tedy pracuje jako dělič napětí. Změna výstupního napětí z potenciometrického snímače je pak přímo úměrná změně polohy dotykového bodu jezdce a odporového vinutí [31].

Indukční snímač dráhy měří v našem případě také zatlačení nosníku v místě podpor. V obalu snímače dráhy je umístěna dvojice cívek připojených do Wheatstonova můstkového zapojení, což je elektrický obvod sloužící pro měření odporu a malých změn odporu. Jádru cívek je pohyblivé a je pevně spojeno s tykadlem, které je vytlačováno pružinou. Změna polohy tykadla vzhledem k poloze obalu snímače způsobí změnu polohy jádra v cívkách a tedy i změnu jejich vzájemné indukčnosti. Při tom vznikne na můstku napětí, jež je přímo úměrné měřené výchylce [31].

U obou typů snímačů jsou tyto změny napětí zaznamenány měřicí ústřednou, k níž byly snímače připojeny. Celá sestava byla řízena pomocí počítače, do něhož byla ukládána i naměřená data.

Zkompletovaná sestava měřicí linky (obrázek č. 45), měřicí ústředny a řídicího počítače je pak připravena ke statické zkoušce.

---

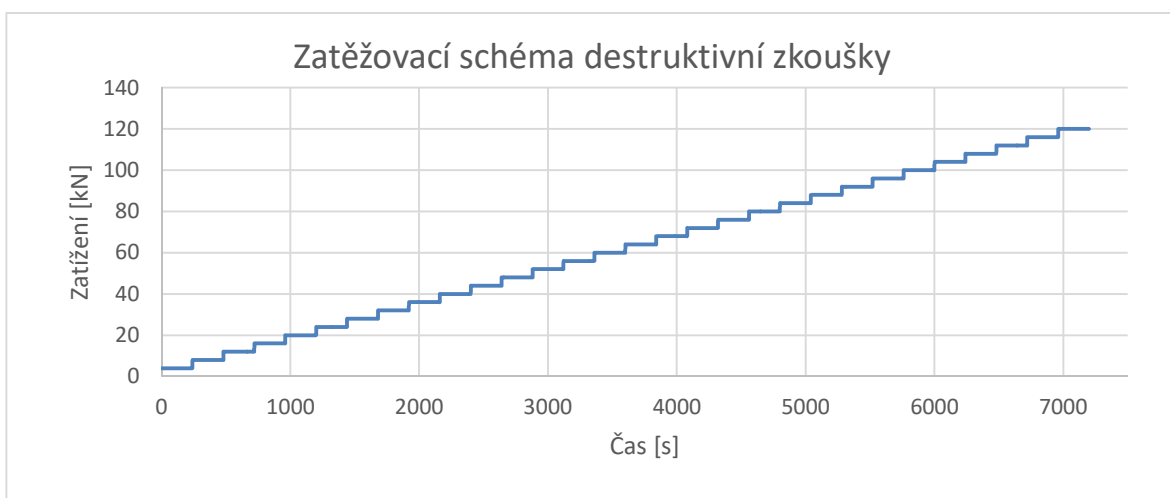
<sup>61</sup> Linear variable differential transformer



Obrázek č. 45 Nosník z LLD připraven na zatěžovací zkoušku<sup>62</sup>

Zatěžování nosníků z LLD bylo prováděno po krocích, přičemž velikost každého stupně byla 4 kN osově. Každá ze dvou sil od vahadla tak měla pro každý krok přírůstek 2 kN. Časová délka každého kroku byla 240 sekund (graf č. 2) a zatížení se postupně navyšovalo až do porušení vzorku (obrázek č. 46). Za pozornost stojí také celková doba trvání zkoušky, která se blížila dvěma hodinám.

Graf č. 2 **Zatěžovací schéma čtyřbodové ohybové zkoušky**



<sup>62</sup> Fotografie pořízena při měření v laboratořích ČVUT, vlastní fotobanka



Obrázek č. 46 Vyztužený nosník krátce po porušení a ukončení zatěžovací zkoušky<sup>63</sup>

Z výsledných hodnot průhybu a zatěžovací síly je možné dopočítat Youngův modul pružnosti nosníku jako celku pro libovolný zatěžovací krok (rovnice č. 11).

$$E = \frac{FL_1(3L_{celk}^2 - 4L_1^2)}{24\delta I} \quad (11),$$

kde:

E = Youngův modul pružnosti [Pa]

F = Zatěžovací síla [N]

L<sub>1</sub> = Třetina rozpětí podpor [m]

L<sub>celk</sub> = Rozpětí podpor [m]

δ = Průhyb středu nosníku [m]

I = Moment setrvačnosti [m<sup>4</sup>]

Vzhledem k tomu, že takto dopočítané hodnoty modulu pružnosti nebudou použity jako vstupní data do výpočetních modelů, jsou brány pouze orientačně. To i z důvodu, že takto dopočítaný modul pružnosti neobsahuje případný vliv vyztužené uhlíkové tkaniny.

<sup>63</sup> Fotografie pořízena při měření v laboratořích ČVUT, vlastní fotobanka

Výsledný modul pružnosti tak může být rozdílný než modul pružnosti nevyztuženého nosníku.

## 7.1.2 Vyhodnocení dat

Destruktivním zkoušením postupně prošly všechny čtyři vyztužené nosníky a u všech došlo k porušení předpokládaným způsobem, tedy že se porušily při dosažení meze únosnosti, přičemž počátek porušení se nacházel v nejvíce namáhané části (střed nosníku). Před samotnou statickou zkouškou byly nosníky posouzeny podle ČSN EN 1995-1-1<sup>64</sup> a z tohoto posudku byly získány předpokládané velikosti sil pro charakteristické i návrhové hodnoty únosnosti (tabulka č. 13). Tyto síly sloužily k určení minimálních očekávaných hodnot sil, jež nosník přeneše při statické zkoušce. K těmto silám byl vypočítán i předpokládaný průhyb nosníku. Protože jde o nosníky s výztuží, byla tato předpokládaná síla do počítána pomocí náhradní plochy za uhlíkovou tkaninu.

Tabulka č. 13 **Předpokládané návrhové a charakteristické hodnoty únosnosti dle statického výpočtu**

Označení	Návrhové hodnoty	Charakteristické hodnoty
Osová síla [kN]	49,2	64,3
Předpokládaný průhyb [mm]	20,2	26

Všechny nosníky dosáhly únosnosti vyšší, než bylo předpokládáno na základě statického výpočtu (tabulka č. 14). Jediným nosníkem, který vyčníval z řady, byl nosník č. 6, jenž se porušil při dosažení nejnižší naměřené hodnoty zatížení. Tento nosník měl pravděpodobně výrobní vadu, která snížila jeho únosnost. Moment, při němž došlo k projevení vady, bude více zřetelný v dalším odstavci textu.

Tabulka č. 14 **Porovnání naměřených sil, při nichž došlo k porušení nosníků**

Nosník č. [-]	1	4	5	6
Mez porušení [kN]	<b>84</b>	<b>96</b>	<b>88</b>	<b>72</b>

<sup>64</sup>ČSN EN 1995-1-1: „Národní příloha – Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla – Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby“ [37]

Po prvotním průzkumu videozáznamu zatěžovací zkoušky a sledování charakteru porušení nosníku č. 6 s výztuží bylo zjištěno, že prvopočátek poruchy vznikl v zubovém spoji spodní lamely v první třetině rozpětí nosníku zleva, naznačen šipkami (obrázek č. 47).



Obrázek č. 47 **Detail počátku poruchy vyztuženého nosníku**<sup>65</sup>

Tento charakter poruchy spíše směřuje k závěru, že spoj měl skrytou vadu již z výroby, protože lepené spoje u LLD by měly vykazovat vyšší pevnostní charakteristiky než samotné rostlé dřevo [32]. Charakter poruchy neodpovídá ani v porovnání s porušením u dalších nosníků, které měly prvopočátek poruchy blíže středu nosníku, přičemž lepené spoje (plošné i podélné) zůstaly neporušené. K porušení došlo v samotné struktuře dřeva, například porušením podélně s vlákny nebo delaminací po letokruzích dřeva v jednotlivých lamelách nosníku.

Průběh zatěžování nosníků vyztužených uhlíkovou tkaninou vykazoval standardní a předpokládané chování při zatěžování pomocí čtyřbodové ohybové zkoušky, tedy přibližně rovnoměrný průhyb ve třetinách rozpětí a ve středu rozpětí. Po destrukci nosníků došlo v místě rozlomení nosníku k odtržení uhlíkové tkaniny od dřeva (obrázek č. 48).

<sup>65</sup> Fotografie pořízena při měření v laboratořích ČVUT

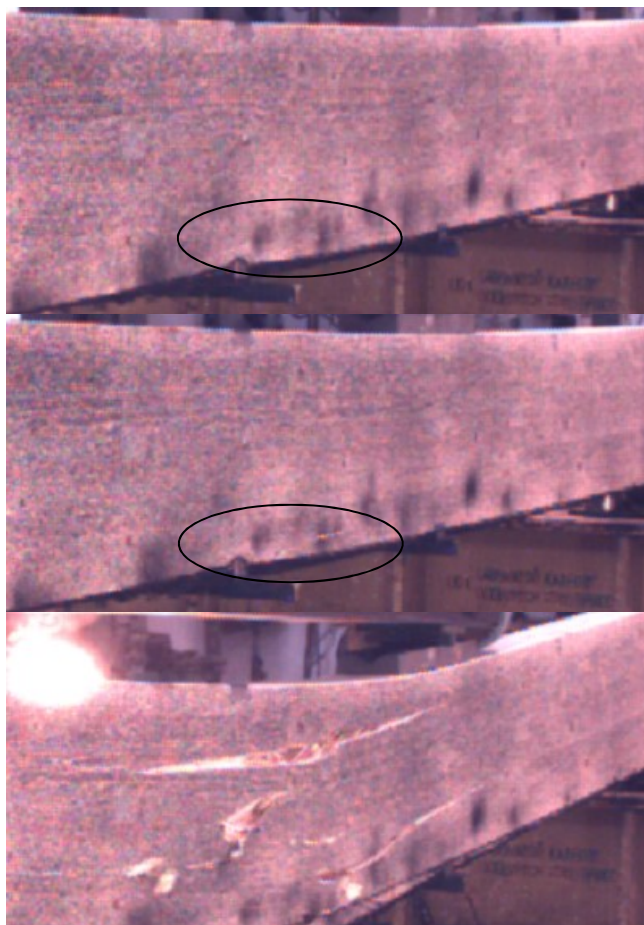


Obrázek č. 48 Vzorek uhlíkové tkaniny odtržený při porušení nosníku<sup>66</sup>

Z těchto vzorků bylo následně možné pozorovat, jak se tkanina spojuje s materiálem nosníku a jak se změní její vlastnosti po napuštění lepidlem. Na vzorcích bylo patrné, že při odtržení tkaniny od materiálu nosníků zůstává na tkanině kromě samotného lepidla i vrstva dřeva, do níž se lepidlo napustilo při lepení tkaniny. Vzorky odtržené tkaniny také vykazují zvýšenou křehkost a lámavost při ohýbání vzorků, které je dáno tím, že vytvrzené lepidlo není pružné, a proto při prudkém lokálním ohnutí je možné tkaninu porušit lomem. Oproti tomu křehkost přilepené tkaniny v podélném směru se při zatěžování nosníků neprojevila a k porušení celistvosti tkaniny došlo až při porušení nosníků.

Ze zpětného zkoumání videozáznamů jednotlivých nosníků bylo možné sledovat i další chování tkaniny při zatěžování. U všech nosníků, tedy kromě nosníku č. 6 (viz popis poruchy výše v textu), zpomalila uhlíková tkanina v poslední fázi zatížení průběh rychlosti kolapsu nosníků (obrázek č. 49).

<sup>66</sup> Fotografie pořízena při měření v laboratořích ČVUT, vlastní fotobanka



Čas: 10:45:04  
Zatěžovací síla: 96.0 kN

Čas: 10:45:07  
Zatěžovací síla: 96.0 kN

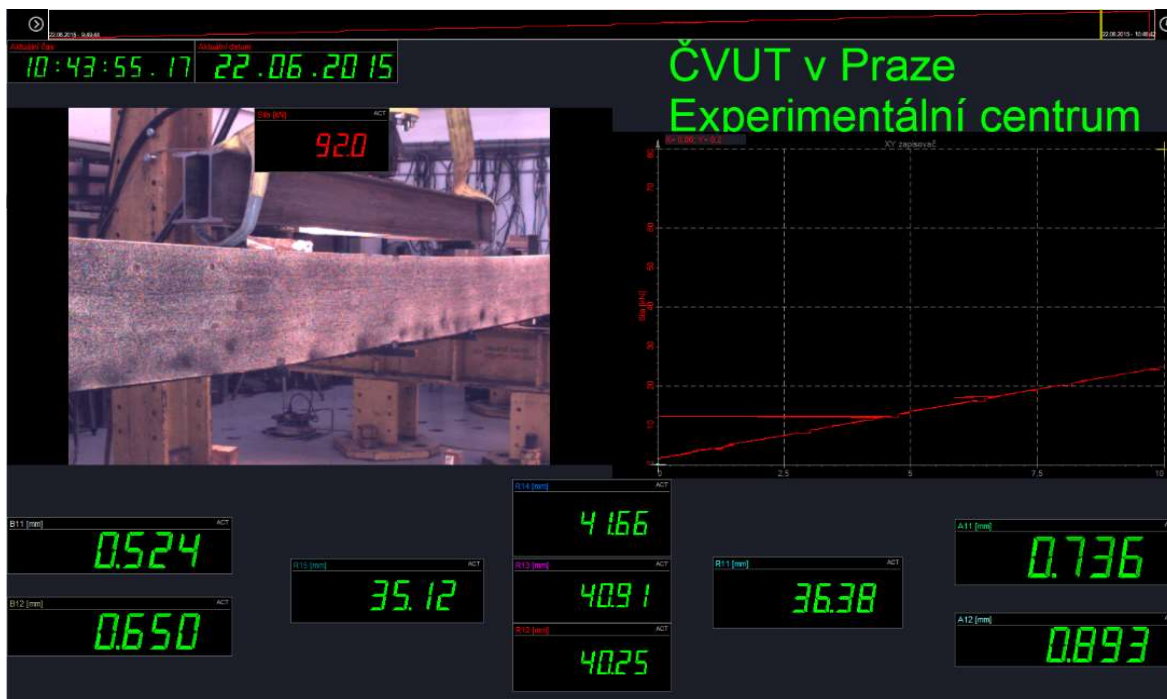
Čas: 10:46:23  
Zatěžovací síla: 12.93 kN

Obrázek č. 49 Časový průběh porušení nosníku č. 4<sup>67</sup>

Na tomto příkladu lze sledovat, že v čase 10:45:07. došlo při celkové zatěžovací síle o velikosti 96 kN k prvotnímu porušení nosníku ve středu rozpětí. Toto porušení mělo počátek vodorovné trhliny přibližně mezi první a druhou řadou lamel a následně pokračovalo šikmo vlevo směrem ke spodní hraně nosníku. Při tomto porušení také došlo ke skokovému zvýšení průhybu, následně se celý postup trhliny zastavil, ale průhyb nosníku se začal zvětšovat vyšším tempem než v předchozí fázi zatěžování. K celkovému porušení a destrukci nosníku došlo až o několik desítek vteřin později, tedy v čase 10:46:23. Obdobné chování vykazovaly i ostatní sledované nosníky. Toto pozastavení šíření trhliny a destrukce nosníku přisuzujeme vlivu uhlíkové tkaniny, která byla schopna krátkodobě přenést skokový nárůst zatížení.

Ze samotného průběhu zatěžovacích zkoušek (obrázek č. 50) je k dispozici kromě videozáznamu také textový záznam hodnot z jednotlivých měřicích zařízení.

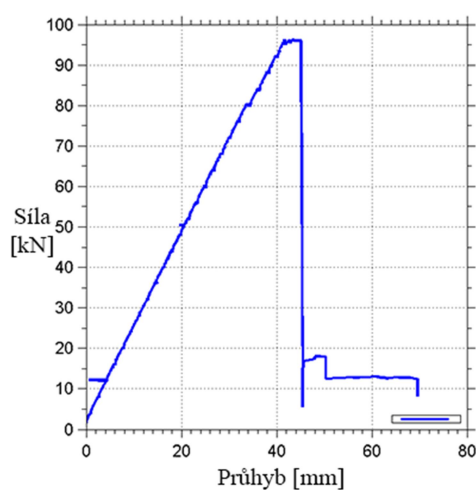
<sup>67</sup> Fotografie pořízena při měření v laboratořích ČVUT, vlastní fotobanka



Obrázek č. 50 Záznam ze statické zkoušky těsně před porušením nosníku<sup>68</sup>

Jak již bylo zmíněno výše v textu, tak se při zatěžování kromě osové síly snímaly průhyby ve středu a třetině nosníku a k nim příslušná zatlačení v místech podpor. Hodnoty pro všechna zařízení měřící linky byly snímány každých pět setin vteřiny. Celkem tak v průměru bylo získáno pro jednu zatěžovací zkoušku 60 tisíc řádků hodnot, které musely být před dalším použitím zpracovány a vyčištěny. Hrubá data z destruktivní zkoušky totiž obsahují mimo jiné i hrubé nepřesnosti (graf č. 3).

Graf č. 3 Celý neupravený průběh zatěžovací zkoušky síly a průhybu ve středu nosníku

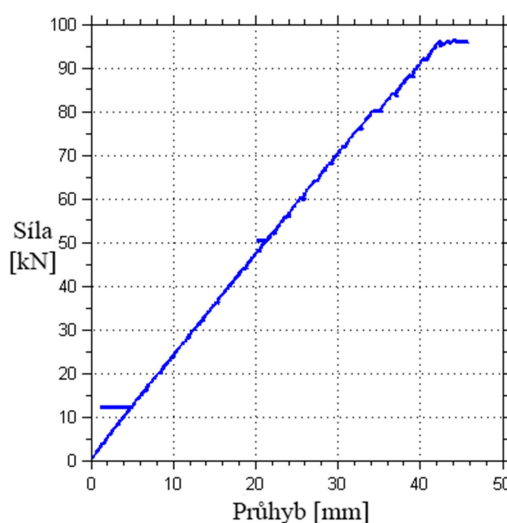


<sup>68</sup> Fotografie pořízena při měření v laboratořích ČVUT, vlastní fotobanka



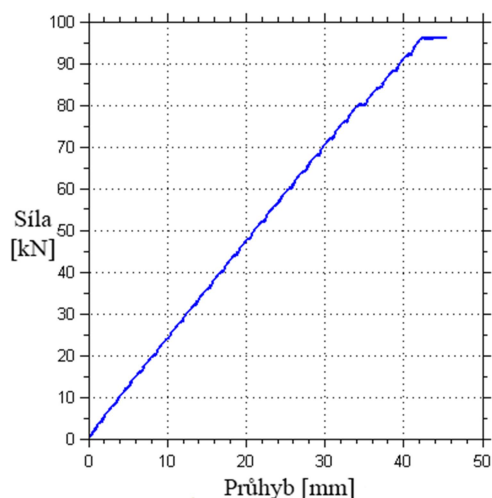
Proto bylo nutné v první fázi odstranit z průběhu zkoušky data, která byla naměřena po porušení nosníku, a zároveň byla odečtena nulová čtení. Hodnoty nulových čtení byly odečteny v čase 1 vteřina před počátkem zatěžování pro každý senzor samostatně. O tyto hodnoty byly průběhy buď poníženy, a to v případě kladných nulových čtení, nebo navýšeny, a to v případě záporných nulových čtení (graf č. 4).

**Graf č. 4 Upravený průběh zatěžovací zkoušky síly a průhybu ve středu rozpětí, bez konce zkoušky a po odečtení nulových čtení**



Po základní úpravě průběhů zatěžovacích zkoušek bylo nutné odstranit z průběhu řádky hodnot, kde došlo k lokální skokové výchylce. Tyto výchylky nekorespondují se skutečným průběhem zatěžovací zkoušky a mohou vznikat například při otřesech v okolí snímačů nebo při kolísání elektrického proudu. Protože by tyto výchylky mohly, a to v závislosti na četnosti výskytu, záporně ovlivnit hodnoty odvozené z těchto průběhů, bylo nutné časově náročné vyhodnocení. V programu MS Excel byly vytvořeny logické funkce, které hledaly v okolí jednotlivých měření nadprůměrně vyšší hodnoty, než se nacházejí v rozmezí jedné vteřiny před a jedné vteřiny za sledovaným řádkem. Řádky, které obsahovaly tyto nepřesnosti, byly následně odstraněny a výsledkem je vyčištěný průběh zatěžovací zkoušky od nežádoucích nepřesností (graf č. 5). Tento průběh je následně možné použít pro další vyhodnocení zatěžovacích zkoušek.

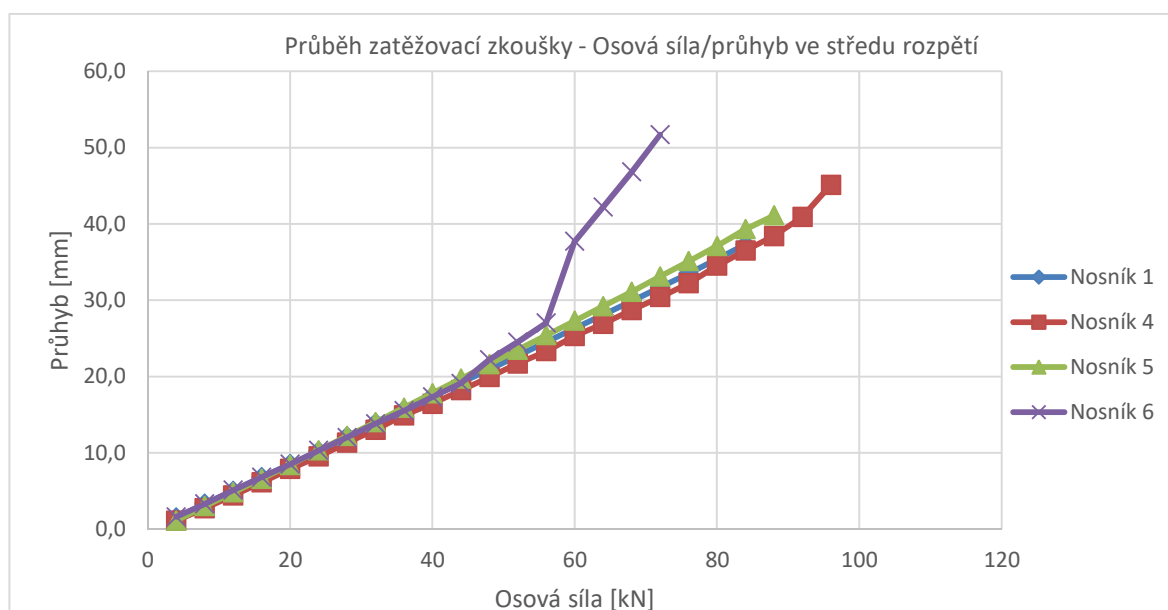
Graf č. 5 Vyčištěný průběh zatěžovací zkoušky síly a průhybu ve středu rozpětí



### 7.1.3 Výsledky měření

Vyčištěné průběhy zatěžovacích zkoušek bylo možné následně vykreslit a vzájemně porovnat (graf č. 6). Z tohoto vykreslení je patrné, že kromě nosníku číslo 6 (jak bylo zmíněno a vysvětleno výše) byl u všech nosníků průběh zatěžovací zkoušky standardní a v souladu s předpoklady, a proto bude možné porovnat tyto průběhy s připravenými konečně prvkovými modely bude tedy možné. Pouze u nosníku číslo 6 bude model porovnán pouze do hodnoty, při níž došlo k projevení vady, tedy přibližně do poloviny únosnosti.

Graf č. 6 Vyčištěný průběh zatěžovacích zkoušek pro jednotlivé nosníky



Z vyčištěných hodnot získaných v průběhu zatěžovací zkoušky bylo následně možné dopočítat (rovnice č. 11) střední hodnoty statického modulu pružnosti, kdy vstupy do výpočtu jsou průřezové charakteristiky nosníku, průhyb ve středu nosníku a jemu příslušná zatěžovací síla v čase (tabulka č. 15). V tabulce jsou jako příklad uvedeny hodnoty modulů pružnosti pro danou zatěžovací sílu a jí příslušný průhyb uprostřed rozpětí nosníku č. 4.

Tabulka č. 15 **Hodnoty modulů pružnosti ze čtyřbodové ohybové zkoušky**

Zatěžovací stupeň – $F_0$ [kN]	Příslušný průhyb [mm]	Modul pružnosti – E [MPa]
24	8,94	12 925
28	10,48	12 870
32	12,03	12 808
36	13,58	12 765
40	15,17	12 696
44	16,70	12 682
48	18,36	12 588
52	19,99	12 526
56	21,65	12 452
60	23,33	12 382
64	25,04	12 304
68	26,75	12 239

Samotný způsob vyhodnocení modulů pružnosti pro jednotlivé nosníky byl proveden podle ČSN EN 408<sup>69</sup>, která stanovuje kromě jiného také zkušební metody pro stanovení modulu pružnosti v ohybu u lepeného lamelového dřeva. Tyto metody platí mimo jiné pro obdélníkový průřez z lepeného lamelového dřeva. Norma určuje, kterou část zatěžovací zkoušky je možné použít pro výpočet ohybového modulu pružnosti. Pomocí tohoto postupu byl dopočítán skutečný modul pružnosti jednotlivých nosníků.

Takto získané hodnoty budou následně porovnány vzájemně s ostatními nosníky a také konfrontovány s hodnotami z nedestruktivního testování nosníků. Výstupem je následující porovnání (tabulka č. 16), na jehož základě si lze udělat představu o přesnosti měření pomocí nedestruktivních metod testování.

<sup>69</sup> ČSN EN 408 Dřevěné konstrukce – Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo – Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností [44]

Tabulka č. 16 **Porovnání hodnot modulů pružnosti pro všechny nosníky**

Označení	Rez. metoda	Zaražení trnu – celý nosník	Čtyřbodový ohyb	Podle ČSN EN 1194
	$E_{dyn}$ [Gpa]	$E_{pil}$ [Gpa]	$E_{des}$ [Gpa]	$E_{tab}$ [Gpa]
Nosník č. 1	13,9	12,4	13,5	12,6
Nosník č. 4	14,3	11,9	12,9	
Nosník č. 5	14,1	13,5	14,4	
Nosník č. 6	14,4	12,4	13,5	

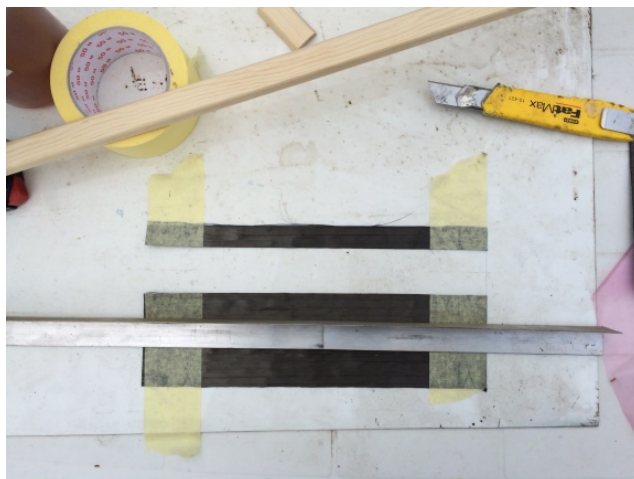
## 7.2 Tahové zkoušky uhlíkové tkaniny

Materiálové charakteristiky dřevěných nosníků byly v této práci zkoumány pomocí nedestruktivních i destruktivních metod a výsledky z těchto zkoušek je následně možné použít jako vstupní parametry do konečně prvkových modelů vyztužených nosníků. Pro přesnější modelování bylo nutné zjistit i materiálové charakteristiky uhlíkové tkaniny, jež byla použita pro vyztužení nosníků. Proto bylo zapotřebí vzorky tkaniny podrobit destruktivnímu testování, abychom mohli určit skutečné charakteristiky, tedy konkrétně modul pružnosti. Tahová zkouška uhlíkové tkaniny byla zvolena pro zjištění referenčních hodnot, které budou naměřeny a následně porovnány s hodnotami uváděnými výrobcem.

Uhlíková tkanina byla zkoušena na přístroji MTS Alliance RT 30, který je určen pro tahové a tlakové zkoušky do velikosti síly 30 kN. Silové zatížení zkoušených vzorků je vnášeno pomocí posunů, jež mohou mít nastavený přírůstek od 0 do 1016 mm za minutu. Při zatěžování vzorků snímá řídicí počítač velikost síly, čas a posuny. Vzorky z uhlíkové tkaniny byly zatěžovány posunem 1mm/min až do porušení nebo ukončení zkoušky.

### 7.2.1 Příprava vzorků a zkoušek

Vzorky pro tahové zkoušky uhlíkové tkaniny byly připraveny následovně. V první fázi byly vzorky pro tahové zkoušky (resp. první série vzorků) připraveny tak, že z uhlíkové tkaniny byly pomocí ostrého lámacího nože nařezány pruhy o šířce 20 mm a délce 300 mm (obrázek č. 51). Aby nedocházelo ke štěpení konců vzorků a byla zachována požadovaná šířka vzorků, byly konce tkaniny přelepeny pomocí papírové pásky, jež zabránila deformacím při řezání.



Obrázek č. 51 Příprava vzorků tkaniny – řezání na jednotlivé pruhy<sup>70</sup>

Celkem bylo nařezáno šest pruhů, které bylo pro potřeby trhacího stroje nutné doplnit o úchyty, za něž je možné ve stroji vzorky uchytit. Tyto úchyty musí být dostatečně pevné, aby nedocházelo k deformacím při tahových zkouškách a od čelistí úchytů trhacího stroje. Tkanina k těmto úchytům musí být také dostatečně přikotvena, aby nedošlo k vytažení tkaniny z úchytů. Z tohoto důvodu bylo pro první sérii vzorků použito bambusové dřevo, jež je velmi tvrdé a pevné. Protože se stále jedná o dřevo, bylo možné použít k připevnění úchytů lepidlo, které bylo také použito při připevnění tkaniny k nosníkům z lepeného lamelového dřeva. Takto připravené vzorky bylo možné následně podrobit tahové zkoušce (obrázek č. 52)



Obrázek č. 52 První sada vzorků tkaniny – připravena ke zkoušení<sup>71</sup>

<sup>70</sup> Fotografie pořízená při měření, vlastní fotobanka

Vzorky z první sady byly následně upevněny do trhacího stroje. Před spuštěním stroje musely být vždy vyrovnány tak, aby samotná tkanina nebyla zkroucena a aby byla svisle srovnána. Při prvotním uchycení měly totiž vzorky tendenci k nevyrovnanému uchycení (obrázek č. 53).



Obrázek č. 53 Uchycení prvního vzorku první sady do trhacího stroje – patrné zkroucení tkaniny<sup>72</sup>

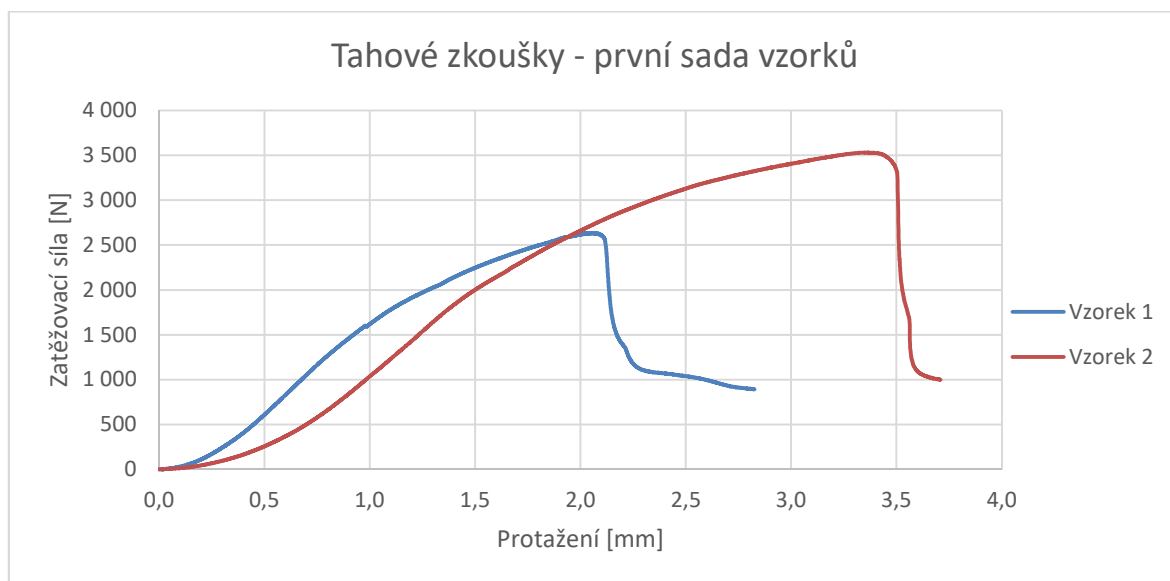
Po vyrovnání vzorků a správném uchycení se přešlo k samotným zatěžovacím zkouškám. Odzkoušeny byly vždy všechny vzorky z dané sady. Při zatěžování vzorků se ukázalo, že uchycení není dostatečné. Ještě před dosažením meze únosnosti uhlíkové tkaniny došlo totiž k vytržení tkaniny z úchyty, avšak nikoli z čelistí trhacího stroje, nýbrž v lepeném spoji mezi dřevěnými úchyty. V následujícím grafu průběhu zatěžovací zkoušky jsou znázorněny vždy dva vzorky (graf č. 7), tedy konkrétně průběhy u vzorků, které se porušily při nejnižší a nejvyšší zatěžovací síle v dané sadě vzorků. U vzorku číslo 1 došlo k vytržení při nejnižší zatěžovací síle, konkrétně při dosažení 2 523 N. U vzorku číslo 2, jenž vydržel nejvíce, došlo k vytržení při dosažení zatěžovací síly 3 535 N.

---

<sup>71</sup> Fotografie pořízená při měření, vlastní fotobanka

<sup>72</sup> Fotografie pořízená při měření, vlastní fotobanka

Graf č. 7 Průběh zatěžovací zkoušky první sady



Tahové zkoušky u první sady nepřinesly požadované výsledky, a proto byla připravena druhá sada zkušebních vzorků. U této sady vzorků byly použity pro vytvoření úchytů kusy smrkových latí o šířce 20 mm a tloušťce 5 mm (obrázek č. 54).



Obrázek č. 54 Příprava vzorků druhé sady<sup>73</sup>

Na rozdíl od použití bambusového dřeva jsme si slibovali od tohoto úchytu větší

<sup>73</sup> Fotografie pořízená při měření, vlastní fotobanka

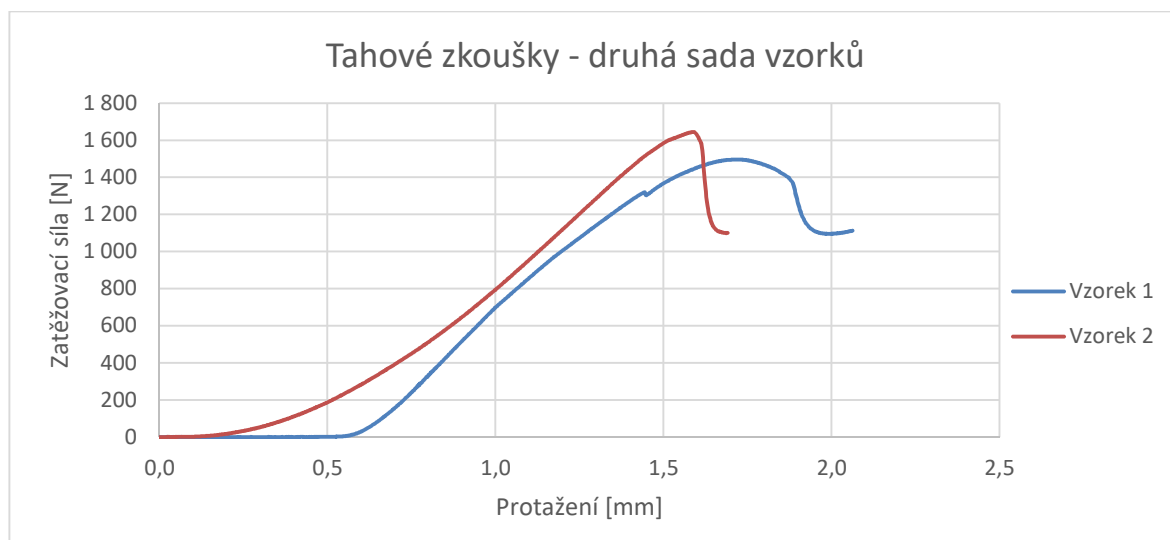
styčnou plochu tkaniny, lepidla a dřeva. U první sady vzorků byla tato styčná plocha 4 cm<sup>2</sup>, zatímco u úchytů ze smrkového dřeva to bylo 20 cm<sup>2</sup> (obrázek č. 55).



Obrázek č. 55 Druhá sada vzorků uhlíkové tkaniny a vzorek z druhé sady při zatěžovací zkoušce<sup>74</sup>

Ve druhé sadě byly připraveny pouze tři vzorky pro vyzkoušení nového způsobu uchycení a všechny byly podrobeny tahové zkoušce. V následujícím grafu je vyobrazen průběh zatěžovací zkoušky, opět pro nejméně a nejvíce odolný vzorek (graf č. 5). U druhé sady vzorků došlo opětovně k vytržení tkaniny z lepených úchytů a oproti očekávání dokonce už při nižší zatěžovací síle (obrázek č. 55). K vytržení došlo již v rozmezí 1 075 až 1 305 N (graf č. 8).

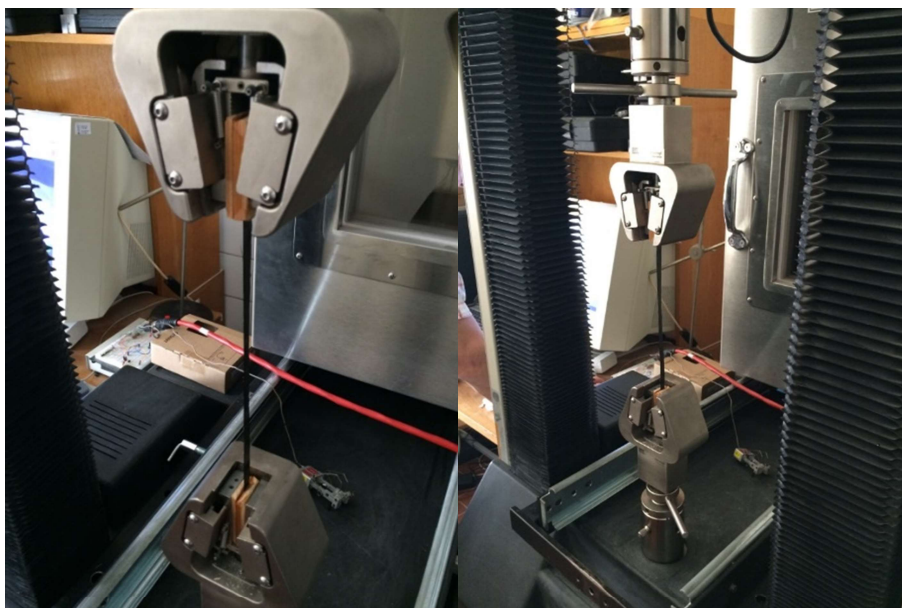
Graf č. 8 Průběh zatěžovací zkoušky – druhá sada vzorků



<sup>74</sup> Fotografie pořízená při měření, vlastní fotobanka



Protože ani druhá sada vzorků uhlíkové tkaniny s větší styčnou plochou v úchytu nebyla dostatečně únosná, aby bylo možné přetřhnout uhlíkovou tkaninu, byla připravena ještě třetí sada vzorků. Tyto vzorky měly opět úchyty ze smrkových latí, ale samotné vzorky uhlíkové tkaniny měly šířku pouze 5 mm (oproti původním 20 mm) a bylo vyrobeny tři kusy. Délka vzorku byla opět 300 mm s tím, že úchyty měly rozměr 50×20×5 mm. Styčná plocha byla v tomto případě 5 cm<sup>2</sup>, ale samotná tkanina měla čtvrtinovou šířku (obrázek č. 56).



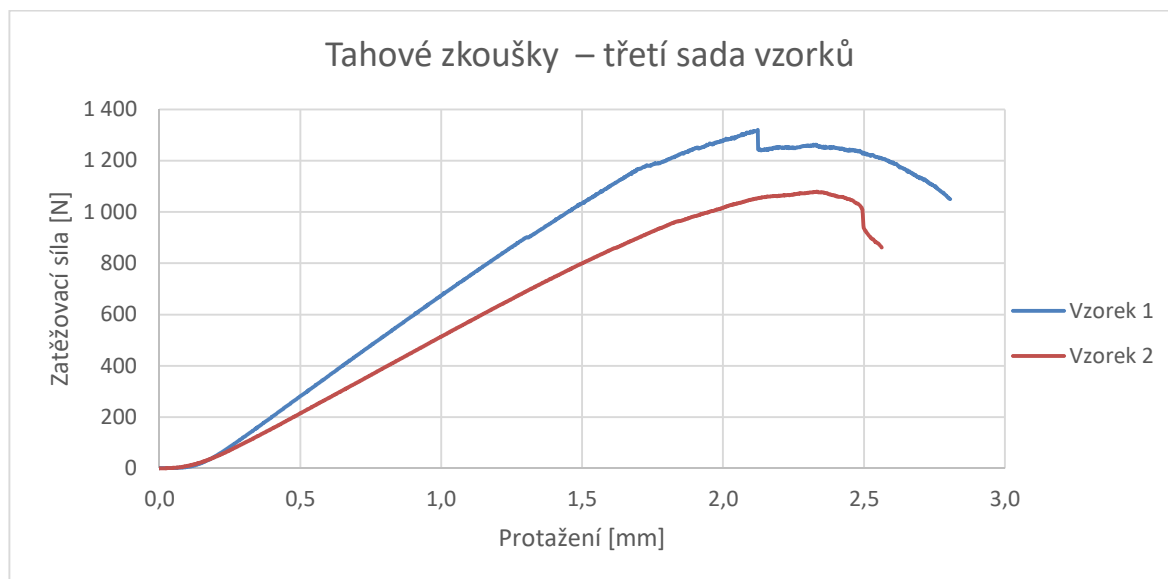
Obrázek č. 56 Třetí sada vzorků při zatěžovací zkoušce.<sup>75</sup>

Třetí sada vzorků se při zatěžovací zkoušce (graf č. 9) chovala v podstatě stejně jako vzorky druhé sady, tedy opět před porušením vzorku uhlíkové tkaniny došlo k vytržení z úchytů. V grafu je zase uveden nejméně a nejvíce odolný vzorek, přičemž k vytržení došlo v rozmezí od 1 075 až 1 309 N (graf č. 9).

---

<sup>75</sup> Fotografie pořízená při měření, vlastní fotobanka

Graf č. 9 Průběh zatěžovací zkoušky – třetí sada vzorků



## 7.2.2 Vyhodnocení

Ani po odzkoušení třetí sady vzorků uhlíkové tkaniny se také nepodařilo získat použitelná data pro určení požadovaných vlastností, tedy statického modulu pružnosti uhlíkové tkaniny. Z důvodu časové náročnosti a složitosti kotvení vzorků uhlíkové tkaniny do úchytnů trhačím stroje jsme již další vzorky ke zkoušení nepřipravili. V teoretické fázi přípravy dalších vzorků by bylo zapotřebí vytvořit velké množství vzorků uhlíkové tkaniny, přičemž by jednotlivé vzorky byly tvořeny pouze několika jednotlivými vlákny. Takovéto vzorky by bylo možné v trhačím stroji odzkoušet při nižších zatěžovacích silách, ale pro přesné výsledky by bylo nutné takových vzorků připravit desítky, důkladně zdokumentovat rozměry vzorků a například pod mikroskopem spočítat počet jednotlivých vláken.

Tímto způsobem postupoval i výrobce použité uhlíkové tkaniny, který materiálové charakteristiky pravidelně ověřuje a uvádí je i ve svých technických listech. Výhodou je, že uváděné materiálové charakteristiky se velmi blíží reálným hodnotám uhlíkové tkaniny (tabulka č. 17). To je dáno tím, že výrobní proces dokáže vytvářet uhlíková vlákna s potřebnou přesností, aby se v ploše tkaniny neměnily její vlastnosti. Materiálové charakteristiky uváděné výrobcem tak budou použity i do počítačových modelů nosníků s tím, že skutečné hodnoty se velmi blíží tabulkovým hodnotám.

Tabulka č. 17 **Materiálové charakteristiky použité uhlíkové tkaniny**<sup>76</sup>

Název	Gramáž [g/m <sup>2</sup> ]	Tahová pevnost [GPa]	Modul pružnosti [GPa]	Protažení při porušení [%]
UD CST 200	200	4,9	234	0,40

<sup>76</sup> Technické listy uhlíkové tkaniny GRM systems dostupné na: <http://www.grm-systems.cz/en/carbon-reinforcements>

## 8 MODELOVÁNÍ

Po zjištění materiálových charakteristik nosníků z lepeného lamelového dřeva nedestruktivními zkouškami a po destruktivních zkouškách vyztužených nosníků z lepeného lamelového dřeva je nutné porovnat jejich chování s počítačovým modelem vyztužených nosníků. Fungující počítačový model, který se bude chovat jako skutečný vyztužený nosník, může následně ušetřit čas a práci při uvažování o jiných způsobech vyztužování, například při použití silnější tkaniny apod.

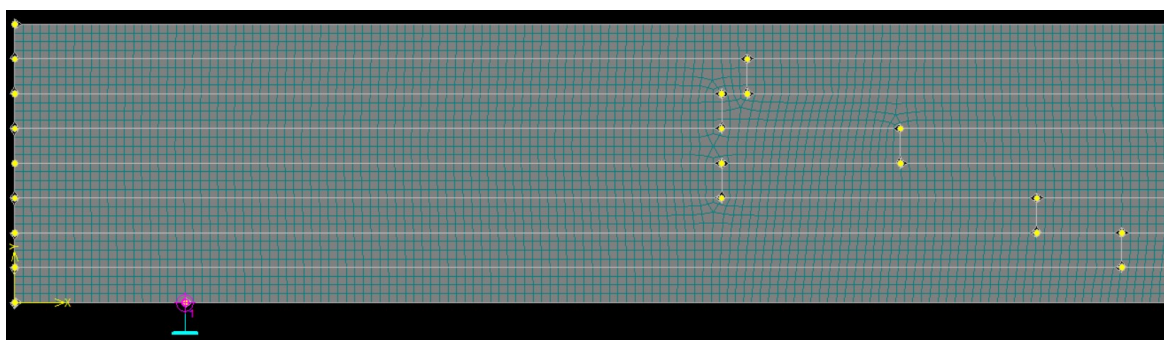
Vzhledem k tomu, že v současné době není dostupný výpočetní software explicitně se zabývající simulováním dřevěných prvků, musel být vybrán software, který umožní podrobně nastavit parametry modelu. Po rešerši aktuálních výpočetních softwarů a v návaznosti na předchozí práce [33], byl zvolen pro tvorbu modelů nosníků software ATENA 2D od společnosti Červenka Consulting<sup>77</sup>. Programem ATENA lze modelovat skutečné chování konstrukcí, včetně jejich porušování trhlinami, a umožňuje ověřit konstrukce v grafickém prostředí.

### 8.1 Postup při modelování

Počítačový model byl schematicky vytvořen tak, aby přesně odpovídal zkoušeným nosníkům z lepeného lamelového dřeva. Délka nosníku byla tedy zvolena 4,6 m, výška 0,32 m a šířka 0,1 m. Obě podpory prostého nosníku byly umístěny ve vzdálenosti 2,1 m od středu nosníku. Zatěžovací síly nebyly zadány osově ve třetinách rozpětí, ale vzhledem k tomu, že při čtyřbodové ohybové zkoušce byly roznášeny pomocí ocelových desek, bylo náhradní zatížení simulováno spojitým zatížením se středem ve třetinách rozpětí a po délce 0,32 m. Při tvorbě počítačového modelu muselo být také vyjasněno, která vstupní data z provedených zkoušek budou použita a jakým způsobem. Obecné parametry počítačového modelu byly zvoleny následovně. Jednotlivé makroprvky modelu, které mají simulovat potřebný materiál rovinné napjatosti, mají nastaveno izotropní chování pro rovinné elastické napětí. Přesto, že dřevo není izotropní materiál, bylo toto nastavení použito v návaznosti na předchozí práci [33], kde se prokázalo, že rozdíl je pro řešenou úlohu zanedbatelný. V první fázi byl zhotoven prostý nosník bez výztužných prvků v několika verzích, kde

<sup>77</sup> Použitá verze ATENA 2D v5.4.1.0, podrobně na <https://www.cervenka.cz/products/atena>

jediným rozdílem byla hustota konečně prvkové sítě. Tato síť byla vzhledem k tvaru a průřezu nosníků zvolena jako čtvercová, a to z důvodu určení ideální velikosti jednotlivých prvků. Nosník byl tedy zatěžován stejnými zatěžovacími stupni, ale u makroprvků byla měněna velikost konečně prvkové sítě. Hledali jsme ideální poměr mezi přesností a časem výpočtu. Například při použití sítě s hranou prvku menší než 1mm trval výpočet i několik hodin u použitého hardwaru. Ideální velikostí pro náš účel se ukázala čtvercová konečně prvková síť s hranou čtverce o velikosti 10 mm (obrázek č. 57), která umožňovala provést výpočet v řádu minut, přičemž výsledné hodnoty se téměř rovnaly těm z jemné sítě.



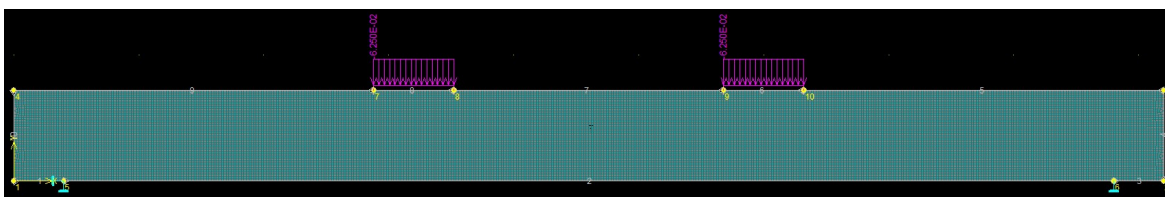
Obrázek č. 56 Detail konečně prvkové sítě použité při výpočtu<sup>78</sup>

Když bylo vybráno obecné nastavení a chování počítačových modelů, mohli jsme přejít k určení způsobu modelování samotného lepeného lamelového nosníku z pohledu konstrukce. Jak již bylo zmíněno výše v textu, jsou nosníky z lepeného lamelového dřeva tvořeny jednotlivými řadami lamel, jež jsou k sobě lepeny. Tyto lamely dále navíc obsahují jednotlivé části, které jsou napojeny lepením v zubových spojích. Vzhledem k tomu, že jsou k dispozici podrobné hodnoty modulů pružnosti jak pro nosník jako celek, tak i pro jednotlivé segmenty lamel, bylo nutné jednotlivé stavy namodelovat a určit nejpřesnější způsob modelování ve srovnání s reálným chováním při zatěžování.

V návaznosti na nedestruktivní zkoušení a jeho výsledky byly zvoleny pro další použití výsledky z nedestruktivní metody zaražením trnu. Tyto výsledky jsou vzhledem k podrobnosti měření nejvíce vypovídající a data jsou k dispozici nejen pro nosník jako celek, ale i pro lamely a jednotlivé segmenty lamel. Uhlíková tkanina byla u všech modelů nastavena vždy stejně, tedy přiřazen izotropní materiál, modul pružnosti uváděný výrobcem (tabulka č. 17), a skutečná tloušťka.

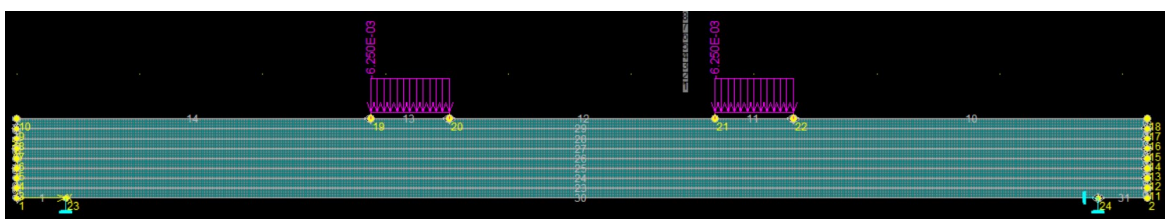
<sup>78</sup> Snímek ze softwaru při modelování, vlastní fotobanka

První model byl vytvořen tak, že lepený lamelový nosník byl tvořen pouze dvěma samostatnými makroprvky (obrázek č. 58). Jedním byla uhlíková tkanina a druhým byl samotný nosník z lepeného lamelového dřeva. Materiálovým vlastnostem makroprvku lepeného lamelového dřeva byl přiřazen modul pružnosti získaný pomocí Pilodyn, tedy konkrétně průměrná hodnota za všech hodnot získaných pro konkrétní nosník. Makroprvek uhlíkové tkaniny se u jednotlivých modelů neměnil a měl přiřazenou hodnotu modulu pružnosti udávanou výrobcem.



Obrázek č. 58 Model nosníku – nosník jako celek<sup>79</sup>

Dalším stupněm v přípravě jednotlivých modelů nosníků byla tvorba modelu nosníku, který byl tvořen jednotlivými lamelami (obrázek č. 59). Každá jednotlivá řada lamel byla tvořena jedním makroprvkem o délce 4,6 m, výšce 0,04 m a šířce 0,1 m. Tomuto makroprvku byl přiřazen průměrný modul pružnosti, získaný ze všech hodnot pro jednotlivou řadu lamel příslušného nosníku.



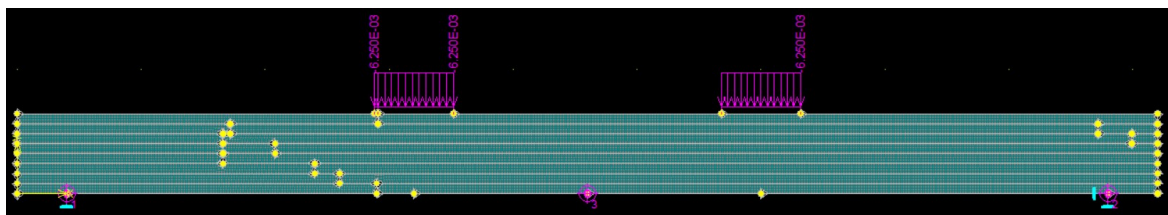
Obrázek č. 59 Model nosníku – nosník rozdělen po řadách lamel<sup>80</sup>

Třetí typ počítačového modelu byl vytvořen takovým způsobem, aby co nejvíce odpovídal skutečnému nosníku. Model byl tedy tvořen z mnoha makroprvků, z nichž každý rozměrově a polohově odpovídal jednotlivým segmentům lamel nosníku (obrázek č. 60). Tyto segmenty byly zaměřeny pro každý nosník, například viz tabulka č. 2. Každému seg-

<sup>79</sup> Snímek ze softwaru při modelování, vlastní fotobanka

<sup>80</sup> Snímek ze softwaru při modelování, vlastní fotobanka

mentu byla přiřazena průměrná hodnota modulu pružnosti získaná pomocí Pilodynů.



Obrázek č. 60 Model nosníku – nosník rozdělen na jednotlivé segmenty<sup>81</sup>

Za účelem dalšího rozlišení v rámci našeho šetření byly jednotlivé modely označeny čísly. Číslo 1 je model nosníku jako celku, číslo 2 je pro model nosníku s řadami lamel a číslo 3 je model nosníku s jednotlivými segmenty.

Všechny tři typy takto vytvořených modelů měly společné nastavení způsobu zatěžování, analytických kroků a monitorovaných bodů. Jak bylo zmíněno již výše v textu, nastavili jsme externí zatížení jako spojité zatížení ve třetinách rozpětí nosníku o velikosti 6,25 kN/m na délce 0,32 m. To v součtu tvořilo jeden zatěžovací krok, tedy 4 kN osově. Vlastní tíhu jsme uvažovali tak, že materiál měl nastavenou objemovou hmotnost příslušnou danému nosníku (tabulka č. 4).

Každý model měl nastaveny tři monitorovací body pro sledování posunů. Tyto body byly umístěny tak, aby odpovídaly poloze měřičů z čtyřbodové ohybové zkoušky, tedy ve třetinách a polovině rozpětí mezi podporami.

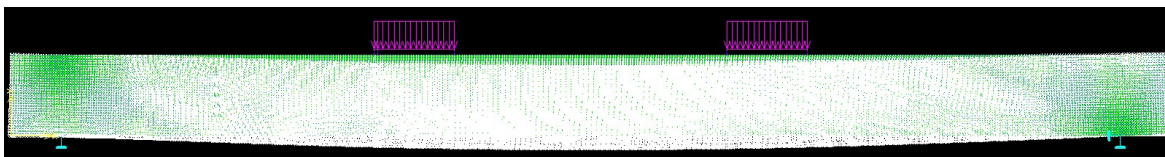
Po nastavení zatížení a monitorovaných bodů jsme zadali počet analytických kroků. Každý analytický krok odpovídal přírůstku zatížení 4 kN, tedy jednomu kroku zatížení z čtyřbodové ohybové zkoušky. Každý krok měl nastaven maximální počet iterací na 40 nebo do dosažení přesnosti na 0,1 mm. Počet těchto analytických kroků jsme nastavili tak, aby v součtu odpovídaly maximálnímu zatížení, které konkrétní nosník vydržel při čtyřbodové ohybové zkoušce (zaokrouhleno nahoru v násobku 4 kN).

Pro vzájemnou konfrontaci jednotlivých modelů jsme všechny tři typy vytvořili z hodnot a rozměrů odpovídajících nosníku č. 4. Výsledky z těchto různých modelů budou porovnány se skutečným chováním nosníku a bude vybrán ideální model pro řešenou úlohu.

Po nastavení společných vlastností jednotlivých modelů jsme přešli k samotnému

<sup>81</sup> Snímek ze softwaru při modelování, vlastní fotobanka

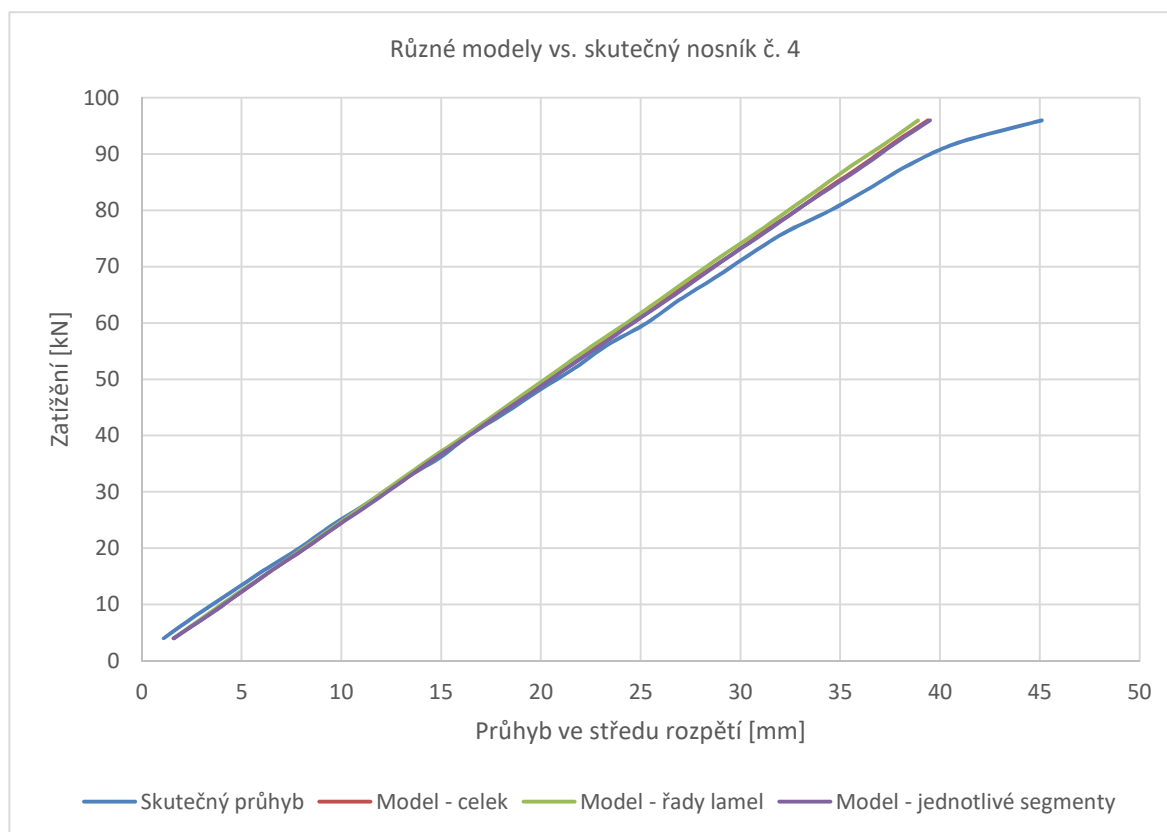
spuštění výpočtů a následnému porovnání výsledků. Z každého modelu byl výstupem kromě grafického znázornění tvaru nosníku pro každý zatěžovací krok (obrázek č. 61) také textový výpis posunů v monitorovaných bodech pro každý zatěžovací krok.



Obrázek č. 61 Vykreslení tvaru nosníku č. 4 pro 24. krok (96kN)<sup>82</sup>

Výsledné hodnoty z jednotlivých modelů jsme mohli následně konfrontovat a vybrat ten, který se nejvíce blíží skutečnému nosníku. Porovnány byly hodnoty průhybů v třetinách rozpětí mezi podporami a ve středu nosníku a dospěli jsme ke zjištění, že rozdíl mezi jednotlivými variantami konečně prvkových modelů je minimální. Modely také velmi korespondují s reálným průběhem zatěžovací zkoušky nosníku (graf č. 10).

Graf č. 10 Porovnání hodnot modulů pružnosti pro všechny nosníky



<sup>82</sup> Snímek ze softwaru při modelování, vlastní fotobanka



Rozdíly mezi jednotlivými modely byly v řádu desetin milimetrů, což je patrné například z porovnání průhybů ve středu nosníku z tabulky č. 18. Ačkoliv rozdíly mezi jednotlivými modely byly minimální, ukázalo se, že nejvíce korelujícím modelem je model 3, tedy model se segmenty. V tomto modelu se patrně projevil vliv rozdílných vlastností a polohy jednotlivých segmentů v nosníku a průhyby ve třetinách rozpětí více korespondovaly s reálnými průhyby. Proto jsme pro srovnání všech nosníků vybrali model typu 3, tedy ten, jenž i přes malé rozdíly mezi všemi typy modelů vykazoval nejvíce korespondující průběhy průhybů s reálným nosníkem, a to jak v polovině, tak i ve třetinách rozpětí.

Tabulka č. 18 Porovnání variant modelů a skutečného nosníku – průhyb ve středu nosníku  
č. 4

Zatěžovací síla	Skutečný průhyb nosník č. 4	Model 1 (celek)	Model 2 (lamely)	Model 3 (segmenty)
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
F	$W_{ISKUT}$	$W_{1FEM}$	$W_{2FEM}$	$W_{3FEM}$
4	1,1	1,6	1,6	1,6
8	2,7	3,3	3,2	3,3
12	4,4	4,9	4,8	4,9
16	6,1	6,5	6,5	6,5
20	7,9	8,2	8,1	8,2
24	9,5	9,8	9,7	9,8
28	11,3	11,4	11,3	11,5
32	13,0	13,1	12,9	13,1
36	14,9	14,7	14,5	14,7
40	16,4	16,3	16,2	16,4
44	18,2	18,0	17,8	18,0
48	19,9	19,6	19,4	19,7
52	21,7	21,3	21,0	21,3
56	23,3	22,9	22,6	23,0
60	25,3	24,6	24,3	24,6
64	26,9	26,2	25,9	26,3
68	28,7	27,8	27,5	27,9
72	30,4	29,5	29,1	29,5
76	32,2	31,1	30,8	31,2
80	34,5	32,8	32,4	32,8
84	36,5	34,4	34,0	34,5
88	38,4	36,1	35,6	36,2
92	40,9	37,7	37,3	37,8
96	45,1	39,4	38,9	39,5

Toto je možné sledovat i při konfrontaci jednotlivých modelů s realitou pomocí metody nejmenších čtverců (tabulka č. 19). Zde jsou porovnány sumy všech hodnot nejmenších čtverců mezi hodnotou skutečného průhybu a příslušnou hodnotou z modelu. Čím je hodnota v tabulce nižší, tím se model více přibližuje skutečnému nosníku. Je zde také vidět, že nejmenší hodnota přísluší modelu 3, jenž byl také vybrán pro naše další šetření.

Tabulka č. 19 Porovnání sum nejmenších čtverců všech hodnot průhybů pro nosník č. 4 a příslušných modelů

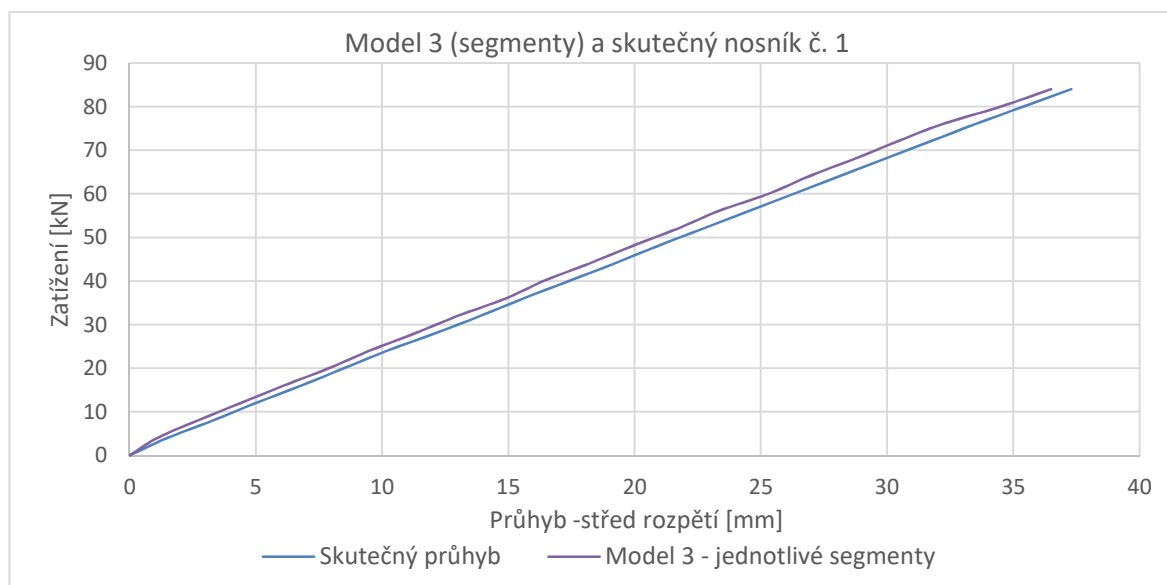
Název	Model 1 (celek)	Model 2 (lamely)	Model 3 (segmenty)
Suma nejmenších čtverců	60,9	79,5	57,6

## 8.2 Porovnání modelů s realitou

Po výběru nejvhodnějšího modelu pro konfrontaci se skutečnými nosníky jsme přešli k samotné tvorbě jednotlivých modelů. Ke každému zkoumanému modelu nosníku byla vytvořena jeho počítačová alternativa, jež byla následně porovnána s průběhy průhybů z ohybových zkoušek. V následujících grafech jsou pro srovnání zobrazeny průběhy ve středu rozpětí z modelů a ohybových zkoušek.

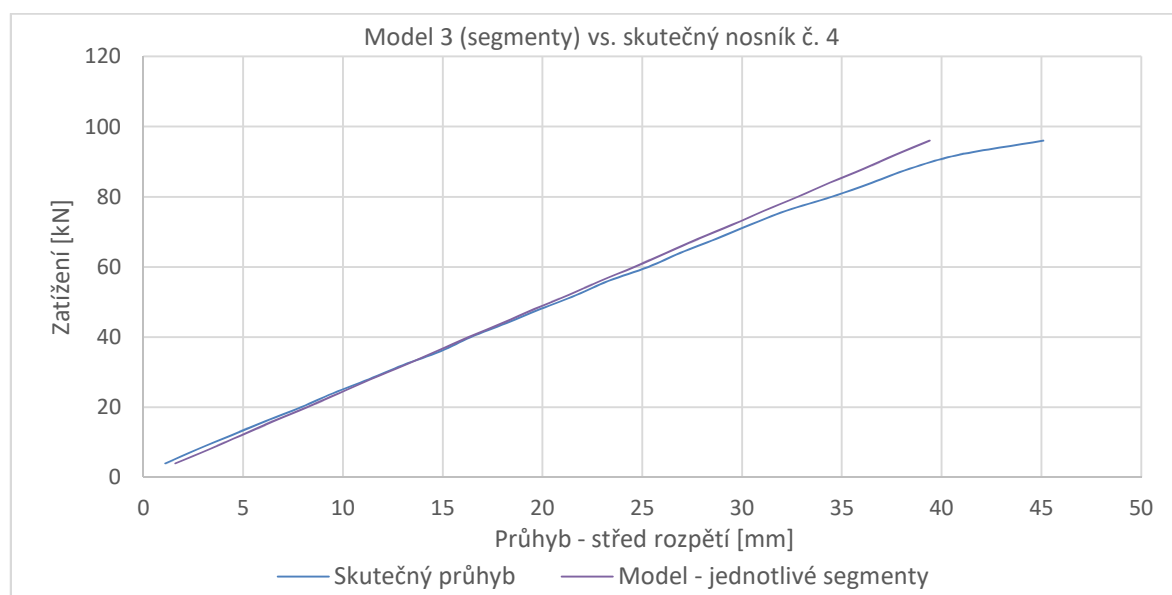
Model nosníku číslo jedna při srovnání poměrně přesně kopíruje skutečný průběh průhybů v celém rozsahu porovnávaných částí (graf č. 11). Rozdíly v průhybech se pohybují v rozmezí od 0,4 do 1,2 mm.

Graf č. 11 Porovnání modelu a skutečnosti nosníku č. 1 – průhyb ve středu rozpětí



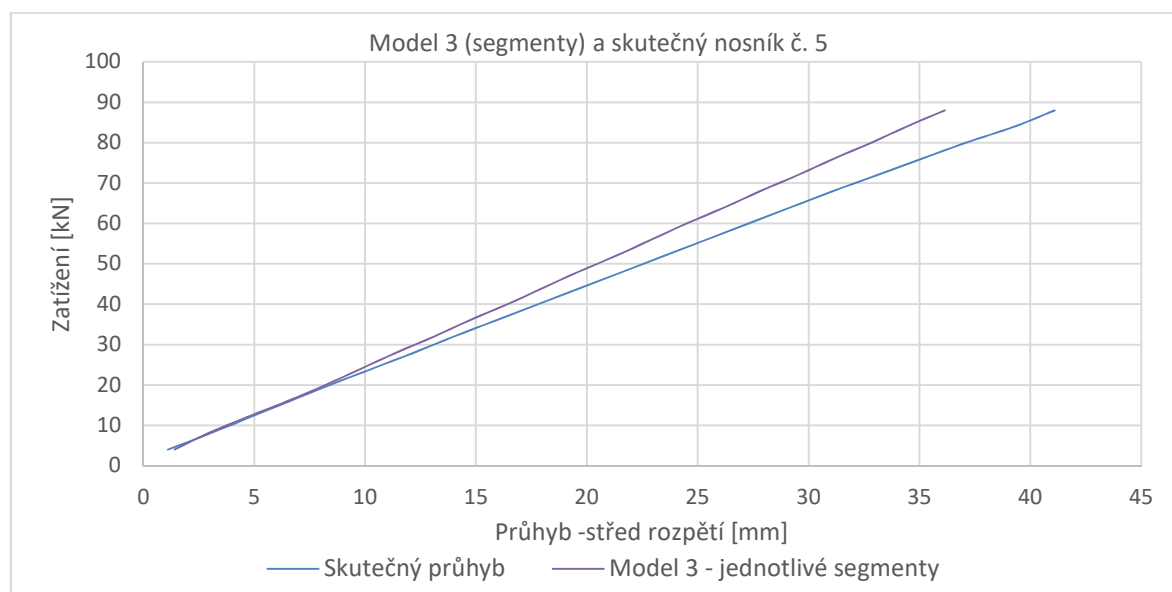
Při porovnání modelu nosníku č. 4 se skutečným průběhem je možné sledovat, že až do hodnoty zatížení 68 kN průběh poměrně přesně koreluje se skutečným průhybem (graf č. 12), rozdíly jsou patrné v rozmezí 0,1 až 0,9 mm. Po dosažení této hodnoty se skutečný průhyb zvětšuje více nelineárně a dosahuje rozdílu 0,9 až 5,7 mm.

**Graf č. 12 Porovnání modelu a skutečnosti nosníku č. 4 – průhyb ve středu rozpětí**



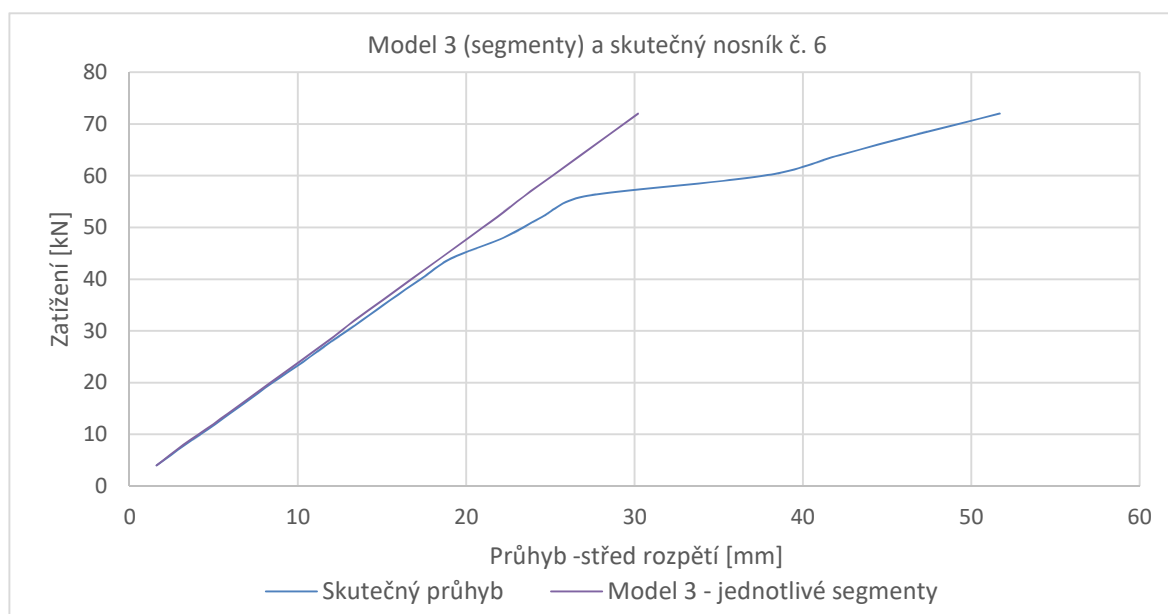
Při konfrontaci modelovaného a skutečného průběhu průhybu nosníku č. 5 je zřetelné, že v celém porovnávaném rozsahu se ve srovnání s ostatními nosníky rozdíl zvětšuje postupně (graf č. 13). V tomto případě se ukázal rozdíl v rozsahu 0,1 až 5 mm, přičemž největší rozdíl se projevil u největšího zatížení.

**Graf č. 13 Porovnání modelu a skutečnosti nosníku č. 5 – průhyb ve středu rozpětí**



Výsledné hodnoty při porovnání průběhů průhybů modelu a skutečnosti pro nosník č. 6 jsou specifické. Jak už bylo zmíněno výše v textu, měl tento nosník pravděpodobně výrobní vadu, jež po dosažení hodnoty zatížení 44 kN značně ovlivnila průběh průhybu (graf č. 14). Od dosažení této hodnoty zatížení již průhyb nenarůstá lineárně, jako je tomu u ostatních nosníků, ale zvětšuje se skokově až do porušení nosníku. Z tohoto důvodu budeme porovnávat průběhy pouze do zatížení o velikosti 44 kN. V této části byl rozdíl mezi modelem a skutečností 0 až 0,7 mm.

Graf č. 14 Porovnání modelu a skutečnosti nosníku č. 6 – průhyb ve středu rozpětí



V souhrnu je možné u všech modelů pozorovat určité podobnosti. Všechny modely vykazovaly největší rozdíly v průhybech oproti skutečnosti během prvních zatěžovacích kroků a následně ve fázi před samotným porušením nosníku. Větší rozdíly v začátku zatěžování byly zpravidla do velikosti zatížení 12 kN. Po dosažení tohoto zatížení se přírůstek průhybu ustálil a s poměrnou přesností kopíroval skutečný průběh. Rozdíly v počátku zatěžování je možné přisoudit rozdílu mezi modelem a skutečným nosníkem.

Model se při zatěžování chová lineárně již od počátku zatěžování, ale skutečný nosník může mít určité tvarové a výrobní nepřesnosti, například v místě uložení nosníku na podpory, drobná vůle ve spojích, nedokonalé lepené spoje, nehomogenita materiálů, skryté vady dřeva apod. V počátku zatěžování skutečného nosníku musí nejdříve dojít k vyrovnání těchto drobných nepřesností a následně k rovnoměrnému přerozdělení zatížení do celého objemu nosníku a aktivaci nosníku jako celku. Ačkoli tyto rozdíly v počátcích

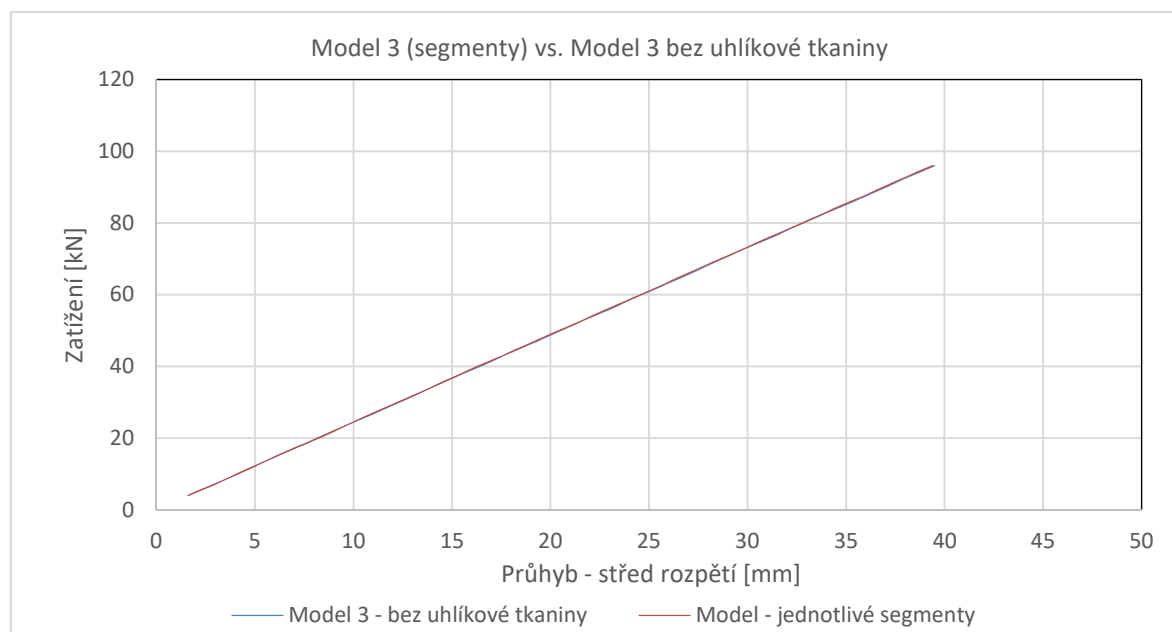
zatížení nabývaly hodnot v několika desetínách milimetrů, jednalo se při srovnání s modelem o rozdíly okolo 10 až 15 %. Po vyrovnání průběhů byly rozdíly maximálně do 4 %. Větší rozdíly mezi jednotlivými průběhy se znovu ukázaly až při posledních zatěžovacích krocích, krátce před porušením nosníku. V této fázi se nosník dostává na hranici únosnosti, a tak může lokálně docházet k poruchám celistvosti nosníku. To se následně projeví na průběhu průhybů, jež mohou narůstat skokově nebo s rychlejším přírůstkem než u modelu.

Dalším společným znakem je, že hodnoty skutečného průběhu průhybů nosníků byly vždy větší než u modelu. Toto neplatí pouze u výše popsaného začátku zatěžování, kde tomu u dvou nosníků bylo opačně (graf č. 12 a č. 13).

Z tohoto pohledu je možné konstatovat, že takto vytvořené modely pro tuto úlohu se při zatěžování chovají velmi podobně jako skutečné nosníky a s vysokou přesností odpovídají naměřeným průběhům. Modely nosníků s výztužnou vrstvou z uhlíkové tkaniny tak stabilně plní svojí funkci a je možné je použít pro další práci s tím, že rozdíl mezi modelem a skutečností je pouze v řádu desetín milimetru.

V další fázi ověřování modelů bylo nutné ověřit a zjistit, jaký má takto namodelovaná výztužná uhlíková tkanina vliv na velikost průhybů. Z tohoto důvodu jsme vytvořili model nosníků, který byl vytvořen bez vrstvy z uhlíkové tkaniny. Průběhy průhybů z tohoto modelu jsme mohli porovnat s modelem s výztužnou tkaninou a specifikovat rozdíly (graf č. 15).

**Graf č. 15 Porovnání modelů 3 s uhlíkovou tkaninou a bez ní – nosník č. 4**



Z tohoto srovnání lze pozorovat, že rozdíl mezi modelem s tkaninou a bez ní je minimální. V části s největším rozdílem vykazuje model bez tkaniny průhyb větší pouze o 0,1 mm. Stejným způsobem byly konfrontovány všechny modely nosníků a největší rozdíl mezi průhyby činil 0,3 mm. Tímto srovnáním se ukázalo, že vliv samotné uhlíkové tkaniny na zvýšení únosnosti, případně na omezení průhybu, je podle modelu minimální, až zanedbatelný.

## 9 ZÁVĚRY

Pro zjištění lokálních modulů pružnosti dřeva ve směru vláken byla vybrána nedestruktivní metoda zarážení trnu. Jako jediná je použitelná na stávajících konstrukcích a zároveň je schopná zachytit rozdílné materiálové parametry mezi úseky lamel, ohraničenými zubovitými spoji.

Materiálové parametry výztužné tkaniny byly v MKP modelech použity dle hodnot uváděných výrobcem. Provedené tři sady tahových zkoušek uhlíkové tkaniny ukázaly problém v místě uchycení vzorků do čelistí trhacího stroje. Poškození nastalo vždy v tomto místě, namísto požadovaného přetržení vzorku. Šířku testovaných vzorků by bylo nutné ještě výrazně snížit, oproti pěti milimetrům, použitým v poslední sérii.

Destruktivní zkoušky nosníků s nalepenou výztužnou tkaninou provedené čtyřbodovým ohybem prokázaly malý vliv vyztužení na průhyb a pevnost, ale zásadní vliv na rychlost kolapsu nosníků. Vyztužené nosníky kolabují desítky sekund, nevyztužené desetiny sekundy.

Byla prokázána velmi dobrá shoda mezi měřenými průhyby nosníků a jejich konečně prvkovými modely sestavenými v programu ATENA.

## 10 POUŽITÁ LITERATURA A ZDROJE

- [1] PECINA, P., PECINA, J. Materiály a technologie - dřevo. Brno: Masarykova Univerzita, 2006. 132 s. ISBN 80-210-4013-0.
- [2] BERGRAM, R., Wood Handbook, Wood as an Engineering Material (AllChapters). Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: 508 p. 2010.
- [3] ANGST, V., et al. Handbook 1: Timber structures. 2008. 242 p.
- [4] PROKOPOVÁ, I., Makromolekulární chemie. Praha: Vydavatelství VŠCHT Praha, 2007. 207 s. ISBN 978-80-7080-662-3.
- [5] KOŽELOUH, B. Dřevěné konstrukce podle eurokódu 5, Step 1. Zlín: KODR, 1998. 460 s. ISBN 80-238-2620-4.
- [6] GREGOR, R. Materiály a technologie: dřevo a materiály ze dřeva. Brno: Univerzita Jana Evangelisty Purkyně, 1989. 196 s.
- [7] BÍLEK, V. Dřevostavby: Navrhování dřevěných vícepodlažních budov. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. 251 s. ISBN 80-01-03159-4.
- [8] AUGUSTIN, M., et al. Handbook 2: Design of Timber Structures according to EC 5. 2008. 130p.
- [9] ČSN EN 1995-1-1: „Národní příloha – Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla – Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby“.
- [10] EMERSON, Robert N., et al. Non destructive Evaluation Techniques for Timber Bridges. [online]. 1999 [cit. 2013-12-14]. Dostupné z: <http://www.ndt.net/article/v04n11/emerson/emerson.htm>.
- [11] ROSS, R. and PELLERIN, R. Non destructive testing for assessing wood members in structures. Madison: WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1994. 42 p.
- [12] HEŘMÁNKOVÁ, V. BI03 – Diagnostické metody ve stavebnictví [online]. [cited 2013-08-20] Brno, 2013. Dostupné z: <http://www.szk.fce.vutbr.cz/vyuka/BI03/BI03%20D%C5%99evo%202013.pdf>.
- [13] TANNERT, Thomas, Ronald W. ANTHONY, Bohumil KASAL, Michal KLOIBER, Maurizio PIAZZA, Mariapaola RIGGIO, Frank RINN, Robert WIDMANN a Nobuyoshi YAMAGUCHI. In situ assessment of structural timber using semi-destructive techniques. Materials and Structures. s. -. DOI: 10.1617/s11527-013-0094-5. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1617/s11527-013-0094-5>



- [14] CERALDI, C., V. MORMONE a E. RUSSO ERMOLLI. Resistographic inspection of ancient timber structures for the evaluation of mechanical characteristics. *Materials and Structures*. 2001, vol. 34, issue 1, s. 59-64.
- [15] ASTM E1876 – 09. Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006. DOI 10.1520/E1876-09. Dostupné z: <http://www.astm.org/Standards/E1876.htm>.
- [16] BILOŠOVÁ, A. Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část Modální zkoušky. vyd. 1. Ostrava, 2012. 129 p. ISBN Pending.
- [17] ČSN EN 14080: „Dřevěné konstrukce – Lepené lamelové dřevo – Požadavky“.
- [18] EWINS, D. *Modal Testing - Theory, Practice and Application*, England: Research Studies Press Ltd., 2000. 400 s. ISBN 0-86380-218-4.
- [19] KUKLÍK, P. and MELZEROVÁ, L. *Kompozitní materiály na bázi dřeva*. Praha: ČVUT Praha, 2011. 76 s. ISBN 978-80-01-04958-7.
- [20] MELZEROVÁ, L., KUKLÍK, P., ŠEJNOHA, M. Variable local moduli of elasticity as inputs to FEM-based models of beams made from glued laminated timber 2012 *Technische Mechanik*, 32 (2), p. 425-434.
- [21] MELZEROVÁ, L., ŠEJNOHA, M. Interpretation of results of penetration tests performed on timber structures in bending. 2014 *Applied Mechanics and Materials*, 486, pp. 347-352.
- [22] KOŘÍNEK, Z. 2. vlákna [Online]. Nedatováno. Str. 3-68. [cit. 2014-07-05]. Dostupné z [www: <http://mujweb.cz/zkorinek/vlakna.pdf >](http://mujweb.cz/zkorinek/vlakna.pdf).
- [23] HORSKÁ, P. Příprava polymerních kompozitů: skleněné vlákno/polyesterová pryskyřice [online]. 2009. [cit. 2014-7-05]. Dostupné z [www: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/1012/10336/BP%20all.pdf?sequence=1&isAllowed=y>](https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/1012/10336/BP%20all.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- [24] AGARWAL, B., BROUTMAN, L. *Vláknové kompozity*. Státní nakladatelství technické literatury. Praha, 1987, 294 s.
- [25] REINPRECHT, L., ŠTEFKO, J.: *Dřevěné stropy a krovky – typy, poruchy, průzkumy a rekonstrukce*. ABF – ARCH Praha, 2000, 242 s.
- [26] REINPRECHT, L., ŠTEFKO, J., *Dřevěné stropy a krovky, typy, poruchy, průzkumy a rekonstrukce*. ABF, a.s., Nakladatelství ARCH, Praha, 2000, 252 str., ISBN 80-86165-29-9.

- [27] KUKLÍK, P. and MELZEROVÁ, L., Vysokopevnostní výztužné lamely v nosnících z lepeného lamelového dřeva [online]. 2012. [cit. 2014-07-05]. Dostupné z www: <<http://stavba.tzb-info.cz/drevene-a-ocelove-konstrukce/8776-vysokopevnostni-vyztuzne-lamely-v-nosnicich-z-lepeneho-lameloveho-dreva>>.
- [28] DE LUCA, V. and MARANO, C., Prestressed glulam timbers reinforced with steel bars. Potenza, Italy, 2011, at Construction and Building Materials 30 (2012), str. 206-217.
- [29] TINGLEY, D., A., CEGELKA, S. New Compression Based Design Principals for Reinforced Glulams. Materials for the New Millennium, 4th Materials Engineering Conference. 1996, str. 1479-1491.
- [30] SIKA s.r.o. [Online]. 2010 [cit. 2014-07-05]. Dostupné z www: [http://cze.sika.com/content/dam/Czech\\_Republic/Main/01\\_General/cz\\_news/2010/20100525\\_cz\\_con\\_velkypartner.pdf](http://cze.sika.com/content/dam/Czech_Republic/Main/01_General/cz_news/2010/20100525_cz_con_velkypartner.pdf).
- [31] POLÁK, M. Experimentální ověřování konstrukcí 10. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. 155 s. ISBN 80-01-02032-0.
- [32] ČSN EN 301: „Fenolická a aminová lepidla pro nosné díly dřevěných konstrukcí – Klasifikace a technické požadavky“.
- [33] KLAPÁLEK, Pavel. Vliv rozložení suků na pevnost nosníků z lepeného lamelového dřeva. Praha, 2013. Diplomová práce (rkp). ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra mechaniky. Vedoucí práce Lenka Melzerová.
- [34] ČSN EN 385: „Konstrukční dřevo nastavované zubovitým spojem – Požadavky na užité vlastnosti a minimální výrobní požadavky“.
- [35] ČSN EN 386: „Lepené lamelové dřevo – Požadavky na užité vlastnosti a minimální výrobní požadavky“.
- [36] ČSN EN 1194: „Dřevěné konstrukce – Lepené lamelové dřevo – Třídy pevnosti a stanovení charakteristických hodnot“.
- [37] ČSN EN 1995-1-2: „Národní příloha – Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru“.
- [38] ČSN EN 1995-2: „Národní příloha – Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 2: Mosty“.
- [39] BKSV. [online]. [cit. 2013-12-14]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/Products/transducers/vibration/impact-hammers/8206?tab=accessories>.

- [40] BKSV. [online]. [cit. 2013-12-14]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/Products/transducers/vibration/accelerometers/accelerometers/4519003?tab=overview>.
- [41] BKSV. [online]. [cit. 2013-12-14]. Dostupné z: <http://www.measuretronix.com/files/bruel-and-kjaer/pulse-3560-product-data.pdf>.
- [42] REINPRECHT, L., Rekonstrukce dřevěných prvků protézováním, příložkováním a ukotvením do ocelových konzol [online]. 2008. [cit. 2014-07-05]. Dostupné z [www: <http://www.asb-portal.cz /stavebnictvi/drevostavby/rekonstrukce-drevenych-prvku-protezovanim-prilozkovanim-a-ukotvenim-do-ocelovych-konzol>](http://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/drevostavby/rekonstrukce-drevenych-prvku-protezovanim-prilozkovanim-a-ukotvenim-do-ocelovych-konzol).
- [43] ČSN 73 2030: „Zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí. Společná ustanovení“.
- [44] ČSN EN 408 Dřevěné konstrukce – Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo – Zjišťování některých fyzikálních a mechanických vlastností, Český normalizační institut.