



**FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ**  
**Katedra zpracování dřeva**

**Stanovení pevnostních vlastností konstrukčního  
dřeva vyztuženého kompozitem s uhlíkovými vlákny  
destruktivní metodou**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Autor:  
Vedoucí diplomové práce:  
Konzultant:

Bc. Petr Veith  
Ing. Martin Böhm, Ph.D.  
Ing. Přemysl Šedivka, Ph.D.

**2011**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a s použitím uvedené literatury.

Bc. Petr Veith

V Praze, dne 20.5.2011

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Martinu Böhmovi, Ph.D za zájem a věcné připomínky k tvorbě a organizaci práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Přemyslu Šedivkovi, Ph.D za čas, který mi v rámci diplomové práce věnoval. Děkuji firmě Sika CZ za poskytnutí uhlíkových vláken. Děkuji své rodině za podporu během studia.

Česká zemědělská univerzita v Praze  
Katedra zpracování dřeva

Fakulta lesnická a dřevařská  
Akademický rok: 2010/2011

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

pro: **Bc. Petr Veith**

obor: Dřevařské inženýrství

Název tématu: **Stanovení pevnostních vlastností konstrukčního dřeva  
vyztuženého kompozitem s uhlíkovými vlákny destruktivní  
metodou.**

Název tématu v anglickém jazyce: Estimation of strength properties of structural wood  
reinforced by carbon composite by destructive method.

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Literární rozbor metod vyztužování dřevěných konstrukčních prvků.
3. Stanovení cíle práce a výběr vhodného vlákna pro vyztužování.
4. Metodologický postup realizované zkoušky stanovení pevnosti konstrukčních prvků vyztužených kompozitem.
5. Zpracování dat a prezentace výsledků.
6. Závěr.

Rozsah grafických prací: Max. 20

Rozsah průvodní zprávy: 50 – 80 stran

Seznam odborné literatury:

- Kuklík, P., 2002: Timber structures 10, ČVUT v Praze, ISBN 80-01-02639-6.
- Brunner M.; Schnueriger M., 2001: Timber beams strengthened with prestressed fibres Delamination, Final report from COST action E13, Wood adhesion and glued products.
- Melnick S., 2000: Fibre Reinforced Polymer Market Expands. Structure. Springerlinck, s. 42 – 45.
- Minster J., 2006: Aplikace vláknových polymerních kompozitů ve stavebnictví, Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR.
- Minster J., Hristová , 2006: Moisture effects on long-term relaxation and creep characteristics of an epoxy resin. Proceed. 11<sup>th</sup> International Conference on Mechanics and Technology of Composite Materials, Sofia, October 2 – 4, s. 257 – 263
- Mufti A.; Erki M.; Jaeger L., 1991: Advanced Composite Materials with Application to Bridges. Montreal, The Canadian Society
- Ozel M.; Bank L., 2000: Mechanical testing of Pultruded FRP bars and plates for determination of In-plane Engineering Constants. Dept of Civ. And Envir. Engrg., University of Wisconsin, Madison, WI.
- ČSN EN 380 Dřevěné konstrukce – Zkušební metody – Všeobecné zásady pro statické zatěžovací zkoušky.
- ČSN EN 408 Dřevěné konstrukce. Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Böhm, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Ing. Přemysl Šedivka, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 5.1.2010

Termín odevzdání diplomové práce: duben 2011



.....  
Vedoucí katedry



.....

Děkan

V Praze dne .....

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce je zaměřena na vyztužování masivního dřeva uhlíkovými vlákny za použití dvou různých typů lepidel. V praktické části diplomové práce byly provedeny zkoušky ve čtyřbodovém ohybu, posuzovány a porovnávány výsledky některých pevnostních parametrů vyztužených a nevyztužených nosníků. Vlákna byla vybrána s ohledem na druh namáhání, jako nejvhodnější byla na základě vlastností vybrána uhlíková vlákna, která ve formě tkaniny poskytla firma Sika CZ, s. r. o. Bylo poskytnuto také speciální lepidlo Sikadur 330, které bylo vyvinuto k lepení právě zmíněných vláken ve formě tkaniny. Druhé lepidlo bylo na bázi polyuretanu (lepidlo na dřevo D4 od firmy Zwaluw). Byly odzkoušeny tři soubory nosníků po deseti kusech, zkoušky a potřebné postupy byly provedeny dle příslušných norem. Cílem je relevantním způsobem vypovídat na základě zkoušek o platnosti hypotézy, že soubory vyztužených nosníků mají vyšší pevnost.

## **Abstract**

The thesis is focused on massive wood reinforcing with carbon fibres by using two different types of adhesives. In the practical part of the thesis the four – point bending tests were done and the results of some parameters of strength of reinforced and unreinforced beams were assessed and compared. Fibres were selected with respect to the type of strain and carbon fibres were chosen as the most appropriate type. These fibres and a special adhesive named Sikadur 330 were provided by Sika CZ, s. r. o. which developed this adhesive especially for bonding of this fibres type. The second adhesive was polyurethane – based (wood adhesive named D4 made by Zwaluw). Three sets of ten pieces of beams were tested and the necessary tests and procedures were done according to relevant norm. The aim of these tests is to demonstrate that the sets of reinforced beams have greater strength than the unreinforced sets of beams.

## OBSAH

<b>1. ÚVOD</b> .....	1
<b>2. LITERÁRNÍ ROZBOR METOD VYZTUŽOVÁNÍ DŘEVĚNÝCH KONSTRUKČNÍCH PRVKŮ</b> .....	3
2.1 MKP model nosníků z lepeného lamelového dřeva.....	5
2.2 Numerický model lepených lamelových nosníků vyztužených lamelou ze skelných vláken.....	11
2.3 Návrhový model pro nosníky z lepeného lamelového dřeva vyztuženého FRP.....	18
2.4 Vyztužování dřeva uhlíkovými vlákny přilepením.....	22
2.5 Dřevěné nosníky vyztužené předpjatými vlákny: delaminace.....	41
<b>3. STANOVENÍ CÍLE A VÝBĚR VHODNÉHO VLÁKNA PRO VYZTUŽENÍ</b> .....	51
3.1 Uhlíková vlákna (vlákna polykrystalická).....	52
3.2 Vlákna skleněná (vlákna amorfní).....	53
3.3 Vlákna aramidová (vlákna syntetická).....	54
<b>4. METODIKA</b> .....	56
<b>5. ZPRACOVÁNÍ DAT A PREZENTACE VÝSLEDKŮ</b> .....	64
5.1 Postup.....	64
5.2 Výsledky.....	65
5.3 Shrnutí výsledků.....	72
<b>6. ZÁVĚR</b> .....	73

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých zkratk

Seznam obrázků, tabulek a grafů

Přílohy

## 1. ÚVOD

Vyztužování materiálů či staveb není lidem cizí, vždyť už ve Starověkém Egyptě tamější obyvatelé vyztužovali cihly slámou, aby zvýšili jejich pevnost. Jedná se v podstatě o materiál složený ze dvou nebo více substancí, které mají za úkol výslednému výrobku dodat nové vlastnosti. Úkol jedné substance v materiálu je většinou zajistit pevnost, druhá slouží jako pojivo. Takový produkt se obecně nazývá kompozitní materiál. Nejznámějším a nejvýznamnějším kompozitním materiálem lze nazvat železobeton.

V šedesátých letech dvacátého století se technologové a výrobci začínali pomalu zajímat o výrobu kompozitních vláken, ač např. první uhlíkové vlákno bylo vyrobeno již v roce 1880 a použito ke zhotovení Edisonovy žárovky [15]. Vlákná uhlíková, aramidová, čedičová, skleněná, azbestová, PVA a další se nazývají kompozitní vlákna. Jedná se tedy o materiál anizotropní. Vlastnosti jako vysoká pevnost v tahu, vysoká tuhost a nízká hmotnost nám umožňují široké spektrum použití.

Charakteristiky dřeva jsou velice variabilní a i jeho anizotropní chování se u navrhování složitějších staveb stává často nevýhodou z hlediska únosnosti a tuhosti. Proto se materiály s vysokou pevností využívají jako vyztužení nejen pro dřevěné konstrukční prvky. V našem oboru potažmo v oboru stavebním se nejčastěji pro aplikace vyztužování uvažuje s vlákny uhlíkovými, aramidovými a skleněnými [11]. Vyskytují se ve formě desek, lamel, tyčí nebo tkanin a vlastnosti, díky nimž jsou v současné době tolik využívány, mají pouze ve směru vláken. Tato metoda se aplikuje také na objekty zasažené vlivem stárnutí, chyb projektování, změn zatížení nebo poničení a je potřeba je zesílit. Vysokopevnostními materiály je možné vyztužit nosníky, sloupy, podlahy a mnoho dalších stavebních prvků.

U nás jako první uvedla trend zesilování konstrukcí pomocí lepených uhlíkových lamel či tkanin firma Sika CZ, s. r. o. v roce 1996. Jedná se o dodatečné vyztužení uhlíkovými vlákny formou lepení, tato metoda se na našem trhu používá převážně pro železobetonové konstrukce. Nedostatky, které prosté lepení na konstrukce přináší, jsou, že jejich pevnost je



využívána jen ze 40 % bezpečné únosnosti. Aby se docílilo vyššího využití vláken, existují dvě možnosti realizace. První lze využít např. u zesilování mostních konstrukcí, kdy je potřeba eliminovat stávající průhyb buď dočasným přizvednutím konstrukce, nebo odstraněním stávajícího stálého zatížení. Druhou možností lepšího využití pevnosti vláken je jejich předpínání. V současné době se firma zabývá i systémem použitelným pro předpínání dřevěných ohýbaných prvků a i tato metoda předpínání uhlíkových vláken je plně funkční.

[17]

Popularita dřevěných konstrukcí s využitím lepeného lamelového dřeva se při pohledu do posledního desetiletí zvyšuje. Lepené nosníky mají oproti masivnímu dřevu lepší fyzikální vlastnosti, jako jsou rozměry a homogenita. Vzhledem k tomuto faktu bude druhá kapitola diplomové práce věnována třem výzkumům týkajících se lepených lamelových nosníků, jejich modelům vytvořených metodou konečných prvků jak vyztužených tak nevyztužených a jejich typům porušení. Ostatní dva výzkumy, které budou uvedeny v další části druhé kapitoly, se zaměřují na vyztužování dřevěných prvků a nosníků z masivu, testování v tahu i ohybu při respektování různých vlivů a na problematiku delaminace. V třetí kapitole se budu věnovat výběru vhodného vlákna pro vyztužení nosníků na základě vlastností vláken. Jak již v úvodu bylo deklarováno, v úvahu budou brána vlákna uhlíková, aramidová nebo skelná. Postup realizovaného průzkumu bude popsán v kapitole čtvrté (rozměry vzorků, vlastnosti materiálů, typy použitých lepidel atd.) a na jeho základě v kapitole následující proběhne zpracování dat a prezentace výsledků pomocí statistických metod.

### **Cíle práce**

Cílem této diplomové práce je prozkoumat chování nosníků z masivního dřeva vyztužených novým typem uhlíkových vláken ve formě tkaniny za použití dvou různých typů lepidel, porovnat je s prvky nevyztuženými a statisticky je zanalyzovat. Postup bude realizován podle příslušných norem. Závěry z průběhů zkoušek by měly relevantním způsobem vypovídat o platnosti hypotézy, že soubory vyztužených nosníků mají vyšší pevnost.

## 2. LITERÁRNÍ ROZBOR METOD VYZTUŽOVÁNÍ DŘEVĚNÝCH KONSTRUKČNÍCH PRVKŮ

Při navrhování vyztužování prvků HSF materiály je potřebné uvažovat se všechny stavy zatěžování, které mohou nastat. Je potřebné, aby návrh splňoval cílený efekt vyztužení a možnost přerozdělení vnitřních sil v posíleném prvku. Navrhování se provádí na základě modelů vycházejících z analýz a částečně na základě zkušeností v této problematice. Přirozeně se jako vstupní hodnota uvažuje prvek před vyztužením. [18]

Dřevo je organický materiál, který se vytváří za různých podmínek na různých stanovištích, což ovlivňuje jeho vlastnosti. Abychom eliminovali anizotropii dřeva, vyrábí se lepené nosníky z malých prvků, tzv. lamel o stanovených rozměrech. Hlavním přínosem tohoto přístupu je, že pro každý prvek lepeného lamelového nosníku lze stanovit jednotlivé parametry a následně na jejich základě vymodelovat nosník. Stejně rozměry jako model má také skutečně vyrobený nosník. Cílem výzkumu v kapitole 2.1 je porovnat chování vymodelovaného nosníku s reálným. Tato metoda se nazývá metoda konečných prvků (MKP) [2] a má uplatnění také v modelaci fiktivních nosníků vyztužených vysokopevnostními vlákny, jak ilustruje další výzkum v kapitole 2.2 [12].

V tomto výzkumu se autoři Vídeňský a Melzerová zabývají porovnáním modelů nosníků vyztužených skleněnými a uhlíkovými vlákny a skutečných lepených nosníků vyztužených stejnými kompozitními vlákny. I zde byla použita metoda konečných prvků. Na rozdíl od předchozího výzkumu bylo bráno v úvahu také rozmístění zubovitých spojů segmentů po délce nosníku. Vlastnosti jednotlivých lamel byly získány sklerometrickou a dynamickou metodou, následně byly vytvořeny modely a porovnány s odzkoušenými skutečnými nosníky stejných rozměrů. [12]

Výzkum popsáný v kapitole 2.3 je zaměřen na návrhový model pro lepené lamelové nosníky vyztužené vysokopevnostními vlákny. Autoři Kuklík, Melzerová a Vídeňský řeší v návrhu zejména typy vyztužení průřezu nosníku a módy porušení. Návrhový model má za

úkol převést výpočet nosníků vyztužených na výpočet nosníků nevyztužených za použití geometrických součinitelů a obecných součinitelů. [9]

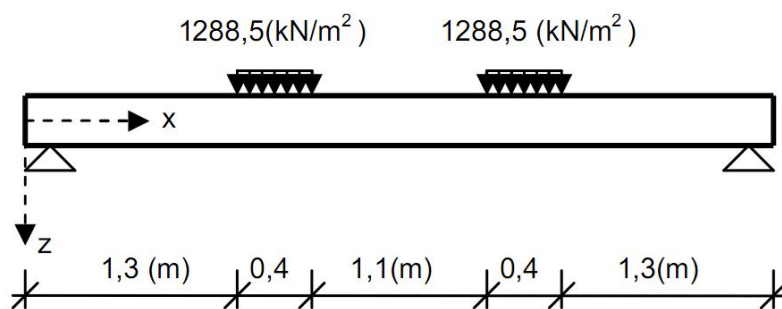
Švýcarské federální laboratoře provedly výzkum spojování dílců dřeva pomocí HSF laminátů v tahu a ohybu (kapitola 2.4). Zkoušky se prováděly ve dvou fázích, v první části výzkumu se autoři Brunner a Schnueriger zaměřili na zkoušení prototypů – malých vzorků, jež byly testovány pouze v tahu. Testy měly odhalit možnosti a proveditelnost spojování dílců dřeva v závislosti na různých parametrech, jako jsou druh lepidla, kvalita ploch před lepením, tloušťka vrstvy lepidla atd. V druhé fázi byly prováděny zkoušky na konstrukčních prvcích s větší velikostí. Na místo dražších uhlíkových vláken byly použity kompozity se skleněnými vlákny. Zde se již prvky testovaly jak v tahu, tak v ohybu. V úvahu byly brány parametry, které by mohly mít vliv na kvalitu spoje. Hodnoceno bylo také vystavení vlivu klimatu a dlouhodobému zatížení – tečení. Dále byly hodnoceny různé druhy lepidel, jak komerčně vyrobená, tak lepidla upravená pro konkrétní aplikace, jejich teploty skelného přechodu, teploty použitelnosti a další. Pro všechny vzorky bylo použito masivní smrkové dřevo. [5]

Poslední výzkum zařazený do této diplomové práce se týká problematiky delaminace (autorem Steiger). Jelikož pevnost vysokopevnostních vláken není při prostém přilepení v tažené části nosníku plně využita, jak bylo zmíněno v úvodu, byla realizována myšlenka tyto vlákna předepnout. Pak by se jejich pevnost lépe využila a zároveň by se množství vláken snížilo. Použití velkých předpínacích sil je problém, protože přenos síly z vláken na koncích nosníku do hlavní části nosníku může způsobit právě zmíněnou delaminaci – rozvrstvení. Proto se výzkum zabýval dvěma tématy, která by mohly problém delaminace eliminovat. První část výzkumu se zaměřuje na použití tvárného lepidla, které by přenášené síly rozložilo na větší plochu nosníku, druhou částí bylo využití zařízení na předpínání výztuže u dřevěných konstrukcí, které bylo vyvinuto za účelem předpínání výztuže u betonových konstrukcí. Byla určena vhodná lepidla a odzkoušena na slepených částech dřevěných prvků v tahu a smyku. Pro zjištění, zda je možné připojit vlákna na nosník bez efektu delaminace, byly zkoušeny nosníky s přilepenými předpjatými vlákny v ohybu. [10]

## 2.1 MKP model nosníků z lepeného lamelového dřeva [2]

Autoři popisují tvorbu jednoho MKP modelu z dvaceti nosníků z lepeného lamelového dřeva. Dvacet nosníků s rozměry skutečné konstrukce bylo komerčně vytvořeno. Během zatěžovacích testů, které probíhaly až do porušení nosníků, byla sledována řada různých parametrů. Materiálové charakteristiky jednotlivých lamel byly určeny nezávisle. Díky těmto skutečnostem je možné model MKP vytvořit velmi přesně, dále se testovala shoda mezi výsledky MKP modelu a skutečně zjištěnými parametry na reálném nosníku. [2]

Obr.č. 1: Teoretický model



(Kuklík, Melzerová, Vídeňský, 2007 [2])

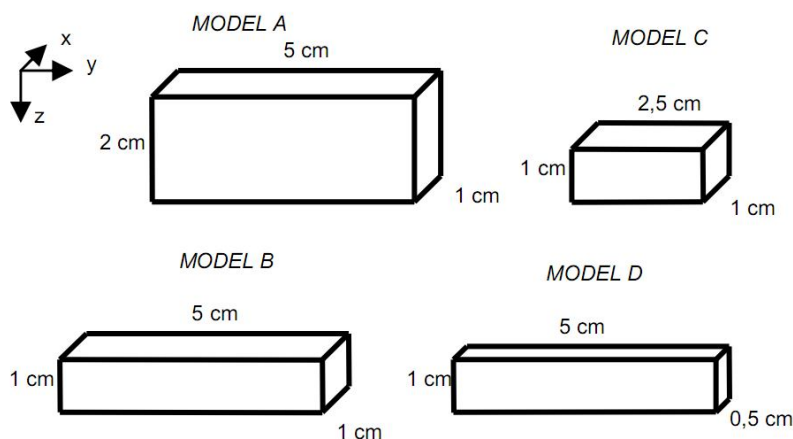
Zkoušené nosníky byly podepřeny jako prosté a zatíženy dvěma břemeny ve třetinách rozpětí. Velikost zatížení pro počáteční testy byla určena přesnou hodnotou maximální dosažené síly při porušení z celého souboru nosníků. Břemena byla rozprostřena do plochy. Velikost jedné síly  $F = 51,54 \text{ kN} = 1288,5 \text{ kN/m}^2$ , jelikož je rozložena po celé šířce prvku  $0,1$  metru a délce roznášecí plochy  $0,4$  metru. Síla odpovídá maximální síle pro reálné nosníky při porušení daného nosníku a bude užita ve všech zkouškách MKP modelu. [2]

## Stanovení velikosti prvku

Pro jeho stanovení jsou zjištěny srovnávací parametry ve středním průřezu. Jedná se o parametry normálového napětí a průhybu. Jejich srovnání parametrů popisuje tabulka 1. V obrázku 2 jsou vyobrazeny lokální souřadnicové systémy jednotlivých prvků. „Materiál je modelován jako ortotropní s parametry  $E_x$  (tento parametr se bude u reálných nosníků měnit),  $E_y$ ,  $E_z$ ,  $G_{xy}$ ,  $G_{yz}$ ,  $G_{xz}$ ,  $\nu_{xz}$ ,  $\nu_{xy}$ ,  $\nu_{yz}$ . Pro představu je uvedena i hodnota srovnávacích parametrů, které vycházejí ze stejného, ale izotropního nosníku s modulem pružnosti totožným s  $E_x$  v MKP modelu a vypočteným empiricky, bez použití počítače.“ [2]

„Základním konečným prvkem je kvádr ( $x = 1$  cm,  $y = 5$  cm,  $z = 2$  cm), což je pro celý nosník 14 400 prvků. Model složený z těchto kvádrů je zde označen jako MODEL A. Dalším rozdělením základního prvku vznikne postupně MODEL B, C, D jak je naznačeno na obrázku 2. Vlastnosti jednotlivých modelů shrnuje tabulka 1.“ [2]

Obr.č. 2: Velikosti konečných prvků



(Kuklík, Melzerová, Vídeňský, 2007 [2])

Tab.č. 1: Porovnání jednotlivých modelů

Model	Tisíc prvků	Velikost souboru	Doba výpočtu	Průhyb w	Ohybové napětí $\sigma_x$
	[tis]	[MB]	[s]	[mm]	[MPa]
A	14,4	450	48	51,6987	40,8796
B	28,8	501	99	51,7361	40,8793
C	57,6	572	283	51,7356	40,8794
D	57,6	585	264	51,8657	40,8793
empirie	-	-	-	46,27	40,769

(Kuklík, Melzerová, Vídeňský, 2007 [2])

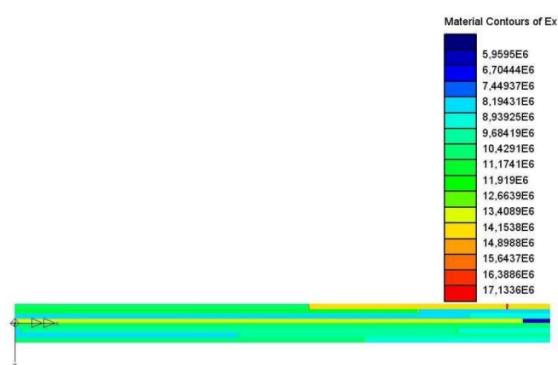
Následující výpočty se prováděly na nosníku s označením Nosník 2. Bylo třeba zjistit, zda-li se nosník chová v celém rozsahu zatěžování pružně, jelikož to radikálně ovlivní výpočet. Máme vyobrazeny tři grafy (obr.č. 3, 4 a 5 viz příloha), které ukazují závislost průhybu na působící síle (to je určeno snímačem posunutí) a poměrného přetvoření na taženém a tlačném povrchu. Na tento nosník byly místo tenzometrů použity snímače posunutí, jejichž pozice byla 20 mm od povrchu. Snímače byly nainstalovány v párech ve stejné výšce po obou bocích nosníku jak v tlačené tak v tažené části. Poslední naměřená hodnota snímačů byla 27, 03 kN, proto je tato síla uvedena jako maximální, ačkoli porušení nosníku nastalo až při 30, 95 kN. [2]

*„Je třeba ještě poznamenat, že při vyhodnocování experimentů, byla věnována velká pozornost korekci průhybu o zatlačení podpor. Rovněž při vznášení zatížení, kdy byla každá ze sil zvětšena vždy o 4 kN, byla sledována nejen hodnota síly nastavená, ale i skutečně aplikovaná. Tato skutečná korigovaná hodnota potom vstupovala do výpočtu.“ [2]*

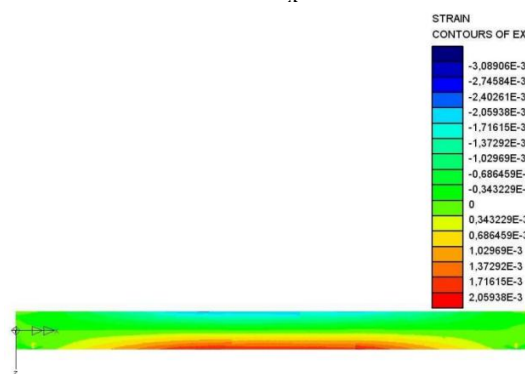
Dřevo je modelováno jako ortotropní materiál, kde je modul pružnosti ve směru vláken řádově vyšší, než ve směrech ostatních. Ve výpočtu jsou uvažovány konkrétní moduly

pružnosti ve směru podélném, jejichž hodnoty byly určeny pro všechny segmenty nedestruktivní zkouškou. Další parametry pro tento materiál zůstávají pro všechny prvky stejné (obr.č. 6). Segmenty jsou vytvořeny rozdělením každé lamely po délce zubovitými spoji. Výstupem jsou dále zobrazeny dva pohledy na nosník s vyobrazeným průběhem  $\epsilon_x$  (obr.č. 7) a  $\sigma_x$  (obr.č. 8). [2]

Obr.č. 6: Rozložení  $E_x$  v Nosníku 2

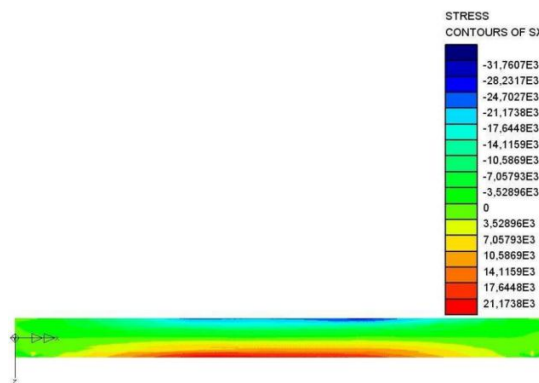


Obr.č. 7: Rozložení  $\epsilon_x$  v Nosníku 2



(Kuklík, Melzerová, Vídeňský, 2007 [2])

Obr.č. 8: Rozložení  $\sigma_x$  v Nosníku 2



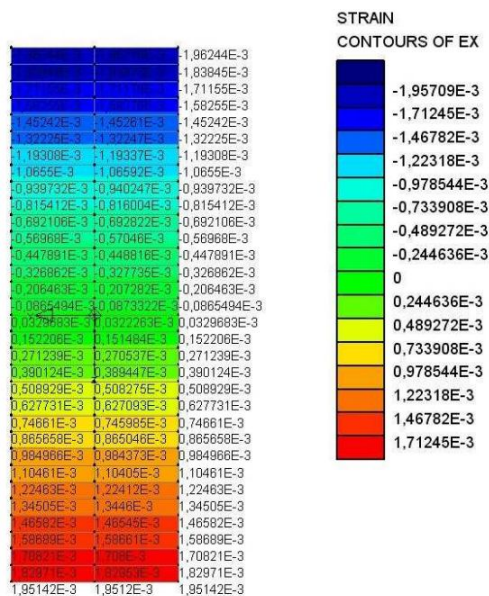
(Kuklík, Melzerová, Vídeňský, 2007 [2])

Na grafech si lze povšimnout, že na horním tlačném povrchu jsou větší napětí i deformace, ovšem ne ve středu nosníku, kdy byly velikosti deformací snímány, ale v jeho pravé části, kde byl podle obrázku 7 umístěn segment s vysokým  $E_x$ . [2]

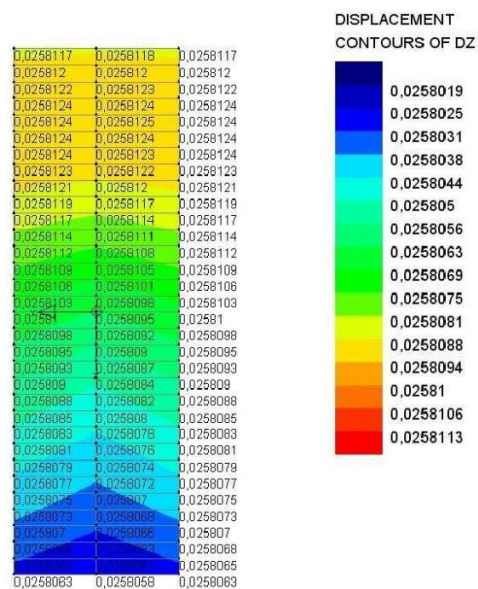
## Porovnání experimentu s MPK modelem

„Jak bylo již řečeno dříve, vyhodnocení poměrného přetvoření na taženém a tlačném povrchu a průhybu bylo experimentálně provedeno ve středním průřezu. Pro představu o rozložení lamel s různým modelem pružnosti po středním průřezu, což se ukazuje pro výsledky velmi podstatné, je obrázek 9 (viz příloha). Na obrázku 10 (viz příloha) je potom uveden průběh normálového napětí  $X_{po}$  středním průřezem. Zde si všimněme, že neutrální osa je posunuta mírně nad těžiště do lamely s vysokým modulem pružnosti. Pro srovnání výsledků experimentu s MKP modelem jsou nejdůležitější obrázky 11 a 12.“ [2]

Obr.č. 11: Pole poměrného přetvoření ve středním průřezu



Obr.č. 12: Pole průhybu ve středním průřezu



(Kuklík, Melzerová, Videňský, 2007 [2])



Uvedená tabulka 2 zobrazuje průhyb v milimetrech na dvě desetinná místa, jak bylo měřeno. Parametr  $\varepsilon_x$  byl měřen na šest desetinných míst. U všech modelů MPK je situace taková, že vypočtené veličiny jsou více než 100 % veličin vypočtených. [2]

Tab.č. 2: Porovnání naměřených a vypočtených deformací

Hodnota	Měřená	Vypočtená	%
Průhyb [mm]	22,3	25,81	116
$\varepsilon_s$ tah	0,00153	0,00171	112
$\varepsilon_s$ tlak	0,00141	0,00171	121

(Kuklík, Melzerová, Vídeňský, 2007 [2])

#### **Závěry autorů článku**

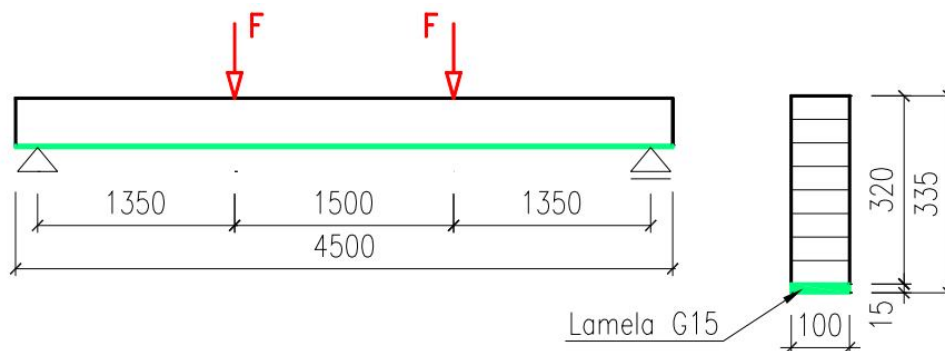
- „velikost prvků v MKP modelu je pro danou úlohu optimální,
- shoda experimentu s vytvořeným MKP modelem je velmi dobrá,
- vliv různých modulů pružnosti ve směru vláken je pro výsledné chování nosníku velmi podstatný.“ [2]

## 2.2 Numerický model lepených lamelových nosníků vyztužených lamelou ze skelných vláken [12]

Autoři tohoto článku se věnují vytvořením MKP modelů, které měly rozměry skutečných konstrukčních prvků. Pro porovnání byly vytvořeny lepené nosníky vyztužené jednak skelnými a také uhlíkovými vlákny. V tomto případě nám zpráva prezentuje vyhodnocení měření a prvotní verzi numerického modelu konečných prvků pro nosníky vyztužené skelnou lamelou tloušťky 15 mm. V sérii zde bylo zkoušeno pět nosníků. [12]

Délky všech nosníků byly 4500 mm, šířky 100 mm a výšky bez skelných lamel byly 320 mm. Zatížení nosníků bylo dvěma břemeny a jejich uložení bylo prosté, jak je vyobrazeno na obrázku 13. Průřez nosníku na výšku byl vytvořen z osmi lamel tloušťky 40 mm a po délce byly lamely individuálně napojeny za použití lepeného zubovitého spoje. Aby u břemen bylo eliminováno jejich zatlačování do prvku, byly po celé šířce nosníku umístěny roznášecí desky délky 400 mm. Stejně tak tomu bylo provedeno v místě uložení kvůli zatlačování do podpor při zatěžování. Postup zatěžování byl následovný – zatěžování se zvyšovalo po 4 kN s tím, že se mezi dvěma zatěžovacími stupni provedla časová prodleva, při které byla sledována změna deformace při udržování stejné hladiny zatížení. Při ustálení deformace se pokračovalo v dalším zatěžovacím kroku, což se opakovalo až do porušení nosníku. [12]

Obr.č. 13: Schéma zatížení a geometrie průřezu

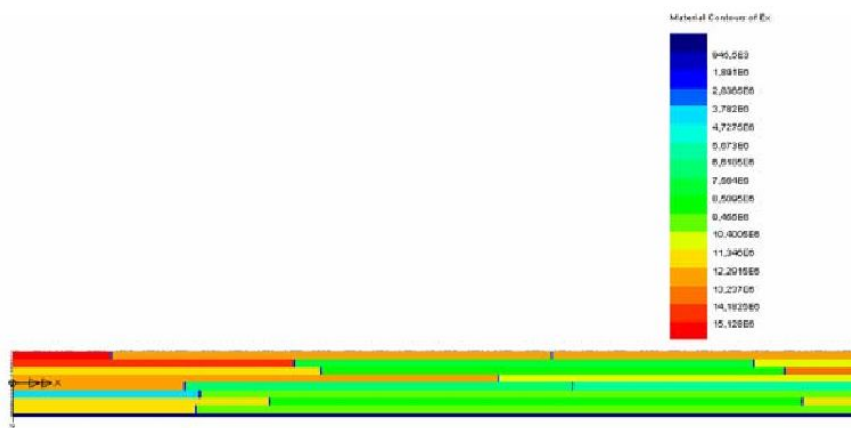


(Melzerová, Vídeňský, nedatováno [12])

Pro měření průběhu deformací byly na nosník nainstalovány tenzometry na horním a spodním povrchu nosníku uprostřed jeho rozpětí. Další přípravky na měření jsou snímače posunutí a v tomto případě jich bylo osazeno patnáct. Dva páry snímačů byly umístěny u podpor na každé straně nosníku jeden, kvůli možnosti provedení korekce při zatlačování nosníku. Průhyb trámu v každém stupni zabezpečoval snímač posunutí umístěný v polovině rozpětí. Pro zjištění přetvoření v místě nejvíce namáhaného průřezu bylo umístěno osm snímačů posunutí v párech na bocích nosníku uprostřed rozpětí. Tyto snímače byly deaktivovány tehdy, když se blížila destrukce zkoušeného prvku z důvodu, aby nedošlo k jejich poničení. Pro určení lokálního modelu pružnosti nosníku byly dva snímače umístěny na ramínkách mezi břemeny. [12]

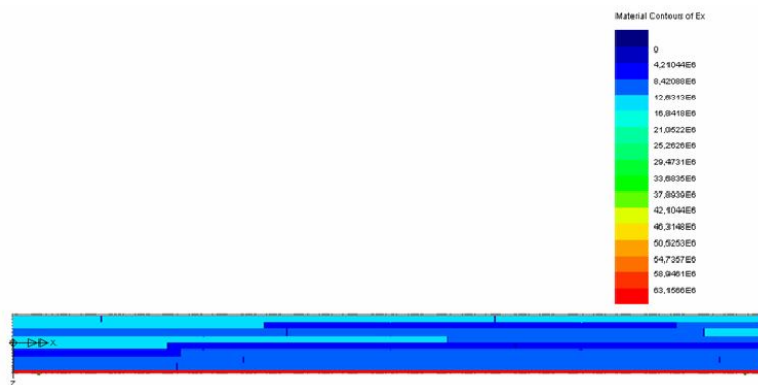
Moduly pružnosti ve směru vláken byly určeny sklerometrickou a dynamickou metodou v každé lamely zvlášť a to nezávisle na výše zmíněné zatěžovací zkoušce. Každý tento segment byl měřen čtyřikrát a z těchto výsledných hodnot byla vypočtena průměrná hodnota. *„Na spoje je do výpočtu použit materiál s poškozením, což se projeví lokálním snížením modulu pružnosti ve směru vláken. Obrázek 2 ukazuje rozložení modulů pružnosti ve směru vláken pro jeden konkrétní zkušební vzorek s označením Nosník 46. Na tomto obrázku je potlačen vliv modulu pružnosti výztužné lamely (respektive je zadán nulovou hodnotou), neboť její modul pružnosti je řádově šestkrát vyšší a rozdíl v modulech pružnosti mezi jednotlivými dřevěnými segmenty a spoji by nevynikly. Pro úplnost je pro stejný nosník ještě uveden obrázek 3, kde je výztužná lamela zobrazena svým skutečným modulem pružnosti.“* [12]

Obr.č. 14: Rozložení veličiny  $E_x$  v [kPa] na nosníku 46 s potlačeným vlivem lamely s vlákny vysoké pevnosti



(Melzerová, Vídeňský, nedatováno [12])

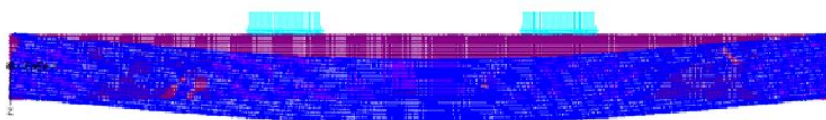
Obr.č. 15: Rozložení veličiny  $E_x$  v [kPa] na nosníku 46 s patrným vlivem lamely s vlákny vysoké pevnosti



(Melzerová, Vídeňský, nedatováno [12])

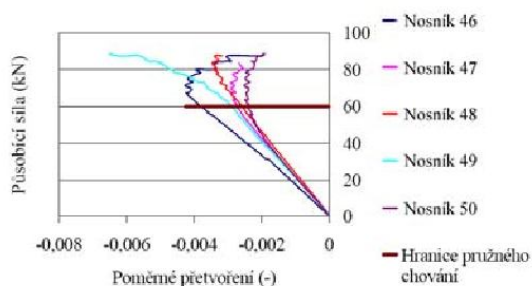
Parametry na vstupu výpočtu jsou přesné hodnoty  $E_x$  (jejich hodnoty v jednotlivých lamelách) a rozmístění zubovitých spojů. MKP model všech nosníků a skutečné nosníky byly porovnávány na základě některých vypočtených a experimentálně naměřených parametrů. Jeden MKP model nosníku je i s tvarem deformace vymodelován na obrázku 16 a je uvažován jako ortotropní.

Obr.č. 16: Zatížení, dělení a deformovaný tvar nosníku 46

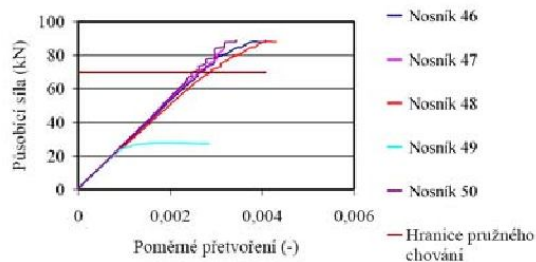


(Melzerová, Vídeňský, nedatováno [12])

Obr.č. 17: Závislost poměrného přetvoření na tláčeném povrchu nosníku na působící síle



Obr.č. 18: Závislost poměrného přetvoření na taženém povrchu nosníku na působící síle



(Melzerová, Vídeňský, nedatováno [12])

Nejprve je nutné určit, do jaké hodnoty zatížení se chovají nosníky pružně. Tyto skutečnosti můžeme stanovit z obou grafů (obr.č. 17 a 18). Zde je patrné, že pro všechny nosníky je maximální hodnota na taženém povrchu 70 kN a pro nosníky v tláčené části povrchu je hodnota 60 kN. Proto nadále uvažujeme jako hraniční hodnotu pružného chování sílu 60 kN. V tabulce jsou zobrazeny rozdíly mezi hodnotami experimentálně určenými a mezi hodnotami vypočtenými na základě modelů MKP nosníků. To vše při pružném chování tzn. při síle 60 kN. [12]

Tab.č. 3: Měřené a vypočtené hodnoty průhybu a poměrného přetvoření na nosnících na taženém resp. tlačném povrchu uprostřed nosníku

Označení	průhyb w, měřený	průhyb w, vypočtený	$\epsilon$ v tahu, měřené	$\epsilon$ v tahu vypočtené	$\epsilon$ v tlaku, měřené	$\epsilon$ v tahu, vypočtené
	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[-]
Nosník 46	33,88	34,59	0,00226	0,00217	-0,0038	-0,0031
Nosník 47	32,17	32,17	0,0022	0,00206	-0,0027	-0,0027
Nosník 48	34,54	37,34	0,00237	0,00239	-0,0026	-0,0033
Nosník 49	35,85	32,24	Chyba	0,00203	-0,0029	-0,0028
Nosník 50	35,09	35,07	0,00217	0,00215	-0,0024	-0,0032

(Melzerová, Vídeňský, nedatováno [12])

Při porovnávání hodnot měřených a vypočítaných z hlediska průhybu je zřejmé, že rozdíl se pohyboval v rozmezí od 0 do 3,6 mm, což je od 0 do 10 %, jak nám uvádí tabulka 3. Z uvedených výsledků lze konstatovat, že modelované nosníky mají velice dobrou shodu s nosníky skutečnými. Na základě pozitivních výsledků se autoři článku pokusili provést predikaci chování reálných nosníků při fiktivním rozmístění spojů. *„Nejprve je však třeba stanovit modul pružnosti dřeva ve směru vláken, který má na výpočet dominantní vliv. Ostatní parametry dřeva jako ortotropního materiálu zůstávají nezměněny. Tento modul pružnosti je stanoven průměrnou hodnotou modulů pružnosti ze všech segmentů všech pěti nosníků v této sérii. Pro ověření přesnosti byly všechny skutečné nosníky se skutečným rozložením spojů fiktivně modelovány ze dřeva o průměrném Ex.“* [12]

Následující tabulka udává rozdíly průhybu všech nosníků jak modelovaných tak skutečných uprostřed jejich rozpětí se stejným rozmístěním zubovitých spojů. [12]

Tab.č. 4: Odchytky průhybu uprostřed rozpětí skutečných nosníků a nosníků se stejným rozložením zubovitých spojů, ale průměrným  $E_x$

Označení	Vypočtený průhyb nosníku, skutečné rozložení $E_x$	Vypočtený průhyb nosníku, průměrné $E_x$
	[mm]	[mm]
Nosník 46	34,59	34,03
Nosník 47	32,17	34,08
Nosník 48	37,34	34,15
Nosník 49	32,24	33,88
Nosník 50	35,07	33,96

(Melzerová, Vídeňský, nedatováno [12])

V tomto případě z tabulky 4 vyplývá, že rozdíly rozložení spojů při konstantním modulu pružnosti  $E_x$  jsou velmi malé. Byly vymodelovány tři fiktivní nosníky s extrémním rozložením spojů. Model fiktivního nosníku 1 nebude obsahovat žádné spoje. Vypočtený průhyb nosníku podle MKP modelu je  $w = 33,83$  mm. Model 2 má v každé vrstvě pouze jeden spoj. Tyto spoje jsou všechny seřazeny nad sebou a umístěny do poloviny rozpětí. V tomto případě, ač je nepříznivý, vychází průhyb  $w = 34,11$  mm. Model nosníku 3 je, co se týče rozmístění spojů ještě nepříznivější. Spoje jsou rozmístěny tak, že po celé výšce jsou srovnány nad sebou a to ve dvou liniích ve vzdálenosti 80 mm. Toto rozmístění spojů, které dle kritérií není přípustné vyrobit, vykázalo průhyb 34,41 mm. „Z uvedeného je patrné, že při vyztužení prvku lamelou ze skelných vláken o tloušťce 15 mm hraje v rozdílných průhybech mezi jednotlivými prvky dominantní roli modul pružnosti  $E_x$  jednotlivých segmentů oproti rozložení spojů a jejich vzájemné poloze v jednotlivých lamelách.“ [12]

## **Závěry výzkumu**

Porovnávání reálných nosníků s MKP modely poukázalo na velmi dobré shody. Pro hodnoty průhybu jsou stěžejní reálné parametry jednotlivých segmentů dřevěného prvku. Oproti tomu různé rozmístění zubovitých spojů se nám ve výsledku téměř nepromítne. Na základě znalosti parametrů jednotlivých segmentů určených nedestruktivní metodou a znalosti geometrie celého prvku je možné vytvořit MKP model, který velice přesně popisuje chování reálného nosníku. [12]



## 2.3 Návrhový model pro nosníky z lepeného lamelového dřeva vyztuženého FRP [9]

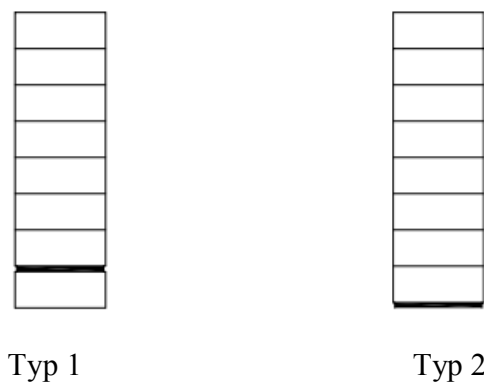
V tomto průzkumu, jak vyplývá z nadpisu, byly zjišťovány možnosti zesílení nosníků z lepeného lamelového dřeva rovnoběžně s vlákny. Cílem vyztužení bylo zvýšit ohybovou a osovou tuhost nosníků. Pro tuto metodu vyztužení na tažené straně průřezu, bylo použito skelných a uhlíkových vláken ve formě kompozitu. Proveden byl návrhový model uvažující plastické chování dřeva namáhaného tlakem rovnoběžně s vlákny. [9]

Potenciální oblast použití vyztužených dřevěných prvků:

- „*používat v konstrukcích dřevo nižší třídy,*
- *zlepšovat vlastnosti nových a již existujících konstrukcí,*
- *opravovat poškozené konstrukce.*“ [9]

Jak již bylo řečeno, k porušení dochází v tažené části průřezu a to zejména v místě suků a zubovitých spojů. Aby bylo zesíleno toto slabé místo, je vhodné vyztužit nosníky na tažené straně a to materiálem s vysokým modulem pružnosti a s velkým poměrným přetvořením na mezi porušení. Vhodné materiály jsou plasty vyztužené skelnými (GFRP) či uhlíkovými vlákny (CFRP). Nevhodná je ocel – má nízkou pevnost na mezi kluzu, která vede k plastickým deformacím dřívě, než dojde k porušení dřeva. Při použití vysoko pevnostních vláken k tomuto jevu nedochází. Při správném vyztužení dochází k plastickému chování dřeva v tlačené části. U nevyztuženého dřeva návrhové modely s tímto efektem nepočítají, protože u něj nejdříve dojde k plastické deformaci v tažené části. Pro vyztužené prvky vysoko pevnostními vlákny byly vytvořeny dva odlišné návrhové modely. Na obrázku č. 19 jsou vyobrazeny obě varianty řešení vyztužení průřezu nosníku. Z důvodu požární bezpečnosti a estetičnosti je v praxi používá spíše Typ 1. Šířka vyztužení ve většině případů odpovídá šířce průřezu. [9]

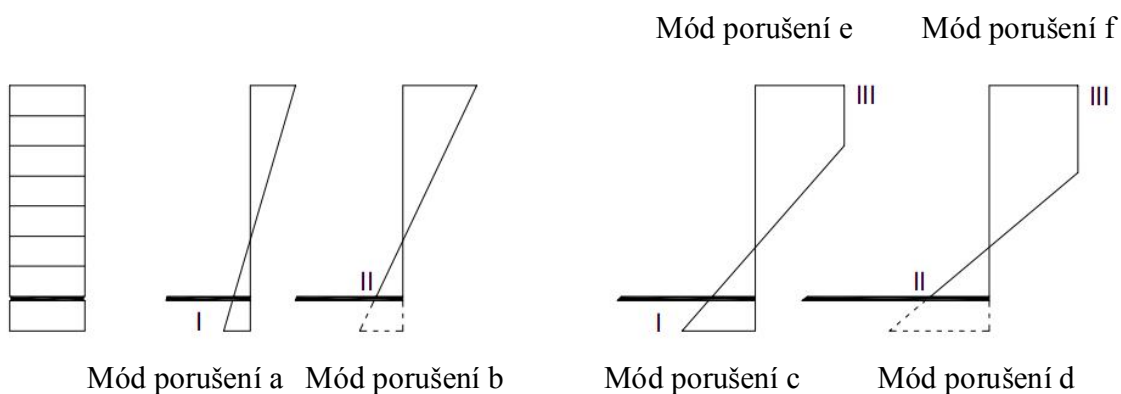
Obr.č. 19: Typy vyztužení průřezů u lepených lamelových nosníků



(Kuklík, Melzerová, Vídeňský, 2005 [9])

U těchto lepených lamelových nosníků jsou možné různé módy porušení. „Za předpokladu konstantního modulu pružnosti, konstantní pevnosti v tlaku i v tahu a lineárně – pružném – ideálně – plastickém vztahu mezi napětím a přetvořením po průřezu nosníku, jsou možné následující módy porušení.“ [9]

Obr.č. 20: Typy porušení



(Kuklík, Melzerová, Vídeňský, 2005 [9])

### **Typy porušení v tažené části průřezu**

*„Mód a: Porušení krycí lamely na tažené straně průřezu v úrovni I, průřez se nachází v lineárně – pružném stavu.*

*Mód b: Porušení nad výztužným pásem na tažené straně průřezu v úrovni II, krycí vrstva je porušena, průřez se nachází v lineárně – pružném stavu.*

*Mód c: Porušení krycí lamely na tažené straně průřezu v úrovni I, průřez se nachází v lineárně – pružném – ideálně – plastickém stavu.*

*Mód d: Porušení nad výztužným pásem na tažené straně průřezu v úrovni II, krycí vrstva je porušena, průřez se nachází v lineárně – pružném – ideálně – plastickém stavu.*

*Módy porušení na tlačené straně průřezu při definovaném mezním přetvoření v tlaku:*

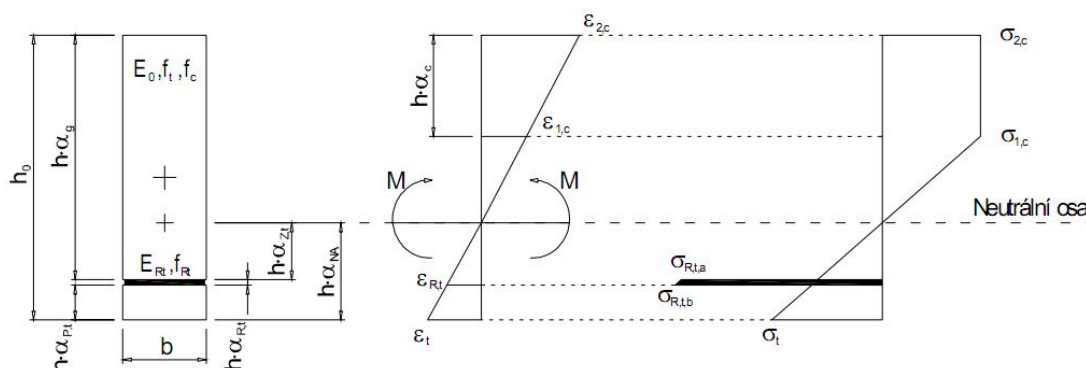
*Mód e: Porušení na tlačené straně průřezu v úrovni III, před poškozením dřevěné krycí vrstvy v tahu, průřez se nachází v lineárně – pružném – ideálně – plastickém stavu.*

*Mód f: Porušení na tlačené straně průřezu po poškození dřevěné krycí vrstvy za současného porušení v tahu nad výztužným pásem, průřez se nachází v lineárně – pružném – ideálně – plastickém stavu.“ [9]*

### **Výsledky řešení**

Předpokládaný vztah poměrného přetvoření a napětí je demonstrován na vyztuženém nosníku na obrázku 21. Návrhový model převádí výpočet vyztužených nosníků na výpočet nevyztužených nosníků za pomoci geometrických součinitelů  $\alpha_i$  a obecných součinitelů  $k_i$ . S pomoci těchto součinitelů je možné počítat geometricky podobné průřezy s tím, že součinitelé  $\alpha_i$  a  $k_i$  je potřeba spočítat pouze jednou v rámci celého výpočtu. [9]

Obr.č. 21: Vyztužený nosník s průběhem poměrného přetvoření a napětí



(Kuklík, Melzerová, Vídeňský, 2005 [9])

„Rozměrové součinitelé  $\alpha_i$ “:

$$\alpha_i = \frac{h_i}{h}$$

Pevnostní součinitel  $k_f$  vyjadřuje poměr pevnosti dřeva v tlaku a tahu:

$$k_f = \frac{f_c}{f_t} = \frac{\varepsilon_{c,u}}{\varepsilon_{t,u}}$$

Deformační součinitel  $k_t$ :

$$k_t = \frac{E_{R,t}}{E_0} - 1 \quad [9]$$

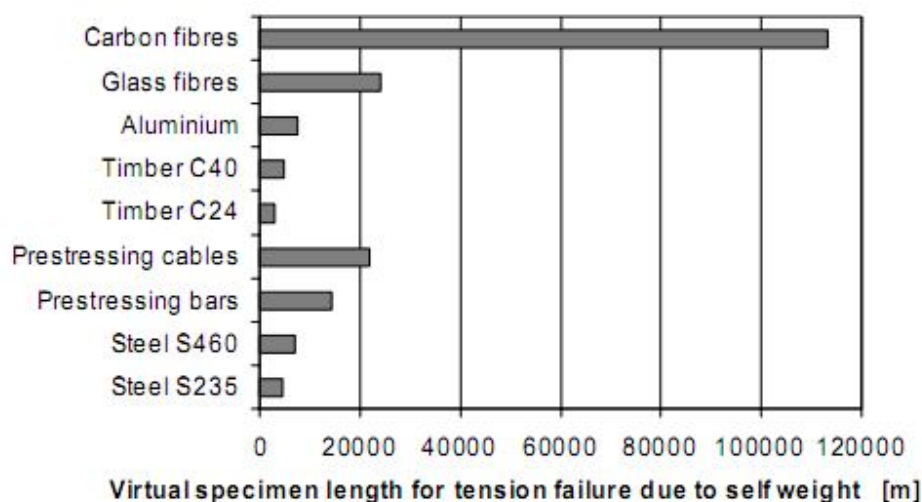
Účinná výška  $h$  je zbytková výška průřezu po snížení výšky o výšku dřevěné krycí vrstvy a výšky vyztuženého pásu. V případě nepoškozené krycí vrstvy se účinná výška průřezu  $h$  zmenšuje o výšku této vrstvy. [9]

## 2.4 Vyztužování dřeva uhlíkovými vlákny přilepením [10]

V roce 1990 EMP dřevařská laboratoř začala provádět rozsáhlý výzkum na využití HSF laminátů pro vyztužení spojů u dřevěných konstrukcí poté, co se seznámil s možnostmi použití a vývojem HSF. Základní myšlenkou bylo spojit tahové prvky sestříhané z desky HSF laminátů. Jako druh dřeviny se při zkouškách používal smrk, neboť je nejčastěji využívanou dřevinou ve střední Evropě a obzvláště ve Švýcarsku. [10]

Provádění zkoušek pro velká rozpětí prvků a jejich zatěžování vyžaduje použití vysoce výkonných prvků, což znamená nejen vysokou absolutní pevnost a tuhost, ale i vysoký poměr pevnosti a tuhosti k vlastní tíze (obr.č. 22). [10]

Obr.č. 22: Zvláštní pevnosti materiálu (poměr tahového napětí k vlastní hmotnosti)



(Steiger, nedatováno [10])

Nové materiály na bázi vysoko pevnostních vláken (HSF), skla, uhlíku, bóru, aramidu atd. se stále vyvíjejí. Vzhledem k vysokým nákladům bylo první použití HSF - laminátů zaměřeno především na dodatečné vybavení a vyztužení stávajících dřevěných konstrukcí. Díky postupně klesající ceně těchto high-tech materiálů, jsou nové technologie

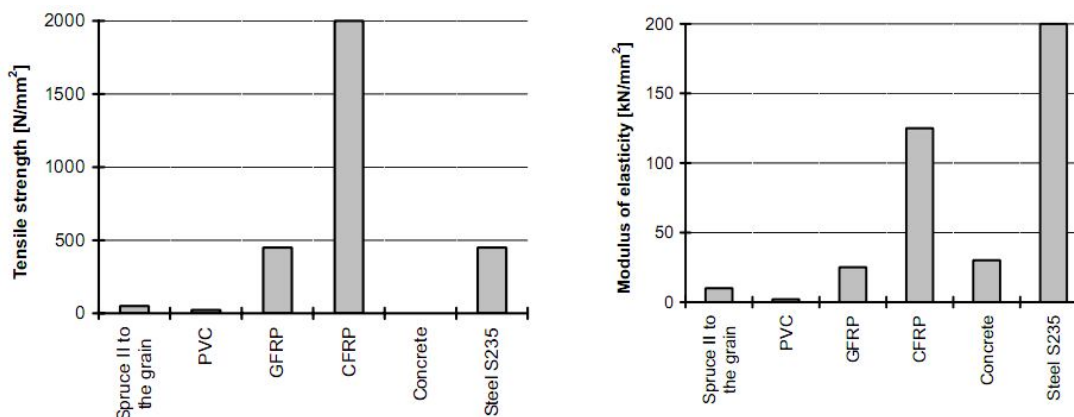
ekonomičtější a zajímavější a tím se otevřely nové možnosti využívání těchto materiálů. Švýcarské federální laboratoře zabývající se testováním materiálů a výzkum EMPA hrály významnou roli ve vývoji konstrukčního využití HSF, zejména z uhlíkových vláken (CF) po mnoho let. [10]

Jednou z prvních žádostí bylo vyztužení stávajících betonových a zděných konstrukcí uhlíkovými vlákny, konkrétně plasty (CFRP). Od té doby je o kombinaci vláken v podobě kompozitu (FRP) se dřevem také velký zájem, v roce 1992 EMPA dřevařská laboratoř zahájila program pro používání FRP u dřevěných konstrukcí. Současné články poskytují přehled o mnoha činnostech tohoto výzkumného programu se zvláštním zaměřením na poslední zkoušky. [10]

### **Mechanické vlastnosti FRP**

Pokud jde o možnosti uplatnění a kombinování s různými materiály, je efektivní porovnat jejich důležité vlastnosti. Obrázek č. 23 zobrazuje pevnosti v tahu a moduly pružnosti různých materiálů, které se často používají pro stavební účely. Je třeba poznamenat, že srovnání je přibližné, protože dřevo vykazuje značné rozdíly, co se týče mechanických vlastností a velmi nízké jsou zejména ve smyku a tahu kolmo k vláknům. Protože má materiál CFRP lepší technické vlastnosti v porovnání s GFRP a EMPA již úspěšně aplikovala CFRP k vyztužení betonových a zděných konstrukčních prvků, rozhodla se proto hlavně výzkum soustředit na využití CFRP u dřevěných konstrukcí. [10]

Obr.č. 23: Mechanické vlastnosti (pevnost v tahu a modul pružnosti) pro různé materiály



(Steiger, nedatováno [10])

### Možné využití FRP u dřevěných konstrukcí

První krok ve výzkumu spočíval v hodnocení možných využití a zkoumání týkající se kombinace FRP a dalších vysoko pevnostních materiálů se dřevem. Cílem studie bylo:

- najít a charakterizovat problémy u dřevěných konstrukcí, kde by mohlo být použito FRP nadějně,
- určit výhody a nevýhody kombinace různých materiálů. [10]

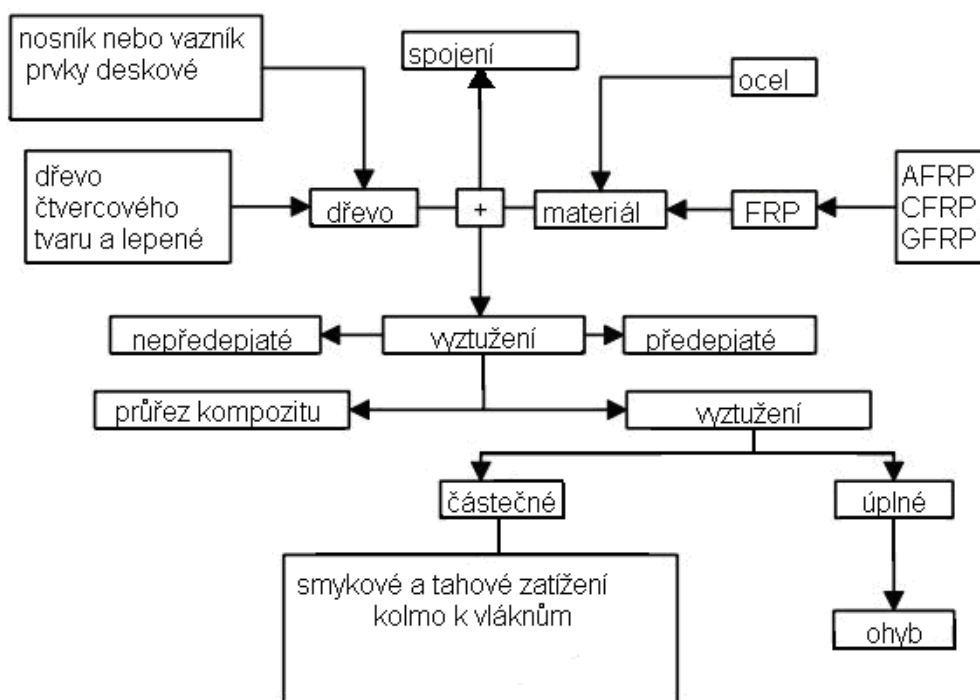
Bylo zjištěno, že existuje široké spektrum využití FRP u dřevěných konstrukcí (obr.č. 24) a že další studie by se měla zaměřit na:

- vyhodnocení vhodných syntetických pryskyřic a vláken,
- zkoušky tahem na malých vzorcích s FRP ve spoji,
- výroba prototypů 1:1 a získat tak představu o proveditelnosti,
- chování spojů s FRP pod dlouhodobým zatížením při různých teplotách,
- závislost použití FRP s ohledem na kvalitu lepidla (přesnost míchání pryskyřice a tvrdidla) a zpracování (v laboratorních a reálných podmínkách). [10]

## Použití výztuže

Zlepšení konstrukce při vyšším zatížení nebo obnovení původní pevnosti bylo vždy důležitým úkolem inženýrství u konstrukcí z jakéhokoliv materiálu. Před vývojem FRP byla pro tyto účely používána především ocel. Spojování ocelových desek na beton bylo vyvinuto velmi úspěšně výzkumem EMPA v sedmdesátých letech. Na počátku osmdesátých let byly ocelové desky nahrazeny CFRP. Dnes je tato technika dobře známa a byla již úspěšně použita na přibližně 400 staveb po celém světě. Trvale se snižují ceny HSF laminátu a vzhledem k úspornějším technologiím se práce s tímto materiálem stává zajímavějším. [10]

Obr.č. 24: Možnosti využití FRP v dřevařském inženýrství



(Steiger, nedatováno [10])



Mezi hlavní výhody použití CFRP laminátu oproti ocelovým plechům je jeho nízká hmotnost, odolnost proti korozi, jakož i jejich pružnost, která umožňuje pohodlné a snadné dopravování v rolích na zakázku nebo na staveništi. Lákavá byla představa používat tento materiál také na dřevěné konstrukce. Značný počet dřevěných konstrukcí (z lepeného a masivního dřeva) bylo již úspěšně vyztuženo pomocí FRP především v Severní Americe ale také v Evropě. Obr.č. 25 a 26 (viz příloha) ukazují příklady realizovaných konstrukcí ve Švýcarsku. [10]

FRP - výztuž se skládá z pruhů / desek / prutů z HSF vložené do polymerní matrice a lepené pomocí (lepidla, maltové směsi nebo namíchané směsi). FRP lamely mohou být připojeny

- uvnitř dřevěného prvku, což představuje řadu potíží při realizaci, ale má významné výhody (neviditelnost, ochrana proti požáru), nebo
- zvnějšku prvku-to je nejběžnější způsob, jak postupovat při vyztužování / dodatečném vyztužení stávajících konstrukcí. [10]

Lepení laminátů musí být připraveno velmi pečlivě:

- povrch dřeva musí být rovný, čistý a neztvářený (vliv povětrnosti) k zajištění správné přilnavosti,
- povrch dřeva musí být při lepení suchý,
- při lepení lamel FRP musí být styčné plochy odmaštěné a čisté,
- použití lamely musí probíhat v přiměřené teplotě ( $> 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a v okolí lepené spáry nebo plochy nesmí být během vytvrzování lepidla žádné napětí. [10]

Prodloužená doba vytvrzení může být nezbytná při nízkých teplotách, a při využití vysoko pevnostních vláken např. na vyztužení prvků důležitých dopravních cest, může být tento proces velmi zdlouhavý. K překonání tohoto problému byla vyvinuta metoda zrychleného tepelného vytvrzování a použita s úspěchem. Pomocí speciálního generátoru je stejnosměrný proud přiváděn mezi konce lamely za účelem získání trvalého vytvrzování při teplotě přibližně  $70^{\circ}\text{C}$ . Tak lze vytvrzovací dobu snížit na přibližně 2 hodiny. [10]

## **Použití připojení**

U spojů dřevěných konstrukcí hraje v některých případech rozhodující roli design, což je výzvou pro provádění inovativních zkoušek, zejména pokud jde o přenos tahových sil. Použití FRP-laminátů se jeví jako velmi dobrá možnost čelit problémům jako je částečné maximální napětí a více osé zatěžování. Můžeme provádět kompaktní spoje s vysokou tuhostí. Tepelná vodivost HSF-laminátů je mnohem menší než u oceli. Pokud jsou HSF-lamináty při požáru chráněny dřevem, požární odolnost ve spoji je spolehlivá. Kde jsou spoje vystaveny tlakovému zatížení, je potřeba si uvědomit, že pevnost tahového spoje musí být vždy přizpůsobena o tuhost, geometrické rozměry a vyšší pevnost. Proto bylo rozhodnuto, že se výzkum bude zabývat možným využitím FRP laminátů testováním vzorků se spoji, které budou vystaveny tahovému napětí. Díky dosaženým znalostem z procesu vyztužování jinými materiály, kde lze studovat různé parametry, je možné je snadno transformovat na použití FRP jako vyztužujícího prvku. Všechny zkoušky zaznamenané v následující části byly prováděny na vzorcích smrku. [10]

## **Předběžné testy na malých vzorcích v tahu**

Jako první krok výzkumu a vývoje byl proveden experiment na určitém počtu malých vzorků v tahu s připojenými FRP v podélném spoji (obr. č. 27), který byl proveden jako jakýsi model použití a měl za úkol prokázat úroveň proveditelnost a rozpoznat možné obtíže. V této etapě bylo jako vyztužující materiál použito hlavně uhlíkových vláken. Zkoušky braly v úvahu celou řadu parametrů:

- typ lepidla (epoxidové pryskyřice),
- tloušťka vrstvy lepidla (0,20 až 1,75 mm),
- délka laminace FRP (15 - 90 mm),
- tuhost (tloušťka) laminátu FRP (0,50 až 1,25 mm),
- vzdálenost od okraje (4.0 - 18.5 mm),
- kvalita provedení povrchů dřeva a FRP laminátů před lepením,
- vyztužení překližkou přilepením po stranách vzorků k vyrovnání druhotných příčných tlaků. [10]

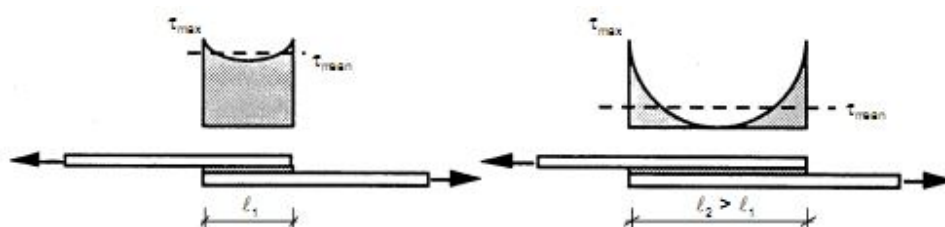
Síla spoje se ukázala být pro většinu vzorků celkem vysoká pro většinu z testovaných parametrů. V některých případech dosáhla smyková pevnost dřeva více než  $10 \text{ N/mm}^2$ , což znamená, že vyšší síly mohly být dosaženy jen s využitím větší smykové plochy. Bylo prokázáno, že pevnost ve smyku závisí na délce vazby spoje (obr.č. 28 viz příloha). S rostoucí délkou čepu je smyková pevnost spoje snížena v důsledku nerovnoměrného rozložení smykových sil podél linie spojení ve vrcholu spoje na obou koncích (obr.č. 29). Tento jev je dobře znám u spojení na čep a rozpor. Vzhledem k nízkému počtu zkoušených vzorků ve srovnání s vysokým počtem parametrů testu, byly výsledky statisticky nevýznamné, ale spíše ukázaly směr vývoje. [10]

Obr.č. 27: Předběžné testy na malých vzorcích v tahu  
(Příklad VZ 1.3.3:  $b = 25 \text{ mm}$ ,  $h = 30 \text{ mm}$ )



(Steiger, nedatováno [10])

Obr.č. 29: Rozdělení smykových napětí pro různé délky smykových ploch a pro stejnou tuhost  $E \cdot A$  spojovaných dílů



(Steiger, nedatováno [10])

Nakonec bylo rozložení napětí analyzováno pomocí metody konečných prvků. Tato metoda byla použita také při provádění tepelných výpočtů vzorků, které byly testovány v tahu při různých teplotách (obr.č. 30 viz příloha). [10]

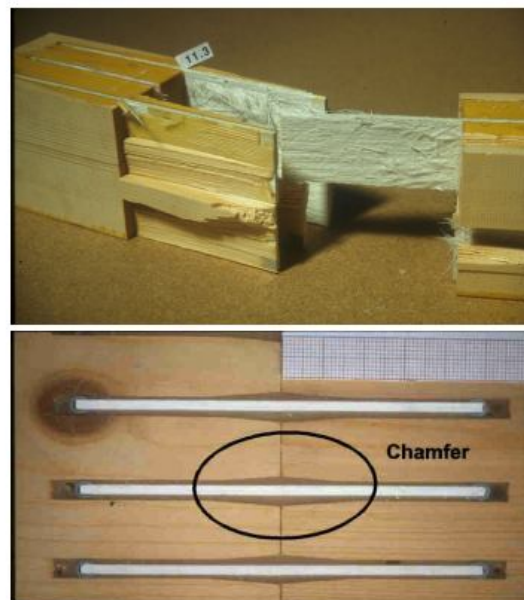
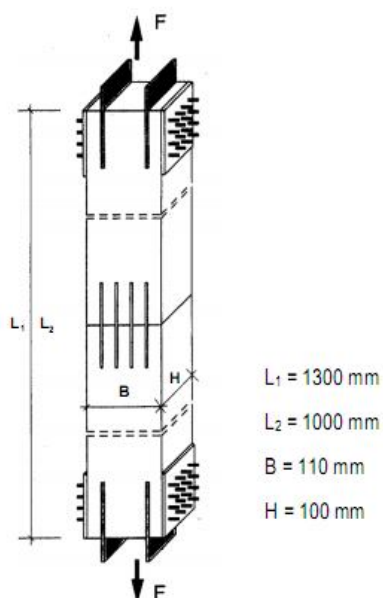
Při řešení daného tématu je shromažďování zkušeností týkajících se zhotovení spojů a testování vzorků stejně významné. Zhotovení spojů může být docela choulostivá a namáhavá práce: ovlivňuje ho řada faktorů jako je síla a kvalita lepené plochy: přesnost směšovacího poměru pryskyřice / tužidla, úprava povrchů dřeva a FRP-laminátu před lepením, vytvrzovací podmínky atd. Značný význam je přisuzován viskozitě lepidla: Nízká viskozita pryskyřice ukazuje - v porovnání s vyšší viskozitou pryskyřice - mnohem lepší proniknutí do spár a dutin, což vede tedy k lepší kvalitě lepené plochy. Smršťování lepidla při vytvrzování je větší u pryskyřice s nízkou viskozitou, ale její pevnost je nižší. Vzhledem k tomu, že je při lepení velmi obtížné zjistit nedostatky, u pryskyřic s vysokou viskozitou hrozí riziko nebezpečí nízké kvality lepicí plochy a nemělo by být podceňováno. Výsledky šetření ukázaly možnosti provedení spojů pomocí lepení FRP pro dřevěné konstrukce. Je nezbytné ke zlepšení pochopení chování tohoto typu spoje, objasnit vlivy dalších parametrů jako je rozdíl mezi bobtnáním dřeva a FRP (kvůli smršťování, bobtnání nebo teplotě). [10]

## **Zkoušky v tahu a ohybu na lepených olaminovaných vzorcích**

### **Tahové zkoušky**

Další série testů se skládala z více než sto tahových zkoušek na vzorcích s větší velikostí. Vzorky byly lepené olaminované smrkové s průřezy až do 110 x 110 mm (obr.č. 31). Protože pevnost laminátů je ve skutečnosti mnohem vyšší, než je přenos smykové síly u masivu, byly na místo dražších laminátů CFRP použity lamináty GFRP. Tato změna však vyžaduje další optimalizaci použitých pryskyřic. Epoxidový typ lepidla se ukázal být jako nejvhodnější. Byly zde řešeny podobné zkušební parametry jako v předchozí sérii: typ pryskyřice, délka spojovací desky, tuhost desek ( $E \cdot A$ ), vyztužení průřezu (na vyrovnání příčného napětí), tvar drážek pro desky, klima expozice, atd. Kromě toho byl počet a rozmístění desek novým parametrem. Hlavním cílem této série bylo dosáhnout geometrické optimalizace spojů spolu se snížením vedlejších tahových napětí kolmo k vláknům. Bylo použito třech až pěti desek s délkou mezi 50 až 120 mm na jeden spoj a spoje s různými druhy uspořádání (obr.č. 32 viz příloha). Pevnost se obecně zvyšuje s rostoucím počtem desek ve spoji. Vzdálenost 20 mm mezi lamináty a kotevní délka od 100 do 150 mm se ukázala být optimální. S takovou geometrií může spoj přenést zatížení až téměř 250 kN, což představuje namáhání v tahu o síle  $22,7 \text{ N/mm}^2$ , pokud jde o hrubý průřez. Pokud jde o čistý průřez, pevnosti v tahu dosahovaly až  $40 \text{ N/mm}^2$ , což představuje tahové napětí na úrovni, které je pro většinu smrkových dřevěných prvků v praxi dostačující. Optimálně navržený spoj je charakteristický vyšší smykovou pevností lepidla než dřeva v kontaktní zóně, namáháním ve stříhu a pevností dřeva. [10]

Obr.č. 31: Tahové zkoušky na lepených olaminovaných vzorcích (GFRP lamináty), vzorky jsou konstrukčních velikostí



(Steiger, nedatováno [10])

Otestované provedení / parametry:

Délka rozporu:  $l$ : 50, 75 a 115 mm

Vzdálenost mezi rozpory: 16, 18, 20, 24, 26, 30 mm

Lamely: GFRP,  $t = 2.8 \text{ mm} \rightarrow E \cdot A = 5,8 \text{ až } 6,2 \text{ MN}$

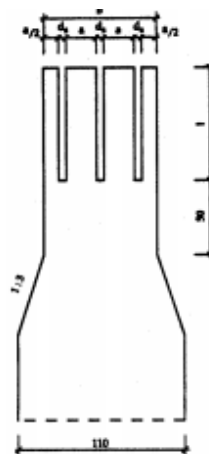
GFRP,  $t = 3.7 \text{ mm} \rightarrow E \cdot A = 9,8 \text{ MN}$

GFRP,  $t = 4,7 \text{ mm} \rightarrow E \cdot A = 16,4 \text{ MN}$

Oceli S 235,  $t = 4.0 \text{ mm} \rightarrow E \cdot A = 84 \text{ MN}$

Tloušťka vrstvy lepidla: 0,70, 1,00, 1,10, 1,15, 2.10 mm

Obr.č. 33: Geometrie vzorků pro zkoušky v tahu



(Steiger, nedatováno [10])

Podle zkoušek v tahu na malých vzorcích se pevnost spoje zvyšuje spolu s větší délkou čepu a rozporu, ale průměrná konečná pevnost ve smyku je - vzhledem k vlastnostem smykového napětí rozložena podél spoje - jednoznačně menší s delším rozporem a čepem. Toto rozložení smykového napětí spolu s působením příčných tahových sil a koncentrací smykového napětí na spoji určují poruchy metody. Koncentrace napětí se mohou snížit použitím tužšího laminátu (E·A), který zvýší společnou pevnost. Koncentrace napětí se také může snížit rozšířením šířky rozporu ve spoji. Díky zkosení spoje o 15 mm délky a 1 mm šířky (obr.č.32 viz příloha) zvýšila pevnost až o 25 %! Zvýšená síla byla získána také posílením vzorku bukovou překližkou za účelem tlumení příčných tahových sil (obr.č. 32 viz příloha, typ 6). Jiný účinný způsob jak snížit příčné tahové síly a tím zvýšit i pevnost spoje je zvýšit počet spojovacích prvků. Blízké rozteče prvků zvyšují pevnost spoje, ale pevnost v tahu se může stát limitujícím činitelem. Spojovací prvky v blízkosti povrchu vzorku efektivně snižují efekt odloupenutí.

Z důvodu možného oslabení spojů způsobené druhotnými napětími v důsledku rozdílného smršťování a bobtnání vyvolané změnami v MC, byly provedeny dlouhodobé testy (1 rok) na základě několika klimatických situací:

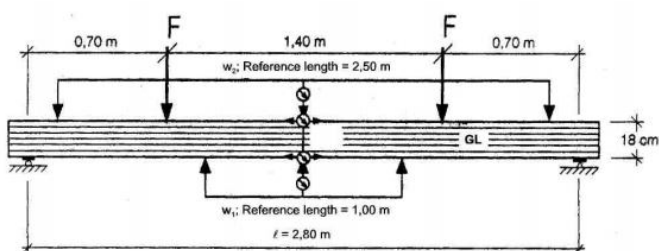
- vlhké podnebí: 20°C a 95% relativní vlhkosti vzduchu,
- změny klimatu: 6 týdnů v intervalech 20°C a 95% / 35% relativní vlhkosti vzduchu,
- venkovní, pod přístřeší: přírodní cykly teploty a vlhkosti vzduchu. [10]

Vzorky zkoušené za výše uvedených podmínek měly ve smyku o 15% nižší pevnost než vzorky testované při vlhkosti 12%, které nebyly vystaveny klimatickým změnám ani vlivu času. [10]

### Testy v ohybu

U dřevěných konstrukcí se jako dílce často v praxi používají nosníkové prvky. Spoje nosníků musí být tuhé, aby se zabránilo vychýlení. Proto byly provedeny 4-bodové krátkodobé i dlouhodobé ohybové zkoušky na trámech s průřezem 120 x 180 mm a délce 2,80 m spojené ve středu délky (obr.č. 34). Byly zkoušeny tři různé délky spoje (čep a rozpor) (obr.č. 35) spojené pomocí prvků. Geometrický návrh a zhotovení spoje byly založeny na poznacích získaných z tahových zkoušek. [10]

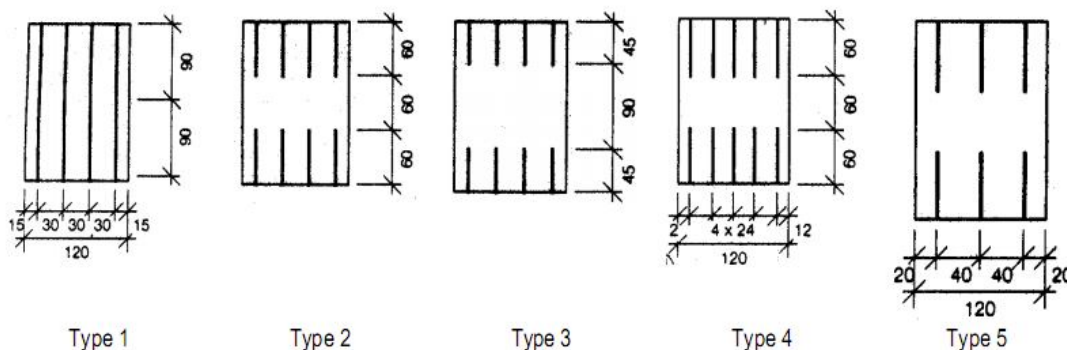
Obr.č. 34: Zkouška v ohybu – uspořádání



(Steiger, nedatováno [10])



Obr.č. 35: Geometrie zkoušených těles v ohybu



(Steiger, nedatováno [10])

Šířka drážky: 6 mm

čep a rozpor délky:

L1 až L3 = 75 mm

L4 = 50 mm

L5 = 115 mm

Dosažené hodnoty byly uspokojivé pro všechny tři délky čepů resp. rozporů. MOR byl mezi  $30 \text{ N/mm}^2$  a  $34 \text{ N/mm}^2$ , což je odpovídající úroveň při navrhování prvků - lepených nosníků. Zvýšení průhybu nosníků vzhledem ke spoji bylo pouze v rozmezí 6 až 12 % ve srovnání se vzorky beze spoje tzn., že tuhost spoje se ukázala být pozoruhodná. První provedení výzkumu u zkoušky dlouhodobého ohybu na vzorku se společnou konfigurací 2 podle obr.č. 35 bylo uskutečněno tak, že se zvyšovalo napětí v ohybu až na  $27,5 \text{ N/mm}^2$  po časových intervalech 28 dní (první fáze) a 7 dní (druhá fáze). Při napětí okolo  $25 \text{ N/mm}^2$  se průhyb výrazně zvýšil. Ve druhé sérii dlouhodobých zkoušek – dotvarování nosníku s maximálním napětím v ohybu  $22,5 \text{ N/mm}^2$ , což je asi 2x vyšší než dovolené napětí, se zvýšila deformace do 26 měsíců o cca 20 %, což ukazuje postupnou stabilizaci dotvarování. Po uplynutí 22 dnů bez zátěže byl nosník podroben zvýšenému krátkodobému ohybu. Bylo dosaženo napětí ve výši  $33,4 \text{ N/mm}^2$ , které neukázalo snížení pevnosti v ohybu ve srovnání se vzorky testovanými pouze za krátkodobého zatížení. Hodnota dlouhodobého zatížení byla poměrně vysoká, ale při této zkoušce nedocházelo ke změnám klimatických podmínek. Na

základě hrubé extrapolace křivky tečení (obr.č. 36 viz příloha) je třeba vzít v úvahu dotvarovací faktory 1.0 pro časové rozpětí od 100 do 200 let. [10]

### Vyhodnocení a optimalizace různých lepidel

V dalším kroku se zaměřili na optimalizaci lepidla na CFRP na dřevo a hodnotili teplotní odolnost a vlastnosti tečení. Obchodní lepidla, stejně jako další výrobky upravené pro tuto konkrétní aplikaci (tab.č. 5) byly hodnoceny se zvláštním ohledem na náklady, pevnost a tuhost spoje, vlastnosti tečení a vliv teploty (až 80°C). [10]

Tab.č. 5: Hodnocení originálních výrobků a jejich úprava

Výrobek	Typ	Složky	Plnivo (original)	Úprava
A	Epoxid.	2	ne	žádná
B	Epoxid.	2	ne	
C	Epoxid.	2	ne	
D	Polyester.	2	ne	
E	Epoxid.	2	ne	
F	Epoxid.	2	ne	
G	Epoxid.	1	ano	
H	Epoxid.	1	ano	
I	Epoxid.	1	ano	
C-Mod1	Epoxid.	2	ne	křemenný prášek: 0,78.(GPRYSK.+GTUŽID.)
C-Mod2	Epoxid.	2	ne	křemenný prášek: 1,04.(GPRYSK.+GTUŽID.)
D-Mod	Polyester.	2	ne	křemenný prášek: 0,78.(GPRYSK.+GTUŽID.)
E-Mod	Epoxid.	2	ne	křemenný prášek: 0,78.(GPRYSK.+GTUŽID.)

(Steiger, nedatováno [10])

### **Zkoušky torzní vibrace**

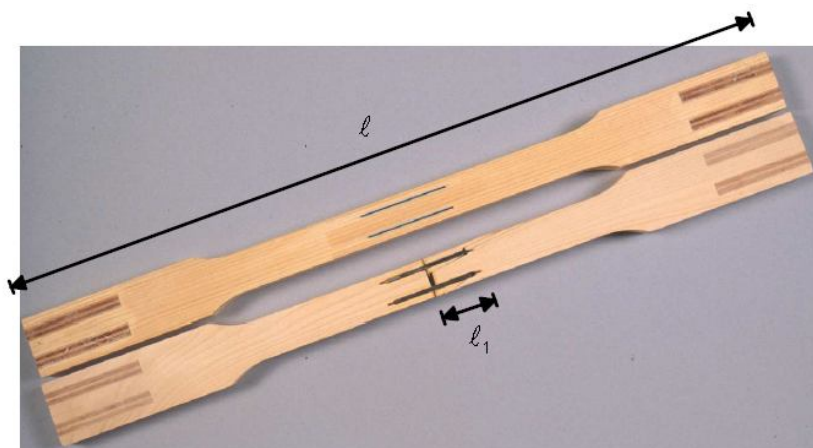
První hodnocení nízko viskozitních lepidel byla provedena na základě zkoušky torzní vibrace podle DIN 53445. Hlavním parametrem zájmu byla teplota skelného přechodu tj. teplota, při které lepidlo přechází z tuhé-elasticity do měkkého-elastického stavu stejně jako teplota, při které modul pružnosti ve smyku (paměťový modul  $G'$ ) začíná klesat (obr.č. 37 viz příloha). [10]

### **Tahové zkoušky**

Následně byly provedeny tahové zkoušky na malých vzorcích (obr.č. 38) s cílem vyhodnotit výkon lepidel a jejich úprav vybraných na základě testů torzní vibrace. Tvar vzorků byl optimalizován tak, aby byl vzorek silou porušen. Série testů v tahu byly zaměřeny na získání informací o

- způsobilosti a schopnosti procesu lepení vyhodnocené pomocí testů torzní vibrace,
- síle / deformaci při různých teplotách (20°C, 50°C, 60°C, 70°C, 80°C),
- vlivu doby zatížení (krátkou dobu - 2 min, šikmé zatížení a stálé zatížení během 0,5 h, 16 h, 21 h),
- vlivu na vytvrzování (vytvrzování 7 dní při pokojové teplotě, vytvrzování 1 den při pokojové teplotě a post-vytvrzování při 80°C v průběhu 4 h),
- vlivu základových laků ke zlepšení adheze,
- vlivu na tuhost lamel. [10]

Obr.č. 38: Zkoušky v tahu na malých vzorcích s cílem optimalizovat tuhost materiálů a vyhodnotit použitá lepidla



(Steiger, nedatováno [10])

Obr.č. 38: Zkoušky v tahu na malých vzorcích s cílem optimalizovat tuhost materiálů a vyhodnotit použitá lepidla



CFRP lamela T700  
 $E = 152 \text{ GPa}$   
 $f_t = 2300 \text{ MPa}$   
 $\epsilon_u = 1,51\%$

CFRP lamela T300  
 $E = 109 \text{ GPa}$   
 $f_t = 1115 \text{ MPa}$   
 $\epsilon_u = 1,05\%$

Vyztužené upínací zóny,  
 aby se zabránilo roztržení  
 vzorků kolmo k vláknům

(Steiger, nedatováno [10])

## **Výsledky**

### **Vliv na tuhost lamel**

Zkoušky prováděné při okolní teplotě ukázaly, že tuhost materiálu přenosu zatížení tj. dřevo, CFRP a pojivo mají rozhodující vliv na celkovou pevnost spoje. Tuhost závisí na poměru dřeva / lepidla / lamela a musí být vyvážené. Lepidla a vyztužení s nejvyšší tuhostí, poskytovaly lepší výsledky testů. Výrazně vyšší pevnost spojů na bázi lamel T700 bylo dosaženo díky lepší přilnavosti lepidla / lamel a optimalizovanému rozdělení napětí na kontaktních zónách (obr.č. 39 viz příloha). [10]

### **Vliv plniv**

Pro celý testovaný teplotní rozsah měla lepidla s plnivou vyšší pevnost, než bez nich (obr.č. 40 viz příloha). [10]

### **Vliv teploty (obr.č. 40 a 41 viz příloha)**

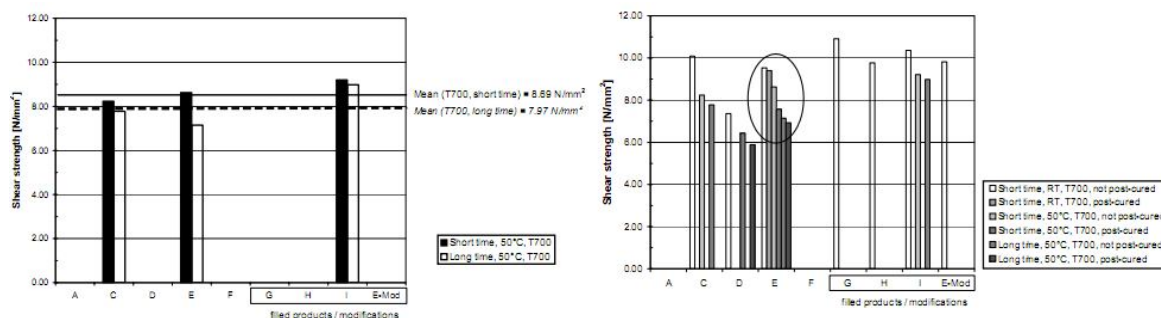
Ve srovnání s normální teplotou došlo u všech lepidel vystavených při zkoušce  $T = 50^{\circ}\text{C}$  k určité ztrátě smykové pevnosti. Při teplotách nad  $T = 50^{\circ}\text{C}$  lepidla s plnivou fungovala lépe, než bez plniv vzhledem k pevnosti a tuhosti. Nad  $T = 70^{\circ}\text{C}$  žádný z testovaných produktů a jejich modifikací nedosahoval dostatečné pevnosti a tuhosti. Při teplotách nad  $T = 50^{\circ}\text{C}$  došlo obvykle k vnitřnímu selhání lepidel s plnivou. [10]

### **Charakteristiky tečení**

Žádné významné deformace tečení a ztráty síly pro trvalé zatížení po dobu max. 16 až 21 h v  $T = 50^{\circ}\text{C}$  nebylo zjištěno (obr.č. 42 viz příloha). Někdy jsme mohli sledovat dokonce mírně vyšší pevnost spoje při stálém zatížení za zvýšené teploty kvůli provázání a snížení koncentrace napětí. [10]

Obr.č. 43: Pevnost ve smyku při  $T = 50^{\circ}\text{C}$  pro různé zatěžovací doby

Obr.č. 44: Vliv post-formování ( $4\text{h}/80^{\circ}\text{C}$ )



(Steiger, nedatováno [10])

### Vliv post-formování

Žádný významný vliv na pevnost a tuhost spojů nebyl pozorován při zkouškách krátkodobého a dlouhodobého zatěžování (obr.č. 43 viz příloha). [10]

### Možnost využití

Pro uplatnění v praxi je třeba brát v úvahu několik užitečných rad:

- důležitá je příprava lepících ploch,
- působení silně exotermické reakce na přípravky a zvláště na takové přípravky, které jsou velmi citlivé na poruchy směsi pryskyřice / tužidla by mohla způsobit problémy při praktickém použití,
- v závislosti na aplikaci by měl být vybrán (zvolení a výběr) produkt s odpovídající viskozitou,
- vytvrzování za nízkých teplot ( $T < 15 - 20^{\circ}\text{C}$ ) může vyvolat neúplné vytvrzení,
- problémy s přilnavostí vyskytující se při  $50^{\circ}\text{C}$  mezi CFRP a některých lepidla nemohly být uspokojivě překonány použitím resorcinového nátěru. [10]

## **Závěry výzkumu**

Zkoušky prokázaly, že účinné spoje s vysokou tuhostí a nosností mohou být prováděny pomocí FRP laminace. V případech, kdy je důležité vyzdvihnout vzhled a odolnost proti korozi, může pak být použití laminace FRP cennou alternativou. Technicky není použití FRP laminátů překážkou, avšak používání těchto přípravků u dřevěných konstrukcí vyžaduje zkušenost a zejména vyšší kvalitu při provádění než u tradičních spojů a vyztužování. Pro provádění šetření vyšly četné výsledky kvantitativní povahy, zejména pevnosti a tuhosti, stejně jako výsledky kvantitativní povahy týkající se vhodnosti materiálů, které byly v podstatě lepidla a FRP. Problémy proveditelnosti, které hrají rozhodující roli pro kvalitu spoje, byly také objasněny. Aktuálně se na trhu vyskytují lepidla, která zaručují spolehlivé, tuhé a dobré spojení slepením HSF laminátů ke dřevu. Produkty však musí být pečlivě vybrané s ohledem na rozsah teplot, aby byly vhodné pro konkrétní podmínky v praxi.

Jak se očekávalo, tak spojení epoxidové pryskyřice a dřeva bylo bez problémů. Ale nebylo snadné dosáhnout dostatečné přilnavosti na povrchu lamel FRP. (Tento problém nelze uspokojivě vyřešit ani použitím resorcinového nátěru.) Kvalita vyplnění spár velmi závisí na viskozitě pryskyřice, která postupně ovlivňuje objemové smrštění a prostřednictvím kvality naplnění spáry i pevnost náplně. Kotevní délka lamel má být stanovena za předpokladu, že pojivo je vždy silnější než dřevo a že maximální možné smykové napětí, které mohou přenášet, je rovna smykové pevnosti dřeva. Tímto způsobem se předejde vnitřnímu selhání lepidla. Prvek opravovaný lamelami FRP by měl být suchý, neboť dřevo absorbuje vodu a to může být příčina nabobtnání a vzniku tlaků v lepidle. Vlhkost se bude také nacházet pod laminátem a to by mohlo vést k rozpadu-hnilobě dřeva. Proto se dodatečná opatření musí použít jako ochrana opraveného povrchu trvale před deštěm stejně jako před přímým slunečním zářením. [10]

## 2.5 Dřevěné nosníky vyztužené předpjatými vlákny: delaminace [5]

Delaminace je hlavní problémem u lepených nosníků, které jsou posíleny přidanými předpjatými vysokopevnostními vlákny v tažené části nosníku. V projektu COST E13 autoři analyzovali dvě možná řešení. První řešení zahrnuje použití speciálního zařízení pro přidání předpjatých vláken v několika fázích od středu nosníku. Druhý přístup zahrnuje zdokonalování použitého "tvárného" lepidla, které šíří předpínací síly přes větší plochu na koncích nosníku. Zkoušky s předpínacím zařízením dosahují uspokojivých výsledků. Zkoušky s různými lepícími směsmi přinesly některé zajímavé výsledky průkopnické povahy, nicméně pevnost upnutí zaostala za očekáváním. Témata by mohla být použita pro další výzkumnou práci. [5]

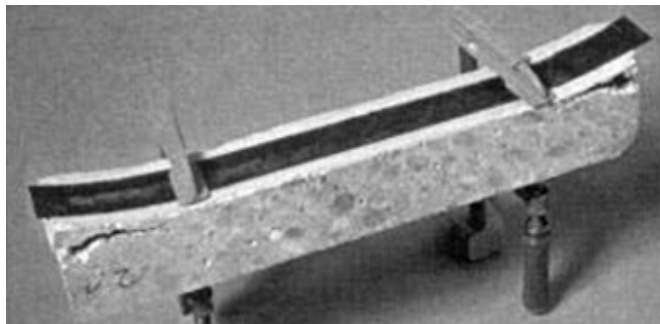
### Úvod do tématu

Metoda se někdy používá ke zvýšení únosnosti lepených nosníků a zahrnuje použití vysokopevnostních vláken v tažené části nosníků. Praktická zkušenost ukazuje, že vysoká pevnost těchto vláken nemůže být plně využita, pokud jsou vlákna prostě lepeny na nosník. Proto někteří vědci hledají cesty, jak připevnit předpjatá vlákna, aby se lépe využila jejich vysoká pevnost a zároveň aby se snížilo množství těchto vláken a tím i potřebné náklady. [5]

Lepené nosníky zatížené ve směru vláken vykazují vysokou pevnost. Teoreticky by mělo být možné použít velmi vysoké předpínací síly na relativně malém průřezu. V praxi mohou být použity pouze malé předpínací síly, protože kvůli delaminaci hrozí nebezpečí rozvrstvení způsobené přenosem síly z umělých vláken na koncích nosníku do hlavní části nosníku. Pokud jsou použita obvyklá lepidla vyskytující se na trhu, jsou předpínací síly upevněny na malé ploše na obou koncích nosníku. Výsledkem přenosu koncentrované síly se indukují vysoké tlaky ve směru kolmém k vláknům, kde postačuje nízká energie k vytvoření povrchových trhlin. Toto vede k předčasné delaminaci podél linie lepidla nebo k praskání dřeva. Jak obr.č. 45 ukazuje, nebezpečí delaminace je také dobře známo u betonových nosníků, které jsou podobně vyztuženy. [5]



Obr.č. 45: Delaminace: předpjaté vlákno je odtržené od betonového nosníku



(Brunner, Schnueriger, nedatováno [5])

V rámci projektu COST akce E13 "Lamelové dřevo a lepené výrobky" zahájili autoři výzkumný projekt na analýzu dvou nadějných přístupů k problému delaminace. Výzkum byl zaměřen na následující dvě témata:

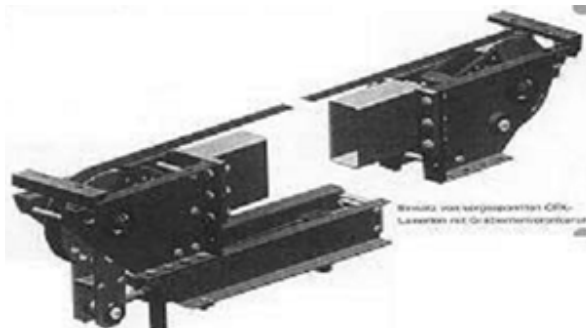
- První téma bylo, že upevňovací technika vyvinutá pro betonové konstrukce by mohla být úspěšně použita i na dřevo.
- Druhým tématem bylo, že přenášené síly by mohly být rozloženy na větší plochu nosníku s pomocí "tvárného" lepidla. [5]

### **Možné řešení problému delaminace**

#### **Kotevní technika**

Dřevařský průmysl se může učit od pokročilejší výzkumné práce se zaměřením na vyztužení stávajících betonových konstrukcí. Například ve Švýcarsku, EMPA (Švýcarský zkušební ústav materiálů) vyvinul speciální předpínací zařízení - kotevní systém, které aplikuje předpínací síly v několika fázích. V první fázi se na střední průřez obou nosníků připojují předepjatá vlákna aktivací lepidla teplem. Síla je pak mírně snížena a další části vlákna jsou připojovány k nosníku. Ve skutečnosti se předpínací síly šíří po celé délce nosníku, čímž se sníží maximální napětí (obr.č. 47, 48, viz příloha). [5]

Obr.č. 46: EMPA Předpínací zařízení - kotevní systém (Stöcklin Meier)

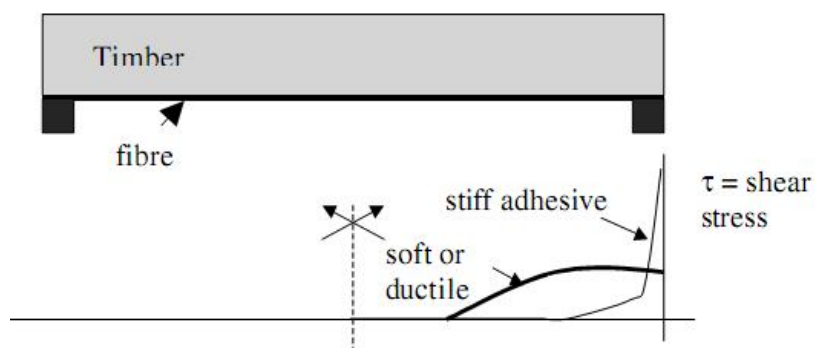


(Brunner, Schnueriger, nedatováno [5])

### Vývoj tvárného lepidla

Přístroj používá EMPA epoxidové lepidlo, které se používá v dřevařském průmyslu jen zřídka. Teoreticky by mělo snížit velké koncentrace napětí na koncích nosníku také šíření přenosu síly přes větší plochu nosníku s pomocí "tvárného" lepidla (obr. č. 49). Autoři se rozhodli pro realizaci s použitím lepidla lépe známého v oblasti dřevozpracujícího průmyslu. Experimenty byly provedeny na lepených nosnících vyztužených předpjatými uhlíkovými, aramidovými nebo skleněnými vlákny. [5]

Obr.č. 49: Možný vliv typu lepidla na rozložení smykového napětí na koncích nosníku vyztuženého předpjatým umělým vláknem



(Brunner, Schnueriger, nedatováno [5])

## **Program výzkumu**

### **Tento výzkum zahrnoval následující činnosti:**

1. Vyhledat „tvárné“ lepidlo. Byly vybrány dva typy lepidel: epoxidové a polyuretanové báze. Další varianty byly vytvořené smícháním obou složek v různých poměrech. Různé směsi lepidel byly použity na slepení dvou dřevěných vzorků, které byly testovány v pevnosti ve smyku v souladu s evropskou normou standart EN 205. Zvláštního zájmu byla křivka o síle a deformaci a údaje o pružném chování. Nejslibnější směsi byly vybrány pro druhou sérii zkoušek.

2. Vzorky uhlíkových vláken lepené na dřevěné desky směsmi lepidla, které byly vybrané při smykových zkouškách, byly podrobeny výše uvedené zkoušce tahem. Cílem testu bylo vybrat směs, která by umožnila přenést velké předpínací síly a bezpečně připojila vlákna k lepenému nosníku.

3. Všechny lepené nosníky vyztužené vlákny připojené pomocí vybraných lepících směsí byly testovány v ohybu.

4. V závěrečné sérii zkoušek, všechny lepené nosníky byly vyztuženy použitím EMPA kotevní techniky. Vyztužené nosníky byly testovány v ohybu. [5]

## **Testy**

### **Analýza lepidel směsi a testů v tahu / smyku**

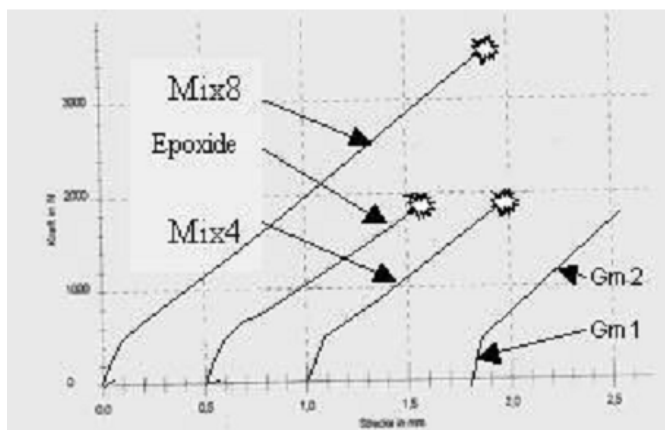
Dvě hlavní složky epoxidové a polyuretanové báze byly smíchané v různých poměrech a byly určeny jejich vlastnosti zejména vytvrzovací časy. Dvě směsi (4 a 8) přinesly uspokojivé časy tvrdnutí a byly vybrány pro zkoušku pevnosti ve smyku. Pro účely kontroly byly použity také vzorky prováděné s nemíchaným epoxidovým lepidlem. Obr.č. 50 ukazuje nastavení pro zvolené smykové zkoušky. Tři různé lepící směsi byly použity, v tenkých vrstvách (méně než 0,1 mm) používané v průmyslu, a pak v tlustší vrstvě (0,6 mm). Celkem asi 20 až 30 vzorků byly použity pro každou ze 6 zkušebních sérií. [5]

Obr.č. 50: Nastavení pro smykové zkoušky podle německé normy DIN EN 205



(Brunner, Schnueriger, nedatováno [5])

Obr.č. 51: Křivky síly a deformace při testu ve smyku (střední hodnoty jednotlivých druhů lepidla s tenkými vrstvami jsou uvedeny zde)



(Brunner, Schnueriger, nedatováno [5])

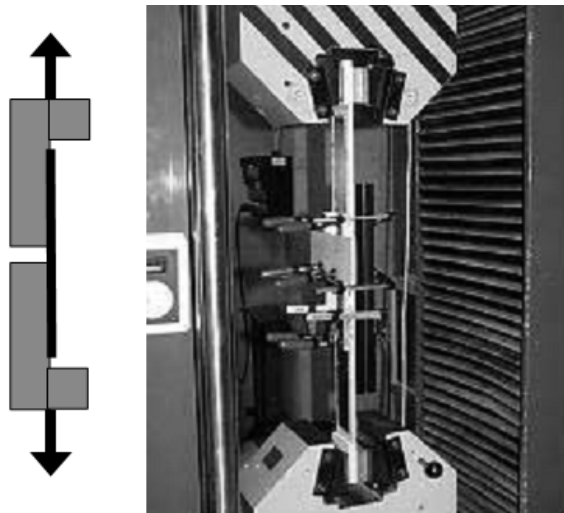
Výsledky smykových zkoušek, jest uvedené v obr.č. 51, lze je shrnout takto:

- křivky zatížení a deformace všech zkušebních vzorků na displeji ukazuje na počáteční prudký nárůst a následuje pozvolnější svah. Po dosažení maximálního zatížení síla náhle klesá,
- všechny testované vzorky ukazují podobné sklony průběhu křivky síly a deformace,
- poškození dřeva se obvykle objevilo v důsledku smyku na povrchu nosníku,
- porušení při zatížení záviselo na druhu použité lepicí směsi: nejlepší lepidlo mix 8 vystavené zatížení, dosáhlo při porušení o dost vyšší hodnoty, než bylo dosaženo směsmi 100% - epoxidové a směsí mix 4. [5]

### **Tahové zkoušky**

Pro lepicí směs 8, která měla nejlepší výsledky při smykových zkouškách, byl vybrán k vyztužení nenapjatý laminát z uhlíkových vláken lepený na dřevěnou desku. Pro kontrolní účely byly další vzorky provedeny pomocí čisté epoxidové a čisté polyuretanové lepicí směsi. Tahové zkoušky byly provedeny na 10 exemplářích, které určily pevnost v tahu pro laminát z uhlíkových vláken spojených s dřevěnou deskou. Zkouška v tahu je uvedena na obr.č. 52. Byly použity tenké vrstvy lepidla. Vzorky byly stabilizovány proti boční deformaci, aby se zabránilo tahu kolmo k vláknům. Vzhledem k příznivým výsledkům zkoušek pevnosti ve smyku, byla vysoká očekávání od směsi 8. Bohužel původní naděje z dobrého výsledku nemůže být potvrzena v tahových zkouškách. Všechny zkušební vzorky s použitím tří různých lepicích směsí, přinesl podobné výsledky. Maximální předpínací síly asi 30 kN mohou být přenášeny bez strachu z delaminace. [5]

Obr.č. 52: Průběh tahových zkoušek



(Brunner, Schnueriger, nedatováno [5])

### **Zkoušky v ohybu předpjatých lepených nosníků**

Zde byla potřeba ověřit, zda by bylo možné bezpečně připojit předpjatá vlákna lepený nosník reálné velikosti bez delaminace. Zkoušky v ohybu byly provedeny k prokázání zvýšení pevnosti lepených nosníků s přilepenými předpjatými vlákny. Vzhledem k pozitivním výsledkům úvodních zkoušek, byla směs mix 8 vybrána k přilepení předpjatého laminátu na lepený nosník. Bohužel pokus byl naprostý nezdar: předpjatá síla 30 kN zanikla během pěti dnů, protože lepidlo ji neudrželo. Ve druhé sérii testů byly lepené nosníky posíleny uhlíkovým laminátem předpjatým pomocí kotevního systému silou 60 kN, což je síla běžně používá v souvislosti s betonovými nosníky. Lepidlo stanovené pro tento systém, bylo speciální epoxidové. Experiment byl naprostým úspěchem, protože v tomto případě nebyly žádné známky delaminace nebo tečení. Ve třetí sérii testů byly lepené nosníky posíleny pomocí nepředpjatého uhlíkového laminátu. Pro kontrolu byly připraveny lepené nosníky o stejné velikosti bez vyztužení. [5]

Tab.č. 6.1: Použité zkušební vzorky

Série testů	nevyztužený nosník	vyztužený nosník nenapjatými FRP	vyztužený nosník předpjatými FRP
předpínací síly	-	0 kN	60 kN - kotevní systém
použité lepidlo	-	epoxidové	epoxidové

(Brunner, Schnueriger, nedatováno [5])

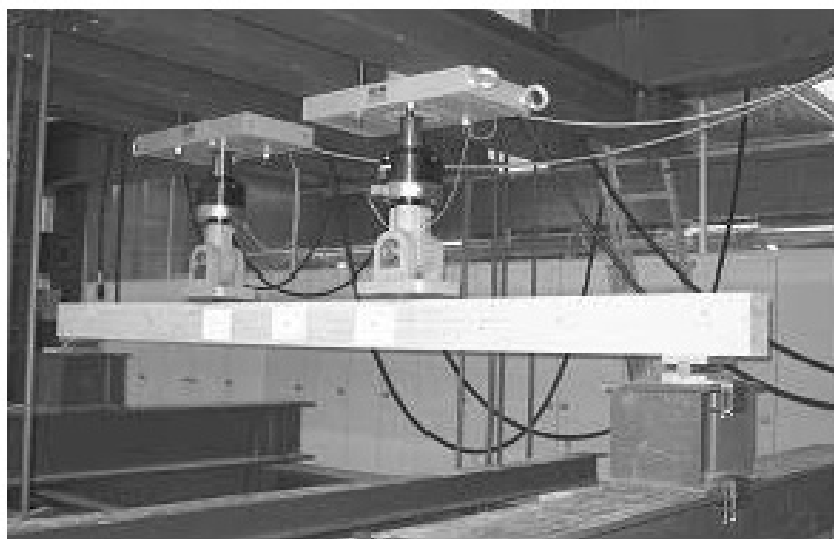
Tab.č. 6.2: Použité zkušební vzorky

Rozměry	šířka x výška [mm]	délka [mm]
uhlíkový laminát FRP	50 x 1,14	4000
nosník	200 x 140	4000

(Brunner, Schnueriger, nedatováno [5])

Výsledky ohybových zkoušek jsou uvedeny v tabulce č. 6 a zobrazují, jak mohou být lepené nosníky vyztužené laminátem z uhlíkových vláken nepředpjatých a předpjatých. Testy také prokázaly, že vyztužení předpjatým laminátem je účinnější než použití laminátu nepředpjatého: pevnost nosníku v ohybu byla zvýšena při použití předpjatého laminátu o 32 %, při použití nepředpjatého o 21 % oproti nevyztuženému nosníku. [5]

Obr.č. 54: Čtyřbodová zkouška v ohybu podle německé normy DIN EN 408



(Brunner, Schnueriger, nedatováno [5])

Tab.č. 7: Shrnutí z ohybových zkoušek ukazují na pozitivní výsledky vyztužení lepených nosníků s nenapjatými a předepjatými pásy FRP.

Série	ohybová tuhost EI [N.mm <sup>2</sup> ]		konečný ohybový moment M [kNm]	
	průměrné hodnoty	nárůst	průměrné hodnoty	nárůst
nevyztužený nosník	1,20 E12	0	41,6	0
s FRP nenapjatými	1,43 E12	+19 %	50,4	+21 %
s předpjatými FRP	1,46 E12	+22 %	54,9	+32 %

(Brunner, Schnueriger, nedatováno [5])



### **Závěry provedeného výzkumu dřevěných nosníků s předpjatými vlákny**

Cílem projektu bylo analyzovat dvě možná řešení problému týkající se delaminace při procesu vyztužování lepených nosníků předpjatými umělými vlákny s vysokou pevností. První návrh řešení se týkal předpínacího zařízení vyvinutého ve Švýcarsku EMPA k vyztužování betonových nosníků. Ačkoli předepsané epoxidové lepidlo je k tomuto účelu zřídka používáno v dřevařském průmyslu, zkoušky prokázaly, že systém by mohl také být úspěšně použit k vyztužení lepených nosníků s předpjatými umělými vlákny vysoké pevnosti. [5]

Druhý návrh řešení se týkal úpravy lepidel, která by mohla být pro dřevařský průmysl vhodnější. Cílem studie bylo vytvořit "tvárné" lepidlo, které mělo za úkol díky své "poddajnosti" při vysokém tlaku přenést síly z předpjatého umělého vlákna do hlavní části nosníku, čímž se sníží nebezpečí maximálního napětí, které nastane, pokud se užití běžné tuhá lepidla na trhu. Počáteční testy přinesly zajímavé výsledky průkopnické povahy, nicméně poslední testy selhaly. Předpínací síla 30kN nebyla vzhledem k použitému lepidlu zachována a zanikla během 5 dnů. Důvod nemůže být plně vyjasněn v rámci COST E13 projektu. Je možné, že problém má co dočinění s nedostatečným vytvrdnutím použitého lepidla mix 8. [5]

### 3. VÝBĚR VHODNÉHO VLÁKNA PRO VYZTUŽENÍ

Hledisek, kterých obecně při navrhování vyztužení nosných konstrukcí vysokopevnostními vlákny musíme brát v úvahu, je hned několik. Aby výztuž splňovala svůj účel, potřebuje mít požadované technické parametry. Nejčastějšími řešeními parametry pro vyztužení jsou pevnost v tahu, hustota, hmotnost, modul pružnosti, odolnost proti korozi a mnoho dalších. Všechny tyto kritéria se pro správnou aplikaci musí zohlednit. Neméně důležitým hlediskem je technologie spojení výztuže spolu s vyztužovaným materiálem. Spojení těchto prvků se nejčastěji provádí lepidly, záleží na podobě a typu vlákna a taktéž na typu zesilovaného materiálu.

Jelikož tyto high-tech materiály jsou relativně nové výrobky, tak náklady na jejich výrobu jsou vysoké, ačkoli cena vysokopevnostních vláken se od počátku komerční výroby snížila, přesto jsou ceny v porovnání s jinými stavebními materiály dražší.

Skleněná vlákna se vyznačují modelem pružnosti v tahu kolem 60 GPa, pevností v tahu zhruba 1000 MPa a hustotou  $2,4 \text{ kg}\cdot\text{dm}^{-3}$ . Tyto vlastnosti jsou výborné, ale nedosahují hodnot uhlíkových ani aramidových vláken. Skleněná vlákna však nelze použít kvůli efektům porušení při tečení. Jedná se zejména o místa trvale namáhané napětím ve smyku či v ohybu. [11]

Uhlíková vlákna z hlediska parametrů vyčnívají před ostatními dvěma materiály. Modul pružnosti v tahu mají až 600 GPa, pevnost v tahu až 4000 MPa a hustota vláken je kolem  $1,9 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Uhlíková vlákna jsou ideální materiál na vyztužování dřevěných konstrukcí. [11]

Aramidová vlákna se díky jejich odolnosti proti vodě používají např. jako kotvící lana a další využití pod vodou. Parametry vláken jsou: modul pružnosti v tahu až 100 GPa, pevnost v tahu 2000 MPa a hustota cca  $1,5 \text{ kg}\cdot\text{dm}^{-3}$ . [11]

V oblasti stavitelství se vysokopevnostní vlákna používají spíše ve formě kompozitu. Je to materiál složený dvou či více fází, které mají rozdílné fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti. Spojitá fáze v kompozitu se nazývá matrice, druhá fáze – nespojitá je výztuž. V porovnání obou materiálů má výztuž lepší mechanické vlastnosti. Polymerní matrice má splnit několik požadavků. Chrání výztuž před poškozením, zajišťuje jejich polohu a roznáší namáhání na všechna vlákna. V našem oboru se nejvíce využívá matric z reaktoplastů (epoxidové a polyesterové pryskyřice). [11], [6]

### **3.1 Uhlíková vlákna (vlákna polykrystalická) [3]**

Uhlík existuje ve třech formách: diamantové, amorfní a grafitové. Vysoký modul pružnosti mají ale jen krystalické formy. Tato vlákna mají jiné vlastnosti než vlákna kovová, skelná, plastová nebo křemenná. Uhlík totiž netaje, není tažný a je naprosto odolný vůči rozpouštědlům, z těchto důvodů jsou všechny uhlíkové materiály získávány pyrolýzou organických sloučenin vyjma grafitu. [3]

Pyrolýza je proces, kdy dochází k termálnímu rozkladu organických sloučenin jako např. uhlí, ropa, smoly, polymery či uhlovodíky za nepřítomnosti jiných chemických činitelů. Vlákna mohou být vytvořena s různou tuhostí a pevností. Prameny, které se dodávají, obsahují 3 – 10 tisíc a i více vláken většinou s průměrem 8  $\mu\text{m}$ . Jedním z důležitých procesů vytvoření uhlíkových vláken je tzv. grafitizace – jedná se o zahřívání, které vede k vývoji vlastností uhlíkových materiálů. [3]

Výhody uhlíkových vláken jsou vysoká pevnost, nízká hustota a vysoký modul pružnosti. Další nespornou předností je vysoká chemická odolnost a neměnnost vlastností až do teploty 2000°C, kdy vlákna z ostatních materiálů své výhodné vlastnosti úplně ztrácí. Vykazují také nízkou tepelnou a elektrickou vodivost a mají nízký koeficient teplotní roztažnosti. Jedinou nevýhodou, kterou tyto vlákna mají, je jejich vysoká křehkost. Uhlíková vlákna se vyrábějí buď jako vysokopevnostní nebo vysokomodulová a podle toho se dělí do 4 kategorií:

- UHS (ultra high strength) – velmi vysoká pevnost  $R_m > 3,1$  GPa,  $E = 200 - 250$  GPa,  $\rho = 1,8 - 2$  kg.dm<sup>-3</sup>
- HS (high strength) vysoká pevnost –  $R_m > 2 - 3,1$  GPa,  $E = 200 - 250$  GPa,  $\rho = 1,73 - 1,87$  kg.dm<sup>-3</sup>
- UHM (ultra high modulus) velmi vysoký modul –  $E > 400$  GPa,  $R_m > 1,7$  GPa,  $\rho = 1,95$  kg.dm<sup>-3</sup>
- HM (high modulus) vysoký modul –  $E = 300 - 400$  GPa,  $R_m > 1,7$  GPa,  $\rho = 1,8 - 2$  kg.dm<sup>-3</sup>. [3]

Tab.č. 8: Vlastnosti uhlíkových vláken při normální teplotě

Vlastnosti	Vysokomodulový grafit	Vysokopevnostní grafit	Ocel (pro porovnání)
Hustota $\rho$ [kg.dm <sup>-3</sup> ]	1,9	1,9	7,8
Modul pružnosti v tahu E [GPa]	390	240	210
Pevnost v tahu $R_m$ [GPa]	2,1	2,5	0,34 až 2,1
Měrný modul $E / \rho$ [MPa.kg <sup>-1</sup> .dm <sup>3</sup> ]	205	126	26,9
Měrná pevnost [MPa.kg <sup>-1</sup> .dm <sup>3</sup> ]	1,1	1,3	0,043 až 0,27

(Machek, Sodomka, 2008 [3])

### 3.2 Vlákná skleněná (vlákná amorfní) [3]

Skleněná vlákna jsou určena chemickým složením a svými teplotními parametry. Tyto vlákna nemohou konstrukcím poskytovat díky nízkému modulu pružnosti požadovanou tuhost. Vlákná mezi sebou působí velmi abrazivně, čímž se snižuje jejich původní pevnost. To se děje při stáčení do pramenců. Při vytváření pramenců je proto každé vlákno lubrikováno – potaženo mikrotenkou ochrannou vrstvou. [3]

Hlavní předností skleněných vláken je především jejich pevnost. Bohužel je ovlivněna více faktory, jednak výrobními, tak i geometrickými. Největším problémem skleněných vláken je korozní odolnost a to především proti vlhkosti. Díky kompozitu jsou účinku vody vystavena pouze povrchová vlákna, jelikož vnitřní vlákna chrání matrice, jenže nelze vyloučit průnik vlhkosti po vláknech nebo rovnou matricí. Značná část výroby skleněných vláken vychází z tzv. E-skla, vyznačující se vysokým odporem a dobrými tvárnými vlastnostmi. [3]

Tab.č. 9: Typické vlastnosti některých skleněných vláken při normální teplotě

Vlastnost	E - sklo	A - sklo	C - sklo	D - sklo	M - sklo	S a R -sklo	Tavený křemen
Hustota $\rho$ [ $\text{kg}\cdot\text{dm}^{-3}$ ]	2,54	2,48	2,49	2,16	2,89	2,48	2,2
Modul pružnosti v tahu EL [GPa]	72	74	71	54	112	88	75
Pevnost v tahu $R_m$ [GPa]	3500	3100	3200	2500	3500	4900	nad 6000
Podél. souč. tepel. roztažnosti při teplotě 25 - 100°C $\alpha$ [ $10^{-6}\text{K}^{-1}$ ]	4,9	8,55	7,2	3,1	5	2,9	5,5
Specifické teplo [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	798	–	789	735	–	739	714
Teplota při bodu měknutí [°C]	846	695 - 720	750	770	–	970	1667

(Machek, Sodomka, 2008 [3])

### 3.3 Vlákna aramidová (vlákna syntetická) [3], [7]

Syntetická vlákna se vyrábí ve formě nekonečného vlákna a ve formě stříže, přičemž poměr těchto forem závisí na druhu chemických vláken. Z vláknotvorných polymerů se vytváří vlákna protlačováním jemnými otvory zvláknujících trysek. Pro toto protlačování musí být polymer v kapalně formě buď jako tavenina či jako roztok. Polymery je možné tedy zvláknovat z taveniny nebo z roztoku (suchým nebo mokřým způsobem). [3]

Všechna polymerní vlákna mají charakteristickou vlastnost, že nejsou křehká. Za předpokladu, že na vlákna působí tlakové síly ve směru kolmém na průběh vlákna, se vlákno plasticky přetvoří. Díky tomuto jevu jsou vlákna vhodná na výrobu neprůstřelných vest, ochranných oděvů a rukavic. Jako u ostatních běžných polymerů je mez kluzu v tlaku nízká. Pokud působí tahová složka napjatosti v mikroobjemu ve směru kolmém na průběh vlákna, může dojít i k podélnému rozštěpení a fibrilaci hmoty vlákna. [7]

Tab.č. 10: Typické vlastnosti některých aramidových vláken při normální teplotě

Vlastnosti	HM-50	Kevlar 29	Kevlar 49	Kevlar 149	Twaron 930	Nome x
Hustota $\rho$ [ $\text{kg}\cdot\text{dm}^{-3}$ ]	1,39	1,44	1,44	1,47	1,45	1,4
Modul pružnosti v tahu E [GPa]	80	80	130	146	125	17,3
Pevnost v tahu $R_m$ [GPa]	3100	3600	3600	3400	3000	700
Měrný modul $E/\rho$ [ $\text{MPa}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{dm}^3$ ]	57,56	55,55	90,3	99,3	86,2	12,4
Prodloužení [%]	4,2	4	2,5	2	2	22,6

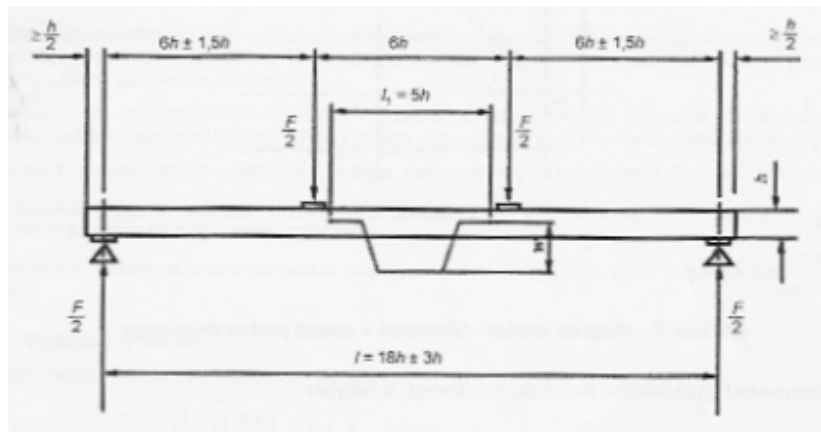
(Kořínek, nedatováno [7])

## 4. METODIKA

V této části práce bylo navázáno na výzkumy, jak bylo výše uvedeno, se zaměřením na zjištění pevnosti vyztuženého masivního dřeva uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny. Uhlíková vlákna dodala švýcarská firma Sika, která má okolo dvaceti poboček v české republice. Technický list použitých uhlíkových vláken je zobrazen v příloze – technický list č.1. S inženýrem Šedivkou, Ph.D jsme byli konzultovat problematiku vyztužování nosných konstrukcí v Čerčanech u Prahy. Mimo toto téma se firma zabývá vývojem a výrobou produktů pro těsnění, lepení, izolace, jak ve stavebnictví, tak v průmyslu. V této oblasti je jedničkou na světovém trhu a letos slaví sto let od svého vzniku.

Celkový počet nosníků je 30 kusů, tedy po deseti kusech s oběma druhy adheziva a zbytek jsou nosníky nevyztužené. Je to minimální počet, který udává norma ČSN EN 408 [21]. Řezivo na výrobu nosníků pochází od společnosti ASKO Uhřetěves a.s. a bylo dodáno ve formě prken o rozměrech 40 x 80 x 3000 mm zatřízených dle normy ČSN EN 1611-1 [22]. Třídění proběhlo dle postupu G4 třídy 0 (suky a ostatní znaky posuzovány na dvou plochách a dvou bocích). Prkna byla ponechána cca jeden měsíc ve vhodném prostředí, tzn. při relativní vzdušné vlhkosti  $w_r = 65 \% \pm 5 \%$  a teplotě  $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ , pro zjištění ustálení vlhkosti byla provedeny dvě vážení po 30 dnech v rozmezí šesti hodin to vše dle normy ČSN EN 408 [21]. Výsledky vážení se nelišily více než o 0,1 %. Následný výpočet vlhkosti dřeva byl proveden dle normy ČSN EN 13183-1 [23] a pro zajímavost změřen hrotovým vlhkoměrem VHT 650 od firmy Elbez [19] (rozsah měření 5-50 %, chyba měření 1 % při vlhkosti do 25 %, 3 % při vlhkosti nad 25 %). Naměřené a vypočtené hodnoty vlhkosti byly 12 %. Prvky byly připraveny k obrobení na přesný rozměr 66 x 30 x 1500 mm. Výpočet byl proveden dle normy ČSN EN 408 [21].

Obr.č. 55: Uspořádání zkoušky pro měření lokálního modulu pružnosti v ohybu



(ČSN EN 408 [21])

### Výpočet velikosti vzorku

Výpočet výšky a délky byl proveden dle normy ČSN EN 408 [21]. Vzdálenost ( $l_p$ ) mezi přípravky univerzálního stroje byla zvolena 400 mm.

$$h = l_p / 6 = 400 / 6 = 66,67 \text{ mm} \rightarrow \underline{66 \text{ mm}}$$

$h$  – výška prvku

$$l = 18h \pm 3h + 2*(\leq h/2) \text{ (avšak vzdálenost podpěr od konců by neměla být menší než 150 mm)}$$

$$\rightarrow 18*66 + 2*150 = 1488 \text{ mm} \rightarrow \underline{1500 \text{ mm}}$$

$l$  – délka prvku

šířka - musí být brána s ohledem proti vybočení tělesa, pro určení byl zvolen postup výpočtu, který se využívá při návrhu dřevěných vodorovných prvků. Návrh šířky je 30 mm.



### Kritické napětí za ohybu

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78b^2 \cdot E_{0,05}}{h \cdot l_{ef}} = \frac{0,78 \cdot 30^2 \cdot 6700}{66 \cdot (0,77 \cdot 1200 + 300)} = \underline{\underline{58,22 \text{ MPa}}}$$

$l_{ef}$  – účinná délka [ m ]

$h$  – výška trámu [ mm ]

$E_{0,05}$  – hodnota 5 % kvantilu modulu pružnosti [ MPa ]

$b$  – šířka trámu [ mm ]

$f_{m,k}$  – návrhová pevnost v ohybu [ MPa ]

(Kuklík, nedatováno [8])

### Poměrná štíhlost

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{22}{58,22}} = \underline{\underline{0,615}}$$

(Kuklík, nedatováno [8])

### Součinitel příčné a torzní stability

$$k_{crit} = 1 \Rightarrow \text{pro } \lambda_{rel,m} \leq 0,75$$

$$k_{crit} = 1,56 - 0,75 \cdot \lambda_{rel,m} \Rightarrow \text{pro } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4$$

$$k_{crit} = \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} \Rightarrow \text{pro } 1,4 \leq \lambda_{rel,m}$$

$$\underline{\underline{k_{crit} = 1}}$$

(Kuklík, nedatováno [8])

Jelikož je koeficient  $k_{crit}$  roven jedné, vypočtené rozměry spolu s navrženou šířkou 30 mm vyhovují, protože v následujícím výpočtu normálového napětí za ohybu koeficient neredukuje normálové napětí.

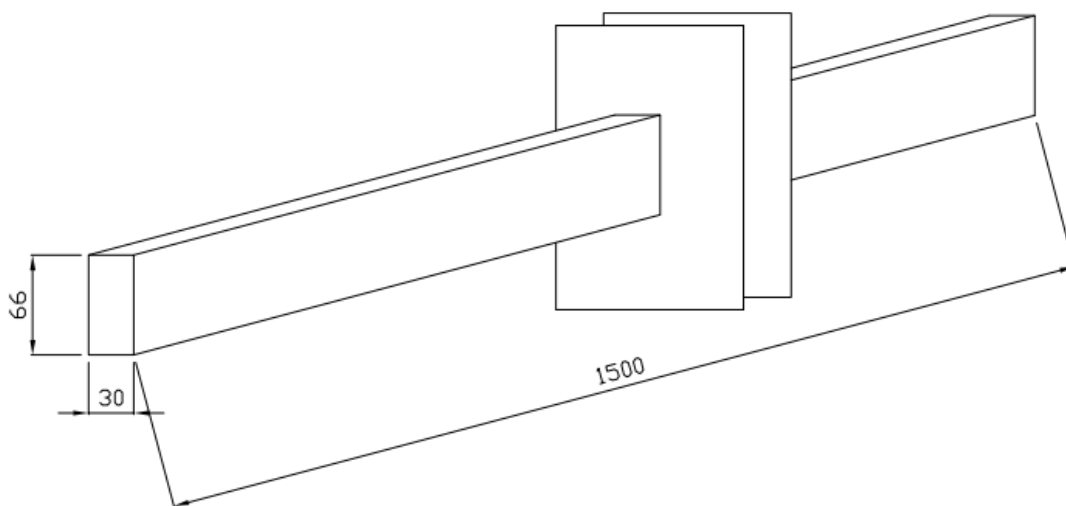
### Normálové napětí za ohybu

$$\sigma_{m,d} = k_{crit} \cdot f_{m,d}$$

(Kuklík, nedatováno [8])

Hodnoty použité pro výpočet jsou zobrazeny v tab.č. 11 (viz příloha).

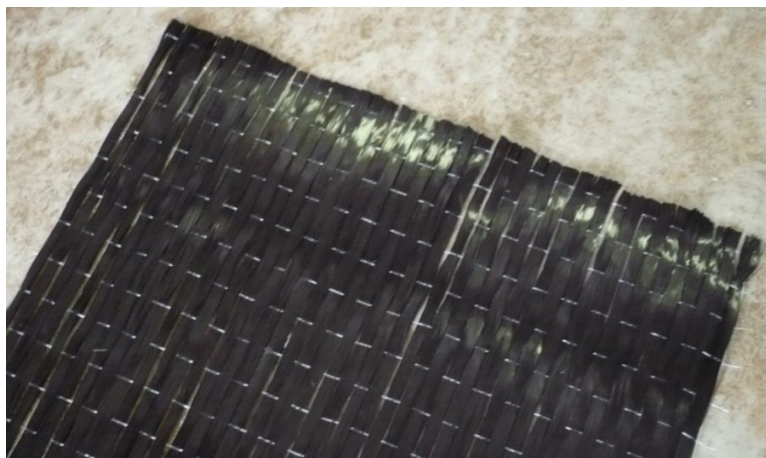
Obr.č. 56 : Nosníkový prvek o rozměrech 30 x 66 x 1500 mm



Zobrazených nosníků bylo vyrobeno 30 kusů, které byly následně zváženy a změřeny, hodnoty fyzikálních vlastností jsou zobrazeny v tab.č. 17 (viz příloha). Veškeré vážení tohoto souboru bylo provedeno pomocí digitální váhy Sartorius BP 3100 S, min. jednotka 0,01 g, tolerance 0,05 g.

Jak jsem již zmínil v úvodu této kapitoly, uhlíková vlákna byla ve formě tkaniny o šířce cca 30 cm a délce 10,5 metru. Šířka tkaniny je sestavena z jednotlivých souborů vláken, jejichž počet byl na  $\pm 25$  cm 44 kusů, jak je zřejmé z obr.č. 56. Každý tento element měl zhruba rozměr mezi 0,5 – 0,55 cm a jejich optimální počet na jednotlivé nosníky byl šest kusů.

Obr.č. 57: Použitá uhlíková vlákna



Firma Sika nám mimo jiné poskytla také adhezivum Sikadur 330, jehož je také výrobcem. Jedná se o dvousložkové lepidlo, které se skládá z epoxidové pryskyřice a tužidla. Toto dvou komponentní lepidlo je určeno k lepení uhlíkové tkaniny SikaWrap pro zesilování nebo opravy konstrukčních prvků jako je především armovaný beton, kamenné zdivo a stavební dřevo zatížených v ohybu či ve stříhu. Jako výhody tohoto lepidla bych vyzdvihl vysokou pevnost, dlouhou dobu zpracovatelnosti (při 20°C – 30 minut) a poměrně nízká

viskozita. Mísicí poměr komponenty A (epoxidová pryskyřice) a komponenty B (tužidlo) je hmotnostní v poměru 4:1.

Druhé lepidlo, které jsem k lepení použil, bylo komerční jednosložkové na bázi polyuretanu. Jedná se o lepidlo PU lepidlo na dřevo D4 od firmy Zwaluw a je vhodné pro lepení dřevěných konstrukcí, čepových spojů a pro kombinace dřevo – polystyren, kovy, plasty, minerální vlna atd. Toto lepidlo se vyznačuje vysokou pevností, odolností proti vlhkosti a vodě. Doba zpracovatelnosti při 20°C je cca 30 minut.

Technické listy obou lepidel jsou přiloženy v příloze (technický list č. 2 – PU lepidlo, technický list č. 3 – EP pryskyřice Sikadur 330).

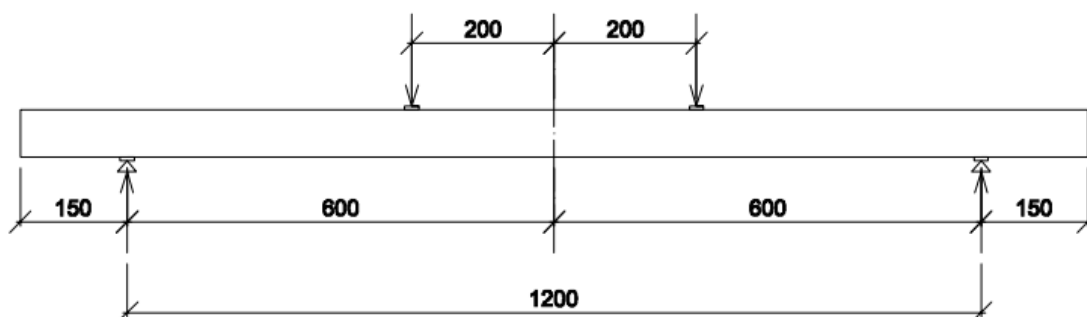
Lepení bylo provedeno při  $\pm 20^{\circ}\text{C}$  a relativní vlhkosti vzduchu cca 50 %. Lepidla byla na očištěný povrch prvků nanášena dřevěnou špachtlí ve vrstvě zhruba 2 mm. Po rozetření lepidla byl na povrch pokladen soubor vláken. Druhá vrstva lepidla byla nanesena na textilií a rozetřena tak, aby došlo k řádnému prosycení vláken. Následujícím krokem lepení bylo aplikování potravinové PE fólie přes lepenou plochu prvku a přiložení laťoviny nebo hranolku. Poté byl soubor vláken pomocí ručních nástrojů napínán přes hranu prvku v podélném směru, aby došlo k plnému využití vysoké pevnosti vláken při testech v ohybu, a na třech místech zafixován rychlosvěrkami mezi zkoušený nosník a pomocné hranolky. Polyuretanové adhezivum má úplnou dobu vytvrzení v tahu po 7 dnech, lepidlo Sikadur 330 má tuto dobu 5 dní (při podmínkách lepení). Vzorčky proto byly ponechány v klimatizovaném prostředí 7 dnů a poté byly připraveny na testování v ohybu.

Obr.č. 59: Vyztužené nosníky – první a druhý zprava Sikadur 330, zbylé PU lepidlo



Pro realizaci zkoušek byl použit stroj typu UTS 50 TESTSYSTEME od výrobce UTS TESTSYSTEME GMBH & CO., Německo, rok výroby 1996. Rozmístění podpěr a zatěžovacích přípravků bylo vypočteno dle normy ČSN EN 408 [21] viz obr.č. 59. Rychlost zatěžování byla konstantní rychlost posunutí zatěžovací hlavy nesmí být větší než 0,003 h mm/s, tzn. nesmí být větší než  $0,003 \cdot 66 = 0,198$  mm/s, v našem případě byla tato rychlost 0,15 mm/s to vše podle normy ČSN EN 408.

Obr.č. 60 : Uspořádání zkoušky pro měření pevnosti v ohybu



Obr.č. 61: Univerzální zkušební stroj.



Obr.č. 62 : Odzkoušený nevyztužený nosník v ohybu



## 5. ZPRACOVÁNÍ DAT A PREZENTACE VÝSLEDKŮ

### 5.1 Postup

Pro zpracování a porovnání dat vyztužených a nevyztužených nosníků bylo použito těchto parametrů: síla potřebná pro přelomení nosníku, průhyb, modul pružnosti v tahu a ohybová tuhost. Jednotlivá data byla mezi sebou porovnávána Testem hypotézy o shodě dvou průměrů s tím, že testy byly uvažovány na pěti procentní hladině významnosti.

$$\text{Vzorec pro výpočet: } U = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$$

$\bar{x}_i$  – průměr daného souboru hodnot

$\sigma_i^2$  – rozptyl daného souboru hodnot

$n_i$  – počet hodnot v daném souboru

(Hindls, Hronová, Seger, 2004[1])

Tab.č. 12: Hypotézy

Test hypotézy o shodě dvou průměrů	
alternativní hypotéza	kritický obor W
$H_0: \mu_1 = \mu_2$	$U \geq -1,96$ a $U \leq 1,96$
$H_1: \mu_1 < \mu_2$	$U \leq -1,645$
$H_1: \mu_1 > \mu_2$	$U \geq 1,646$
$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$	$U \leq -1,96$ a $U \geq 1,96$

(Hindls, Hronová, Seger, 2004 [1])

Všechny grafy byly vytvořeny pomocí softwaru Statistika 8 trial verze, volně dostupné na stránkách [www.statsoft.cz](http://www.statsoft.cz). [20]

## 5.2 Výsledky

Tab.č. 13: Pevnostní charakteristiky zkoušených souborů

PEVNOSTI [N]						
	$\bar{x}$	nárůst [%]	sm.odch.	var [%]	min.F	max.F
nevztužené nosníky	6568,422	0	713,092	10,856	5186,240	7729,000
vztužené - PU lepidlo	6842,101	4,167	924,606	13,513	5978,790	9278,220
vztužené - EP lepidlo	7139,945	8,701	367,170	5,142	6576,600	7991,410

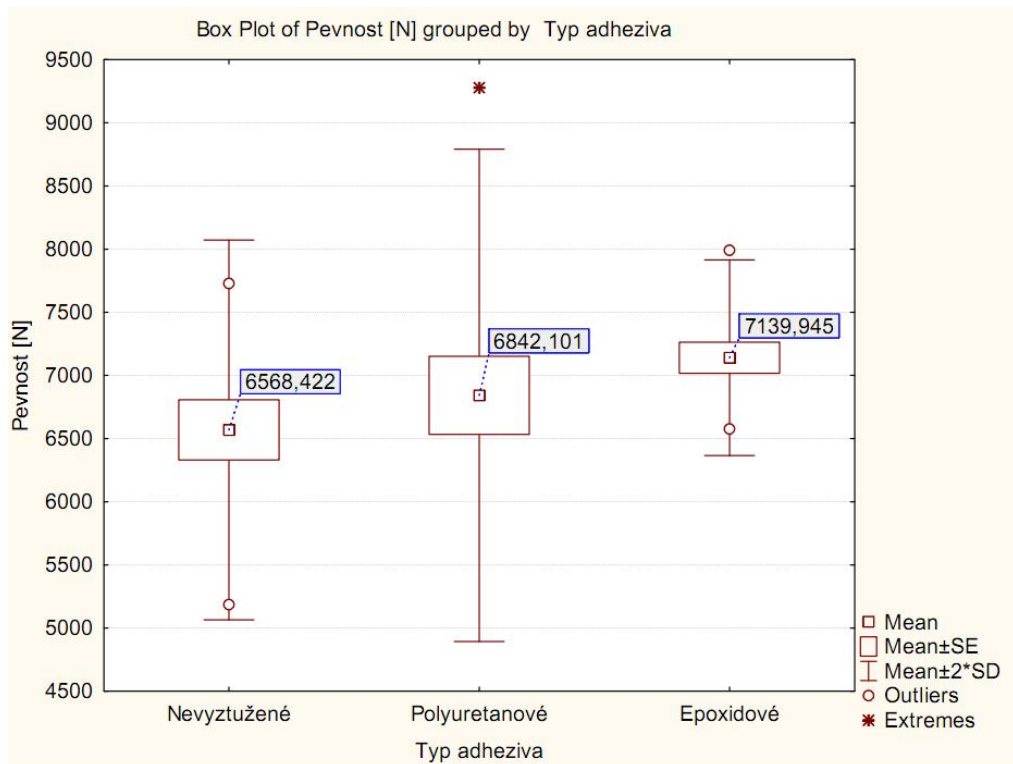
$\bar{x}$  - průměr daného souboru hodnot

sm.odch. – směrodatná odchylka

var. – variační koeficient

min.F a max.F – maximální a minimální síla v daném souboru potřebná na zlomení nosníku

Graf č. 1: Krabicový graf uvádějící průměrné hodnoty pevností zkoušených souborů



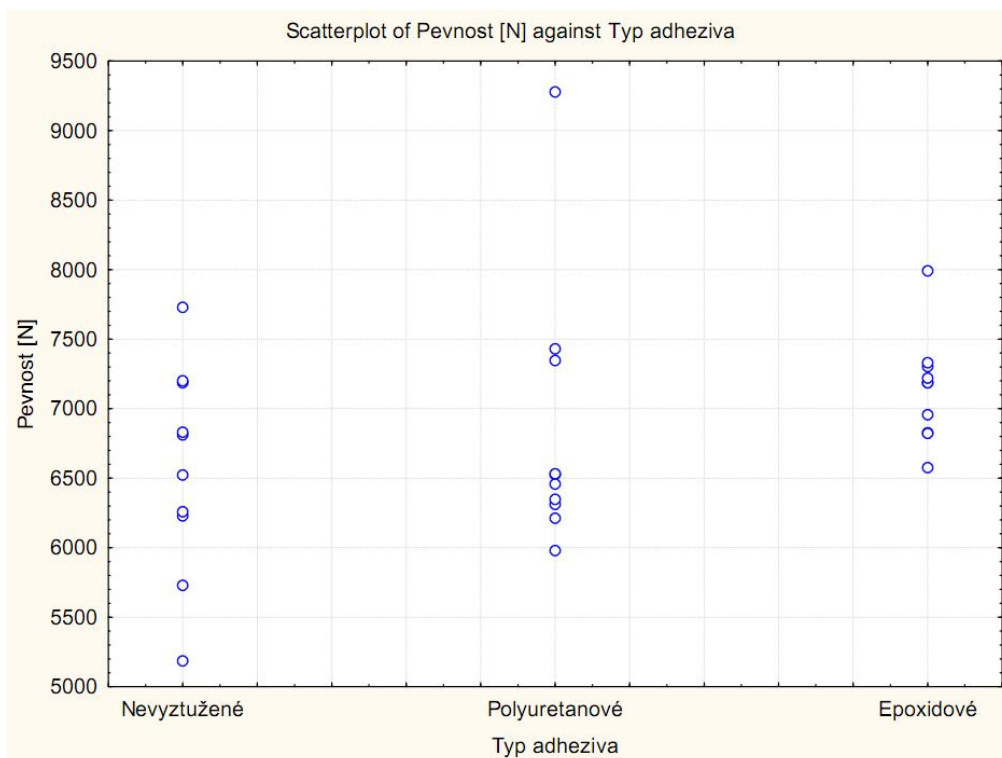


Na základě testu hypotézy o shodě dvou průměrů, platí pro porovnání prvního souboru s druhým a následně druhého se třetím za prokázanou nulová hypotéza  $H_0: \mu_1 = \mu_2$ , která dokazuje, že se průměry sil těchto souborů potřebné na přelomení nosníku statisticky neliší na zvolené pěti procentní hladině významnosti. Oproti tomu porovnání prvního a třetího souboru dokazuje, že platí hypotéza  $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ , to znamená, že se výsledky statisticky liší. Pro přehlednost byly zvoleny k testovému kritériu U indexy  $_1$  – nevyztužený nosník,  $_2$  – vyztužený nosník lepený polyuretanovým lepidlem,  $_3$  – vyztužený nosník lepený epoxidovou pryskyřicí.

$$\begin{array}{l}
 U_{1,2} = -0,741 \\
 U_{2,3} = -0,947 \\
 U_{1,3} = -2,253
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} U_{1,2} \\ U_{2,3} \\ U_{1,3} \end{array}} \right\} \text{ platí } H_0: U \geq -1,96 \text{ a } U \leq 1,96$$

$$\text{ platí } H_1: U \leq -1,96 \text{ a } U \geq 1,96$$

Graf č. 2: Graf uvádějící rozložení naměřených hodnot pevností zkoušených souborů



Při pohledu na graf č. 2 je zřejmý rozdíl mezi rozmístěním hodnot pro nosník nevyztužený a pro vyztužený nosník lepený adhezivem. Tento efekt mají za důsledek uhlíková vlákna, která částečně eliminují anizotropii dřeva a kumulují větší část pevnostních hodnot vyztužených nosníků do souborů s menším rozptylem. Uhlíková vlákna spojená s nosníkem polyuretanovým adhezivem vykazují vyšší pevnost o 4 % oproti nevyztuženým nosníkům, u spojení vláken epoxidovou pryskyřicí Sikadur 330 je pevnost vyšší o necelých 9 %.

Tab.č. 14: Charakteristiky průhybů zkoušených souborů

PRŮHYB [MM]					
	$\bar{x}$	sm.odch.	var [%]	min.	max.
nevyztužené nosníky	33,963	4,562	13,433	24,952	40,981
vyztužené - PU lepidlo	32,890	3,966	12,057	26,036	40,502
vyztužené - EP lepidlo	36,569	2,413	6,599	30,831	39,502

$\bar{x}$  - průměr daného souboru hodnot

sm.odch. – směrodatná odchylka

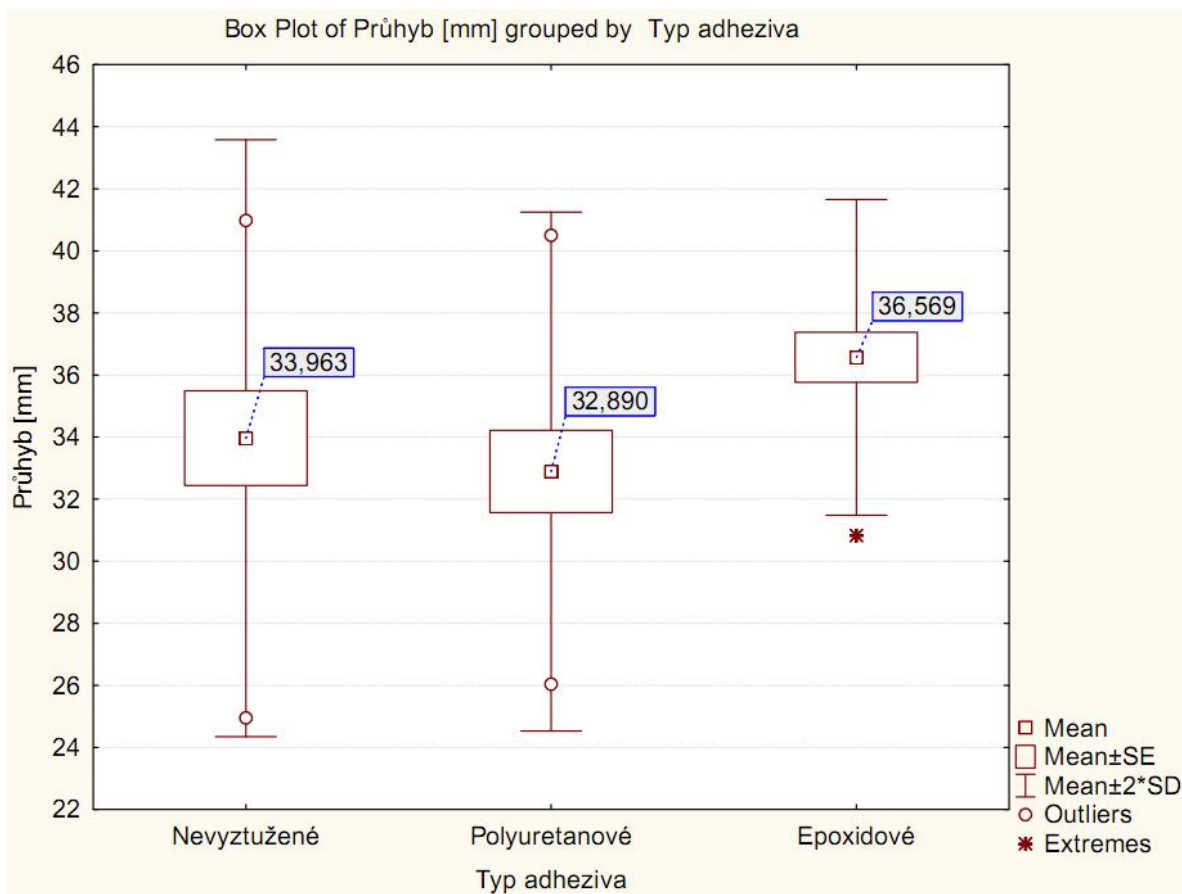
var. – variační koeficient

min.f a max.f – minimální a maximální průhyb v daném souboru

V tomto případě nám statistický výpočet o shodě dvou průměrů dokazuje, že se průměrné hodnoty průhybu statisticky liší pouze mezi vyztuženými nosníky. Jelikož PU lepidlo na dřevo D4 od firmy Zwaluw má vyšší viskozitu oproti epoxidové pryskyřici Sikadur 330, nedošlo k dokonalému prosycení vláken, což snižuje kvalitu spolupůsobení všech třech substancí. Ačkoli bylo dřevo vybíráno podle příslušné normy, působení malých suků v malých průřezích použitých nosníků způsobilo v některých případech zřejmě silový úbytek, což se projevilo také na nižších hodnotách průhybu.

$$\begin{array}{l}
 U_{1;2} = 0,561 \\
 U_{1;3} = -1,597 \\
 U_{2;3} = -2,506
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} U_{1;2} \\ U_{1;3} \\ U_{2;3} \end{array}} \right\}
 \begin{array}{l}
 \text{platí } H_0: U \geq -1,96 \text{ a } U \leq 1,96, H_0: \mu_1 = \mu_2 \\
 \text{platí } H_1: U \leq -1,96 \text{ a } U \geq 1,96, H_1: \mu_1 \neq \mu_2
 \end{array}$$

Graf č. 3: Krabicový graf uvádějící průměrné hodnoty průhybů zkoušených souborů



Tab.č. 15: Charakteristiky modulů pružnosti zkoušených souborů

MODUL PRUŽNOSTI [MPa]						
	x	nárůst [%]	sm.odch.	var [%]	min.E	max.E
nevyztužené nosníky	3736,120	0,000	482,768	12,922	3062,218	4519,247
vyztužené - PU lepidlo	4021,996	7,652	704,132	17,507	3081,566	5674,450
vyztužené - EP lepidlo	4348,834	16,400	460,087	10,580	3725,584	5399,153

$U_{1;2} = -1,059$   
 $U_{2;3} = -1,229$

platí  $H_0: U \geq -1,96$  a  $U \leq 1,96$ ,  $H_0: \mu_1 = \mu_2$

$U_{1;3} = -2,905$

platí  $H_1: U \leq -1,96$  a  $U \geq 1,96$ ,  $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$

Ze statistické analýzy je patrné, že situace je obdobná jako u pevností – hodnoty se statisticky liší mezi průměry souborů nevyztužených a vyztužených epoxidovou pryskyřicí Sikadur 330. Postup výpočtu modulu pružnosti byl proveden dle normy ČSN 49 0116 - Dřevo. Metoda zjišťování modulu pružnosti při statickém ohybu.

**Vzorec pro výpočet:**

$$E_{12} = 3Fl^3 / 64bh^3f$$

$E_{12}$  – modul pružnosti v ohybu při 12% vlhkosti dřeva [Mpa]

F – síla potřebná k přelomení [N]

l – délka vzorku [m]

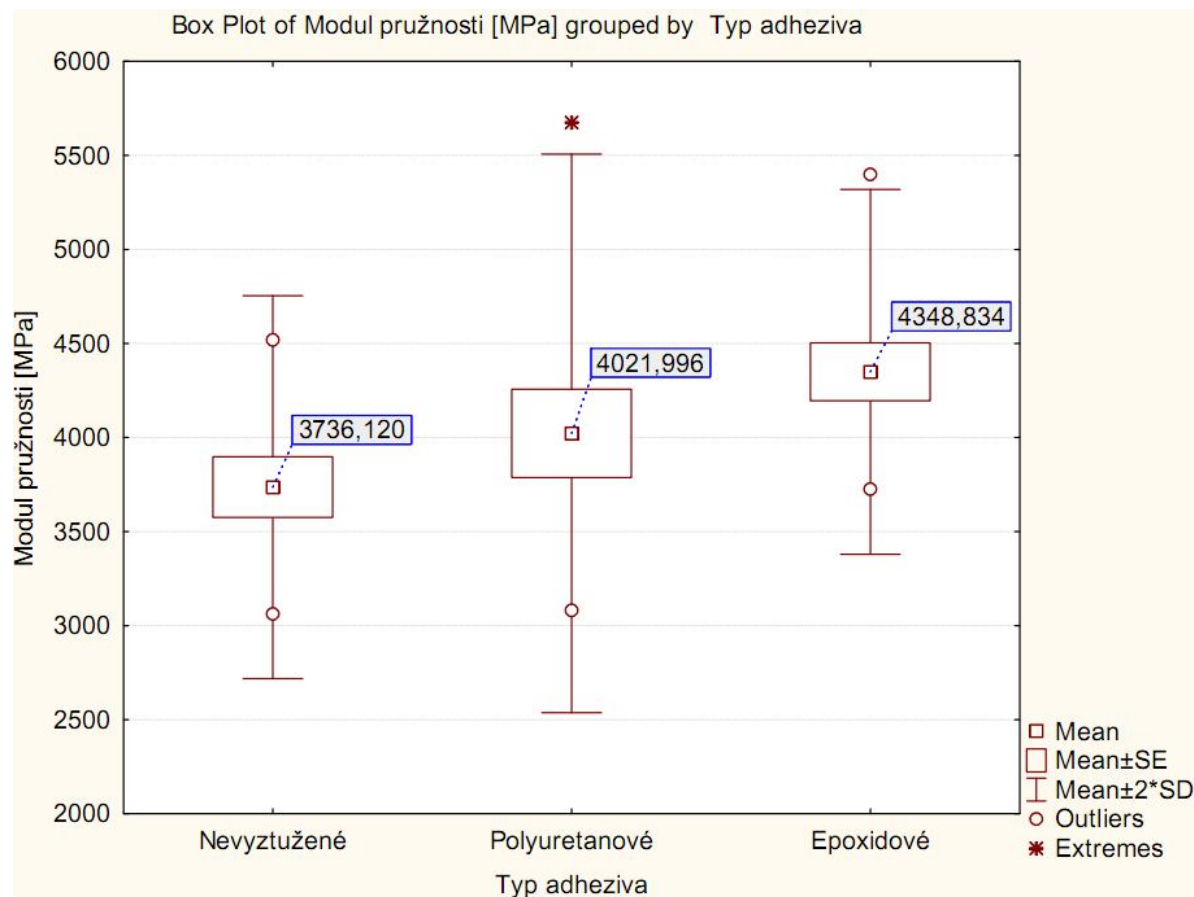
b – šířka vzorku [m]

h – výška vzorku [m]

f – průhyb [m]

(ČSN 49 0116 [24])

Graf č. 4: Krabicový graf uvádějící průměrné hodnoty modulů pružnosti zkoušených souborů



Ze vzorce je patrné, že nejvíce ovlivňují výsledek modulu pružnosti proměnné  $F$  a  $f$ , které se jako jediné zásadně mění. Proto lze říci, že modul pružnosti je největší v tom případě, kdy je potřeba na přelomení nosníku největší síla a zároveň je průhyb nejmenší (pokud uvažujeme o souborech se stejnými rozměry vzorků a shodnými podmínkami při zkoušení). Při výpočtu byl zjištěn nárůst hodnoty modulu pružnosti pro polyuretanové adhezivo o 7,5 % a pro epoxidovou pryskyřici o 16,5 % s tím, že jako nulová výchozí hodnota byl uvažován soubor nevyztužených nosníků.

Tab.č. 16: Charakteristiky ohybové tuhosti zkoušených souborů

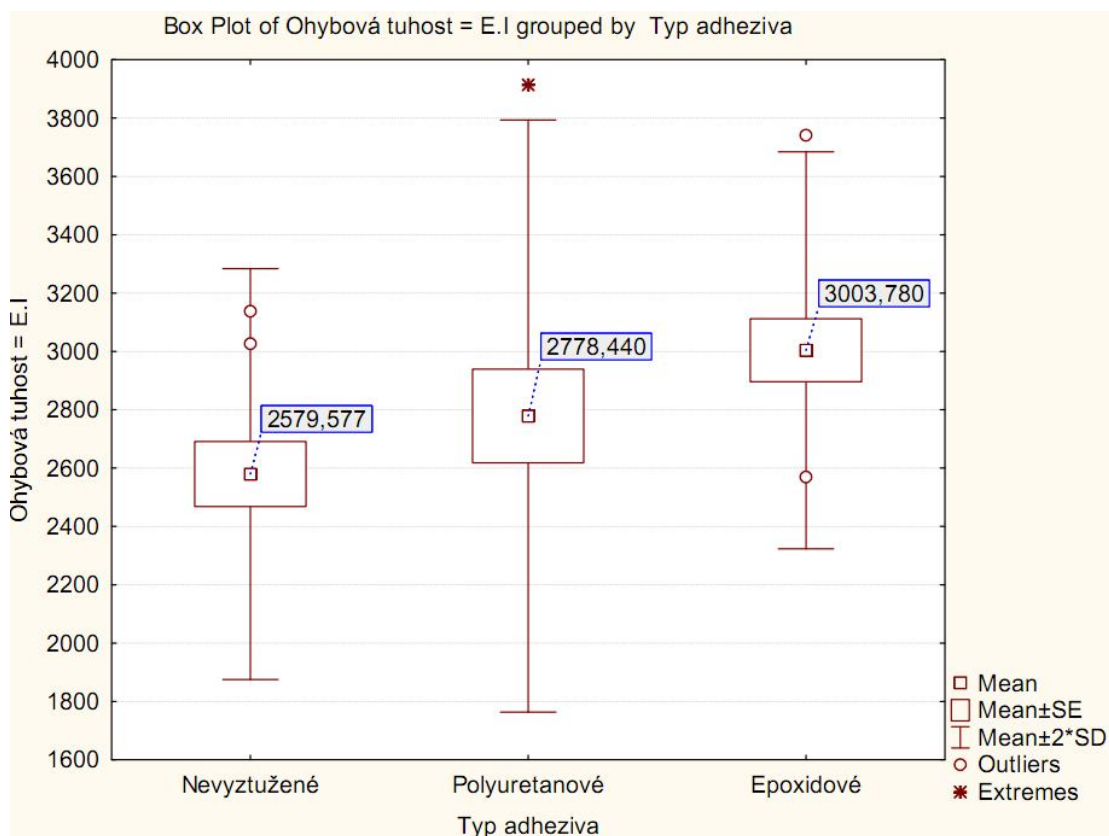
OHYBOVÁ TUHOST E.I						
	x	nárůst [%]	sm.odch.	var [%]	min.EI	max.EI
nevztužené nosníky	2579,577	0	334,043	12,950	2141,457	3137,868
vztužené - PU lepidlo	2778,44	7,709	481,4742	17,329	2162,171	3913,873
vztužené - EP lepidlo	3003,78	8,110	322,695	10,743	2569,67	3741,178

$U_{1,2} = -1,073$  } platí  $H_0: U \geq -1,96$  a  $U \leq 1,96$ ,  $H_0: \mu_1 = \mu_2$

$U_{2,3} = -1,229$  }

$U_{1,3} = -2,888$  } platí  $H_1: U \leq -1,96$  a  $U \geq 1,96$ ,  $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$

Graf č. 5: Krabicový graf uvádějící průměrné hodnoty ohybové tuhosti zkoušených souborů



Ohybová tuhost = EI

I = moment setrvačnosti pro obdélníkový průřez ( $I = \frac{1}{12}bh^3$ ) [m<sup>4</sup>]

Ohybová tuhost charakterizuje číselně tuhost nosníku na základě jednak tuhosti materiálu (E) a jednak tuhosti průřezu (I). Opět se statisticky liší pouze průměry mezi nevyztuženými nosníky a nosníky vyztuženými EP pryskyřicí Sikadur 330. Byl zjištěn nárůst ohybové tuhosti u vyztužených vzorků – PU lepidlem o necelých 8 %, EP pryskyřicí o 8 %. I zde je na nárůstu modulu pružnosti patrné spolupůsobení uhlíkových vláken se dřevem.

### 5.3 Shrnutí výsledků

Na základě provedeného měření a dosažených výsledků porovnávaných parametrů lze konstatovat, že došlo ke změně chování vyztužených nosníků při zatěžování. Statisticky se významně liší vyšší pevností, ohybovou tuhostí a vyšším modulem pružnosti, pouze soubory nevyztužené a vyztužené za použití epoxidové pryskyřice. Vzhledem k vysoké pevnosti vláken v tahu byl ale očekáván vyšší nárůst jednotlivých parametrů vyztužených prvků, než jaký byl skutečně naměřen. Skutečností, které k tomu vedly, bylo několik. Ačkoli byl materiál vybírán s ohledem na nejvyšší kvalitu dle normy, výskyt vady či skryté vady prvku jako malé suky a nepravidelnost vláken, mohou podstatně ovlivnit pevnostní charakteristiky nosníku v uvažovaném průřezu masivního dřeva, jako je předčasné zlomení nosníku na základě porušení v tažené či tlačené části během zkoušek. Jak již bylo zmíněno, použité polyuretanové lepidlo má vyšší viskozitu než by bylo vhodné. Tento fakt zapříčiňuje nedokonalé prosycení vláken. Epoxidová pryskyřice Sikadur 330 je vyvinuta pro aplikaci uhlíkových vláken ve formě tkaniny a je proto pro tento způsob vyztužení ideální.

## 6. ZÁVĚR

Vyztužené prvky uhlíkovými vlákny vykazují vyšší pevnost, vyšší modul pružnosti a vyšší ohybovou tuhost. Tato skutečnost však platí pouze pro vyztužení za použití epoxidové pryskyřice Sikadur 330. Vybrané polyuretanové lepidlo není optimální z důvodu vysoké viskozity a pravděpodobně nedošlo k dostatečnému prosycení vláken. Ovšem hlavní příčinou nižší hodnoty pevnostních parametrů všech nosníků se ukázal být navržený profil zkoušených nosníků. Relativně malé vzorky nemohly být větší z důvodu kapacitních parametrů zkušebního zařízení. Ač byly rozměry stanoveny dle normy ČSN EN 408 a dřevo vybráno podle nejvyšší kvalitativní třídy (norma ČSN EN 1611-1), povolené vady dřeva zejména suky, ovlivňovaly pevnostně nosník v tlačené či tažené části, čímž docházelo ke zlomení dřívě, než u bezvadného dřeva a tím pádem i k nižším pevnostem prvků. Jak již bylo v práci zmíněno, použité epoxidové adhezivum je určeno právě k lepení této formy vláken (systém Sika Wrap) a to se projevilo i na výsledcích. Oproti polyuretanovému lepidlu bylo prosycení vláken dokonalé a spojení obou materiálů vzhledem k vysoké pevnosti epoxidové pryskyřice dokázalo více eliminovat vady dřeva. Vyztužení při lepení EP pryskyřicí dosáhlo nárůstu pevnosti o necelých 9 %, použití PU lepidla vykázalo nárůst 4 %, tyto hodnoty nejsou nikterak převratné a ze statistického hlediska lze považovat za směřodatné pouze výsledky EP lepidla. Stejně tak dopadly i ostatní testované pevnostní vlastnosti zkoušených prvků. Modul pružnosti za použití PU lepidla vykázal hodnotu nárůstu o 7,6 %, zatímco za použití EP pryskyřice o 16,4 %. Ohybová tuhost nosníků vyztužených za použití PU lepidla vzrostla o 7,8 % a EP lepidla o 8,1 %.

Pro docílení lepších výsledků by bylo potřeba provést zkoušení na nosnicích s takovou dimenzí, kde by malé vady neovlivňovaly pevnost prvků. Popřípadě předepnutím vláken by mohlo být zajištěno vyšší využití tohoto materiálu, avšak pro použití této metody je potřeba náročnější technologie. Vlákna ve formě tkaniny jsou vhodnější spíše na prostorové útvary se zakřivenými plochami a pro sofistikované technologické postupy. Na hraněné nosníky a pro dílenské zpracování je vhodnější použít vlákna ve formě kompozitu, který chrání výztuž před poškozením, zajišťuje jejich polohu a roznáší namáhání na všechna vlákna.



## Seznam použitých zdrojů

1. HINDLS, R., HRONOVÁ, S., SEGER, J.: *Statistika pro ekonomy, páté vydání*, Professional Publishing, Praha, 2004, str.146, ISBN 80-86419-59-2 (5.vyd.).
2. KUKLÍK, P., MELZEROVÁ, L., VÍDENSKÝ, J.: MKP model nosníků z lepeného lamelového dřeva. *AT&P journal PLUS1 2007*. Str.51-54. ISSN 1336-5010.
3. MACHEK, V., SODOMKA, J.: *Polymery a kompozity s polymerní matricí; Nauka o materiálu. 4. část*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT. 2008. 86 stran. ISBN 978-80-01-03937-4.
4. REINPRECHT, L., ŠTEFKO, J.: *Dřevěné stropy a krovy, typy, poruchy, průzkumy a rekonstrukce*, ABF, a.s., Nakladatelství ARCH, Praha, 2000, 252 stran, ISBN 80-86165-29-9

## Internetové zdroje

5. BRUNNER, M., SCHNUERIGER, M.: *Timber beams strengthened with prestressed fibres: Delamination* [online]. Biel, Switzerland. Nedatováno. [cit. 2010-7-21]. Dostupné z: [http://www.ewpa.com/Archive/2004/jun/Paper\\_059.pdf](http://www.ewpa.com/Archive/2004/jun/Paper_059.pdf)
6. HORSKÁ, P. *Příprava polymerních kompozitů: skleněné vlákno/polyesterová pryskyřice* [online]. 2009. [cit. 2011-4-20]. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=13702](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=13702)
7. KOŘÍNEK, Z. *2. vlákna* [online]. Nedatováno. Str. 2-55. [cit. 2011-4-21]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>

8. KUKLÍK, P.: *Dimenzování prvků dřevěných konstrukcí* [online]. Nedatováno. [cit. 2011-4-21]. Dostupné z:  
[http://www.prolignum.cz/fileadmin/prolignum/media.cz/7\\_Dimenzova%CC%81ni%C C%81%20prvku%CC%8A%20dr%CC%8Ceve%CC%8Cny%CC%81ch%20konstrukci%CC%81\\_Petr%20Kukli%CC%81k.pdf](http://www.prolignum.cz/fileadmin/prolignum/media.cz/7_Dimenzova%CC%81ni%C C%81%20prvku%CC%8A%20dr%CC%8Ceve%CC%8Cny%CC%81ch%20konstrukci%CC%81_Petr%20Kukli%CC%81k.pdf)
9. KUKLÍK, P., MELZEROVÁ, L., VÍDENSKÝ, J.: *Návrhový model pro nosníky z lepeného lamelového dřeva vyztuženého FRP* [online]. Praha. Vystaveno 6.12.2005. [cit. 2010-6-26]. Dostupné z: <http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2007/>
10. STEIGER, R.: *Bonding of Carbon Fibre-reinforced Plastics with Wood* [online]. Dübendorf, Switzerland. Nedatováno. [cit. 2010-7-5]. Dostupné z: [http://www.empa.ch/plugin/template/empa/\\*/33921/---/l=1](http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/33921/---/l=1)
11. ŠILHAN, O. Zesilování stavebních konstrukcí dodatečně lepenou kompozitní výztuží. *Časopis stavebnictví*, 2008, č. 06. [cit. 2011-4-20]. Dostupné z: [http://www.casopisstavebnictvi.cz/zesilovani-stavebnich-konstrukci-dodatecne-lepenou-kompozitni-vyztuzi\\_A1126\\_I21](http://www.casopisstavebnictvi.cz/zesilovani-stavebnich-konstrukci-dodatecne-lepenou-kompozitni-vyztuzi_A1126_I21)
12. VÍDEŇSKÝ, J., MELZEROVÁ, L.: *Numerický model lepených lamelových nosníků, vyztužených lamelou ze skelných vláken* [online]. Praha. Nedatováno. [cit. 2010-6-26]. Dostupné z: [http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2007/Sekce\\_2.2/Vidensky\\_Jan\\_CL.pdf](http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2007/Sekce_2.2/Vidensky_Jan_CL.pdf)
13. Webové stránky firmy Compass stavební chemie s.r.o. *Technický list produktu Sikadur 330* [online]. Vystaveno leden 2006. [cit. 2011-04-21]. Dostupné z: [http://www.compassholding.com/media/file/cz-con-tds-sikadur\\_330.pdf](http://www.compassholding.com/media/file/cz-con-tds-sikadur_330.pdf)

14. Webové stránky dodavatele lepidla firma Framar, s. r. o. *Technický list produktu PU lepidla na dřevo D4 od firmy Zwaluw* [online]. Vystaveno červen 2006.  
[cit. 2011-04-2]. Dostupné z:  
[http://framar.bcmkt.net/TL%2006\\_17%20rev1%20PU%20lepidlo%20na%20drevo%20D4.pdf](http://framar.bcmkt.net/TL%2006_17%20rev1%20PU%20lepidlo%20na%20drevo%20D4.pdf)
15. Webové stránky Fyzika v pozadí, Vědci a vynálezci. *Elektrický proud a teplo* [online]. Nedatováno. [cit. 2011-04-28]. Dostupné z:  
[http://www.techmania.cz/edutorium/art\\_exponaty.php?key=400&xkat=fyzika&xser=456c656b74f8696e612061206d61676e657469736d7573h](http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?key=400&xkat=fyzika&xser=456c656b74f8696e612061206d61676e657469736d7573h)
16. Webové stránky prodejce uhlíkových vláken Sika CZ, s. r. o. *Technický list produktu Sika Wrap®-600 C/120* [online]. Vystaveno červen 2006. [cit. 2011-04-21]. Dostupné z: <http://cz01.webdms.sika.com/fileshow.do?documentID=482>
17. Webové stránky firmy SIKA SK, s. r. o. *PREVIADUR – zesilování konstrukcí uhlíkovými vlákny* [online]. Nedatováno. [cit. 2011-5-11]. Dostupné z: [http://www.sika.sk/cz-con-news-mat7\\_2004.pdf](http://www.sika.sk/cz-con-news-mat7_2004.pdf)
18. Webové stránky firmy STADO CZ, s. r. o. *Speciální stavební systémy - Stado Carbo Systém* [online]. Nedatováno. [cit. 2011-5-11]. Dostupné z:  
[http://www.stado.cz/index.php?option=com\\_content&task=view&id=73&Itemid=123](http://www.stado.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=73&Itemid=123)
19. Hrotový vlhkoměr VHT 650 od firmy Elbez, k nahlédnutí zde: <http://www.e-pristroje.cz/vlhkomery-drevo.html>
20. Česká trial verze programu Statistica 8, dostupná z: <http://www.statsoft.cz/podpora/ke-stazeni/>

## Normy

21. ČSN EN 408. *Dřevěné konstrukce – Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo – Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností*. Brno: Český normalizační institut, 2004. 30 stran.
22. ČSN EN 1611-1. *Řezivo – Vizuální třídění jehličnatého dřeva – Část 1: Evropské smrky, jedle, borovice a douglasky*. Praha: Český normalizační institut, 2000. 12 stran.
23. ČSN EN 13183-1. *Vlhkost vzorku řeziva - Část 1: Stanovení váhovou metodou*. Praha: Český normalizační institut, 2002, 7 stran.
24. ČSN 49 0116. *Dřevo. Metoda zjišťování modulu pružnosti ve statickém ohybu*. Praha: Český normalizační institut, 1980, 8 stran.

## Seznam použitých zkratk

AFRP	Aramide Fibre Reinforced Plastic - laminát vyztužený aramidovými vlákny
CFRP	Carbon Fibre Reinforced Plastic - laminát vyztužený uhlíkovými vlákny
FRP	Fibre Reinforced Plastic - laminát vyztužený vlákny
EP	epoxidové
GFRP	Glass Fibre Reinforced Plastic - laminát vyztužený skleněnými vlákny
HSF	High Strength Fibres – vysokopevnostní vlákna
MKP	metoda konečných prvků
PVA	polyvinil acetátové
PU	polyuretanové

## Seznam obrázků, tabulek a grafů

### Obrázky

Obr.č. 1: Teoretický model

Obr.č. 2: Velikosti konečných prvků

Obr.č. 3: Závislost průhybu na zatížení

Obr.č. 4: Závislost poměrného přetvoření v tahu na zatížení

Obr.č. 5: Závislost poměrného přetvoření v tlaku na zatížení

Obr.č. 6: Rozložení  $E_x$  v Nosníku 2

Obr.č. 7: Rozložení  $\epsilon_x$  v Nosníku 2

Obr.č. 8: Rozložení  $\sigma_x$  v Nosníku 2

Obr.č. 9: Rozložení  $E_x$  ve středním průřezu

Obr.č. 10: Pole napětí ve středním průřezu

Obr.č. 11: Pole poměrného přetvoření ve středním průřezu

Obr.č. 12: Pole průhybu ve středním průřezu

Obr.č. 13: Schéma zatížení a geometrie průřezu

Obr.č. 14: Rozložení veličiny  $E_x$  v [kPa] na nosníku 46 s potlačeným vlivem lamely s vlákny vysoké pevnosti

Obr.č. 15: Rozložení veličiny  $E_x$  v [kPa] na nosníku 46 s patrným vlivem lamely s vlákny vysoké pevnosti

Obr.č. 16: Zatížení, dělení a deformovaný tvar nosníku 46

Obr.č. 17: Závislost poměrného přetvoření na taženém povrchu nosníku na působící síle

Obr.č. 18: Závislost poměrného přetvoření na tlačném povrchu nosníku na působící síle

Obr.č. 19: Typy vyztužení průřezů u lepených lamelových nosníků

Obr.č. 20: Typy porušení

Obr.č. 21: Vyztužený nosník s průběhem poměrného přetvoření a napětí

Obr.č. 22: Zvláštní pevnosti materiálu (poměr tahového napětí k vlastní hmotnosti)

Obr.č. 23: Mechanické vlastnosti (pevnost v tahu a modul pružnosti) pro různé materiály

Obr.č. 24: Možnosti využití FRP v dřevařském inženýrství

Obr.č. 25: Dodatečné vyztužení prvku na spodní ploše-most v městě Murgenthal na řece Aare (Švýcarsko)

Obr.č. 26: Pilíř v historické budově posílený ve směru kolmo k vláknům

Obr.č. 27: Předběžné testy na malých vzorcích v tahu

Obr.č. 28: Pevnost ve smyku při lepení pro různé délky spoje

Obr.č. 29: Rozdělení smykových napětí pro různé délky smykových ploch a pro stejnou tuhost  $E \cdot A$  spojovaných dílů

Obr.č. 30: Vliv teploty na pevnost spoje v tahu

Obr.č. 31: Tahové zkoušky na lepených olaminovaných vzorcích (GFRP lamináty), vzorky jsou konstrukčních velikostí

Obr.č. 32: Geometricky optimalizovaný vzorek

Obr.č. 33: Geometrie vzorků pro zkoušky v tahu

Obr.č. 34: Zkouška v ohybu – uspořádání

Obr.č. 35: Geometrie zkoušených těles v ohybu

Obr.č. 36: Křivka tečení při dlouhodobém zatížení ( $22,5 \text{ N/mm}^2$ ) během 800 dnů

Obr.č. 37: Modul pružnosti ve smyku a teplota skelného přechodu použitých epoxidových lepidel, odvozeno ze zkoušky torzní vibrace

Obr.č. 38: Zkoušky v tahu na malých vzorcích s cílem optimalizovat tuhost materiálů a vyhodnotit použitá lepidla

Obr.č. 39: Vliv tuhosti lamel při normální teplotě

Obr.č. 40: Vliv plniv při normální teplotě

Obr.č. 41: Pevnost ve smyku při normální teplotě a  $T=50^\circ\text{C}$

Obr.č. 42: Vliv teploty na smyk. pevnost

Obr.č. 43: Pevnost ve smyku při  $T = 50^\circ\text{C}$  pro různé zatěžovací doby

Obr.č. 44: Vliv post-formování ( $4\text{h}/80^\circ\text{C}$ )

Obr.č. 45: Delaminace: předpjaté vlákno je odtržené od betonového nosníku

Obr.č. 46: EMPA Předpínací zařízení - kotevní systém (Stöcklin Meier)

Obr.č. 47: Detail předpínacího zařízení během procesu předpínání dřevěného nosníku

Obr.č. 48: Napětí rozložené předpjatými CFRP proužky ukazující předpínací síly podél délky nosníku

Obr.č. 49: Možný vliv typu lepidla na rozložení smykového napětí na koncích nosníku vyztuženého předpjatým umělým vláknem

Obr.č. 50: Nastavení pro smykové zkoušky podle německé normy DIN EN 205

Obr.č. 51: Křivky síly a deformace při testu ve smyku (střední hodnoty jednotlivých druhů lepidla s tenkými vrstvami jsou uvedeny zde)

Obr.č. 52: Průběh tahových zkoušek

Obr.č. 53: Průběh křivky síly a deformace-zkouška v tahu Smyková deformace--hodnota "GM" je definován jako sklon křivky v N / mm

Obr.č. 54: Čtyřbodová zkouška v ohybu podle německé normy DIN EN 408

Obr.č. 55: Uspořádání zkoušky pro měření lokálního modulu pružnosti v ohybu

Obr.č. 56 : Nosníkový prvek o rozměrech 30 x 66 x 1500 mm

Obr.č. 57: Použitá uhlíková vlákna

Obr.č. 58 : Rozdělené soubory vláken po šesti kusech připravené k lepení

Obr.č. 59: Vyztužené nosníky – první a druhý zprava Sikadur 330, zbylé PU lepidlo

Obr.č. 60 : Uspořádání zkoušky pro měření pevnosti v ohybu

Obr.č. 61: Univerzální zkušební stroj.

Obr.č. 62 : Odzkoušený nevyztužený nosník v ohybu

## **Tabulky**

Tab.č. 1: Porovnání jednotlivých modelů

Tab.č. 2: Porovnání naměřených a vypočtených deformací

Tab.č. 3: Měřené a vypočtené hodnoty průhybu a poměrného přetvoření na nosnicích na taženém resp. tlačném povrchu uprostřed nosníku

Tab.č. 4: Odchytky průhybu uprostřed rozpětí skutečných nosníků a nosníků se stejným rozložením zubovitých spojů, ale průměrným  $E_x$

Tab.č. 5: Hodnocení originálních výrobků a jejich úprava

Tab.č. 6.1: Použité zkušební vzorky

Tab.č. 6.2: Použité zkušební vzorky

Tab.č. 7: Shmutí z ohybových zkoušek ukazují na pozitivní výsledky vyztužení lepených nosníků s nenapjatými a předepjatými pásy FRP.

Tab.č. 8: Vlastnosti uhlíkových vláken při normální teplotě

Tab.č. 9: Typické vlastnosti některých skleněných vláken při normální teplotě

Tab.č. 10: Typické vlastnosti některých aramidových vláken při normální teplotě

Tab.č. 11: Doporučené hodnoty charakteristických pevností a modulů pružnosti [MPa] a charakteristických hustot [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] pro masivní dřevo

Tab.č. 12: Hypotézy

Tab.č. 13: Pevnostní charakteristiky zkoušených souborů.

Tab.č. 14: Charakteristiky průhybů zkoušených souborů

Tab.č. 15: Charakteristiky modulů pružnosti zkoušených souborů

Tab.č. 16: Charakteristiky ohybové tuhosti zkoušených souborů

Tab.č. 17: Charakteristiky použitých vzorků

## **Grafy**

Graf č. 1: Krabicový graf uvádějící průměrné hodnoty pevností zkoušených souborů

Graf č. 2: Graf uvádějící rozložení naměřených hodnot pevností zkoušených souborů

Graf č. 3: Krabicový graf uvádějící průměrné hodnoty průhybů zkoušených souborů

Graf č. 4: Krabicový graf uvádějící průměrné hodnoty modulů pružnosti zkoušených souborů

Graf č. 5: Krabicový graf uvádějící průměrné hodnoty ohybové tuhosti zkoušených souborů

## **Technické listy**

Technický list č. 1 - Technický list produktu SikaWrap®-600 C/120

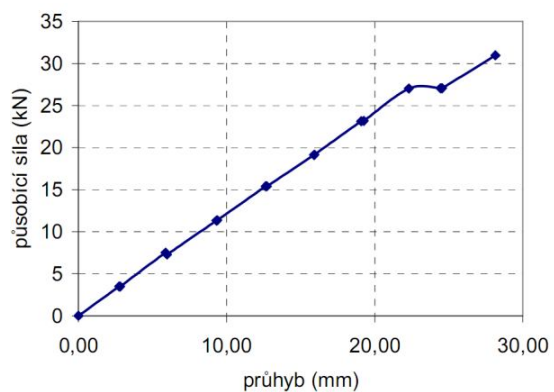
Technický list č. 2 - Technický list produktu PU lepidla na dřevo D4 od firmy Zwaluw

Technický list č. 3 - Technický list produktu Sikadur 330

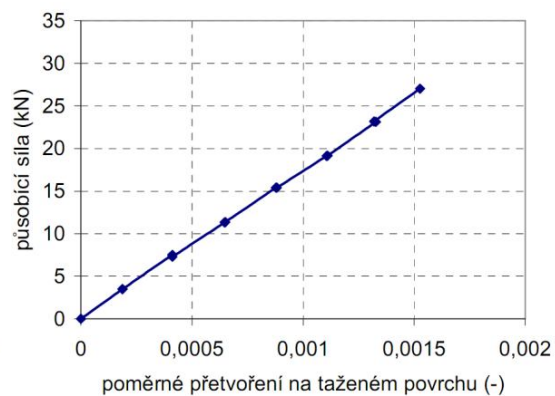


## **PŘÍLOHY**

Obr.č. 3: Závislost průhybu na zatížení

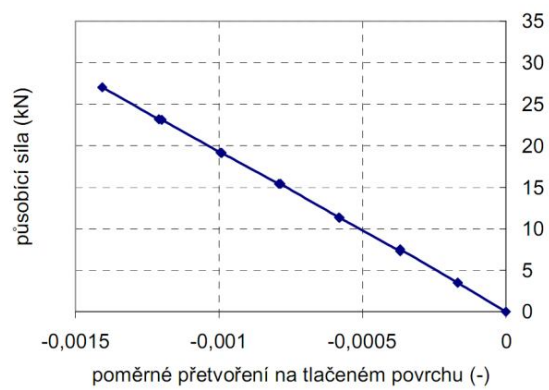


Obr.č. 4: Závislost poměrného přetvoření v tahu na zatížení



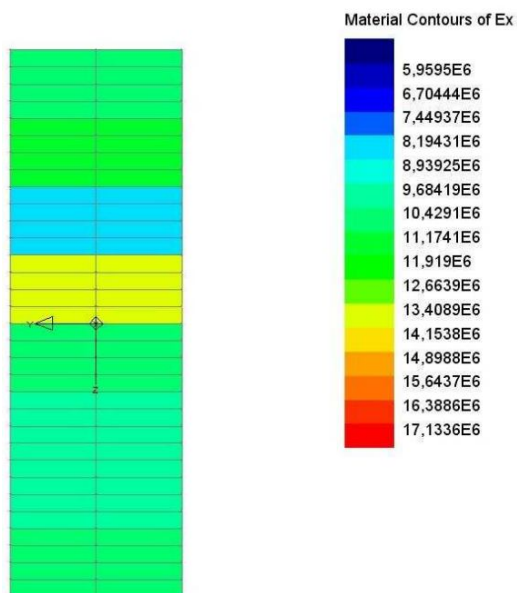
(Kuklík, Melzerová, Vídeňský, 2007 [2])

Obr.č. 5: Závislost poměrného přetvoření v tlaku na zatížení

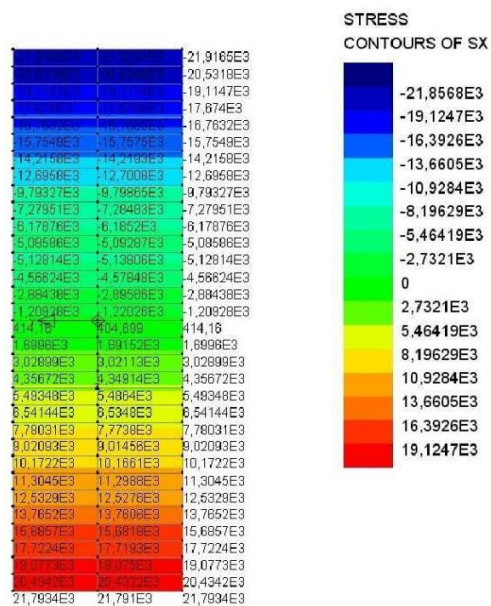


(Kuklík, Melzerová, Vídeňský, 2007 [2])

Obr.č. 9: Rozložení  $E_x$  ve středním průřezu



Obr.č. 10: Pole napětí ve středním průřezu



(Kuklík, Melzerová, Vídeňský, 2007 [2])

Obr.č. 25: Dodatečné vyztužení prvku na spodní ploše-most v městě Murgenthal na řece Aare (Švýcarsko)



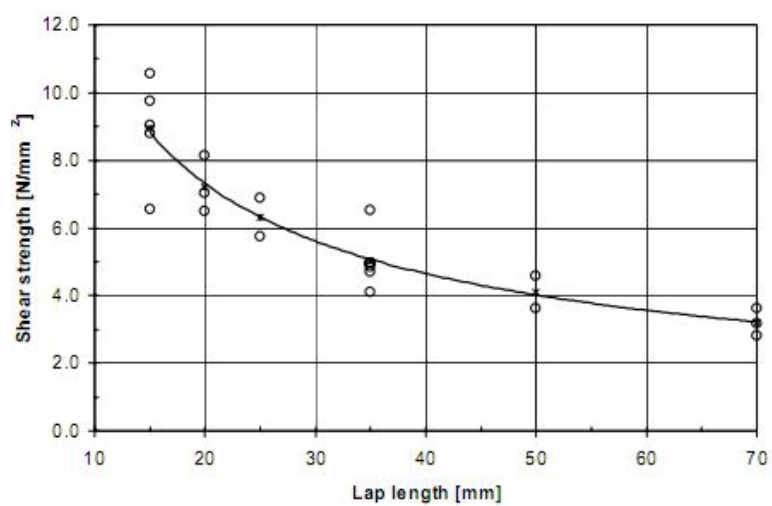
(Steiger, nedatováno [10])

Obr.č. 26: Pilíř v historické budově posílený ve směru kolmo k vláknům



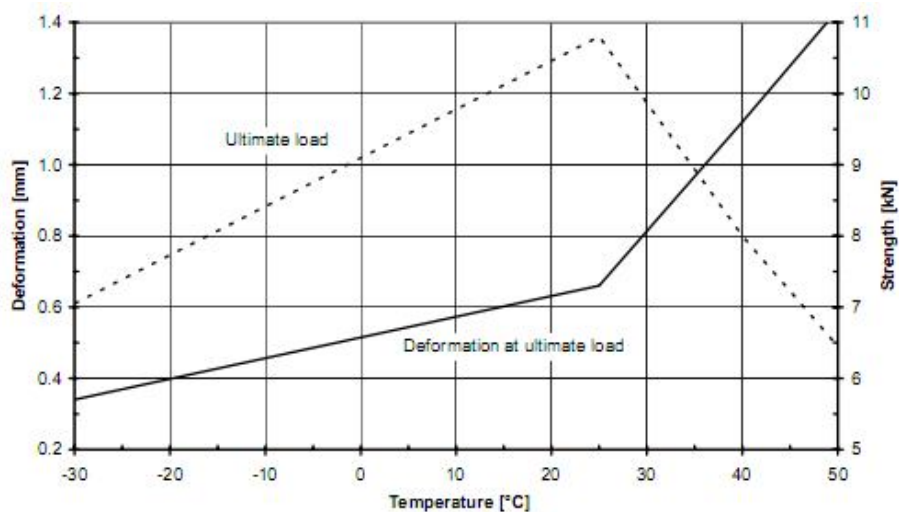
(Steiger, nedatováno [10])

Obr.č. 28: Pevnost ve smyku při lepení pro různé délky spoje



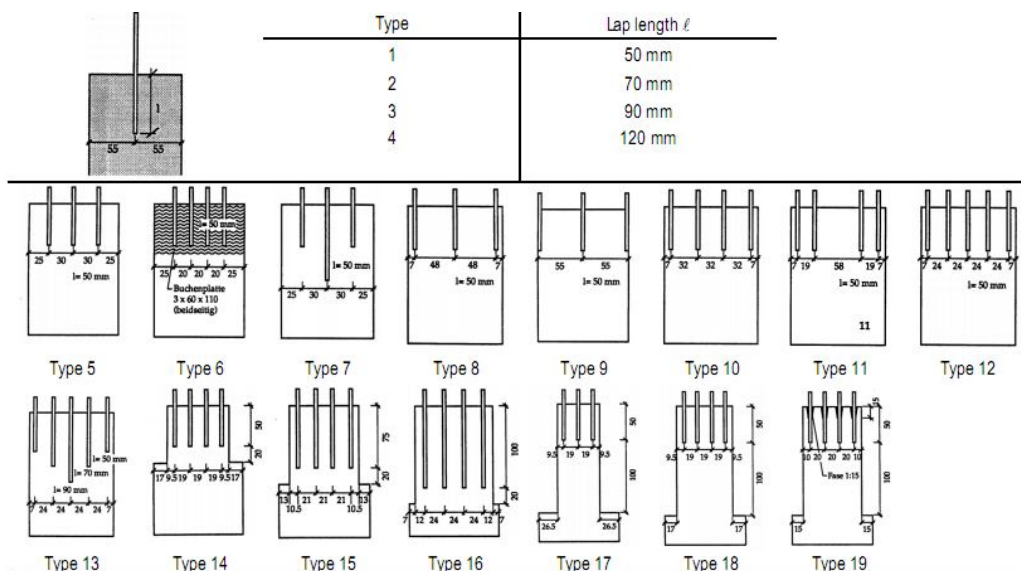
(Steiger, nedatováno [10])

Obr.č. 30: Vliv teploty na pevnost spoje v tahu



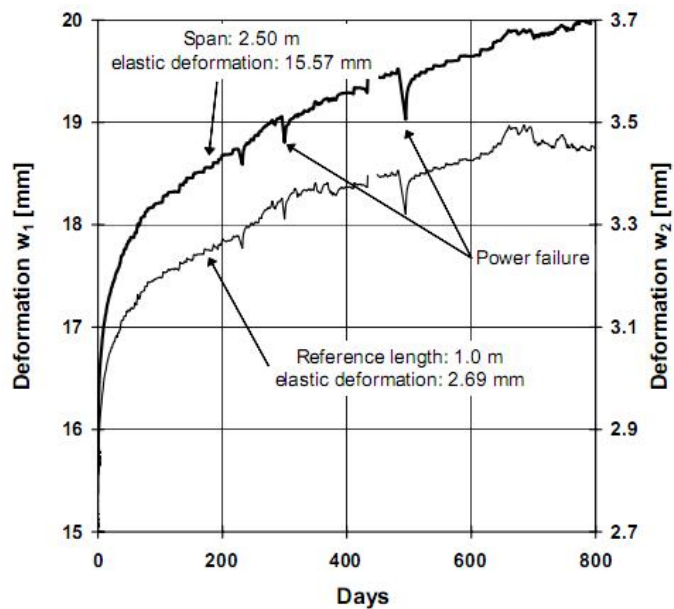
(Steiger, nedatováno [10])

Obr.č. 32: Geometricky optimalizovaný vzorek



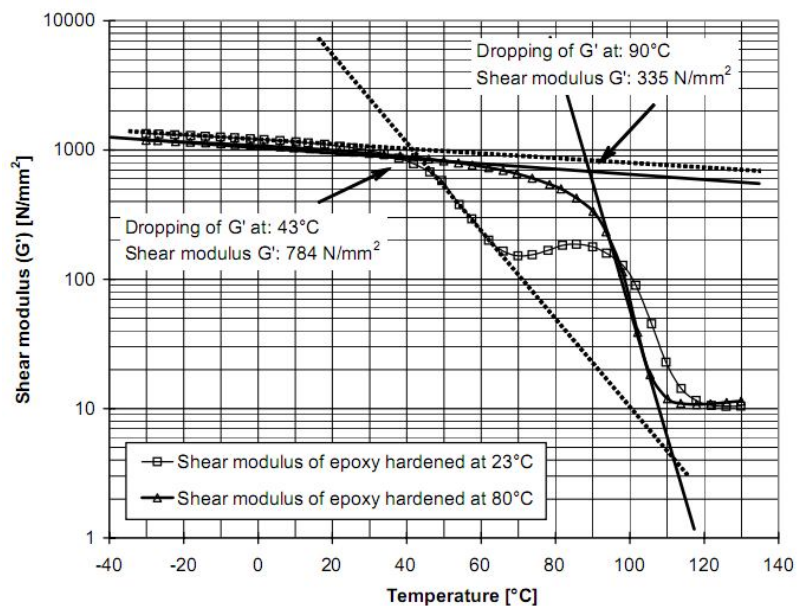
(Steiger, nedatováno [10])

Obr.č. 36: Křivka tečení při dlouhodobém zatížení ( $22,5 \text{ N/mm}^2$ ) během 800 dnů



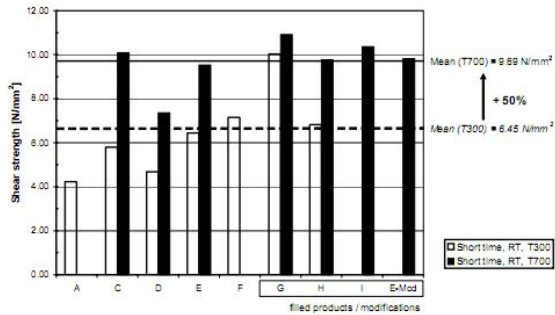
(Steiger, nedatováno [10])

Obr.č. 37: Modul pružnosti ve smyku a teplota skelného přechodu použitých epoxidových lepidel, odvozeno ze zkoušky torzní vibrace

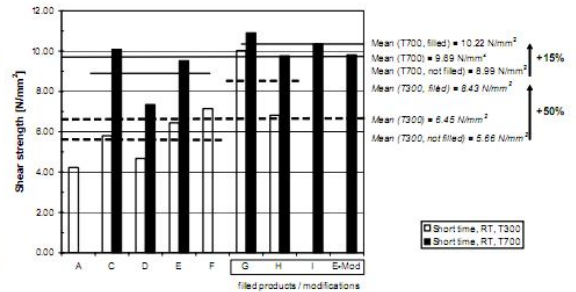


(Steiger, nedatováno [10])

Obr.č. 39: Vliv tuhosti lamel při normální teplotě

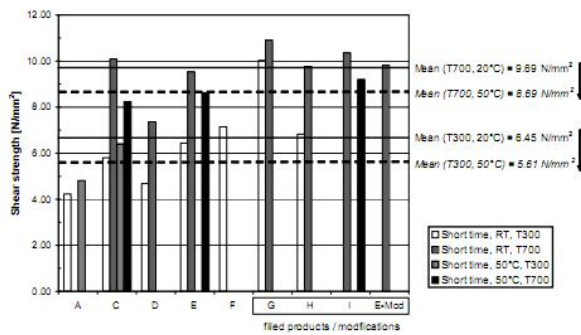


Obr.č. 40: Vliv plniv při normální teplotě

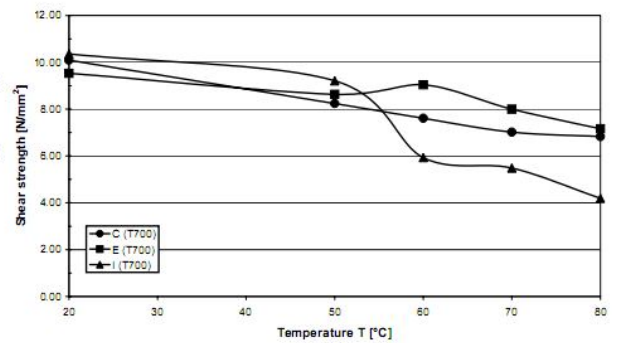


(Steiger, nedatováno [10])

Obr.č. 41: Pevnost ve smyku při normální teplotě a T=50°C

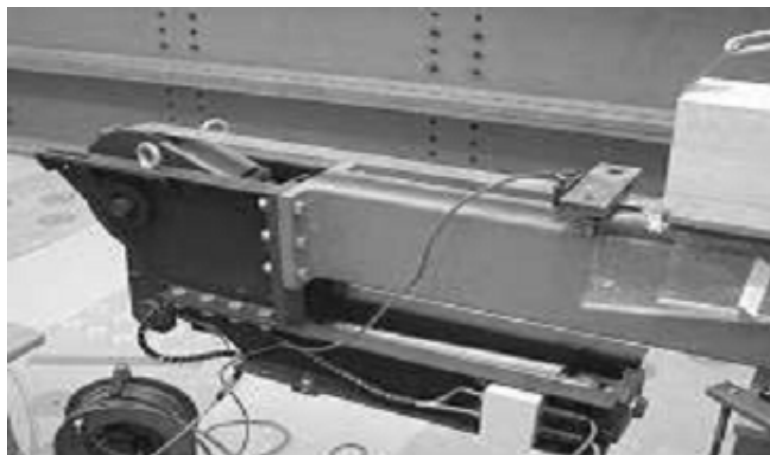


Obr.č. 42: Vliv teploty na smyk. pevnost



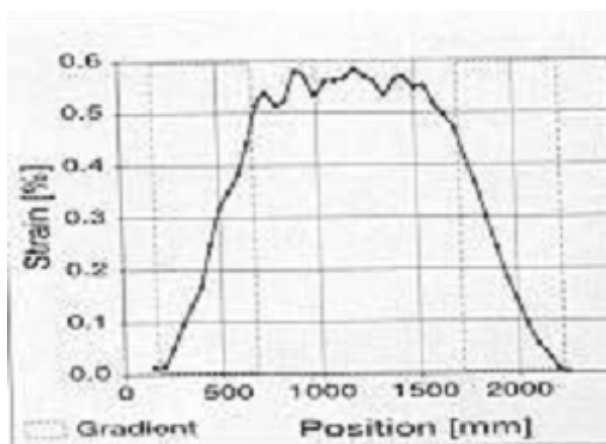
(Steiger, nedatováno [10])

Obr.č. 47: Detail předpínacího zařízení během procesu předpínání dřevěného nosníku



(Brunner, Schnueriger, nedatováno [5])

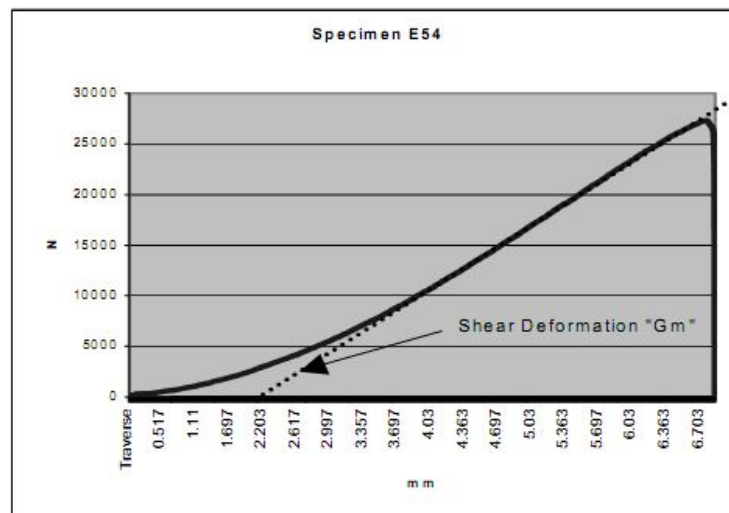
Obr.č. 48: Napětí rozložené předpjatými CFRP proužky ukazující předpínací síly podél délky nosníku



(Brunner, Schnueriger, nedatováno [5])



Obr.č. 53: Průběh křivky síly a deformace-zkouška v tahu Smyková deformace-hodnota "GM" je definován jako sklon křivky v N / mm



(Brunner, Schnueriger, nedatováno [5])

Obr.č. 58 : Rozdělené soubory vláken po šesti kusech připravené k lepení



Zdroj: Vlastní.

Tab.č. 11: Doporučené hodnoty charakteristických pevností a modulů pružnosti [MPa] a charakteristických hustot [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] pro masivní dřevo – podle Národního aplikačního dokumentu ČR A SR

Způsob namáhání		Třída pevnosti		
		Jehličnaté dřeviny (smrk, jedle, borovice, modřín)		Listnaté dřeviny (dub, buk, jasan)
		SI	SII	SI
<b>Ohyb</b>	$f_{m,k}$	22	16	30
<b>Tah</b>	$f_{t,o,k}$	13	10	18
	$f_{t,90,k}$	0,3	0,3	0,6
<b>Tlak</b>	$f_{c,0,k}$	20	17	23
	$f_{c,90,k}$	5,1	4,6	8
<b>Smyk</b>	$f_{v,k}$	2,4	1,8	3
<b>Modul pružnosti E</b>	$E_{0,mean}$	10000	8000	12500
	$E_{0,05}$	6700	5400	10500
	$E_{90,mean}$	330	270	830
	$E_{90,05}$	220	180	690
<b>Modul pružnosti G</b>	$G_{mean}$	630	500	780
	$G_{05}$	420	330	650
<b>Hustota</b>	$\rho_k$	370	350	530

(Reinprecht, Štefko, 2000)

Tab.č. 17: Charakteristiky použitých vzorků

	vzorek	rozměry			hmotnost	hustota
nevyztužené	1	65	29	1500	1,339	473,56
	2	65,4	30	1498	1,262	429,39
	3	65,1	30	1500	1,311	447,52
	4	65,4	30,1	1500	1,314	445,00
	5	65,1	30	1500	1,36	464,24
	6	65,3	29,9	1500	1,227	418,96
	7	65,2	30	1500	1,098	374,23
	8	65,2	30	1500	1,329	452,97
	9	65,1	29,9	1500	1,321	452,44
	10	65,1	30,2	1500	1,29	437,43
vyztužené PU lepidlem	1	65	30	1498	1,325	453,60
	2	65,2	29,9	1500	1,275	436,01
	3	65,1	30,2	1500	1,31	444,21
	4	65,4	30,1	1500	1,241	420,28
	5	65	30	1500	1,343	459,15
	6	65	30,2	1500	1,51	512,82
	7	65,1	29,9	1500	1,336	457,58
	8	65,1	30	1500	1,503	513,06
	9	65,2	29,9	1500	1,324	452,77
	10	65,1	30,1	1500	1,293	439,91
vyztužené epoxidovou pryskyřicí Sikadur 330	1	65,1	29,9	1500	1,724	590,46
	2	65,2	30	1498	1,281	437,19
	3	65,1	30	1500	1,25	426,69
	4	65,2	30,1	1500	1,311	445,35
	5	65	30	1500	1,122	383,59
	6	65,2	30	1500	1,207	411,38
	7	65,1	30,1	1500	1,275	433,78
	8	65,1	30	1500	1,503	513,06
	9	65,2	30	1500	1,215	414,11
	10	65	30	1500	1,32	451,28

Zdroj: Vlastní zpracování.

## Technický list č. 1

Technický list  
Vydání 24/09/2008  
Identifikační č.:  
02 04 01 02 001 0 XXXXXX  
SikaWrap®-600 C/120\_P

### SikaWrap®-600 C/120

Prošivaná tkanina z uhlíkových vláken pro zesilování konstrukcí

#### Popis výrobku

SikaWrap®-600 C/120 je jednosměrná tkaná prošivaná tkanina z těžkých uhlíkových vláken (rohoží) pro mokry způsob aplikace.



#### Použití

Zesilování konstrukcí z armovaného betonu, cihelného zdiva a dřeva pro zatížení v ohybu a ve smyku v důsledku:

- prevence před poruchami způsobené zemětřesením
- snížení následků po explozi (při nehodách a teroristických útocích)
- zvýšení odolnosti cihelných zdí při zemětřesení
- náhrada chybějící, zkorodované výztuže
- zesílení a zvýšení únosnosti sloupů
- zvýšení celkového zatížení konstrukčních prvků
- při změně využití stavby
- chybného návrhu konstrukce
- prodloužení životnosti a provozuschopnosti
- zvýšení únosnosti konstrukce dle platných předpisů

#### Vlastnosti / výhody

- Útek z teplem tvrdnoucích vláken zajišťuje stabilitu vláken
- vhodné pro všechny zesilovací práce
- vhodné pro různé tvarované podklady (trámy, sloupy, komíny, piloty, zdi, síla)
- systém schválen v mnoha zemích na celém světě
- nízká hmotnost – nezvyšuje přídavné zatížení konstrukce
- oproti tradičním technikám finančně méně náročná metoda zesilování

#### Zkušební zprávy

ITC Zlín, AO č. 224 - Certifikát č. 07 0305 V/AO/a

ITC Zlín, AO č. 224 - Stavebně technické osvědčení STO-AO224-79/2007/a s platností do 31.5.2010

#### Údaje o výrobku

##### Druh vláken

Uhlíková vlákna střední pevnosti.

##### Konstrukce tkaniny

Směr vláken: 0° (jednosměrné).

Osnova: černá uhlíková vlákna (99% celkové gramáže).

Útek: bílá termoplastická teplem tvrdnoucí vlákna (1% celkové gramáže).

##### Balení

	délka tkaniny / role	šířka tkaniny
1 role v lepenkové krabici	≥ 50 m	300 mm



## Skladování

Podmínky skladování / Trvanlivost	24 měsíců od data výroby v neporušeném originálním balení v suchu a při teplotách +5°C až +35°C. Chraňte před přímým slunečním zářením.
-----------------------------------	--

## Technické údaje

Gramáž	010 g/m <sup>2</sup> ± 20 g/m <sup>2</sup>
Tloušťka tkaniny	0,337 mm (závisí na obsahu vláken).
Hustota vláken	1,61 g/cm <sup>3</sup>

## Mechanické / Fyzikální Vlastnosti

Vlastnosti „suchého“ vlákna	Pevnost v tahu: 3800 N/mm <sup>2</sup> (přibližně)  Modul pružnosti v tahu: 242000 N/mm <sup>2</sup> (přibližně)  Protažení při přetržení: 1,55% (přibližně)
-----------------------------	---

Vlastnosti laminátu	Tloušťka laminované vrstvy: 1,3 mm na vrstvu (impregnovaná Sikadur <sup>®</sup> -300)  Mezní zatížení: 750 kN/m šířky na vrstvu  Modul pružnosti v tahu: 50,0 kN/mm <sup>2</sup> (platí pro běžnou tloušťku laminované vrstvy 1,3 mm)  Poznámka: Výše uvedené hodnoty jsou pouze orientační. Získané údaje o vlastnostech laminované vrstvy během zkoušky napětí závisí na druhu použité impregnační / laminační pryskyřice a způsobu provedení zkoušky. Zohledňujte redukující materiálové faktory podle relevantních návrhových norem.
---------------------	--

Návrh	Návrh napětí: Protažení max. 0,60% (závisí na druhu zatížení; hodnotu je nutné přizpůsobit místním návrhovým normám).  Pevnost v tahu: (teoretická odolnost v tahu pro návrh): <ul style="list-style-type: none"><li>při protažení 0,4%: 270 kN/m šířky (≙ 60 kN / 30 cm)</li><li>při protažení 0,6%: 400 kN/m šířky (≙ 120 kN / 30 cm)</li></ul>
-------	--

## Informace o systému

Složení systému	Dodržujte uvedenou skladbu systému, v žádném případě nesmí být měněna. Primer pro beton - Sikadur <sup>®</sup> -330 nebo Sikadur <sup>®</sup> -300 se Sikadur <sup>®</sup> -513. Impregnační / laminační pryskyřice - Sikadur <sup>®</sup> -300. Tkanina pro konstrukční zesílení - SikaWrap <sup>®</sup> -600 C/120. Podrobnosti o vlastnostech pryskyřice, aplikaci tkaniny a další informace naleznete v technickém listu Sikadur <sup>®</sup> -300.
-----------------	---

## Aplikační podrobnosti

Spotřeba	Primer na připravený podklad (závisí na nerovnosti podkladu): <ul style="list-style-type: none"><li>hladký povrch: ~ 0,5 kg/m<sup>2</sup> (Sikadur<sup>®</sup>-300 nebo Sikadur<sup>®</sup>-330)</li><li>nerovný povrch: ~ 0,5 – 1,0 kg/m<sup>2</sup> (Sikadur<sup>®</sup>-330 nebo Sikadur<sup>®</sup>-300 smíchaný s maximálně 5% Sikadur<sup>®</sup>-513)</li></ul> Impregnace pryskyřice na každou vrstvu: <ul style="list-style-type: none"><li>~ 0,75 kg/m<sup>2</sup> (Sikadur<sup>®</sup>-300)</li></ul>
----------	---

<b>Kvalita podkladu</b>	<b>Specifické požadavky:</b> Minimální pevnost v tahu: 1,0 N/mm <sup>2</sup> nebo podle konkrétního projektu pro zesilování.
<b>Příprava podkladu</b>	<p>Betón a zdivo.</p> <p>Podklad musí být pevný, suchý, zbavený nečistot a cementového šlemu, ledu, stojaté vody, mastnoty, olejů, starých nátěrů a všech ostatních nesoudržných a volných částic.</p> <p>Povrch musí být důkladně očištěný a musí být mechanicky otevřena povrchová struktura.</p> <p>Opravy a vyrovnání: Pokud je beton zasažen karbonatací (popř. je křehký), nebo pokud je povrch nesterádný, je třeba aplikovat tyto systémy:</p> <p>(Aplikační podrobnosti naleznete v příslušných technických listech.)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ochrana zkorodované výztuže: SikaTop<sup>®</sup> Armatec<sup>®</sup> 110 EpoCem<sup>®</sup></li> <li>• Konstruktivní opravy: Sikadur<sup>®</sup>-41 epoxidová opravná malta, Sikadur<sup>®</sup>-30 lepicí malta nebo cementová správková malta řady Sika<sup>®</sup>MonoTop<sup>®</sup> (např. Sika<sup>®</sup>MonoTop<sup>®</sup>-412 pro práce horizontální, vertikální a nad hlavou, nebo Sika<sup>®</sup>MonoTop<sup>®</sup>-438).</li> </ul>
<b>Aplikace</b>	
<b>Způsob aplikace / Nástroje</b>	<p>Tkaninu stříhejte speciálními nůžkami nebo nožem na koberce. Tkaninu nikdy nepřehýbejte!</p> <p>Informace o impregnaci / laminaci jsou uvedené v technickém listu Sikadur<sup>®</sup>-300.</p>
<b>Poznámky k aplikaci / Omezení</b>	<p>Tento výrobek patří pouze do rukou zkušených profesionálů.</p> <p>Minimální poloměr zaoblení rohu: &gt; 20 mm.</p> <p>Nevhodné rohy lze obrousit, nebo vyplnit maltou Sikadur<sup>®</sup>.</p> <p>Překrytí pásů ve směru vláken musí být minimálně 150 mm – konkrétní hodnota závisí na druhu tkaniny SikaWrap<sup>®</sup> nebo na speciálních pravidlech pro zesilování.</p> <p>Při aplikaci několika pásů vedle sebe není překryvání nutné. Místa překryvání následujících vrstev musí být rovnoměrně rozdělena po celém obvodu sloupu.</p> <p>Zesilovací práce představují zásah do konstrukce, proto musí být prováděny pouze zkušenými pracovníky.</p> <p>Tkanina SikaWrap<sup>®</sup>-600 C/120 je přetírána impregnačními/laminačními pryskyřicemi, které zajistí optimální adhezi / lepidlost a trvanlivost. Dodržujte pořadí aplikace jednotlivých prvků zesilovacího systému.</p> <p>Z estetických důvodů nebo kvůli ochraně může být tkanina SikaWrap<sup>®</sup>-600 C/120 opatřena mlátou na cementové bázi nebo nátěrem. Výběr závisí na místních vnějších podmínkách. Pro základní ochranu proti UV záření použijte Sikagard<sup>®</sup>-550W Elastic, Sikagard<sup>®</sup> ElastoColor-675 W nebo Sikagard<sup>®</sup>-680 S.</p>
<b>Platnost hodnot</b>	<p>Hodnoty a data uvedené v tomto technickém listu jsou založena na výsledcích laboratorních testů. Tyto hodnoty se mohou při aplikaci v praxi lišit, což je mimo naši kontrolu.</p> <p>Detailní informace o zdravotní závadnosti a bezpečnosti práce jsou spolu s bezpečnostními informacemi (např. fyzikálními, toxikologickými a ekologickými daty) uvedeny v bezpečnostním listu.</p> <p>Aktuální technické a bezpečnostní listy, Prohlášení o shodě, Certifikáty najdete na internetové adrese <a href="http://www.sika.cz">www.sika.cz</a>.</p>
<b>Bezpečnostní předpisy</b>	<p>Ochranná opatření</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Při zpracování je nutné dodržovat bezpečnostní pokyny, platné předpisy příslušných úřadů o ochraně zdraví při práci.</li> <li>• Při aplikaci používejte ochranný oděv, brýle a rukavice.</li> <li>• Podrobnější údaje týkající se hygieny a bezpečnosti práce, ochrany životního prostředí jsou uvedeny v Bezpečnostním listu.</li> <li>• Odstraňování odpadu</li> </ul>

- Odpad dle zákona č. 185/2001 Sb. o odpadech.
- Odpad odvézt na skládku stavebního odpadu nebo předat odborné firmě k likvidaci
- Fólie je možné recyklovat.

## Místní omezení

V závislosti na specifických místních omezeních se mohou výsledné vlastnosti tohoto výrobku v různých zemích lišit. Vždy se řiďte informacemi uvedenými v platném Technickém listu.

Tento technický list je ve fázi přípravy, před použitím důkladně prostudujte aktuální technický list dostupný na [www.sika.cz](http://www.sika.cz).

## Právní dodatek

Uvedené informace, zvláště rady pro zpracování a použití našich výrobků, jsou založeny na našich znalostech z oblasti vývoje chemických produktů a dlouholetých zkušenostech s aplikacemi v praxi při standardních podmínkách a řádném skladování a používání. Vzhledem k rozdílným podmínkám při zpracování a dalším vnějším vlivům, k četnosti výrobků, různému charakteru a úpravě podkladů, nemusí být postup na základě uvedených informací, ani jiných psaných či ústních doporučení, vždy zárukou uspokojivého pracovního výsledku. Veškerá doporučení firmy Sika CZ, s.r.o. jsou nezávazná. Aplikátor musí prokázat, že předal písemně včas a úplné informace, které jsou nezbytné k řádnému a úspěšnému posouzení firmou Sika. Aplikátor musí přezkoušet výrobky, zda jsou vhodné pro plánovaný účel aplikace. Především musí být zohledněna majetková práva třetí strany. Všechny námi přijaté objednávky podléhají našim aktuálním „Všeobecným obchodním a dodacím podmínkám“. Ujistěte se prosím vždy, že postupujete podle nejnovějšího vydání technického listu výrobku. Ten je spolu s dalšími informacemi k dispozici na našem technickém oddělení nebo na [www.sika.cz](http://www.sika.cz).



Sika CZ, s.r.o.  
Bystroňská 1132/36,  
ČZ 624 00 Brno

tel: +420 546 422 484  
fax: +420 546 422 400  
e-mail: [sika@cz.sika.com](mailto:sika@cz.sika.com)  
<http://www.sika.cz>

4



SikaWrap®-800 CH20

4/4



# Den Braven Sealants

## Technický list 06.17 Zwaluw PU lepidlo na dřevo D4

**Výrobek** Jednosložkové lepidlo na bázi polyuretanu, vytvrzující vulkanizací vzdušné vlhkosti, vytvářející pevný voděvzdorný spoj.

**Vlastnosti**

- Po vytvrzení transparentní;
- Rychlá přilnavost, mírná plnicí schopnost;
- Pro interiéry i exteriéry, odolné vlhku a vodě – odolnost B4;
- Vysoká pevnost lepeného spoje v kombinaci dřevo – polyuretan - polystyren;

**Použití**

- Lepení dřevěných konstrukcí, sendvičových hranolů a trámů;
- Lepení čepových spojů s požadavkem na vysokou pevnost a odolnost proti vodě;
- Lepení dřeva na polyuretanové panely, polystyren, plasty, kov, minerální vlnu, apod.;

**Barva** Medově hnědá  
**Balení** Dóza 250ml, 500ml, plechovka 5kg

### Technické údaje

Základ		polyuretan	
Konzistence		tekutá	
Hustota	g/ml	1,1	
Sušina	%	100	
Tepelná odolnost	°C	-30 / +100	(po vytvrzení)
Tepelná odolnost	°C	-15	(pouze při přepravě)
Tepelný rozsah použití	°C	+15 / +20	
Otevřený čas	min	≈ 30	(při 23°C / 55% rel. vlhk.)
Lisovací čas	hod	8	(při 23°C / 55% rel. vlhk.)
Doba úplného vytvrzení	hod	24	(při 23°C / 55% rel. vlhk.)
Spotřeba	g/m <sup>2</sup>	150 – 250	(dle savosti podkladu)
Pevnost v tahu	kg/cm <sup>2</sup>	120	(při 23°C / 65% RF / za 7 dnů)
Odolnost proti vodě		B4	(dle DIN 68602)
Trvanlivost	měsíce	9	

**Omezení** Mimo jiné není vhodné pro použití na PE, PP, živичné podklady a teflon.

**Polkný** Lepidlo nanášíme na lepenou plochu dle požadavku celoplošně a rovnoměrně. Lepený materiál přiložíme na podklad, mírně přitlačíme a zatlačíme (zafixujeme). Lepidlo mírně nabývá, fixaci nutno provést co nejdříve.

**Podklad** Musí být čistý, suchý, pevný, bez volných částic prachu, mastnot a oleje.

**Ošetření před aplikací** K urychlení vytvrzení lze porézní (savý) podklad navlhčit rozprašovačem (vodou).

**Čištění** Materiál : Aceton, Perchllorethýlen / ruce: pasta na ruce, mýdlo a voda.

**Bezpečnost** Viz «Bezpečnostní údajový list 06.17». Dodržujte běžná hygienická opatření, při práci nejíst, nepít, nekouřit. Skladujte mimo dosah dětí.

**Aktualizace** Aktualizováno dne 29.12.2003

Vyhotovil: L. Kousal 11.11. 2002

Den Braven Sealants zaručuje, že výrobek je v záruční době konformní se specifikací. Uvedené informace jsou založeny na objektivním testování a naší zkušenosti. V žádném případě neručíme nad rámec uvedených informací. Uvedené informace jsou výsledkem našich testů a zkušeností, jsou však všeobecné povahy a neobsahují záruky. Každý uživatel je povinen se přesvědčit o vhodnosti použití vlastními zkouškami.

— světový výrobce tmelů —

Adresa: 793 91 Úvalno 353, tel.: 554 648 200, fax: 554 648 205, Česká republika

Bankovní spojení: KB Krnov, č. ú. 19 - 0848810297 / 0100

info@denbraven.cz

IČO: 25366483, DIČ: 359 - 25366483

www.denbraven.cz

(firma Framar, s. r. o., 2006, [14])




**Technický list**  
 Vydání 01/06  
 Identifikační č.: 02 04 01 04 001 0 000004  
 Verze č. 05  
 Sikadur® 330

## Sikadur® 330

### Lepidlo k systému Sika Wrap

<b>Popis výrobku</b>	Sikadur 330® - thixotropní 2 - komponentní impregnační pryskyčice na epoxidové bázi, bez rozpouštědel.		
<b>Použití</b>	Lepení uhlíkových tkanin. Součást systému SikaWrap pro zesílení nebo opravy konstrukčních prvků vyrobených z armovaného betonu, kamenného zdiva nebo stavebního dřeva, pro zatížení v ohybu a stříhové zatížení.		
<b>Výhody</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• dlouhá doba zpracovatelnosti</li> <li>• odolnost vůči chemikáliím a prostředí</li> <li>• vytvrzuje se i při vysoké relativní vlhkosti vzduchu</li> <li>• vytvrzuje se i při nízkých teplotách vzduchu</li> <li>• snadná zpracovatelnost, jednoduchý míchací poměr</li> <li>• jednotlivé komponenty jsou barevně odlišeny, dobrá kontrolovatelnost homogenity</li> </ul>		
<b>Zkušební zprávy</b>	ITC Zlín, AO č. 224 - Certifikát č. 99 0279 V/AO/b ITC Zlín, AO č. 224 - Stavební technické osvědčení STO-AO224-565/99/b s platností do 31.5.2007		
<b>Údaje o výrobku</b>	Komponent A - bílá Komponent B - šedá Směs A+B: světlá šedá		
<b>Barva</b>	Komponent A - bílá Komponent B - šedá Směs A+B: světlá šedá		
<b>Skladovatelnost</b>	Nejméně 24 měsíců v originálním obalu při teplotách + 5 °C až +25 °C.		
<b>Balení</b>	Předem dávkované nevratné obaly (A+B): 5 kg.		
<b>Chemická báze</b>	Epoxidové pryskyčice.		
<b>Objemová hmotnost</b>	Směs A+B: 1,31 kg/l		
<b>Doba zpracovatelnosti</b>	30 minut ( při +35 °C ) 90 minut ( při +10 °C )		
<b>Mísicí poměr</b>	Hmotnostně	komponent A	: komponent B = 4 : 1
<b>Viskozita</b>	pastovitá, netekoucí		
	teplota	viskozita	
<b>Tahový E-modul</b>	3 800 N/mm <sup>2</sup> ( po 7 dnech, 23 °C)		



<b>Pevnost v tahu</b>	30 N/mm <sup>2</sup> (po 7 dnech, 23 °C)
<b>Koeficient roztažnosti</b>	45 x 10 <sup>-5</sup> pro °C <sup>-1</sup> (-10°C až +40°C).
<b>Teplota použití</b>	-40°C až +50°C).
<b>Teplota průhybu při zahřívání (Heat deflection temperature)</b>	ošetření 7 dní, 15 °C: 41 °C ošetření 7 dní, 23 °C: 47 °C ošetření 7 dní, 35 °C: 53 °C
<b>Teplotní podmínky</b>	Teplota podkladu / okolí: min. +10°C. Teplota podkladu / okolí: max. +35°C.
<b>Vlhkostní podmínky</b>	Max.vlhkost podkladu 4%.. Pozor na roaný bod!
<b>Aplikace</b>	
<b>Podklad</b>	<u>Beton:</u> betonový podklad musí být pevný, bez volných a pískových částic, bez prachu a nečistot. Zvláště musí být odstraněny vrstvy oleje a mastnoty a cementové kaly, které se nalézají na povrchu. Stáří betonu vždy podle klimatu 3 - 6 týdnů. Min. odtrhová pevnost betonu je 1,5 N/mm <sup>2</sup> Předběžné ošetření : pískování, dýskání takovou vodou, obroušení nebo otlučení.
<b>Příprava podkladu</b>	Pokud se na povrchu betonu vyskytují nerovnosti, musí být tyto nejdříve reprofilovány pomocí opravné malty Sikadur 41. Pro dosažení optimálního spojení s betonovým podkladem lze z pojiva Sikaduru 41 (komp.A+B) nanést základní spojovací můstek. Jako alternativu lze reprofilovat povrch maltou Sikadurem 41 (Komp. A+B+C) + křemičitý písek 0,3-0,9 mm v poměru 1:1. Nechat vytvrdit minimálně 24 hodin.
<b>Míchání</b>	Komponent B dobře promíchejte a přidejte všechny ke komponentu A. Míchejte elektrickým míchadlem (při nízkých otáčkách max. 500 ot./min.) tak dlouho až v hmotě nejsou patrná žádná barevná šmouhy. Čas zpracování začíná běžet při smíchání pryskyřice a tužidla. Tento čas bude při větším namíchaném množství a vyšších teplotách kratší. Abychom dosáhli delšího času zpracovatelnosti při vyšších teplotách, můžeme namíchané lepidlo rozdělit do menších množství. Dalším možným opatřením je předchlazení komponentů A a B před mícháním.
	
<b>Mísicí poměr</b>	Váhové díly                      komponent A : komponent B                      = 4 : 1
<b>Aplikace</b>	1. Ustříhnete tkaninu. 2. Namíchané lepidlo Sikadur® 330 naneste na připravený podklad pomocí zednické lžice nebo zubového hladítka v množství cca 0,7 až 1,2 kg/m <sup>2</sup> . 3. Tkaninu SikaWrap® 230 C přiložte v příslušném směru na podklad a lepidlem Sikadur® 330. Pečlivě vtlačte tkaninu SikaWrap® 230 C do lepidla laminačním válečkem, až lepidlo pronikne tkaninou. Nanášáte-li více než jednu vrstvu tkaniny ( max 3 ), aplikujte další vrstvu lepidla (0,5 kg/m <sup>2</sup> ) během 60 minut (20 °C) po nanesení předchozí vrstvy. Pokud to není možné, je nutno dodržet čekací dobu nejméně 12 hod před položením další vrstvy. Pak opakujte krok 2. Jako krycí vrstvu naneste vrstvu pryskyřice v množství 0,5 kg/m <sup>2</sup> , na kterou můžeme přidat křemičitý písek sloužící jako podklad pro následující cementové vrstvy ( omítka ).



**Doba zpracování** Čím větší množství Sikadur® 330, tím kratší doba zpracování. K dosažení delší doby zpracovatelnosti za vyšších teplot, míchejte menší množství nebo uchovávejte Sikadur® 330 za nízkých teplot (>+5°C!).

teplota	+10°C	+35°C
Doba zpracování	90 minut	30 minut

**Čekací doby**

	Teplota podkladu	Minimum	Maximum
Sikadur® 330	+10°C	24 hod	Vytvrzenou prykyfící starší jak 7 dní očistěte Colimou Reiniger a zdraněte amirkovým amirkovým papírem před dalším postupem
Sikadur® 330	+23°C	12 hod	
Sikadur® 330	+35°C	6 hod	

	Teplota podkladu	Minimum	Maximum
Sikadur® a Sikagard® barevné nátěry	+10°C	5 dní	Vytvrzenou prykyfící starší jak 7 dní očistěte Colimou Reiniger a zdraněte amirkovým amirkovým papírem před dalším postupem
	+23°C	3 dny	
		24 hod	

**Doba vytvrzení**

Teplota	Plně vytvrzené
+10°C	7 dní
+23°C	5 dní
+35°C	2 dny

**Důležitá opatření**

- min. pevnost podkladního betonu v odřhu 1,0 N/mm<sup>2</sup>
- povrch, na kterém se lepení provádí, musí být rovný
- překrytí tkaniny ve směru vláken nejméně 100 mm
- namíchané zbytky lepidla Sikadur® 330 nechávejte v kovových nádobách max. po 1 kg
- aplikovaný systém chraňte před přímými slunečními paprsky ( omítkou, nátěry Sikagard, ... )
- max. přípustná provozní teplota + 50 °C
- Sikadur® 330 je nutné chránit před deštěm min. po dobu 24 hod po aplikaci

**Bezpečnostní předpisy**

Ochranná opatření, první pomoc  
 -při kontaktu s kůží vzniká nebezpečí podráždění. Postižené části pokožky důkladně omýt vodou, použít masť na ochranu pokožky, případně konzultovat s lékařem.  
 -při zasažení očí okamžitě opláchnout oči při otevřeném víčku 10-15 minut pod tekoucí vodou a konzultovat s lékařem.  
 -po vdechnutí postiženého dopravit okamžitě z nebezpečné zóny na čerstvý vzduch. Případně okamžitě volat lékaře.  
 -po spolknutí nevyvolávat zvracení. Uložit postiženého do klidu a okamžitě zavolat lékaře.  
 -při míchání a zpracování noste ochranné brýle, rukavice a oděv.  
 nenechtejete vniknout do vody, půdy.  
 Podrobnější údaje týkající se hygieny a bezpečnosti práce, ochrany životního prostředí jsou uvedeny v Bezpečnostním listu.  
Odstraňování odpadu  
 odpad dle zákona č. 185/2001 Sb. o odpadech  
 Komp. A - katalogové č. 08 01 02  
 Komp. B - katalogové č. 07 02 99  
 Vytvrdnutý materiál: katalogové č. 12 01 05  
 Odpad odvézt na skládku stavebního odpadu.



#### Upozornění

Hodnoty a data uvedená v tomto technickém listu jsou založena na výsledcích laboratorních testů. Tyto hodnoty se mohou při aplikaci v praxi lišit, což je mimo naši kontrolu.

Detailní informace o zdravotní zavadlosti a bezpečnosti práce jsou spolu s bezpečnostními informacemi (např. fyzikálními, toxikologickými a ekologickými daty) uvedeny v bezpečnostním listu.

Aktuální technické a bezpečnostní listy, Prohlášení o shodě, Certifikáty najdete na internetové adrese [www.sika.cz](http://www.sika.cz).

#### Právní dodatek

Uvedené informace, zvláště rady pro zpracování a použití našich výrobků, jsou založeny na našich znalostech z oblasti vývoje chemických produktů a dlouholetých zkušenostech s aplikací v praxi při standardních podmínkách a řádném skladování a používání. Vzhledem k četnosti výrobků, různému charakteru a úpravě podkladů, rozdílným podmínkám při zpracování a dalším vnějším vlivům, nemusí být postup na základě uvedených informací, ani jiných psaných či ústních doporučení, zárukou uspokojivého pracovního výsledku. Za uvedené informace firma Sika CZ, s.r.o. neručí a veškerá její doporučení jsou nezávazná. Především musí být zohledněna majetková práva třetí strany. Všechny námi přijaté objednávky podléhají našim aktuálním „Všeobecným obchodním a dodacím podmínkám“. Ujistěte se prosím vždy, že postupujete podle nejnovějšího vydání technického listu výrobku. Ten je spolu s dalšími informacemi k dispozici na našem technickém oddělení.



Sika CZ, s.r.o. Bystrcká 1132/36, CZ – 624 00 Brno  
Tel: +420 546 422 464 e-mail: [sika@cz.sika.com](mailto:sika@cz.sika.com)  
Fax: +420 546 422 400 <http://www.sika.cz>



Sikedur<sup>®</sup> 330 4/4

(Compass stavební chemie s.r.o., 2006, [13])