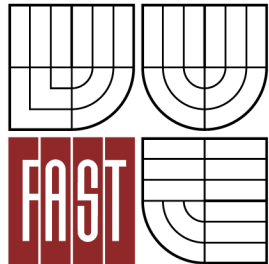




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A
DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND
COMPONENTS

HODNOCENÍ TRVANLIVOSTI LEPIDEL URČENÝCH PRO DŘEVĚNÉ PRVKY

DURABILITY DETERMINATION OF ADHESIVE USED FOR TIMBER STRUCTURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MICHAL ŠOT

VEDOUČÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAN VANĚREK, Ph.D.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Michal Šot
Název	Hodnocení trvanlivosti lepidel určených pro dřevěné prvky
Vedoucí bakalářské práce	Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2011
Datum odevzdání bakalářské práce	25. 5. 2012

V Brně dne 30. 11. 2011

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Vedoucí ústavu

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

Podklady a literatura

- [1] L.C. Hollaway, Construction and Building Materials 24, 2419 (2010)
- [2] G. M. Raftery, A. M. Harte, P. D. Rodd, International Journal of Adhesion & Adhesives 29, 101 (2009).
- [3] C. R. Frihart, in: Proc. Of Wood Adhesives 2005 Conference, Madison, pp. 241– 246 (2005).
- [4] R. E. Rowlands, R. P. Van Deweghe, T. L. Laufenberg, G. P. Krueger. Wood & Fiber Science 18, 40 (1986).
- [5] J. G. Chandler, C. R. Frihart, in: Proc. Of Wood Adhesives 2005 Conference, Madison, WI, pp. 99–106 (2005).

Zásady pro vypracování

Nosným tématem bakalářské práce je řešení problematiky lepených spojů u dřevěných lepených nosných konstrukcí. V této oblasti je veden nový trend zkoumání zaměřený na interakci novodobých lepidel se dřevním adherendem po dlouhodobém vystavení vnějším vlivům. Právě neznalost tohoto chování vede k obavám, zdali expozice lepených prvků ve vlhkostních třídách provozu 2, příp. 3 dle EN 1995-1-1 nepovede k procesům delaminace spojů.

Práce se bude sestávat z teoretické a praktické části.

V teoretické části se zaměří autor na problematiku dřeva a jeho struktury, která má vliv na vytvoření funkčního lepeného spoje a také se zaměří na problematiku pevnostního třídění dřeva, a to jak vizuálního, tak i třídění pomocí tuhostních charakteristik.

V praktické rešeršní části bude důraz kladen na obsáhlou rešerši problematiky lepených spojů u dřevěných adherendů právě s ohledem na ucelený přehled stávajících postupů pro zjišťování trvanlivosti lepidel. Trvanlivostní testy (dlouhodobé či zrychlené) mají různou vypovídající schopnost, a je proto nutné na základě provedené rešerše vědeckých článků vybrat takové postupy, jejich vypovídající schopnost byla ve vědeckých podkladech prokázána. Část pozornosti bude rovněž zaměřena na problematiku trvanlivosti FRP/dřevo materiálů, kdy bude proveden experiment nepřevyšující 10 % rozsahu práce. V rámci experimentu bude hodnocen vybraný krátkodobý trvanlivostní test těchto spojů.

Výstupy praktické části budou podkladem pro navazující diplomovou práci.

Práce bude zpracována v rozsahu cca 40 stran včetně příloh.

Předepsané přílohy

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací .

.....

Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Práce se zabývá problematikou lepených spojů u dřevěných adherendů a použitím zkušebních postupů pro zjištění vlastností a trvanlivostí těchto lepených spojů.

V rámci práce byl proveden přehled zkušebních postupů a byly provedeny 2 rešeršní články.

V praktické části byl proveden experiment zabývající se trvanlivostí lepeného spoje FRP/dřevo a jeho vyhodnocení.

Klíčová slova

Lepený spoj, adherend, lepidlo, smyková pevnost, delaminace, trvanlivost.

Abstract

The work deals with issues of bonding in wood adherents and using test procedures to determine the properties and durability of bonded joints.

The work contains an overview of the test procedures performed, plus two research articles.

In the practical part of the work, experiments were performed dealing with the bond durability of FPR/wood and evaluating this material.

Keywords

Bonding (bonded joint), adherent, shear strength, delamination, durability.

Bibliografická citace VŠKP

ŠOT, Michal. *Hodnocení trvanlivosti lepidel určených pro dřevěné prvky*. Brno, 2011. XX s., YY s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Jan Vaněrek, Ph.D..

Prohlášení:

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

V Brně dne 24.5.2012

.....
podpis autora
Michal Šot

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Vaněrkovi, PhD. za odborné vedení, přístup, rady, trpělivost a diskuze při vypracování mé bakalářské práce.

Obsah

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY	1
1. Vlastnosti dřeva.....	12
1.1. Struktura dřeva	12
1.1.1. Makrostruktura dřeva	12
1.1.2. Mikrostruktura dřeva.....	13
1.1.2.1. Mikrostruktura jehličnanů.....	14
1.1.2.2. Mikrostruktura listnatých dřevin.....	14
1.2. Anizotropie	15
2. Normativní určování pevnosti dřevin	15
2.1. Všeobecné požadavky na třídění dřeva podle pevnosti.....	16
2.1.1. Vizuální třídění podle pevnosti	17
2.1.2. Strojní třídění podle pevnosti	18
2.2. Třídy pevnosti.....	19
2.2.1. Rostlé dřevo.....	19
2.2.2. Lepené lamelové dřevo	20
2.2.2.1. Výroba.....	20
2.2.2.2. Požadavky na užitné vlastnosti a výrobní požadavky.....	21
2.2.2.3. Třídy pevnosti	21
3. Trvanlivost lepených dřevěných spojů	21
3.1. Smyková pevnost lepené spáry.....	22
3.1.1. ČSN EN 302 – 1 - Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce – Metody zkoušení – Část 1: Stanovení podélné smykové pevnosti.....	22
3.1.2. ČSN EN 392 – Lepené lamelové dřevo – Smyková zkouška lepených spojů...	22

3.1.3.	Standardní testovací předpis pro stanovení pevnostních vlastností lepených spojů při zatížení smykem dle ASTM D 905-08e1	23
3.2.	Delaminace lepené spáry	24
3.2.1.	Standardní specifikace pro lepidla na lepené dřevěné prvky používané ve venkovních podmínkách dle ASTM D 2559	24
3.2.2.	Standardní testovací předpis pro několikanásobné zrychlené stárnutí (varem) pro lepidla na dřevo vystavené vnějším vlhkým podmínkám dle ASTM D 3434.....	24
3.2.3.	EN 302-2 - Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce – Metody zkoušení – Část 2.: Stanovení odolnosti proti delaminaci.....	25
3.2.4.	ČSN EN 391 - Lepené lamelové dřevo – Zkouška delaminace lepených spojů	26
3.3.	Podrobný popis vybraných trvanlivostních testů s ohledem na další postup experimentálních prací	26
3.3.1.	ČSN EN 391 - Lepené lamelové dřevo – Zkouška delaminace lepených spojů	26
3.3.1.1.	Podstata zkoušky.....	26
3.3.1.2.	Zkušební zařízení	26
3.3.1.3.	Příprava zkušebních těles.....	27
3.3.1.4.	Zkušební postup	27
3.3.1.5.	Výsledky	28
3.3.2.	ČSN EN 302 – 1 - Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce – Metody zkoušení – Část 1: Stanovení podélné smykové pevnosti.....	28
3.3.2.1.	Podstata zkoušky.....	28
3.3.2.2.	Zkušební zařízení	29
3.3.2.3.	Příprava zkušebních těles.....	29
3.3.2.4.	Postup zkoušky	30
3.3.2.5.	Vyjádření výsledků	30
3.3.3.	EN 302-2 - Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce – Metody zkoušení – Část 2.: Stanovení odolnosti proti delaminaci.....	30
3.3.3.1.	Podstata zkoušky.....	30
3.3.3.2.	Příprava zkušebních těles.....	31
3.3.3.3.	Zkušební postupy	31

3.3.3.4.	Měření a vyhodnocení delaminace	32
3.3.3.5.	Vyjádření výsledků	33
4.	CÍL.....	34
5.	REŠERŠE DANÉ PROBLEMATIKY	35
5.1.	Lepené spoje epoxidovým lepidlem s použitím melamin-močovino- formaldehydového primeru při vlhkostním zatížení	35
5.1.1.	Mechanismus selhávání epoxidových lepidel	35
5.1.2.	Typy použitých primerů	36
5.1.2.1.	HMR	36
5.1.2.2.	MUF	36
5.1.2.3.	MF	36
5.1.2.4.	MME	36
5.1.3.	Příprava vzorků	36
5.1.3.1.	MF	36
5.1.3.2.	MUF, MME	36
5.1.4.	Aplikace lepidel a sestavení vzorků	37
5.1.5.	Výsledky a diskuze.....	37
5.1.5.1.	Experiment 1 - MF.....	37
5.1.5.2.	Experiment 2 - MUF.....	38
5.1.5.3.	Experiment 3 – MUF a MME.....	40
5.1.6.	Dílčí shrnutí.....	41
5.2.	Lepené spoje pomocí jednosložkových, vlhkostí vytvrzujících polyuretanových lepidel.....	41
5.2.1.	Dlouhodobé chování	41
5.2.1.1.	Krátkodobé studie	41
5.2.1.2.	Dlouhodobé studie	41
5.2.2.	Experiment – experiment in situ	42

5.2.2.1.	Příčné tahové zkoušky	42
5.2.2.2.	Odolnost v ohybu	42
5.2.2.3.	Pevnost v ohybu	43
5.2.2.4.	Delaminace	44
5.2.2.5.	Vliv teploty	45
5.2.2.6.	Reakce na vlhkost	45
5.2.1.	Dílčí shrnutí.....	46
6.	Vlastní experiment	47
6.1.	Materiál.....	47
6.2.	Zkoušky trvanlivosti	48
6.3.	Výsledky zkoušek.....	48
6.3.1.	Smyková pevnost	48
6.3.2.	Poškození dřeva.....	51
6.4.	Dílčí shrnutí	52
7.	Závěr.....	53
8.	Literatura	54
9.	Seznam norem.....	54
10.	Seznam použitých zkratk	55

1. Vlastnosti dřeva

Dřevo je organická látka, která vzniká v kmenech, kořenech a větvích stromů a keřů v horizontu 80-100 let. Z chemického hlediska se jedná o spojení tří látkových skupin, tzn. celulózy, hemicelulózy (tedy polysacharidů) a ligninu.

Jedná se o druh pletiva cévnatých rostlin, který je tvořen cévami, cévicemi a vodivým parenchymem a jeho účelem je rozvod živin od kořenů směrem nahoru. Má funkci mechanickou, transportní a zásobní. [1]

1.1. *Struktura dřeva*

1.1.1. Makrostruktura dřeva

Makroskopické znaky dřeva jsou pozorovatelné pouhým okem. Dřevo má charakteristické morfologické znaky textury a to barvu, tvar a výskyt těchto jednotlivých znaků.

Dřeň je světlé, řídké pletivo, u starších stromů odumřelé, nachází se ve středu kmene. Je označováno jako základní pletivo podílející se v prvním roce života stromu na vedení vody.

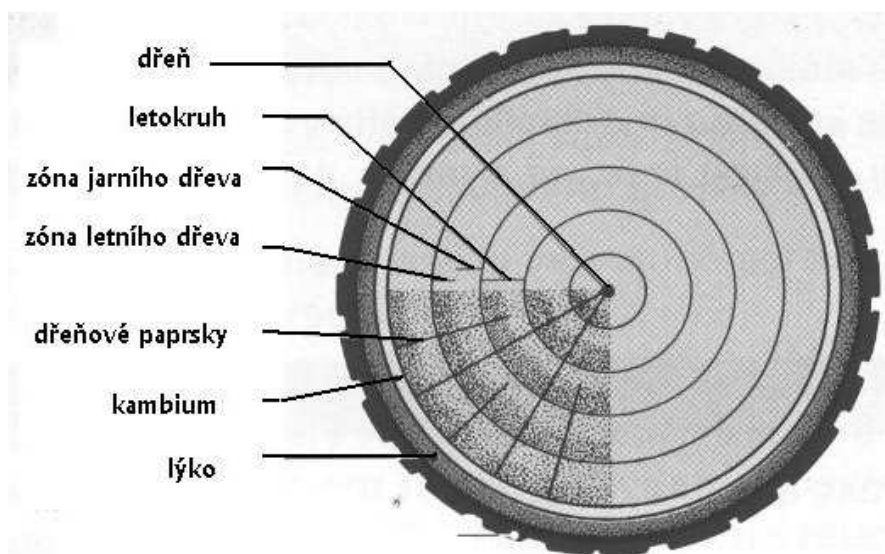
Kůra je soubor povrchových vrstev kmene obklopujících středové části (kambium, dřevo, dřeň). Vzniká činností dvou sekundárních dělivých pletiv felogenu a kambia. Vnější vrstva (vlastní kůra) vzniká činností felogenu, který produkuje odstředivě povrchovou korkovou část kůry a dostředivě zelenou kůru. Tato vrstva kůry chrání vnitřní pletiva kůry (lýko) a především kambium proti mechanickému poškození a nepříznivým vlivům biotických a abiotických činitelů. Vnitřní vrstva kůry - lýko, vzniká činností kambia. Lýkem jsou vedeny asimiláty vytvořené fotosyntézou v listech.

Kambium je dělivé (meristematické) pletivo nacházející se mezi lýkem a dřevem. Tvoří úzkou, okem nerozlišitelnou vrstvu složenou z živých buněk schopných dělení během celého života stromu.

Dřeňové paprsky jsou produktem kambia. Tvoří různě velká seskupení parenchymatických buněk orientovaných na podélnou osu kmene kolmo. Na příčném řezu se jeví jako pásy probíhající od obvodu do středu kmene kolmo na letokruhy. Významně ovlivňují vlastnosti dřeva zvláště štípatelnost

Letokruhy jsou roční přírůstky dřeva. Na příčném řezu tvoří soustředěné vrstvy navazující jedna na druhou a obklopující dřeň. Jsou výsledkem přerušovaného tloušťkového růstu stromů v důsledku vegetačního klidu dřevin mírného pásma. Každý letokruh se skládá z jarního dřeva, vytvořeného na začátku vegetačního období, a z letního dřeva vytvořeného v průběhu vegetačního období. Jarní dřevo bývá světlejší, letní tmavší.

Dřevo je centrální část kmenů dřevin mezi dření a kambiem. Na příčném řezu kmenem se z makroskopického hlediska rozlišují: letokruhy, jarní a letní dřevo v rámci letokruhu, jádro, běl, vyzrálé dřevo, cévy, dřeňové paprsky, pryskyřičné kanálky a suky. [2]



Obr. č. 1: Pohled na strukturu dřeva. Vnitřní vrstva kůry – lýko, vnější vrstva kůry – periderm. [5]

1.1.2. Mikrostruktura dřeva

Pletivo rostlin je soubor buněk přibližně stejné funkce a stejného tvaru. Pletiva pravá vznikají dělením jedné buňky, pletiva nepravá seskupením samostatných buněk a pak srůstem jejich blan a pletiva smíšená druhotným srůstem pletiv nepravých.

Podle tvaru buněk dělíme pletiva na parenchym z tenkostěnných buněk ve všech směrech přibližně stejných rozměrů, prozenchym z buněk tenkoblanných, v jednom směru protáhlých, kolenchym z buněk ve všech směrech skoro stejných rozměrů, bez mezibuněčných prostor, se stěnami ztloustlými na rozích a sklerenchym tvořený buňkami s blanami stejnoměrně ztloustlými.

Různé druhy pletiv se sdružují v soustavy pletiv, mající často jednu společnou funkci. Jedná se o soustavu pletiv dělivých (meristemických, embryonálních), umožňujících růst, s buňkami parenchymatického tvaru. Soustavu pletiv krycích, vodivých, základních, z buněk definitivního tvaru tj. pletiva trvalá (definitivní). [1]

Cévní svazky jsou specializovaná vodivá pletiva vyšších rostlin, jejichž funkcí je rozvádět vodu a vodní roztoky anorganických a organických sloučenin. Vodivá pletiva v cévním svazku jsou uspořádána tak, že transportu látek kladou co nejmenší odpor. Buňky jsou ve směru proudění protáhlé s co nejmenším počtem příčných buněčných stěn, bez intercelulár, s tenkými buněčnými stěnami opatřenými ztenčeninami nebo otvůrkami .

Pro dvojí funkci cévních svazků se vytvořil i dvojí typ vodivých buněk. Anorganické roztoky proudí mrtvými buňkami, cévami (tracheje) a cévicemi (tracheidy). Organické asimiláty jsou vedeny živými, velmi prodlouženými buňkami, sítkovicemi. Část svazků cévních, která obsahuje cévy, se nazývá část dřevní (xylém), část svazků obsahující sítkovice se nazývá částí lýkovou (floém). [2]

Růst stromu začíná v našich zeměpisných šířkách na jaře a trvá až do pozdního podzimu. Rozlišujeme růst podélný (primární) - začíná vyrašením koncových pupenů kmene, větví a větévek. V pupenech se nachází růstové orgány, ve kterých se buňky nepřetržitě dělí a

přítom se protahují. Růst do šíře (sekundární růst) - dochází k němu v mízním, vodivém (kambiálním) pletivu, kde se během období růstu tvoří tři druhy buněk: buňky schopné dělení (mají trvale meristemický charakter), centripetálně buňky dřeva a centrifugálně buňky lýka. [3]

1.1.2.1. Mikrostruktura jehličnanů

Jehličnaté dřevo je vývojově starší než listnáčové a má jednodušší anatomickou stavbu. Převládajícím elementem anatomické stavby jsou tracheidy-cévice, které zabírají 87 až 95% celkového objemu dřeva. Tracheidy plní vodivou i mechanickou funkci. Úlohou parenchymatických buněk dřevných paprsků (5 až 13%) je rozvádět organické zásobní látky. Některé jehličnaté dřeviny obsahují i malé zastoupení dřevného (axiálního) parenchymu (do 1%), epitelialní buňky v živičných kanálcích a příčné tracheidy po obvodu dřevného paprsku.

Tracheidy mají funkci vodivou a mechanickou. Jarní tracheidy se tvoří v první polovině vegetačního období. Jsou tenkostěnné se širokými lumeny, mají funkci vodivou. Letní tracheidy vytvořené v druhé polovině vegetačního období, jsou tlustostěnné s užšími lumeny, mají funkci především mechanickou.

Parenchymatické buňky mají velmi protáhlý, obdélníkový tvar. Buněčné stěny jsou zdřevnatělé. Slouží k ukládání a vedení zásobních látek. Podílejí se na stavbě dřevných paprsků a pryskyřičných kanálků.

Dřevné paprsky tvoří 5-10 % z celkového objemu všech elementů dřeva. Tvoří je pravidelné pásy parenchymatických buněk orientovaných ve směru kolmém na letokruhy. Slouží k vedení vody s rozpuštěnými minerálními látkami i asimilátů. Ukládají také zásobní látky, které v případě potřeby vydávají.

Pryskyřičné kanálky jsou dlouhé mezibuněčné prostory vyplněné pryskyřicí. Vznikly rozestoupením parenchymatických buněk. Jsou dvojího typu: vertikální a horizontální.

Dřeň má u jehličnanů kruhový tvar. Tvoří ji velké parenchymatické buňky, které mají na příčném řezu tvar mnohoúhelníku s tenkými buněčnými stěnami. [2]

1.1.2.2. Mikrostruktura listnatých dřevin

Dřevo listnatých dřevin má složitější stavbu různých druhů buněk, které jsou blíže specializované a více přizpůsobené svojí funkci než ve dřevě jehličnatých dřevin.

Tracheje se vyskytují jen u listnáčů. Tvoří ve dřevě uzavřenou síť vodivých drah. Jsou tvořeny mrtvými soubory nad sebou uložených buněk tzv. tracheálních článků. Příčné buněčné stěny článků se v průběhu ontogeneze rozrušily nebo úplně rozpustily. Zbytky stěn se nazývají perforace a jsou charakteristické pro jednotlivé dřeviny. Zaplnění cév silnostěnnými thylami zvyšuje tvrdost dřeva. Tenkostěnné thyly jsou živé a mají funkci zásobní.

Tracheidy tvoří u listnáčů přechodné typy s funkcí vodivou, mechanickou, někdy i zásobní.

Librifonní vlákna tvoří až 75 % celkového objemu dřeva. Jsou to převážně mrtvé buňky, jejichž vývoj směřoval ke zvýšení mechanické pevnosti a ztrátě vodivé funkce. Jsou

axiálně uložené, na příčném řezu 4-6ti úhelníkového tvaru.

Parenchymatické buňky jsou ve dřevě listnáčů více zastoupeny než ve dřevě jehličnanů (od 2 do 15 - 20% celkového objemu dřeva). Buňky jsou tvarově rozmanité s lignifikovanými buněčnými stěnami, jsou to buňky živé. Mají vodivou a zásobní funkci. Jsou uloženy jak ve směru podélné osy (axiální parenchym), tak ve směru kolmém na osu (radiální parenchym). Radiálně orientované parenchymatické buňky tvoří **dřeňové paprsky**.

Dřeňové paprsky jsou tvořeny živými parenchymatickými buňkami. Slouží k vedení ve směru kolmém na osu a k ukládání zásobních látek, především škrobu.

Dřeň je uložena v centrální části kmene. U některých dřevin zůstává poměrně dlouho živá. Parenchymatické buňky jsou izodiametrické, s relativně tlustými buněčnými stěnami. Mají schopnost hromadit zásobní látky. U jiných dřevin velmi záhy odumírá, stěny parenchymatických buněk jsou tenké, zaokrouhlují se. Zůstávají mezi nimi velké interceluláry, lumeny mají vyplněny vzduchem. [2]

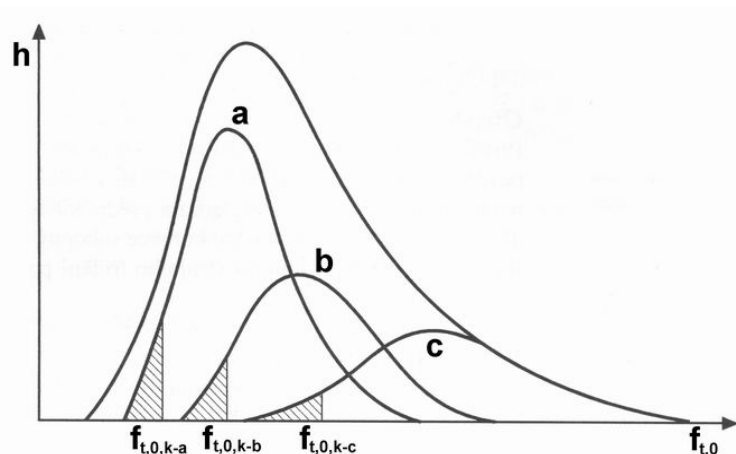
1.2. Anizotropie

Anizotropie dřeva je rozdíl fyzikálních a mechanických vlastností dřeva v jednotlivých směrech (podélném, radiálním a tangenciálním). Je dána stavbou dřeva v jeho makro a mikrostruktuře. Mezi hlavní mikroskopické znaky, které způsobují anizotropii v mikrostruktuře dřeva, patří průběh vláken celulózy, který je orientován podél osy buňky, tj. ve směru osy kmene stromu, ztenčeniny umístěné převážně na radiálních stěnách, jarní a letní dřevo v letokruhu, které má různé hodnoty vlastností a dřeňové paprsky, jež se v radiálním směru málo deformují (parenchym-sklon fibril).

2. Normativní určování pevnosti dřevin

Přírodní surovina dřevo je produkována stromy s velkou mnohotvárností podle jejich druhu, dědičných dispozic, růstových podmínek a prostředí. Vlastnosti dřeva jsou proměnlivé strom od stromu, ale i uvnitř jednoho kmene, po průřezu kmene i v podélném směru kmene. Mechanické vlastnosti dřeva, zejména při malých rozměrech průřezu, proto zčásti vykazují větší rozptyl, než odpovídající vlastnosti nezpracovaných nebo málo opracovaných výřezů. Mechanické vlastnosti netříděného řeziva určité dřeviny mohou mít tak velký rozptyl, že pevnost nejpevnějšího prvku řeziva může být desetinásobkem pevnosti nejslabšího prvku [4].

Protože pro použití konstrukčního dřeva je vždy rozhodující jeho charakteristická pevnost, tj. 5% kvantil základního souboru, při použití netříděného dřeva se nemůže vysoká pevnost většiny prvků řeziva využít. Z toho vyplývá, že z hlediska hospodárnosti je nutné dřevo rozdělit vhodným způsobem, tj. výběrem jednotlivých kusů do tříd rozdílné jakosti. Pevnost jednotlivého konstrukčního prvku není známa, ale může se pouze odhadovat prostřednictvím vizuálně patrných, nebo nedestruktivně měřitelných vlastností dřeva. Rozptyl pevnosti uvnitř jedné jakostní třídy není proto možné libovolně úzce redukovat. Proto se tyto jakostní třídy více nebo méně výrazně překrývají v závislosti na jakosti třídění a to tím více, čím méně účinný je postup třídění. Z toho je zřejmé, že třídění má značný význam pro hospodárné používání dřeva.



Obr. č. 2.: Pevnost v tahu konstrukčního řeziva. Schéma zatřídění dřeva do 3 jakostních tříd (a), (b), (c). Podle Diebold a Glos (1994). [4]

Dřevo se tradičně třídí jeho vizuálním posuzováním. Jakost dřeva se přitom určuje prostřednictvím vizuálně poznatelných charakteristik dřeva, především suků a šířky letokruhů. Z praktických důvodů se mohou uvážit pouze vizuálně poznatelné vlastnosti dřeva a stanovit jednoduché kombinační pravidla. Významné vlivy určující pevnost, jako je například hustota dřeva, mohou být vizuálně vystiženy pouze nedostatečně, například pomocí šířky letokruhů.

Vizuální třídění je proto zásadně zatíženo jistou nepřesností. Tím je omezena hospodárnost třídění, a protože zatřídění závisí na pozornosti a osobním rozhodnutí třídiče, je také pouze omezeně objektivní.

U třídění dřeva se musí všeobecně rozlišovat mezi tzv.:

- a) vzhledovým tříděním,
- b) tříděním podle pevnosti.

Při vzhledovém třídění se dřevo posuzuje podle jeho optického vzhledu, tj. podle estetických kritérií. To je vždy významné v případech, kdy se dřevo pohledově uplatní, například jako obklad stěn nebo stropů, nebo jako konstrukční dřevo, zůstane-li konstrukce pohledově viditelná. Při třídění podle pevnosti se dřevo naproti tomu posuzuje pouze podle kritérií, které mají význam pro jeho nosnou způsobilost. Tzn., že konstrukční dřevo pro náročné a pohledově působící prvky se musí třídit podle obou kritérií. [4]

2.1. Všeobecné požadavky na třídění dřeva podle pevnosti

Pevnostním tříděním se má zajistit, že všechny vlastnosti významné pro použití dřeva na nosné účely budou spolehlivě dodrženy. Pro každou třídu jsou stanoveny mezní hodnoty pro charakteristiky dřeva, které jsou v dostatečné korelaci s pevností a tuhostí dřeva. Při běžném vizuálním třídění jsou to především šířka letokruhů jako měřítko struktury dřeva ve vztahu k pevnosti a také pevnost snižující charakteristiky dřeva, jako například *suky, odklon vláken, trhliny, reakční dřevo, napadení hnilobou a hmyzem a mechanické poškození*. U strojního třídění mohou být přibrány i jiné, vizuálně neměřitelné vlastnosti, jako například *modul pružnosti v ohybu*, pomocí nichž lze odhadovat pevnostní a tuhostní vlastnosti mnohem

lépe. Je nutné stanovit také mezní hodnoty pro geometrické vlastnosti (oblíny, zakřivení), protože tyto vlastnosti mají také vliv na konstrukční použití dřeva [4].

Protože rozměry dřeva, plošné a šroubové zakřivení i trhliny závisí na vlhkosti dřeva, musí být mezní hodnoty vztaženy k referenční vlhkosti 20%. Vlhkost dřeva se musí kromě toho uvážit i při strojním třídění., měří-li se parametry dřeva závislé na vlhkosti.

Tříděné dřevo musí být označeno. Označení musí obsahovat nejméně tyto údaje: jakostní třídy, dřevinu a kombinaci dřevin, výrobce a normu, podle které se třídilo.

2.1.1. Vizualní třídění podle pevnosti

V současné době existuje velký počet pravidel pro vizualní třídění řeziva podle pevnosti. Největší rozdíly v postupech můžeme sledovat především pro vyjádření a výpočet sukovosti. Toto třídění je prováděno podle ČSN EN 518.

Suky se mohou u řeziva projevovat podle jeho rozměrů a způsobu pořezu v rozmanitých tvarech, které lze vizualně jen obtížně vyjádřit a klasifikovat. Příčinou redukce pevnosti není samotný suk, ale jím způsobený výrazný odklon vláken v okolním dřevě. Z toho vyplývá, že porušení dřeva nevychází ze samotného suku, ale z extrémního lokálního odklonu vláken. Protože struktura dřeva může být narušena zvláště výrazně suky, které jsou blízko sebe, parametr sukovosti se běžně stanovuje nejenom se zřetelem k největšímu suku, ale také na základě součtu suků, které se vyskytují v určité oblasti. Suky na okrajích a v tažené oblasti dřeva se projevují nepříznivěji než suky uvnitř průřezu nebo v oblastech tlačných. Proto je nutno přihlížet k samotné poloze suku v průřezu. [4]

ČSN EN 518 shrnuje pouze minimální požadavky, které musí být dodržovány při pevnostním třídění jehličnatého a listnatého dřeva a dovoluje použití všech národních norem, které tyto požadavky splňují. Podle této normy musí při třídění postihnout a uvážit nejméně tyto vlastnosti:

- mezní hodnoty pro vlastnosti snižující pevnost: suky, odklon vláken, dřeh, hustotu nebo šířku letokruhů, trhliny,
- mezní hodnoty pro geometrické vlastnosti: oblíny, plošné a šroubové zakřivení;
- mezní hodnoty pro biotické vlastnosti: napadení hnilobou a hmyzem;
- ostatní vlastnosti: reakční dřevo, mechanické poškození.

Vizualní třídění podle pevnosti zahrnuje tyto výhody a nevýhody:

- je jednoduché, snadno osvojitelné a nemá velké technické nároky;
- nevyžaduje nákladné zařízení;
- při důkladném provádění je spolehlivým postupem třídění;
- je náročné na mzdy, ale málo účinné, protože není dostatečně uvážena struktura dřeva, například hustota, která má značný vliv na pevnost;
- není objektivní, čímž je dodatečně ovlivněna jeho účinnost.

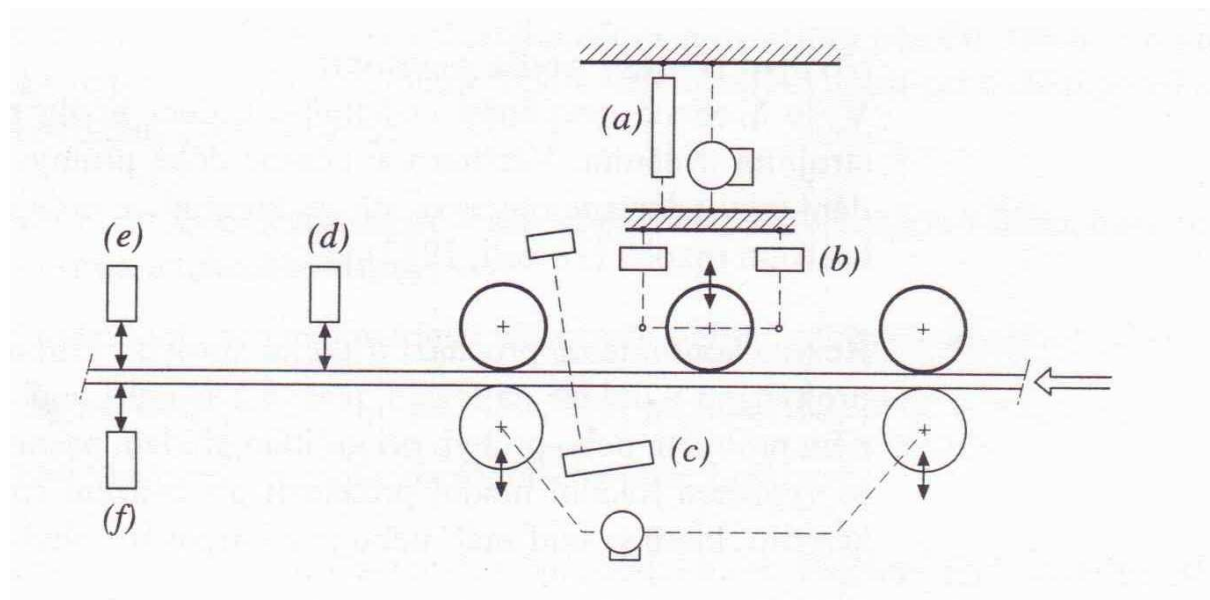
2.1.2. Strojní třídění podle pevnosti

Většina strojů na třídění, které se dnes používají, jsou takzvané ohybové stroje, kterými se zjišťuje průměrný modul pružnosti na krátkém rozpětí. Strojní třídění by mělo eliminovat nevýhody vizuálního třídění. Toto třídění je prováděno podle ČSN EN 519.

Řezivo kontinuálně prochází třídícím strojem. Přitom je při rozpětí 0,5-1,2 m prohýbáno v poloze na ležato, přičemž se měří buď zpětná síla při předem stanoveném průhybu, nebo průhyb při určitém zatížení. Z těchto hodnot je vypočten lokální modul pružnosti při uvážení rozměrů dřevěného prvku a jeho křivosti, která se buď měří, nebo je eliminována ohybem v obou směrech.

Například kombinace modulu pružnosti a sukovosti vykazuje vyšší korelaci s pevností než samotný modul pružnosti. Přidáním hustoty jako dalšího parametru třídění může být účinnost třídění dále zvýšena, protože potom je možné vytvořit vysokojakostní třídy s vyšší charakteristickou hustotou. Suky mohou být zjišťovány například skenováním, tj. snímáním povrchu dřeva videokamerami nebo prozářením. Při prozáření lze snadno vyhledat suky, protože mají asi 2,5×vyšší hustotu než okolní dřevo, a to znamená, že absorbují mnohem víc záření a mají tedy jiné zbarvení.

Podstatný rozdíl mezi vizuálním a strojním tříděním je ten, že správnost vizuálního třídění lze kdykoli vizuálně opět zkontrolovat i v konstrukci. Naproti tomu kontrola strojně tříděného dřeva není jednoduchým vizuálním způsobem možná. Z tohoto důvodu se musí spolehlivost strojního třídění podle pevnosti průběžně kontrolovat a ověřovat rozsáhlými kontrolami. K tomu byly v různých částech světa vyvinuty dva rozdílné postupy, které jsou označovány jako kontrola vztažená na produkci a kontrola vztažená na stroj. [4]



Obr. č. 3.: Schéma evropského stroje na třídění se snímači pro určení průhybu (a), zpětné síly (b), absorpce záření (c), zakřivení (d), tloušťky dřeva (e), a vlhkosti dřeva. [4]

2.2. Třídy pevnosti

2.2.1. Rostlé dřevo

Jednotlivé třídy pevnosti jsou stanoveny v EN 338. V této normě je přesně vysvětleno, jak se konstrukční dřevo určité dřeviny a jakost zařazuje do těchto tříd. Na základě toho je popsáno, jak se mohou určovat charakteristické hodnoty pro navrhování pro jednotlivé sortimenty dřeva.

Pro rostlé dřevo platí tyto požadavky:

- Musí se třídit vizuálně nebo strojně podle pevnosti;
- Vizuální třídění dle EN 518;
- Strojní třídění dle EN 519;
- Charakteristické hodnoty pevnosti, tuhosti a hustoty dle EN 384.

Pro dřevěné konstrukce se tedy může v zásadě použít dřevo libovolného původu, pokud bylo tříděno podle pevnosti podle pravidel EN 518 nebo EN 519, jeho charakteristické hodnoty pevnosti, tuhosti a hustoty byly určeny podle EN 384 a je to doloženo příslušným ověřením shody.

Systém tříd pevnosti stanovený v EN 338 je vytvořen z devíti tříd pro jehličnaté a topolové dřevo a šesti tříd pro listnaté dřevo. Tento systém zahrnuje od nejnižší třídy jehličnatého dřeva C14 do nejvyšší třídy jehličnatého dřeva C40 a od nejnižší třídy listnatého dřeva D30 do nejvyšší třídy listnatého dřeva D70 všechny jakostní třídy. Topolové dřevo vykazuje poměr hustoty a pevnosti, který odpovídá spíše jehličnatému dřevu. Proto bylo zařazeno k třídám pevnosti jehličnatého dřeva. Listnaté dřeviny se odlišují od jehličnatých druhů dřeva jejich anatomickou stavbou. Obvykle mají větší hustotu než jehličnaté druhy dřeva, ale nikoli tomu odpovídající vyšší hodnoty pevnosti a tuhosti.

EN 338 uvádí pro každou třídu pevnosti charakteristické hodnoty pevnosti, tuhosti a hustoty. Kromě toho tato norma stanovuje, jak se řezivo určité dřeviny, původu a jakostní třídy přiřazuje k těmto třídám pevnosti.

Sloučení tříd pevnosti s určitým vždy konstantním souborem hodnot pevnosti a tuhosti je možné, protože prakticky všechny komerčně používané jehličnaté a listnaté dřeviny vykazují nezávisle na jejich původu vzájemně podobný poměr hodnot tuhosti a pevnosti. Na základě existujících výsledků zkoušek bylo možné ukázat, že všechny důležité hodnoty charakteristické pevnosti a tuhosti mohou být s vyhovující přesností vypočteny na základě pevnosti v ohybu, modulu pružnosti v ohybu a hustoty. [4]

Podle EN 338 smí být řezivo určité dřeviny, původu a jakostní třídy zařazeno do určité třídy pevnosti, když:

- - příslušné dřevo bylo vizuálně nebo strojně tříděno podle EN 518 popř. EN 519;
- charakteristické hodnoty pevnosti, tuhosti a hustoty byly určeny podle EN 384;

- charakteristické hodnoty pevnosti v ohybu, modulu pružnosti E a hustoty tohoto základního souboru dřeva jsou stejné nebo větší jako odpovídající hodnoty příslušné jakostní třídy. [4]

2.2.2. Lepené lamelové dřevo

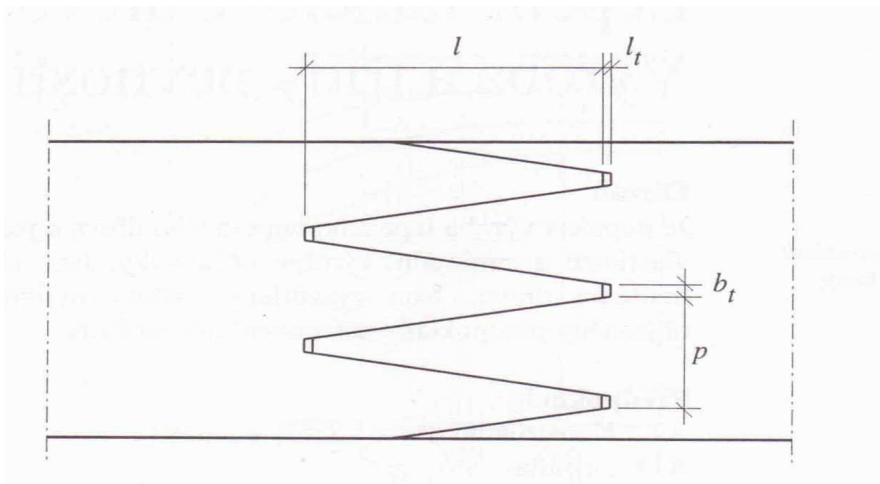
Lepené lamelové dřevo je vysokohodnotný inženýrský konstrukční materiál, který v řadě případů vytlačil tradiční používání rostlého dřeva. Příčinou toho je řada výhod proti rostlému dřevu, které je třeba vztahovat ke způsobu výroby lepeného lamelového dřeva s integrovanou kontrolou jakosti. Mezi největší výhody patří teoreticky neomezené *rozměrové možnosti*, široký rozsah výroby působivých *tvarů nosných prvků*, *vyšší pevnosti a tuhosti*, možnost *kombinace lepeného lamelového dřeva z více druhů lamel o různých pevnostech*. Pro únosnost lepeného lamelového dřeva má prvořadý význam třídění lamel podle pevnosti, jakost zubovitých spojů a také jakost lepených spojů. Strojní třídění dřeva na základě hustoty a modulu pružnosti je základním faktorem pro vysokohodnotné lepené lamelové dřevo. [4]

2.2.2.1. Výroba

Výroba lepeného lamelového dřeva se skládá z několika pracovních pochodů.

Příprava řeziva. Lepené lamelové dřevo pozůstává z řeziva. Řezivo přicházející ze skladu ve venkovním prostředí, se uměle vysouší. Důvodem toho je, že používaná lepidla vyžadují vlhkost dřeva nejvýše 15%. Po sušení se řezivo předběžně frézuje a třídí. Kontroluje se vlhkost dřeva, řezivo se kapuje a ukládá do hrání.

Nastavování zubovitým spojem. Přířezy se na čelních koncích vzájemně spojují zubovitým spojem a vytvářejí tak tzv. nekonečnou lamelu. Typický zubovitý profil s označením podle ČSN EN 385. Zubovitý profil se vyfrézuje v čele přířezu a nanese se lepidlo. Potom se přířezy slisují po dobu nejméně dvou sekund, takže jsou třením působícím mezi ozuby drženy pohromadě. Z výsledné nekonečné lamely se odřezávají lamely požadované délky a ukládají se do hrání. Doba tohoto meziskladování musí být zvolena tak, že je zaručeno vytvrzení lepidla, než se bude pokračovat s dalším zpracováním lamel.



Obr. č. 4.: Zubovitý profil (l = délka ozubu, p = rozteč šroubů, b_t = šířka tupého zakončení ozubů, l_t = vůle v zubovitém spoji). [4]

Lepení. Lamely se frézují a nanášejí se lepidlo. Lamely se uloží na stojato vedle sebe a zalisují se. Lisovací přípravky umožňují výrobu přímých a zakřivených nosníků. Po lisování se nosníky skladují až do konečné úpravy.

Konečná úprava. Nosníky se frézují z bočních stran pro odstranění zbytků lepidla a dosažení rovinných povrchů. Nakonec následuje konečná úprava nosníků. Konečná úprava zahrnuje všechna předběžná a přípravná opatření, která se nemusí provádět na staveništi.

Příprava lepidel. Nepřivádí-li se pryskyřice a tvrdidlo přímo ze skladovacích nádrží a nemíchají-li se automaticky při nanášení, musí být k dispozici samostatný prostor pro přípravu lepidla. Kromě toho musí být vytvořeny možnosti pro vhodné skladování pryskyřice a tvrdidla a prostor pro čištění zařízení na lepení. [4]

2.2.2.2. Požadavky na užitné vlastnosti a výrobní požadavky

Požadavky jsou předepsány v ČSN EN 386. Slouží k dosažení výroby spolehlivých trvanlivých spojů tak, aby jakost lepení byla zachována po uvažovanou dobu životnosti stavebního objektu.

2.2.2.3. Třídy pevnosti

Pevnosti lamelového dřeva jsou stanoveny do 5 tříd v EN 1194. Od nejnižší třídy GL20 do nejvyšší třídy GL 36. Jakosti lamel požadované pro splnění těchto vlastností mohou být určeny zpětným výpočtem pomocí výpočetních vztahů.

V případě homogenních lepených lamelových nosných prvků lze při navrhování postupovat běžným způsobem podle EC5.

V případě kombinovaného lepeného lamelového dřeva se však požaduje navrhování na základě teorie složených průřezů při uvážení rozdílných vlastností lamel (pevnosti a tuhosti). Ověření se přitom musí povést ve všech rozhodujících místech průřezu. [4]

3. Trvanlivost lepených dřevěných spojů

Trvanlivost lepených dřevěných spojů se obvykle provádí normovými postupy, které víceméně sestávají z expozice dřevěných lepených spojů vlhkostním změnám. Právě objemové změny dřeva vyvolané změnou vlhkosti vyvolávají napětí na lepenou spáru, které může vést k následné delaminaci spáry (ztrátě adhezních sil), případně k celkovému snížení pevnosti lepeného spoje (zkoušeno pomocí smykové zkoušky). Mezi základní normy určující typy cyklování lepených spojů patří následující normy, které posuzují kvalitu lepené spáry podle:

I. hodnoty smykové pevnosti

II. hodnoty delaminace lepené spáry.

3.1. Smyková pevnost lepené spáry

3.1.1. ČSN EN 302 – 1 - Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce – Metody zkoušení – Část 1: Stanovení podélné smykové pevnosti

Tato metoda je vhodná pro lepidla pro nosné dřevěné konstrukce. Není vhodná pro získávání konstrukčních dat a nelze ji použít ke stanovení vhodnosti lepidel pro výrobu dílců ze dřeva. Smyková pevnost slepů se stanoví vložением podélné tahové síly na jednoduchý přeplátovaný spoj s tenkou (asi 0,1 mm) a silnou vrstvou lepidla (1,0±0,1 mm). Zkušební vzorky by měly být délky (150±5) mm, tloušťky (10±0,2) mm a šířky (20±0,1) mm. Délka zkoušené plochy je (10±0,1) mm.

Zkušební cyklus se sestává z následujících etap:

- a) příprava zkušebních těles, tedy slepení desek, kondicionování ve standardním prostředí [20°C/65%] a následné nařezání na požadované rozměry zkušebních vzorků;
- b) exponování zkušebních vzorků v 5 různých prostředích daných normou (tabulka č. 3);
- c) umístění vzorků do zkušebního zařízení pro stanovení smykové pevnosti. Rychlost zatěžování je (2,0±0,5) kN/min nebo nesmí posuv čelistí přesahovat rychlost 5mm/min tak, aby doba potřebná k porušení byla mezi 30s a 90s;
- d) stanovení smykové pevnosti podle výpočetního vzorce v [N/mm²] a procenta porušení dřeva na smykové ploše.

3.1.2. ČSN EN 392 – Lepené lamelové dřevo – Smyková zkouška lepených spojů

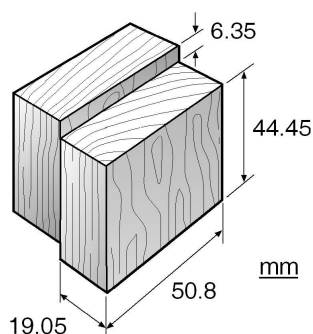
Tato norma stanovuje metodu zjišťování smykové pevnosti lepeného spoje rovnoběžně s vlákny a je určena pro průběžnou kontrolu jakosti lepených spojů. Podstatou zkoušky je namáhání lepeného spoje až do porušení. Zkušební těleso může být hranol šířky (40-50)mm a tloušťky (40-50)mm. Nebo válec s opracovanými rovinnými plochami délky (70-80)mm, průměru cca 35mm, rovinné straně cca 23cm a tloušťce cca 26mm.

Zkušební cyklus se sestává z následujících etap:

- a) kondicionování zkušebních těles ve standardním prostředí [20°C/65%] do ustálení vlhkosti vzorků v rozmezí 8% až 13%;
- b) změření vzorků a umístění do zkušebního zařízení;
- c) rychlost zatěžování taková, aby nedošlo k porušení dřív než za 20s;
- d) výpočet pevnosti smyku se zaokrouhlením na 2 desetinná místa v N/mm² a vizuální určení procenta porušení spoje.

3.1.3. Standardní testovací předpis pro stanovení pevnostních vlastností lepených spojů při zatížení smykem dle ASTM D 905-08e1

Jedná se o americký zkušební předpis ASTM D 905-08e1 - *Standard Test Method for Strength Properties of Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading*. Tento předpis zahrnuje stanovení srovnání smykových pevností lepidel používaných pro lepení spojů dřeva a podobných materiálů, při zkoušení standardních vzorků za určitých podmínek přípravy (zatížení v tlaku). Tato zkušební metoda je určena především jako hodnocení lepidel na dřevo. Je vhodná pro výzkum a vývoj lepených dřevěných výrobků. Na rozdíl od EN 302-1 stanovuje smykovou pevnost v kompresi, nikoli v napětí. Pevnost stanovuje na vzorku o ploše 1900mm^2 , což je plocha 10x větší než u vzorků zkoušených dle EN 302-1.



Obr. č. 5.: Zkušební vzorek pro ASTM D905.

3.2. Delaminace lepené spáry

3.2.1. Standardní specifikace pro lepidla na lepené dřevěné prvky používané ve venkovních podmínkách dle ASTM D 2559

Jedná se o americký zkušební předpis ASTM D 2559 - *Standard Specification for Adhesives for Bonded Structural Wood Products for Use Under Exterior Exposure Conditions*, který se zabývá zkoušením lepidel pro dřevěné nosné prvky, které se používají ve venkovním prostředí. Tato norma neobsahuje zvláštní testy popsané pro různé typy lepidel. Pro použití v této normě jsou lepidla určena pro nosné dřevěné prvky. Účelem zkoušek je zjištění procenta delaminací lepených spár po provedení třech zkušebních cyklů.

Zkušební cyklus se sestává z následujících etap:

- a) kondicionování vzorků v prostředí s teplotou 23 ± 2 °C a relativní vlhkostí vzduchu 50-70%, doporučená hodnota je 65%;
- b) ponoření do vody o teplotě 18-27°C při tlaku 25 Hg (odpovídá 85 kPa) po dobu 5 minut;
- c) vyvození tlaku 75 ± 2 psi (517 ± 14 kPa) po dobu 1 hod;
- d) celý postup se opakuje ještě jednou;
- e) vysušování při teplotě 150 ± 3.6 ° F ($65,5\pm 2$ °C) po dobu 21 až 22 hod;
- f) vizuální hodnocení míry delaminace dle předepsaného postupu v normě.

3.2.2. Standardní testovací předpis pro několikanásobné zrychlené stárnutí (varem) pro lepidla na dřevo vystavené vnějším vlhkým podmínkám dle ASTM D 3434

Jedná se rovněž o americký zkušební předpis ASTM D 3434 - *Standard Test Method for Multiple-Cycle Accelerated Aging Test (Automatic Boil Test) for Exterior Wet Use Wood Adhesives*, který se zabývá zkoušením lepidel, které jsou exponovány ve venkovních podmínkách. Je vhodná pro hodnocení lepidel a jednotlivé způsoby hodnocení. Tato norma se používá pro potenciální porovnání dlouhodobé životnosti, ne pro kontrolu kvality provedení. Jako vhodná zkušební metoda pro simulaci stárnutí a hodnocení dlouhodobé trvanlivosti se považuje vaření vzorků ve vodě s následným sušením. Standardně se provádí v rozsahu 800 cyklů. Zkouška nehodnotí všechny vlivy biologických účinků.

Zkušební cyklus se sestává z následujících etap:

- a) kondicionování vzorků v prostředí s teplotou 23 ± 2 °C a relativní vlhkostí vzduchu 50-70%, doporučená hodnota je 65%;
- b) ponoření vzorků do vody o teplotě 23 ± 2 °C na 3 dny;
- c) následné ponoření vzorků do vařící vody na 10 minut;

- d) sušení vzorků cirkulujícím vzduchem po dobu 4 minut proudícím rychlostí $1,74 \pm 0,29$ m/s, o teplotě 23 ± 2 °C;
- e) sušení vzorků cirkulujícím vzduchem po dobu 57 minut proudícím rychlostí $1,74 \pm 0,29$ m/s, o teplotě 107 ± 2 °C;
- f) opětovné ponoření vzorků do vařící vody na 10 minut;
- g) vzorky jsou zkoušeny v mokřém stavu po vytažení z vody o teplotě 23 ± 2 °C, ve vodě nesmí být uloženy déle než 3 dny;
- h) výsledek delaminace se určí v procentech selhání dřeva a je nutno napsat počet cyklů.

Tento postup může být proveden v počtu 20, 40, 100, 200, 400, 800 cyklů.

3.2.3. EN 302-2 - Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce – Metody zkoušení – Část 2.: Stanovení odolnosti proti delaminaci

Tato zkouška se používá pro získání výkonnostních charakteristik sloužících pro zatřídění lepidel pro nosné dřevěné konstrukce podle jejich vhodnosti k použití v daných klimatických podmínkách. Principem normy je zjištění míry delaminace a to dvěma způsoby. Pro lepidla typu I a II (nizkoteplovní a vysokoteplovní postup).

Je vhodná pro posouzení shody lepidel s EN 301, pro posouzení vhodnosti lepidel a jakosti lepidel pro nosné dřevěné konstrukce a pro porovnání vlivů zvolených podmínek lepení, rozdílných klimatických podmínek a manipulace se zkušebními tělesy před a po slepení na pevnost slepu.

Není vhodná ke zjišťování numerických konstrukčních hodnot a nepředstavuje chování lepených prvků a použití. Není určena pro posouzení vhodnosti lepidel pro výrobu dílců ze dřeva.

Zkušební cyklus se sestává z následujících etap:

- a) impregnace vzorků ve vodě o teplotě $10-25$ °C, absolutním tlaku 25 ± 5 kPa po dobu 15 minut;
- b) impregnace vzorků ve vodě o teplotě $10-25$ °C, absolutním tlaku 600 ± 25 kPa po dobu 1 hodiny;
- c) sušení vzorků cirkulujícím vzduchem po dobu 20 minut proudícím rychlostí $2,25 \pm 0,25$ m/s, o teplotě 65 ± 3 °C;
- d) celý cyklus se opakuje třikrát;
- e) hodnocení delaminace se provede do hodiny po ukončení zkoušky, hodnoty se měří v mm.

3.2.4. ČSN EN 391 - Lepené lamelové dřevo – Zkouška delaminace lepených spojů

Tato zkouška se provádí dle normy ČSN EN 391. Norma stanovuje tři postupy delaminace pro průběžnou kontrolu jakosti lepených dřevěných spojů lepeného lamelového dřeva. Důležitými pojmy jsou *délka delaminace*, která je součtem délek delaminovaných spár na obou čelních plochách každého zkušební tělesa a *lepené lamelové dřevo*, což je konstrukční prvek vytvořený slepením dřevěných lamel s převážně rovnoběžnými vlákny.

Zkušební cyklus se sestává z následující etapy:

- a) vložení těles do vody o teplotě 10 až 20 °C a vytvoření podtlaku 70 až 85 kPa po dobu 5 minut;
- b) zrušení vakua a vytvoření tlaku 500 až 600 kPa na dobu 4 hodiny;
- c) celý cyklus se na tělesa ponořená ve vodě opakuje;
- d) vysoušení probíhá po 21 až 22 hodin při teplotě vzduchu 60 až 70°C a relativní vlhkosti vzduchu 15%, rychlost cirkulace vzduchu je 2 až 3 m/s;
- e) výsledné hodnoty delaminace se vyjádří v procentech.

3.3. Podrobný popis vybraných trvanlivostních testů s ohledem na další postup experimentálních prací

3.3.1. ČSN EN 391 - Lepené lamelové dřevo – Zkouška delaminace lepených spojů

3.3.1.1. Podstata zkoušky

Zavedení vlhkostního spádu ve dřevě pro vyvození vnitřních napětí. Tím dochází k tahovým napětím kolmo k lepeným spojům, takže nedostatečná jakost lepení vede k delaminaci lepených spár.

3.3.1.2. Zkušební zařízení

Tlaková nádoba, která bezpečně odolává přetlaku nejméně 600 kPa a podtlaku nejméně 85 kPa, vybavená čerpadly nebo podobným zařízením, schopným vyvodit přetlak nejméně 600 kPa a podtlak nejméně 85 kPa. Sušárna s rychlostí cirkulace vzduchu 2 m/s až 3 m/s a s teplotou a relativní vlhkostí podle tabulky č. 1. Váhy umožňující stanovení hmotnosti s přesností 0,5 g. Kovový klín a dřevěné kladivo umožňující rozštěpení rozevřených lepených spár.

Tab. č. 1: *Klima v sušárně pro jednotlivé postupy.*

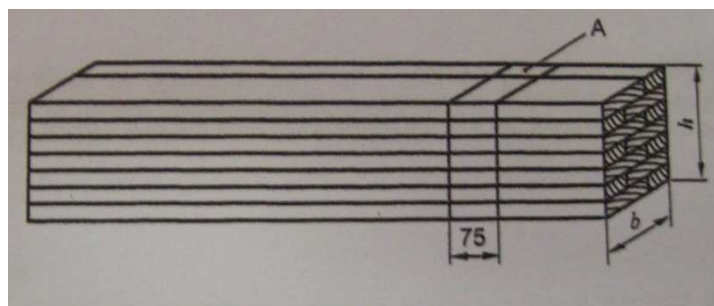
	Postup		
	A	B	C
Teplota °C	60 až 70	65 až 75	25 až 30
Relativní vlhkost %	< 15	8 až 10	25 až 35

3.3.1.3. Příprava zkušebních těles

Zkušební tělesa se musí připravit nebo odebrat takovým způsobem, aby byla reprezentativní pro výrobní proces.

Každé zkušební těleso musí být odebráno z plného průřezu zkoušeného lepeného lamelového prvku, odřezáním kolmo ke směru vláken dřeva. Čelní plochy zkušebního tělesa musí mít hladký povrch.

Je-li šířka průřezu b větší než 300 mm, lze zkušební těleso rozdělit na dvě nebo více zkušebních těles o šířce každého nejméně 130 mm. Je-li výška h větší než 600 mm, lze zkušební těleso rozdělit na dvě nebo více těles o výšce každého nejméně 300 mm, viz obr. č. 6.



Obr. č. 6.: *Zkušební těleso odřezané z lepeného lamelového prvku.*

3.3.1.4. Zkušební postup

Před vystavením zkušebních těles zkušebním cyklům se změří celková délka lepených spár, v milimetrech, na čelních plochách zkušebních těles.

Zkušební tělesa se podrobí příslušnému zkušebnímu cyklu, podle toho zda se jedná o postup A, B nebo C. Zkušební cykly jsou detailně popsány v normě. Počet zkušebních cyklů musí odpovídat uvedené tabulce č. 2.

Tabulka č. 2: Počet zkušebních cyklů pro jednotlivé zkušební postupy.

	Postup		
	A	B	C
Počet počátečních cyklů	2	1	1
Počet přidavných cyklů	1	1	0

Měření delaminace a hodnocení zkušebních těles se nesmí provádět později než 1 hodinu po konečném vysoušení. Celková delaminace lepených spár na obou čelních plochách zkušebních těles se měří v milimetrech.

Rozevření lepené spáry se považuje za skutečnou delaminaci v případech:

- porušení soudržnosti uvnitř vrstvy lepidla;
- porušení lepeného spoje přesně mezi vrstvou lepidla a dřevem. S vrstvou lepidla nesmí zůstat spojena žádná vlákna dřeva;
- porušení dřeva, které je v rozmezí první ze dvou buněčných vrstev sousedících s vrstvou lepidla, a jehož charakter není ovlivněn odklonem vláken anebo strukturou letokruhu. Je charakterizováno hebkým vzhledem vláken dřeva, která ohraničují rozhraní mezi povrchem dřeva a vrstvou lepidla.

Rozevření lepené spáry se nepovažuje za delaminaci v případech:

- porušení masivního dřeva, které se vyskytuje ve vzdálenosti větší než dvě buněčné vrstvy lepidla a jehož charakter je výrazně ovlivněn odklonem vláken a strukturou letokruhů;
- izolovaná rozevření spáry o délce menší než 2,5 mm a vzájemné vzdálenosti větší než 5 mm;
- v případě, že dojde k delaminaci vlivem skrytého soku.

3.3.1.5. Výsledky

Pro každé těleso se vypočítají procentuální hodnoty delaminace. Provádí-li se přidavný zkušební cyklus, vypočtou se výsledky před a po tomto přidavném cyklu.

3.3.2. ČSN EN 302 – 1 - Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce – Metody zkoušení – Část 1: Stanovení podélné smykové pevnosti

3.3.2.1. Podstata zkoušky

Smyková pevnost slepů se stanoví vložením podélné tahové síly na jednoduchý přeplátovaný spoj s tenkou a silnou vrstvou lepidla mezi dvěma pravoúhlými adherendy z bukového dřeva. Spoje jsou namáhány dokud nedojde k porušení.

3.3.2.2. Zkušební zařízení

Musí pracovat při:

- a) konstantní rychlosti zatěžování ($2,0 \pm 0,5$) kN/min; nebo
- b) konstantní rychlosti posuvu čelistí nepřesahující 5mm/min tak, aby doba potřebná k porušení byla mezi 30s a 90s.

Zkušební zařízení musí zajistit, aby tahové namáhání ve smyku neprobíhalo excentricky a aby nedocházelo během zatěžování k prokluzu.

3.3.2.3. Příprava zkušebních těles

Připraví se 2 desky ze silného nenapařeného, ohoblovaného, rovně rostlého bukového prkna s hustotou (700 ± 50) kg.m⁻³ při vlhkosti dřeva (12 ± 1) %. Všechny desky použité pro stejné cyklické namáhání musí být připraveny ze stejného prkna. Úhel mezi letokruhy a lepenými plochami musí být 30° až 90°.

Desky se řezou příčně ke směru vláken na délku nejméně 300 mm se zřetelem na prožez a podélně s vlákny na šířku nejméně 130 mm při zohlednění prožezu. Pro zkoušky slepu s tenkou vrstvou lepidla (0,1 mm) se použijí dvě desky o tloušťce ($5,0 \pm 0,1$) mm. Pro zkoušky slepu se silnější vrstvou lepidla ($1,0 \pm 0,1$) mm se použije jedna ($6,0 \pm 0,1$) mm silná deska a jedna ($5,0 \pm 0,1$) mm silná deska.

Pro *tenké vrstvy lepidla* se slepí dvě desky o tloušťce 5 mm a působením lisovacího tlaku se slepí na panel o tloušťce 10 mm.

Pro *silné vrstvy lepidla* se lepidlo vlije do vyfrézovaných drážek desky v takovém množství, aby při působení lisovacího tlaku bylo vytlačováno. Pro takové slepení se použije jedna vyfrézovaná deska a druhá nevyfrézovaná. Výsledný panel je tloušťky 11 mm.

Po slepení a vylisování se před hodnocením panelu kondicionují nejméně 7 dní ve standardním prostředí [$20^{\circ}\text{C}/65\%$ relativní vlhkost prostředí]. Zkušební tělesa se mohou řezat nejdříve 3 dny po slepení.

Počet těles musí být takový, aby se získalo minimálně 10 platných výsledků z každé expozice. Exponují se již rozřezaná zkušební tělesa. Ta musí být uložena vodorovně s volným přístupem k vodě ze všech stran a musí být podepřena tak, aby na ně nepůsobilo žádné napětí. Jednotlivé expozice jsou vyznačeny v následující tabulce.

Tabulka č. 3: *Typ a doba expozice před smykovou zkouškou.*

Označení	Expozice
A1	7 dní ve standardním prostředí.
A2	4 dny ponoření ve vodě při (20 ± 5) °C; zkouší se v mokřém stavu;
A3	4 dny ponoření ve vodě při (20 ± 5) °C; opětné kondicionování ve standardním prostředí [$20/65$] do dosažení původní hmotnosti; zkouší se v suchém stavu;
A4	6 hodin ponoření ve vařící vodě; 2 hodiny ponoření ve vodě při (20 ± 5) °C; zkouší se v mokřém stavu;

Označení	Expozice
A5	6 hodin ponoření ve vařící vodě; 2 hodiny ponoření ve vodě při (20±5) °C; opětné kondicionování ve standardním prostředí [20°/65%] do dosažení původní hmotnosti; zkouší se v suchém stavu;
	Standardní prostředí je definováno teplotou (20±2) °C a relativní vlhkostí vzduchu (65±5) %.

3.3.2.4. Postup zkoušky

Zkušební těleso se upevní symetricky do čelistí zkušebního zařízení tak, aby vzdálenost mezi čelistmi byla od 50 mm do 90 mm. Zkušební těleso se pevně uchytí, aby jeho podélná osa byla paralelní se směrem zatěžování. Působí se tahovou silou dokud se těleso neporuší.

Pro porovnávací zkoušky lepidel a zařazení lepidla do typu I nebo II podle EN 301 se zkouška provede buď:

a) s přírůstkem zatěžování (2,0±0,5) kN/min; nebo

b) s konstantní rychlostí posuvu čelisti nepřesahující 5mm/min tak, aby doba potřebná k porušení byla mezi 30 s a 90 s.

Zaznamená se zatížení při porušení. Pro každé zkušební těleso se vizuálně odhadne a zaznamená procentuální podíl porušení dřeva, s přesností na nejbližších 10%.

3.3.2.5. Vyjádření výsledků

Smyková pevnost každého zkušebního tělesa se vypočítá podle vzorce:

$$\text{Smyková pevnost} = \frac{\text{Zatížení při porušení [N]}}{200} \frac{[N]}{[\text{mm}^2]}$$

Jako výsledek zkoušky se uvádí průměr smykové pevnosti [N/mm²] vypočítaný z 10 platných zkoušek. Porušení dřeva se vyjádří jako průměr z 10 platných výsledků zkoušek.

3.3.3. EN 302-2 - Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce – Metody zkoušení – Část 2.: Stanovení odolnosti proti delaminaci

3.3.3.1. Podstata zkoušky

Slepená laminovaná tělesa se podrobí procesu impregnace-sušení. Tělesa se impregnují ponořením do vody, přičemž se střídá vysoký tlak a vakuum. Následně se rychle osuší v prostředí s nízkou vlhkostí vzduchem proudícím vysokou rychlostí. Hodnotí se rozsah delaminace ve vrstvě lepidla jako výsledek tohoto působení a porovná se s celkovou délkou vrstvy lepidla na každé čelní ploše.

3.3.3.2. Příprava zkušebních těles

Připraví se 4 laminované dílce ze smrkového dřeva, které se před lepením kondicionuje 7 dní ve standardním prostředí [20°/65%], přičemž se zajistí, aby obsah vlhkosti zůstával v rozmezí (12±1)%.

Každý laminovaný dílec se připraví z nejméně šesti lamel. Ty se ohoblují na požadované rozměry a musí být slepeny do 8 hodin po ohoblování. Po slepení a stlačení se sestava před zatížením a hodnocením kondicionuje 7 dní ve standardním prostředí.

Z každého laminovaného dílce se vyříznou 2 tělesa ke zkoušení, která budou opatřena hladkým řezem. Kolmo k povrchu sestavy se vyříznou pruhy o délce 75 mm od každého okraje.

Tabulka č. 4: Příprava slepených dílců.

Parametry	Dílce 1 a 2	Dílce 3 a 4
Nános lepidla (obě plochy)	Jak je doporučeno ^b	Jak je doporučeno ^b
Teplota vzduchu	(20±2) °C	(20±2) °C
Doba volného zasychání	≤ 5 min	≤ 5 min
Doba zasychání po slepení	Minimální ^b	Maximální ^b
Tlak (jehličnan) ^a	(0,6±0,1) N/mm ²	(0,6±0,1) N/mm ²
Doba lisování ^b	Jak je doporučeno ^b	Jak je doporučeno ^b

^a Pro dřevo z listnatých stromů je tlak doporučen výrobcem lepidla.

^b Jak je doporučeno výrobcem lepidla při teplotě vytvrzování (20±2) °C.

3.3.3.3. Zkušební postupy

Tělesa se zváží a jejich hmotnost se zaznamená s přesností na nejbližší gram. Potom se zkušební tělesa vloží do tlakové nádoby a zabrání se jejich plavání. Přidá se tolik vody o teplotě 10°C až 25°C, aby byla zcela ponořena pod vodou. Tělesa se pak od sebe oddělí na vzdálenost nejméně 5 mm pomocí silných samolepek, drátěných sítok nebo jiným způsobem tak, aby všechny jejich čelní plochy byly ve styku s vodou. Potom se postupuje buď vysokoteplotním postupem (pro lepidla typu I), nebo nízkoteplotním postupem (pro lepidla typu II). Každý postup má předepsáno hodnocení v souladu s požadavky na lepidla. U lepidel typu I je použití za zostřených podmínek, u lepidel typu II je použití za mírných podmínek.

Tabulka č. 5: Působení cyklů při zkoušce delaminace.

Působení	Parametry	Jednotky	Vysokoteplotní postup pro lepidla typu I	Nízkoteplotní postup pro lepidla typu II
Impregnace vodou	Teplota vody	°C	10 až 25	10 až 25
	Absolutní tlak	kPa	25±5	25±5
	Trvání	min	15	15
	Absolutní tlak	kPa	600±25	600±25
	Trvání	h	1	1
	Počet impregnačních cyklů	-	2	2
Sušení	Teplota vzduchu	°C	65±3	27,5±2,5
	Vlhkost vzduchu	%	12,5±2,5	30±5
	Rychlost proudění vzduchu	m/s	2,25±0,25	2,25±0,25
	Trvání	h	20	90
Počet cyklů	Počet úplných cyklů (cyklus se skládá ze dvou impregnačních vodou a jednoho procesu sušení)	-	3	2

3.3.3.4. Měření a vyhodnocení delaminace

Delaminace se musí změřit a zkušební tělesa se musí vyhodnotit do 1 h po konečném sušení. Celková delaminace a celková délka vrstev lepidla na obou čelních plochách se měří v milimetrech.

Za skutečnou delaminaci se považují tyto otvory ve vrstvě lepidla:

- kohezní trhlinka ve vrstvě lepidla;
- porušení vrstvy lepidla přesně mezi vrstvou lepidla a lamelou dřeva, která je k ní přilepena. S vrstvou lepidla nesmí zůstat spojena žádná vlákna dřeva;
- porušení dřeva vyskytující se v prvních buněčných vrstvách sousedících s vrstvou lepidla, ve kterých šíření lomu není ovlivněno úhlem vláken a strukturou letokruhů. Je charakterizováno jemným vzhledem vláken dřeva, která jsou na rozhraní mezi povrchem dřeva a vrstvou lepidla.

Za delaminaci se nepovažují tyto otvory ve vrstvě lepidla:

- porušení pevného dřeva, ve kterém je šíření lomu silně ovlivněno úhlem vláken a strukturou letokruhů;
- jednotlivé otvory ve vrstvě lepidla kratší než 2,5 mm a ve vzdálenosti větší než 5 mm od nejbližší delaminace;
- otvory ve vrstvě lepidla, které se vyskytují podél suků nebo míst se zvýšeným obsahem pryskyřice nacházejícím se v těsné blízkosti vrstvy lepidla, nebo otvory ve vrstvě lepidla způsobené zde skrytými sukami. Při podezření, že otvor ve vrstvě lepidla je způsoben přítomností soku, se musí vrstva lepidla otevřít klínem a kladivem a musí být ověřena přítomnost skrytého soku. Pokud je příčinou otvoru suk, nepovažuje se tento otvor za delaminaci;

- porušení v oblasti letního dřeva letokruhu v těsné blízkosti vrstvy lepidla a rovnoběžné s ní.

3.3.3.5. Vyjádření výsledků

Delaminace se vyjádří v procentech a vypočítá se pro každé zkušební těleso. Zaokrouhlí se na nejbližší 0,1 %. K výpočtu se použije následující vzorec.

$$D = \frac{l_1}{l_2} \cdot 100$$

kde: D je delaminace, v procentech;
l₁ celková délka delaminace na obou čelních plochách, v milimetrech;
l₂ celková délka vrstev lepidla na obou čelních plochách, v milimetrech.

4. CÍL

Cílem práce bylo provést **rešerši stávajících vědeckých článků** zabývajících se problematikou hodnocení trvanlivosti lepidel používaných pro lepení dřevěných prvků. V této oblasti je veden nový trend zkoumání zaměřený na interakci novodobých lepidel se dřevním adhirendem po dlouhodobém vystavení vnějším vlivům z toho důvodu, aby bylo možné tyto lepidla používat jako alternativu k tradičním lepidlům. Právě použití těchto novodobých lepidel splňuje požadavek na aplikaci lepidel bez obsahu formaldehydu. V rámci rešerší byl kladen důraz na výběr takových experimentů, které by sledovaly chování spojů lepidlo/dřevo v případě použití epoxidových lepidel a PUR lepidel, tj. lepidel, která se v této době stávají alternativou k tradičním PRF, MUF lepidlům. Rešerše vybraných článků poté napomůže zjistit stav poznání v otázce hodnocení trvanlivosti těchto alternativních lepidel, což vytvoří dobrý základ pro následující návrh navazujících experimentálních prací.

Druhým hlavním cílem práce bylo **navrhnout a provést experiment** zabývajících se hodnocením kvality epoxidového lepidla ke dřevu v případě aplikace vnější FRP tkaniny. Trvanlivost spoje FRP/dřevo hraje velmi důležitou roli, neboť v případě selhání tohoto spoje by byla významně snížena tuhost a únosnost zesilovaného dřevěného prvku. Zkoušení vzorků v experimentu bylo provedeno podle EN 302 a výsledky byly následně diskutovány.

Výsledkem mé bakalářské práce by tedy mělo být bližší poznání možnosti použití alternativních lepidel pro lepení dřevěných prvků používaných v konstrukcích a měl by vést k bližšímu pochopení chování komplexu FRP/dřevo s ohledem na hodnocení chování epoxidových lepidel.

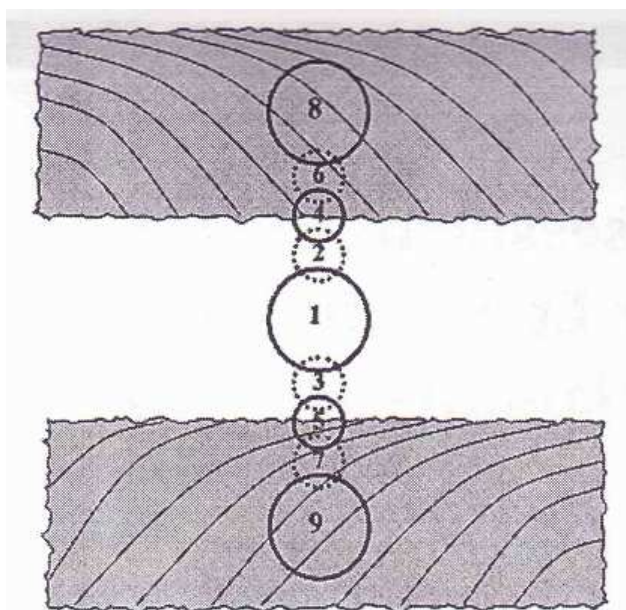
5. REŠERŠE DANÉ PROBLEMATIKY

5.1. *Lepené spoje epoxidovým lepidlem s použitím melamin-močovino-formaldehydového primeru při vlhkostním zatížení*

Omezená trvanlivost epoxidových lepidel na dřevo byla vždy problémem pro výrobce lepených dřevěných produktů, používaných ve venkovním prostředí. Přestože vyvinutá lepidla dosahovala vyšších pevností ve smyku než samotné dřevo, již po jednom vystavení lepeného spoje vodnímu uložení a následnému sušení došlo k jeho selhání. Největším problémem lepených spojů je soudržnost lepidla s povrchem dřeva při vlhkostním zatížení. Tato problematická soudržnost dřeva a lepidla je způsobena složitostí povrchu dřeva a je zde mnoho faktorů, které ji ovlivňují. [6]

5.1.1. Mechanismus selhávání epoxidových lepidel

U epoxidových lepidel dochází nejčastěji k selhání ve dřevě v oblasti 8 a 9 v suchých podmínkách a v lepidle v oblasti 2, 3 a 7 za mokrých podmínek dle obrázku č. 7. Důvodem proč dochází k porušení u epoxidů je jejich neschopnost odolávat napětí, které je způsobeno expanzí dřeva absorbujícího vodu (vlhkost). V dalších studiích bylo zjištěno, že acetylace snižuje nasákavost dřeva a tím dojde k zamezení porušení epoxidu v důsledku menších objemových změn dřeva.



Obr. č. 7.: Vazby v lepeném spoji. Uvedené oblasti jsou nejnáchylnější k porušení (deformaci).

U vzorků lepených epoxidovým lepidlem laboratoře FPL (*Forest Product Laboratory*) byla také zjištěna větší pevnost, jelikož se dřevo lépe obnovovalo po zatížení namáčením a sušením, protože v buněčné stěně docházelo k menšímu napětí. Tato větší stabilita byla zjištěna na základě modelu, popisujícím nezvyklou trvanlivost hydroxymetyl-resorcinových spojů (HMR).

5.1.2. Typy použitých primerů

5.1.2.1. HMR

Zkoumání výzkumníků z FPL ukázalo, že v případě použití HMR jako primeru na povrch dřeva před aplikací epoxidu došlo k dosažení nezvyklé trvanlivosti. Model ukázal, že hlavní spojení je s celulózu a hemicelulózy. Avšak nikdo nebyl schopen vysvětlit, proč musí být HMR použito v rozmezí 4 až 8 hod po zamíchání, pro zajištění největší účinnosti. HMR proto bylo vybráno pro bližší zkoumání, protože obsahuje podobné chemicky funkční skupiny, jako jsou celulóza, hemicelulóza a lignin obsažené ve dřevu.

5.1.2.2. MUF

Jedná se o melamin-močovino-formaldehyd, který se obvykle používá jako primární nátěr na povrch dřeva (primer). Tyto pryskyřice jsou známé svojí stabilitou vůči hydrolyze, čímž pomáhají lepeným spojům MUF zůstat vodě odolnými. MUF může být detekováno v buněčné stěně pomocí UV mikrospektroskopie. Melaminové pryskyřice mohou zlepšit mechanické vlastnosti dřeva na mikroskopické úrovni. Použití MUF jako primeru je především pro charakteristické účely.

5.1.2.3. MF

Jedná se o melamin-sacharózový formaldehyd, který je tvořen 55% kapalinou, a 3 % plastifikátorem.

5.1.2.4. MME

Hexamethylol-melamin-methyl-eter, který je tvořen z 30% kapalinou.

5.1.3. Příprava vzorků

5.1.3.1. MF

Použitá MF pryskyřice byla následně ředěna destilovanou vodou do 5 roztoků o různých koncentracích (25, 10, 7, 5 a 3 hm. %). Za katalyzátor byla použita 10% kyselina fenol sulfonová a do primeru byla přidána ještě před nanesením na dřevo. Primer byl nanesen v množství 0,15 kg/m² na lepenou plochu. Vzorky byly následně umístěny do klimatizované komory po dobu jednoho týdne.

5.1.3.2. MUF, MME

Použitá MUF pryskyřice byla ředěna destilovanou vodou do koncentrací 25, 10, 5, 3 a 2 hm. %. Stejně jako v případě MF, zde byl přidán 10% fenol sulfonan pro následné vytvrzení směsi.

Pryskyřice MME byla ředěna do roztoků o koncentracích 5, 3 a 2 hm. %. Byl přidán 10% p-toluen sulfonan. Následně byl primer zahřán nad teplotu 40°C po dobu 48 hodin a znovu zahřán nad teplotu 60°C opět po dobu 48 hodin.

5.1.4. Aplikace lepidel a sestavení vzorků

Primery byly naneseny v množství 0,15 kg/m² na lepenou plochu. Vzorky byly následně umístěny do klimatizované komory po dobu jednoho týdne.

Pro lepení vzorků po aplikaci primeru bylo použito epoxidové lepidlo FPL 1A. Jakmile je tvrdidlo přidáno, je zde minimální doba pro aplikaci na každý povrch (méně než jedna minuta). Celková doba je 15 až 20 minut, než je dávka epoxidu celkově vytvrzena. Po slepení byly bloky vystaveny tlaku 0,7 MPa po dobu 15 hodin.

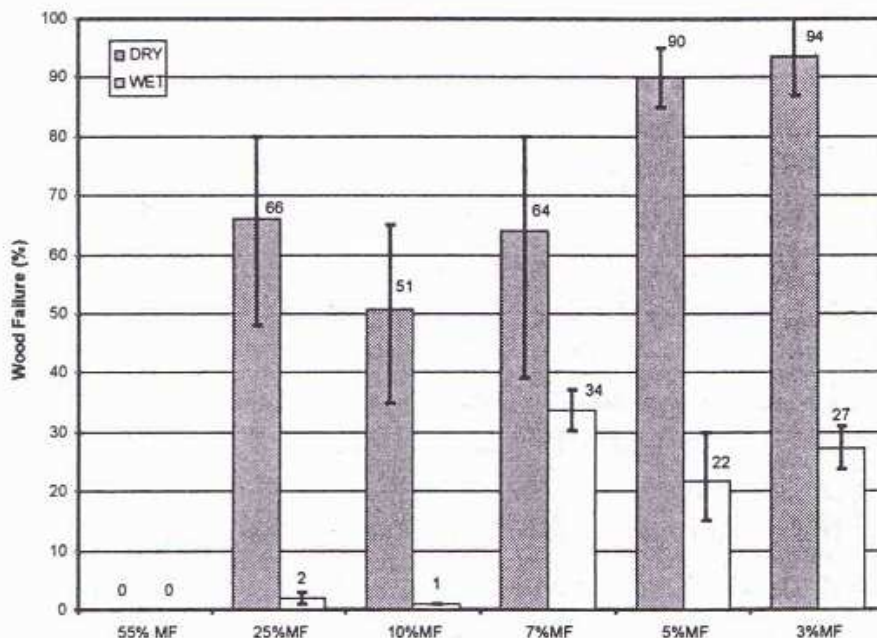
Exponování slepených vzorků vystavených suchému i mokrému prostředí bylo provedeno podle normy ASTM D 905, tj. z jednotlivých bloků byly vyřezány zkušební vzorky a náhodně vybrány na zkoušení v mokrému i suchém prostředí. Vlhkostní zatížení se skládalo z expozice vzorků podtlaku o hodnotě 0,09 MPa po dobu 30 minut a následného vystavení tlaku 0,45 MPa po dobu 30 minut.

Po ukončení expozice byly zkušební vzorky zatříděny dle hodnot smykové pevnosti podle ASTM D 5266, kdy vzorky byly zatěžovány rychlostí 2,5.10⁻³ m/min až do porušení lepené plochy.

5.1.5. Výsledky a diskuze

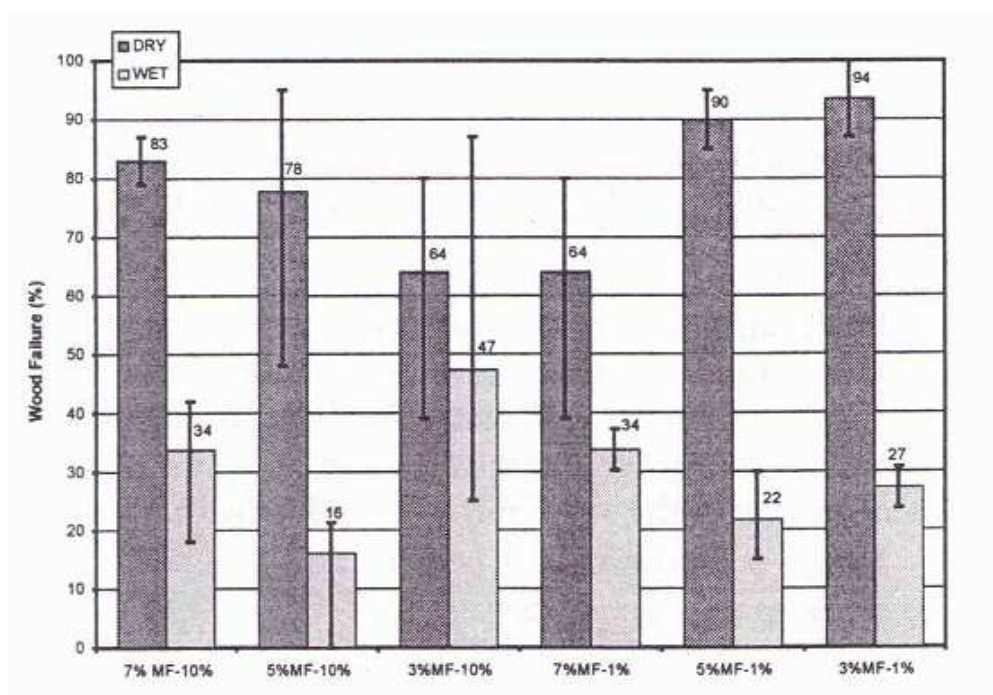
5.1.5.1. Experiment 1 - MF

Tento experiment nám ukazuje, že primery s vysokým obsahem pevných látek nepomáhají k tvorbě pevnější vazby. Tyto primery vytváří lehký film na povrchu a tím způsobují menší procento selhání dřeva jak můžeme vidět na obrázku č. 8.



Obr. č. 8.: Selhání dřeva při použití melamin-sacharóзовého primeru s obsahem 1% katalyzátorů. (wood failure – selhání dřeva)

Významem katalysátorů, bylo zkoušení použití primerů s nízkým obsahem pevných látek. Na obrázku č. 9 je srovnání MF primerů s obsahem 10% a 1% katalyzátorů. Celkové výsledky byly neprůkazné, protože bylo těžké posoudit, které vzorky vykazovaly lepší hodnoty.

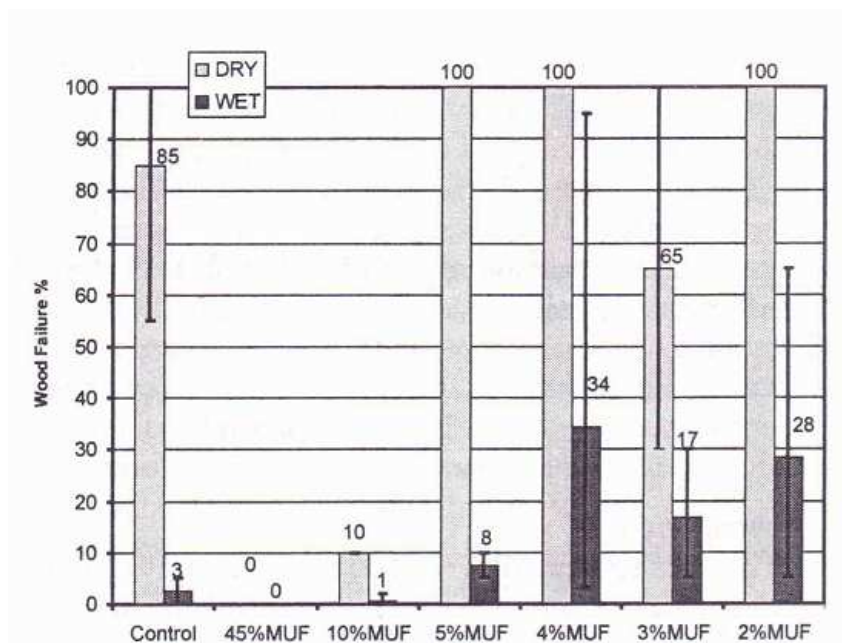


Obr. č. 9.: Selhání dřeva při použití melamin-sacharóзовého primeru s nízkým obsahem pevných částic o koncentraci katalyzátorů 10% a 1%. (wood failure – selhání dřeva)

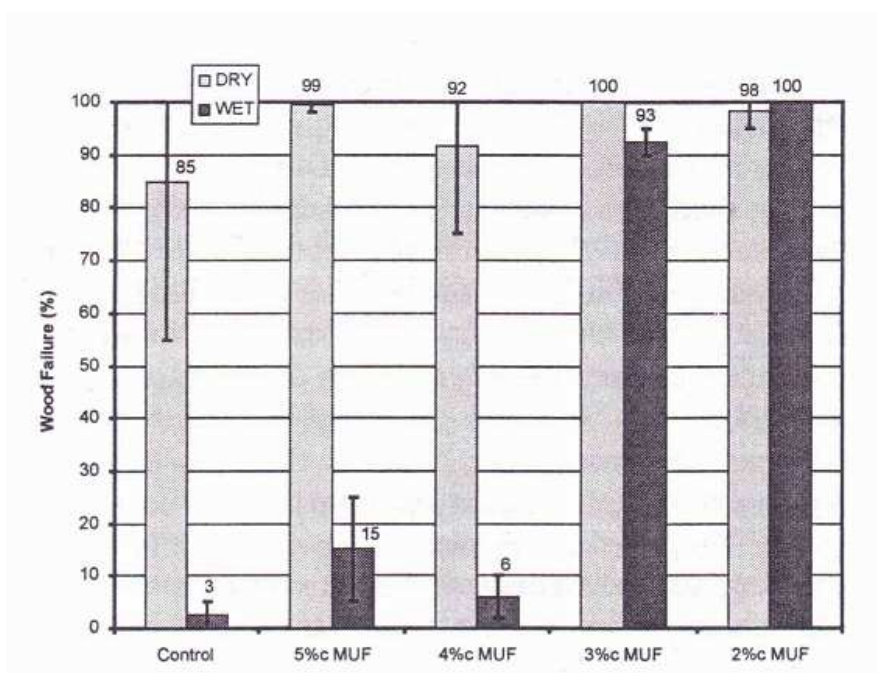
Vzhledem ke krátké době zpracovatelnosti z pryskyřice a neznámým účinkům různých aditiv bylo rozhodnuto pro použití MUF s použitím epoxidu od FPL na rozdíl od získávání MF z venkovních zdrojů. Budoucí experimenty budou provedeny s MUF primery o koncentraci 5% a méně, které jsou obsahem pevných látek podobnější HMR primerům. Nižšího obsahu pevných látek bylo dosaženo díky přidání většího množství vody v průběhu syntézy pryskyřice.

5.1.5.2. Experiment 2 - MUF

Syntetizovaný MUF má počáteční obsah pevných částic 45%. V následujícím grafu (obrázek č. 10) je opět vidět, že primery s obsahem pevných částic nižším než 5%, dokonce i bez použití katalyzátorů, dosahují lepších vlastností, obzvláště u vzorků vystavených mokrému prostředí. Obrázek č.10 ukazuje, že většího procenta selhání dřeva vykazují vzorky, u nichž bylo použito katalyzátoru. 3-procentní primer MUF vykazuje hodnoty selhání mokrého dřeva $92 \pm 5\%$ a 2-procentní primer MUF selhání mokrého dřeva 100%, což jsou zajímavé výsledky.



Obr. č. 10.: Selhání dřeva. Srovnání kontrolních vzorků a vzorků s MUF primerem bez použití katalyzátorů. (wood failure – selhání dřeva)

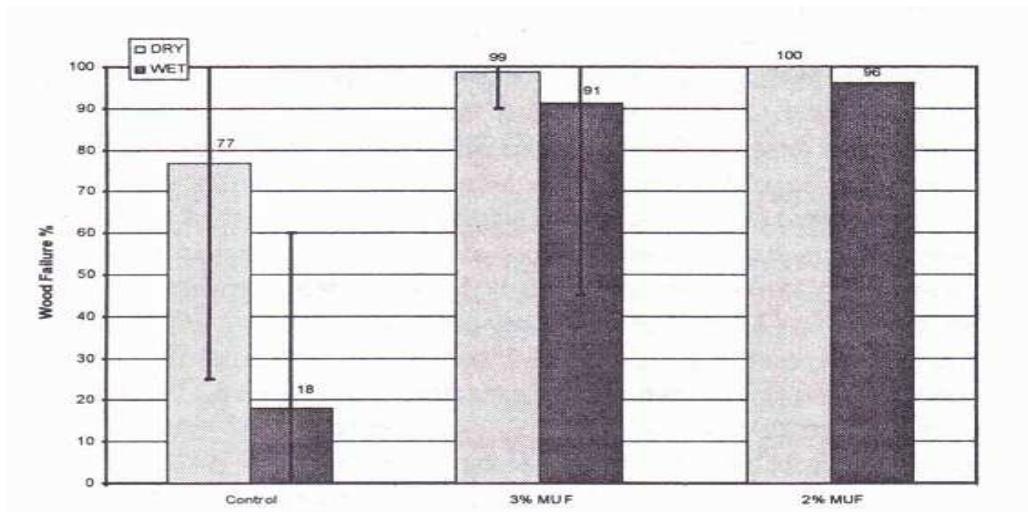


Obr. č. 11.: Selhání dřeva. Srovnání kontrolních vzorků a vzorků s MUF primerem s použitím katalyzátorů. (wood failure – selhání dřeva)

To znamená, že primery s vyšším obsahem pevných látek než jsou 3%, neumožní dostatečné nasáknutí dřeva, protože je složité pro epoxidové lepidlo, aby dostatečně proniklo do struktury dřeva. Na základě těchto výsledků bylo určeno, že optimální množství pevných částic je 2 až 3% pro MUF primery.

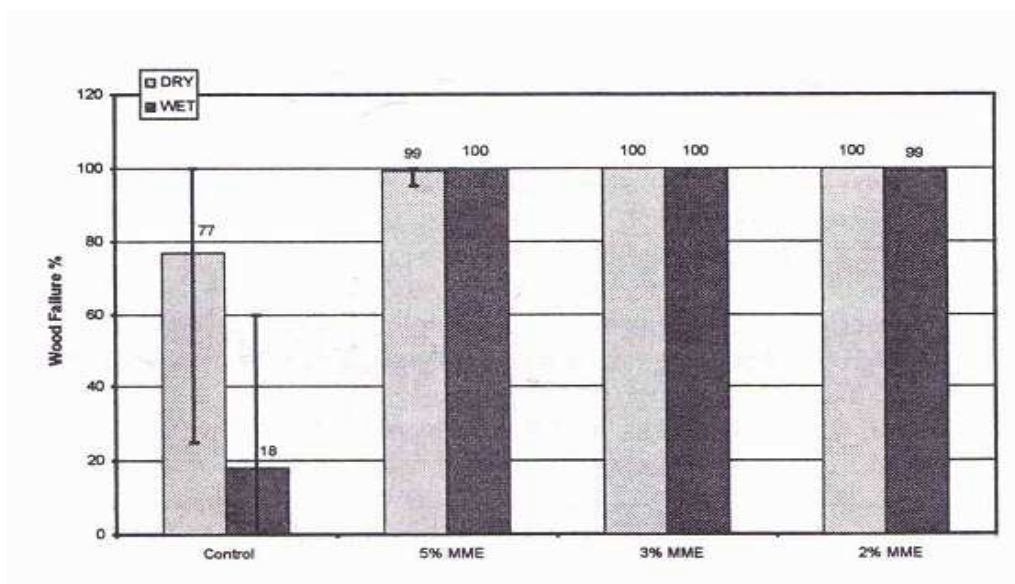
5.1.5.3. Experiment 3 – MUF a MME

MUF primery byly užity s cílem pro dosažení reprodukovatelných výsledků. Dodatečně byly MME primery testovány k určení trvanlivosti. Všechny primery pro tento experiment byly katalyzovány pevnými polymery. Na obrázku č. 12 lze opět pozorovat, že primery způsobují téměř 100% porušení v mokřém dřevě. Z toho vyplývá, že MUF může být velmi efektivně použit jako ošetřující nátěr na dřevo pro zvýšení pevnosti vlhkého dřeva u epoxidových spojů. Na dalším obrázku můžeme pozorovat, že dosahují téměř stejných výsledků jako MME primery a jedná se tedy také o velmi efektivní primer.



Obr. č. 12.: Selhání dřeva při použití primeru MUF. (wood failure – selhání dřeva)

MME primery se zdají být lepší než MUF primery, ačkoli jejich chemické struktury jsou nejasné.



Obr. č. 13.: Selhání dřeva při použití primeru MME. (wood failure – selhání dřeva)

Užití různých katalyzátorů pro primery je nejisté.

5.1.6. Dílčí shrnutí

MUF vykázal dobré a efektivní vlastnosti při použití jako primeru pro lepené dřevo. Zvyšuje pevnost ve smyku u vzorků vystavených vlhkému prostředí. Vzhledem k tomu, že dochází k porušení ve 100% případech ve dřevě, nezjišťujeme pevnost ve smyku lepené spáry, ale dřeva. Selhání mokrého dřeva je častější při použití primeru na povrch dřeva. Výzkum ukazuje, že primery s vyšším obsahem pevných částic než 5% neposkytují tak dobré spoje, pravděpodobně z důvodu větší vrstvy nátěru. U MUF primerů s obsahem pevných částic 2 % až 3% můžeme pozorovat hlubší pronikání do povrchu dřeva, čímž dochází k lepší stabilizaci buněčných stěn. [6]

5.2. Lepené spoje pomocí jednosložkových, vlhkostí vytvrzujících polyuretanových lepidel

Používání těchto jednosložkových lepidel začalo před 40 lety, ale z důvodu velmi přísných předpisů v různých Evropských zemích, nebylo umožněno tato lepidla používat pro nosné konstrukce jako jsou nosníky. Zhruba před 20 lety několik výrobců těchto jednosložkových polyuretanových lepidel (1C PUR) udělalo výzkum a začala tak výroba konstrukčních prvků s použitím PUR lepidel. V posledních letech mnoho laboratoří a institutů provádí výzkumy pro porovnání výhod a nevýhod 1C PUR ve srovnání s konvenčními lepidly založenými na bázi vody.

Tento experiment nám poskytne několik různých studií a srovnání, které byly provedeny na 1C PUR lepidlech v posledních letech. [7]

5.2.1. Dlouhodobé chování

Při udělování certifikátů pro tato lepidla, byly testovány následující vlastnosti.

5.2.1.1. Krátkodobé studie

- a) reologické vlastnosti;
- b) otevřená montáž, smáčení, roztíratelnost;
- c) vliv klimatických podmínek na rychlost tvrdnutí;
- d) vlastnosti stárnutí;
- e) vliv změn klimatických podmínek na lepenou spáru;
- f) vliv smršťovacího napětí na spáru;
- g) vliv tloušťky spáry, doby montáže a klimatických podmínek na napětí ve spoji;
- h) vhodnost lepidla na smykovou plochu;
- i) odolnost lepidla proti delaminaci.

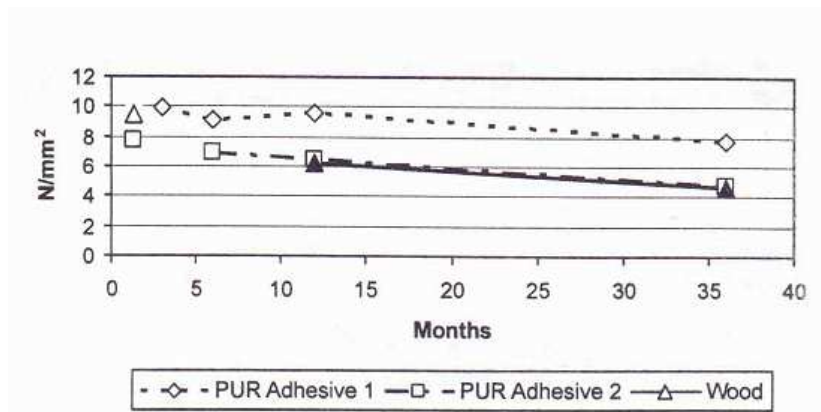
5.2.1.2. Dlouhodobé studie

- a) příčné tahové zkoušky vzorků z bukového dřeva při permanentním zatížení v různých klimatických podmínkách;
- b) odolnost v ohybu lepených lamelových nosníků při stálém zatížení

5.2.2. Experiment – experiment in situ

5.2.2.1. Příčné tahové zkoušky

Na obrázku č.14 můžeme sledovat pokles hodnot pevnosti dvou vzorků slepených 1C PUR lepidlem ve srovnání s bukovým dřevem. Vzorky byly v průběhu 3 let vystaveny prostředí s teplotou v rozsahu -10°C až $+45^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkostí 20% až 100%. Počáteční hodnoty byly naměřeny po 5 týdnech od slepení vzorků. Také zde můžeme vidět, že ztráta pevnosti spoje je způsobena ztrátou pevnosti dřeva, takže je zde velmi vysoké procento selhání dřeva.

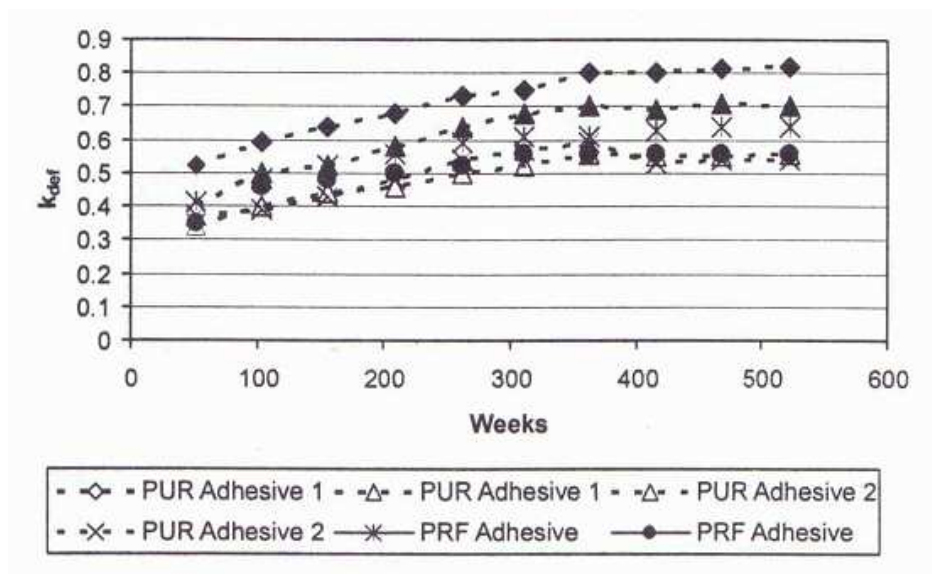


Obr. č. 14: Pokles smykové pevnosti bloku po 3 letech od slepení. (adhesive - lepidlo, wood – dřevo, months - měsíce)

5.2.2.2. Odolnost v ohybu

Tato odolnost je stanovena součinitelem dotvarování, který vyjadřuje vzrůst přetvoření s časem, způsobený klimatem prostředí a dobou trvání zatížení. Na dotvarování má značný vliv i rozměr dřevěných prvků, protože u velkých rozměrů se střední vlhkost dřeva mění omnoho pomaleji než u malých průřezů. [4]

Pro tento test bylo připraveno 6 nosníků. Pro první 2 nosníky bylo použito polyuretanové lepidlo 1, pro druhé nosníky polyuretanové lepidlo 2 a pro zbylé dva nosníky bylo použito fenol-resorcín-formaldehydové lepidlo (PRF). Nosníky byly zatěžovány ve dvou bodech o celkové síle 28 kN. Zkušební zařízení bylo umístěno ve venkovním prostředí, ale bylo chráněno proti působení větru. Vlhkost vzorků se v průběhu 10 let pohybovala v rozmezí 14% až 19%. Hodnoty součinitelů dotvarování můžeme sledovat na obrázku č.15. Koeficienty nabývaly hodnot od 0,54 do 0,82. Také zde je vidět, že se deformace zastavují až po několika letech.



Obr. č. 15: Deformační koeficienty po zkušební době 10 let. (adhesive – lepidlo, weeks – týdny)

5.2.2.3. Pevnost v ohybu

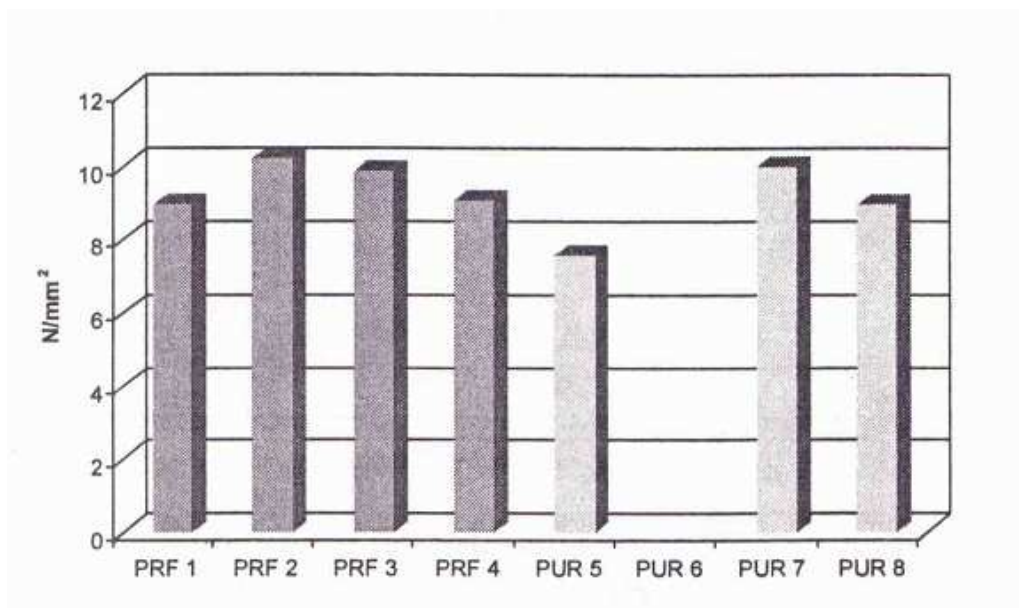
Pevnost v ohybu byla poprvé hodnocena v roce 1996. Na základě pozitivních výsledků, bylo první, ale limitované lepidlo 1C PUR schváleno, přičemž kompletní testy při plném zatížení byly dokončeny až v roce 2004. Pro získání výsledků při praktickém použití, nikoli z laboratoře, byly postaveny za účelem studie 4 mosty z lepených nosníků s použitím 1C PUR lepidla a PF lepidla, tabulka č. 6.

Tabulka č. 6: Zkoumání mostů postavených z lepených nosníků.

Objekt	Rok výstavby	Typ použitého dřeva/lepidla	Výsledky
1. Pěší most, Walde	1993	smrk/1C PUR	bez delaminace
2. Pěší most, Grindelwald	1994	smrk/1C PUR	několik otevřených míst v důsledku selhání spoje
3. Pěší most 1, Gross Bieberau	1998	modřín/PF	bez delaminace
4. Pěší most 2, Gross Bieberau	1997	modřín/1C PUR	bez delaminace

O most 3 a 4 byl zvlášť velký zájem, protože se jednalo o totožné konstrukce, pouze s rozdílem použitých lepidel. Jednotlivé vzorky odebrané z těchto mostů byly zkoušeny na

pevnost ve smyku v souladu s EN 392. Jednotlivé naměřené hodnoty jsou zobrazeny na obrázku č. 16.



Obr. č. 16: Hodnoty smykového napětí. Vzorky 1-4 byly odebrány z mostu 3, lepeného PF lepidlem. Vzorky 5-8 byly odebrány z mostu 4, lepeného IC PUR lepidlem.

Tato zkouška ale nepodalala dostatečně kvalitní výsledky z důvodu malého počtu zkušebních vzorků. Navíc hodnoty smykové pevnosti se pohybovaly okolo hodnoty 9 N/mm², což je smyková pevnost modřínového dřeva.

5.2.2.4. Delaminace

Byla zjišťována na smrkových lepených nosnících. Nosníky byly zatěžovány tlakem vodorovným s lepenou spárou a nakonec byly vystaveny povětrnostním podmínkám bez ochrany. Střední část byla chráněna střechou před přímým navlhčením. Použité lepidlo bylo IC PUR. Z kryté části nosníku byly vyřezány 4 vzorky pro určení hodnot delaminace a zkušeny v souladu s normou EN 391.

Tabulka č. 7: Hodnoty delaminace nosníků po 20 letech.

Vzorek číslo	% delaminace	Rozměr	Délka spáry
1.	0,16 %	257 x 150 x 35 mm	6 spár/vzorek 300 mm/spáru (1800 mm/vzorek)
2.	0,00 %		
3.	0,83 %		
4.	0,00 %		

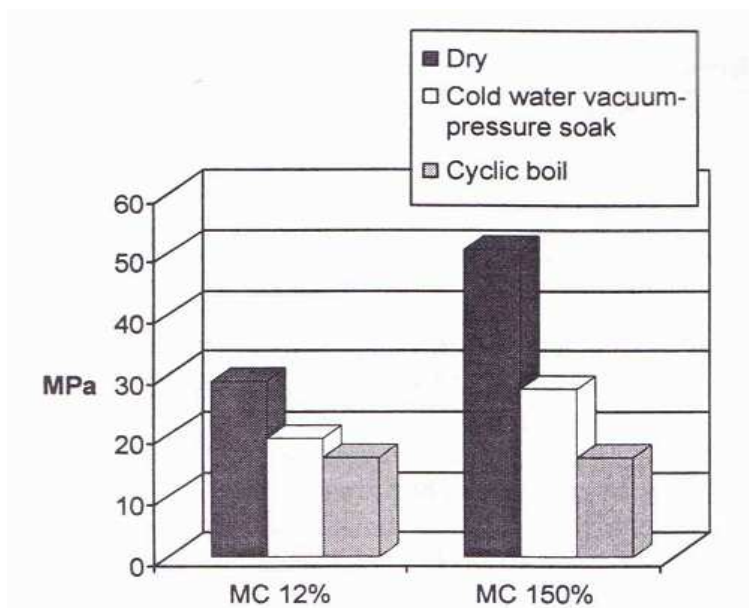
5.2.2.5. Vliv teploty

Největší rozdíl mezi pryskyřicemi (vytvrzení kondenzací) a PUR lepidly je v tepelné roztažnosti. Oba materiály mají své výhody a nevýhody. Díky pevnější matici, dosahují lepších vlastností kondenzační pryskyřice, protože jsou relativně konstantní v průběhu změn teplot a nedochází u nich k takovým délkovým změnám.

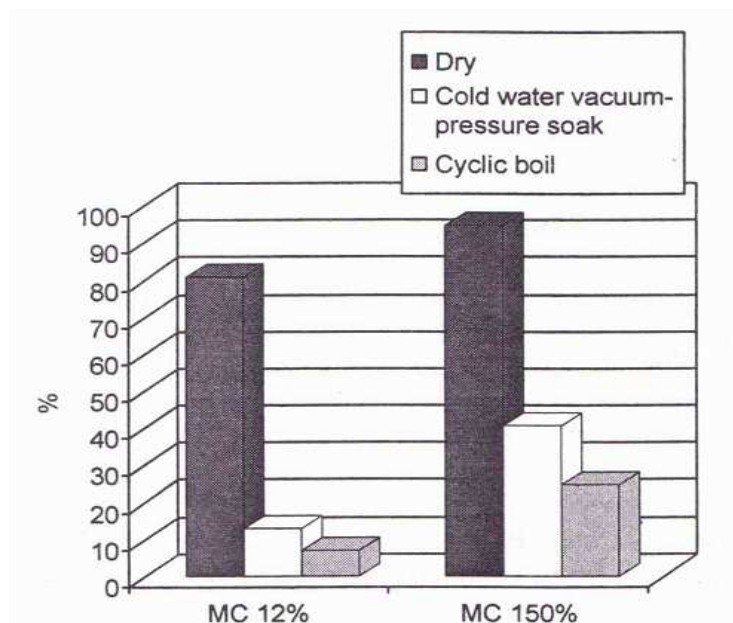
Při zkoušení vzorků na pevnost ve smyku byly vzorky zatěžovány více jak dvojnásobnou silou, než je normálně přípustná v konstrukcích a výsledky ukazují, že 1C PUR lepidla požadavky na pevnost splňovaly. To znamená, že v Evropě 1C PUR lepidla splňují standardy na optimální složení i hodnoty smykové pevnosti.

5.2.2.6. Reakce na vlhkost

V následujících dvou obrázcích se můžeme podívat na to, jaký vliv má vlhkost na změny smykové pevnosti. Vzorky byly zkoušeny v souladu s normou ASTM D 4688 a byly vystaveny zkušebnímu prostředí sušení (*dry*), tlakovým cyklům máčení ve studené vodě při podtlaku a přetlaku (*cold water vacuum-pressure soak*) a cyklickému namáčení (*cyclic boil*). Výsledky nám ukazují hodnoty napětí a procentuální porušení ve dřevě při těchto třech zkouškách. Zvláštních výsledků dosáhly vzorky lepené za mokra a následně vysušené, protože měly tendenci dosahovat o mnoho vyšších pevností, než vzorky lepené za sucha s ohledem na způsob zatěžování a porušení ve dřevě.



Obr. č. 17: Porovnání tahových pevností mokrých a suchých vzorků po vystavení různým prostředím a cyklům. (*dry* – suché prostředí, *cold vacuum-pressure soak* – máčení ve studené vodě při podtlaku a přetlaku, *cyclic boil* – cyklické namáčení)



Obr. č. 18: *Procentuální porovnání selhání dřeva ve spoji mokrých a suchých vzorků po vystavení různým prostředím a cyklům. (dry – suché prostředí, cold vakuum-pressure soak – máčení ve studené vodě při podtlaku a překlaku, cyclic boil – cyklické namáčení)*

Navíc, při mikroskopickém zkoumání 1C PUR lepidel bylo zjištěno, že pronikají velmi hluboko do dřevěných buněk a na základě toho bylo rozhodnuto a dobré vhodnosti pro lepení surového dřeva. Lepidla založená na vodní bázi mohou mít značné problémy při spojování dřeva o vlhkosti vyšší než 20%. 1C PUR lepidla i za těchto podmínek dosahují optimálních vlastností. Na základě těchto výsledků, kdy 1C PUR lepidla poskytují větší stupeň bezpečnosti, došlo k jejich přijetí v Evropě a lepidla na bázi vody se stala pro tyto aplikace zastaralými. Naopak při aplikaci lepidla 1C PUR na dřevo s vlhkostí nižší než 6% již vzorky nedosahovaly tak dobrých hodnot a vlastností.

Fyzikální a chemické vlastnosti zjištěné v tomto experimentu byly velmi překvapivé, ale nemohly být brány za zcela průkazné, takže další studie těchto lepidel probíhají do současnosti. Zdá se, že silně zrychlená lepidla jsou méně citlivá na nízkou vlhkost dřeva, než systémy s velmi pomalou reakcí.

5.2.1. Dílčí shrnutí

V Evropě se 1C PUR lepidla v současné době používají již 20 let, ve Švýcarsku jich bylo použito u některých objektů již před 27 lety. Je to samozřejmě stále ještě krátký čas pro hodnocení životnosti staveb, ale v průběhu těchto let nebyly zjištěny žádné náznaky nějakých zásadních problémů. Samozřejmě, mohou se vyskytnout selhání, které jsou způsobené aplikací lepidla, ale ve všech případech byly tyto chyby zjištěny pomocí vnitřní kontroly kvality. V zásadě je použití 1C PUR lepidel velmi bezpečné, protože se dají velmi snadno aplikovat. Ve srovnání s lepidly na bázi vody zvyšují provozní bezpečnost a nemají prakticky žádné problémy s vysokou vlhkostí dřeva. Ačkoli při vlhkosti dřeva nižší než 6% se vyskytují

problémy, pozitivním aspektem je, že vlhkost dřeva se dá snadno kontrolovat. Pokud není vlhkost v požadovaném rozsahu, jednoduše ji lze regulovat řízeným postřikem vodou. [7]

6. Vlastní experiment

Aplikace využívání vnějších zesilujících komponent pro dřevěné prvky není tak rozšířenou technologií. Přesto se v praxi vyskytují případy, kdy je třeba posílit tuhost dřevěných prvků vlivem dodatečného přitížení v konstrukci nebo zesílit prvek v rámci sanace konstrukce. Při zesilování dřeva aplikovanou pryskyřicí nesmí být však výrazně snížena hygroscopicita dřeva, která by v důsledku poté mohla vést ke zvýšení vlhkosti prvků a možnému následnému rozvoji biotického poškození dřeva. Pro zajištění dokonalého spoje mezi externí FRP tkaninou a dřevem může hrát důležitou roli i druh dřeviny, což bylo náplní provedeného experimentu.

6.1. Materiál

Pro účely experimentu byly vybrány běžně používané druhy dřevin. Jednotlivé dřeviny jsou specifikovány v následující tabulce, včetně uvedených hodnot objemové hmotnosti ve zcela vysušeném stavu.

Tabulka č. 8: *Tabulka použitých dřevin a jejich objemových hmotností.*

Dřeviny	Objemová hmotnost ρ_0 [kg.m ⁻³]
Smrk	546
Borovice	550
Modřín	584
Dub	619

Za zesilující prvek byla použita FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) tkanina s uhlíkovými vlákny Tyfo-SCH-41 s tloušťkou vláken 0,28 mm a se skelnými vlákny Tyfo-SEH-51A s tloušťkou vláken 0,36 mm od výrobce FYFE Company. Pro vytvoření vytvrzeného kompozitu byla použita epoxidová pryskyřice Tyfo S (diglycidyl ether of bisphenol-A DGEBA) s aminovými tvrdidlem (polyoxypropylenediamine) od stejného dodavatele. Pryskyřice byla připravena v míšicím poměru pryskyřice/tvrdidlo 100/34,5 dílů hmotnostně. V experimentu byly zohledněny faktory určující výslednou pevnost spoje, kterými jsou vlhkost dřeva a druh úpravy povrchu dřevěného adherendu při aplikaci vnějšího vyztužujícího prvku. Dřevěné prvky byly pro dosažení rovnovážného vlhkostního stavu aklimatizovány v prostředí 20°C a relativní vzdušné vlhkosti 65,0%. V prvním kroku bylo po aklimatizaci provedeno impregnování dřevěných hoblovaných desek o rozměrech 150×460 mm a prosycení rozměrově připravených tkanin a následné nalepení tkaniny na povrch dřeva. Po vytvrzení pryskyřice byla vytvořena krycí vrstva vnější pryskyřicí. Pro zajištění procesu post-curing epoxidové pryskyřice byly dle technických požadavků zesílená dřevěná prkna FRP vrstvou vystavena 72 hodinové expozici při teplotě 60°C. Po vytvrzení pryskyřice bylo přistoupeno ke zhotovení zkušebních vzorků dle EN 302-1 s výjimkou tloušťky vzorku, která

byla přizpůsobena struktuře letokruhů u jehličnatých dřevin. Zkušební tělesa byla rozměru 8,0×20,0×150 mm rovnoběžně s vlákny s vytvořenými 3 mm zářezy pro vymezení smykové plochy.

6.2. Zkoušky trvanlivosti

Pro hodnocení trvanlivosti lepených spojů bylo postupováno podle EN 302-1, na základě které se hodnotí pevnost a způsob porušení lepeného spoje mezi adherendy. Pro ověření lepeného FRP/dřevo spoje byla zvolena trvanlivostní zkouška A5, která se porovnála s výsledky získaných v referenčním prostředí A1. Trvanlivostní test A5 je založen na aklimatizaci zkušebních těles po dobu 7 dnů v prostředí s teplotou 20°C a relativní vzdušnou vlhkostí 65%, poté následuje vystavení po dobu 6 hodin vařící vodě a po dobu 2 hodin ponoření ve vodě o teplotě (15±5°C). Po této expozici se tělesa nechají kondicionovat na ustálenou hmotnost opět při parametrech prostředí 20°C/65%, po které se vyzkouší smyková pevnost.

6.3. Výsledky zkoušek

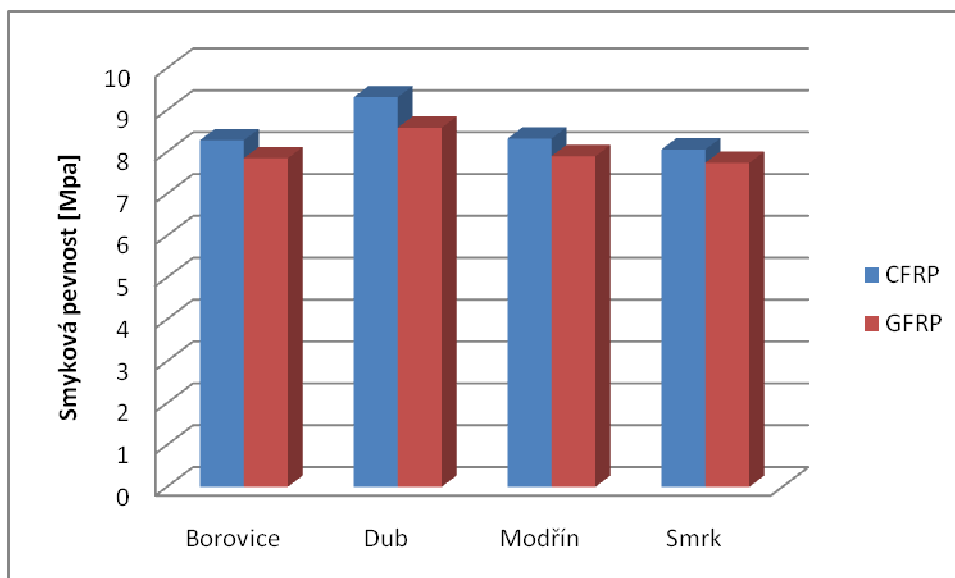
6.3.1. Smyková pevnost

Pro porovnání pevnostních parametrů bylo pro každou expoziční třídu připraveno 15 zkušebních těles, které byly zkoušeny ve smykovém namáhání na přístroji Testometric M350-20CT společnosti Testometric, U.K., s digitálním záznamem průběhu zkoušky. Pro přesné určení způsobu porušení, zda-li se jedná o ztrátu vnitřní soudržnosti stejnorodých molekul (kohezi) či různorodých molekul (adhezi) se u každého porušeného vzorku stanovil procentuální odhad poškozené smykové plochy. Veškeré výsledky smykových zkoušek jsou uvedeny v tabulce č. 9. U vzorků CFRP byla použita tkanina s uhlíkovými vlákny a u vzorků GFRP byla použita tkanina se skelnými vlákny.

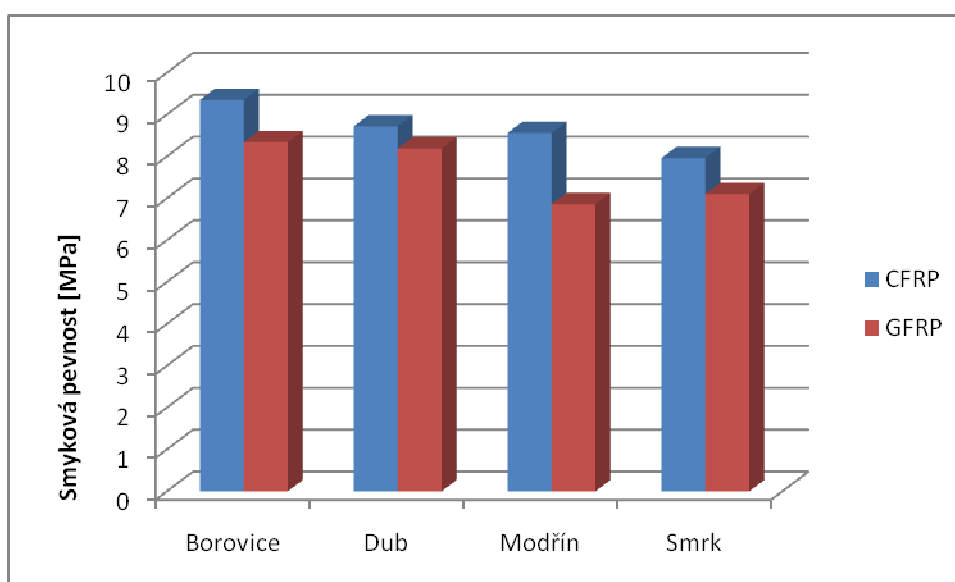
Tabulka č. 9: Střední hodnoty smykové pevnosti pro FRP tkaninu aplikovanou na různé druhy dřevin.

Typ expozice		Dřevina	Střední hodnota smykové pevnosti (MPa)	Standardní odchylka	Poškození dřeva (%)
CFRP/dřevo	A1	Borovice	8,28	0,502	100,0
		Dub	9,31	1,641	98,3
		Modřín	8,32	1,246	92,5
		Smrk	8,06	1,150	100,0
	A5	Borovice	9,35	0,907	100,0
		Dub	8,72	0,815	94,2
		Modřín	8,56	1,248	85,8
		Smrk	7,96	1,201	87,5
GFRP/dřevo	A1	Borovice	7,85	0,704	100,0
		Dub	8,58	0,916	100,0
		Modřín	7,90	0,846	92,5
		Smrk	7,74	1,461	80,0
	A5	Borovice	8,34	0,747	91,7
		Dub	8,19	0,861	100,0
		Modřín	6,86	0,398	78,3
		Smrk	7,10	1,648	81,7

Na grafech č. 1 a 2 jsou znázorněny výsledky pevnostních zkoušek. Z grafu 1 je patrné, že při vystavení vzorků prostředí A1 bylo největších pevností dosaženo při aplikaci CFRP i GFRP na dřevinu dubu. Tento projev můžeme připočítat pórovité struktuře listnaté dřeviny, která díky existenci otevřených pórů vykazuje větší měrný povrch pro hlubší penetraci lepidla. U zbylých jehličnatých dřevin byla zjištěna hodnota pevnosti přibližně stejná, nejnižších hodnot bylo dosaženo při lepení GFRP materiálu ke smrkovému dřevu.



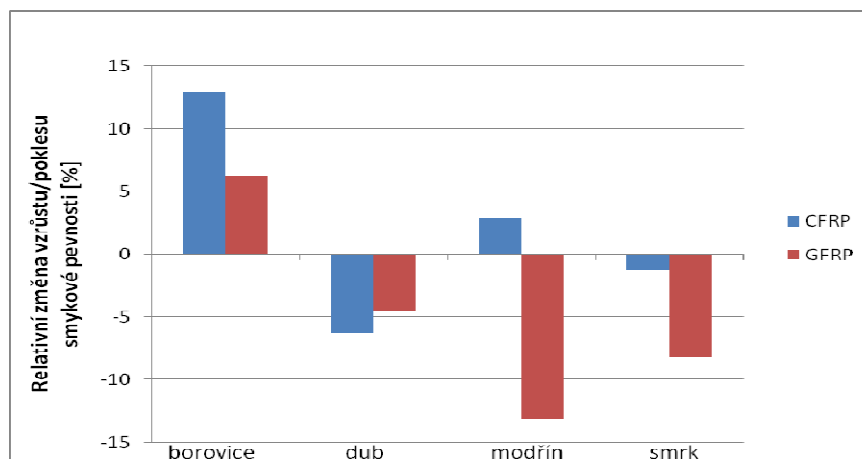
Graf č. 1: Střední hodnoty smykové pevnosti referenčních vzorků vystavených referenčnímu prostředí A1.



Graf č. 2: Střední hodnoty smykové pevnosti referenčních vzorků vystavených referenčnímu prostředí A5.

Z grafu 2 je patrné, že při vystavení vzorků prostředí A5 bylo největších pevností dosaženo při aplikaci CFRP i GFRP na dřevinu borovice. Nejnižších hodnot bylo dosaženo při lepení GFRP materiálu k modřínovému dřevu.

Trvanlivost lepeného spoje lze posoudit porovnáním výsledků pevností referenčních zkušebních vzorků s výsledky pevností po vystavení expoziční třídě A5. Graficky jsou rozdíly patrné v grafu č. 3.



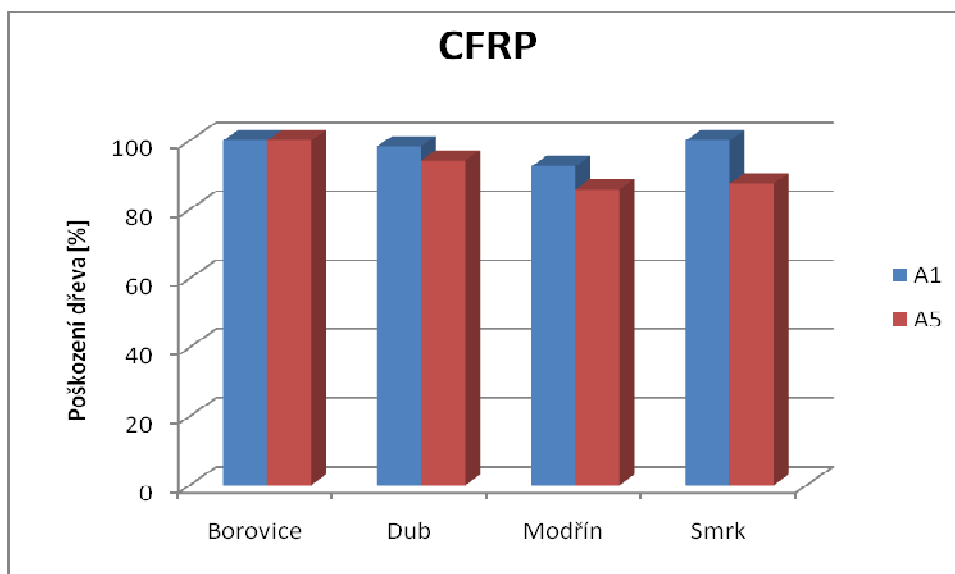
Graf č. 3: Porovnání trvanlivosti spojů FRP/dřevo pro různé druhy dřevin po expozičních A1 a A5 dle EN 302-1.

Principiálně je zkouška trvanlivostí lepených spojů založena na působení namáhání na lepenou spáru vyvolanou objemovými změnami v důsledku procesu bobtnání a sesychání dřeva. Jak je z grafu 2 zřejmé, v případě dubu, smrku a modřínu došlo ke snížení pevností v rozpětí až do 13,2 % vůči referenčním vzorkům. U borovice bylo zjištěno, že po vystavení trvanlivostní zkoušce došlo u obou aplikovaných tkanin naopak k nárůstu smykových pevností. I přes tento efekt je však nutné si uvědomit, že v případě borovice bylo u zkoušek v prostředí A5 dosaženo 100 % (CFRP) resp. 91,7 % (GFRP) poškození dřeva na smykové ploše. To znamená, že při obou zkouškách došlo k převažujícímu koheznímu porušení ve dřevě, nikoliv v namáhané lepené spáře, tudíž lze tento spoj považovat za dostatečně trvanlivý.

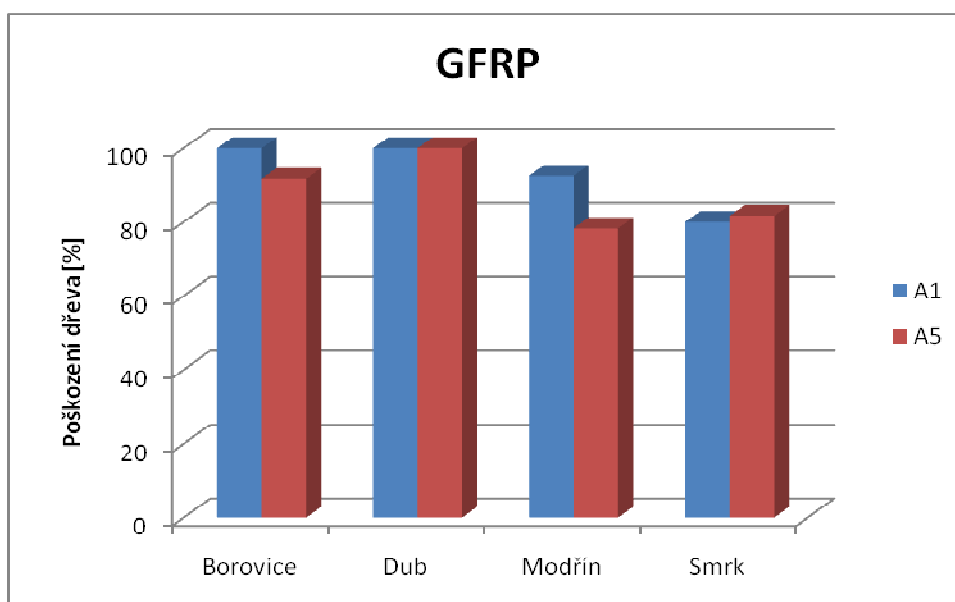
6.3.2. Poškození dřeva

Z hlediska hodnocení přídržnosti FRP ke dřevěnému adherendu je důležitým faktorem mechanismus vytvoření lepeného spoje. Důležitým mechanismem je tzv. *mechanické spojení*, které je způsobeno vyplněním lepidla do otevřené pórovité struktury povrchu adherendu a stejně tak i penetrací do zdravého dřeva.

Zmíněnou trvanlivost lepených spojů lze velmi dobře kvantifikovat právě hlediskem poškození dřeva na smykové ploše, které nám vystihuje plochu poškození ve dřevěném adherendu po provedené zkoušce. Vystavení zkušebních těles cyklickému trvanlivostnímu testu (expoziční A5) vede ke zvýšenému namáhání v lepené spáře FRP/dřevo, což se dle předpokladů projevuje na snižující se hodnotě poškození dřeva, resp. narůstající procento adhezního poškození v lepené spáře, jak je patrné v grafech č. 4 a 5.



Graf č. 4: Porovnání procentuálního poškození dřeva vzorků A1 a A5, u kterých byla použito CFRP.



Graf č. 5: Porovnání procentuálního poškození dřeva vzorků A1 a A5, u kterých byla použito GFRP.

6.4. Dílčí shrnutí

V rámci experimentu byly posouzeny listnaté a jehličnaté dřeviny z hlediska ověření, jakým způsobem ovlivňuje druh dřeviny finální přídržnost s FRP tkaninou tvořící výztužnou vrstvu dřeva. Na základě analýzy provedených pevnostních zkoušek bylo zjištěno, že pórovitá struktura listnáčů vede k dosažení vyšších hodnot přídržnosti vyjádřené smykovou pevností oproti jehličnatým dřevinám. U experimentu byla posuzována i otázka trvanlivosti spoje porovnáním referenčních vzorků se vzorky vystavených procesu stárnutí. Po provedené zrychlené trvanlivostní zkoušce byl prokázán významný vliv na přídržnost spoje, a to poklesem jak pevnosti (vyjímaje obě sady zkušebních vzorků s aplikovanou CFRP a GFRP tkaninou u borovice) tak i snížením hodnoty kohezního porušení resp. nárůstu adhezního poškození smykové plochy.

7. Závěr

V této práci jsem se věnoval **řešení stávajících vědeckých článků** zabývajících se problematikou hodnocení trvanlivosti lepidel používaných pro lepení dřevěných prvků. Tyto vědecké články porovnávají vlastnosti alternativních lepidel s tradičně používanými lepidly. V rámci řešení byl kladen důraz na výběr takových experimentů, které by sledovaly chování spojů lepidlo/dřevo v případě použití epoxidových lepidel a PUR lepidel, tj. lepidel, která se v této době stávají alternativou k tradičním PRF, MUF lepidlům.

Druhým hlavním cílem práce bylo **navrhnout a provést experiment** zabývajících se hodnocením kvality epoxidového lepidla ke dřevu v případě aplikace vnější FRP tkaniny. Trvanlivost spoje FRP/dřevo hraje velmi důležitou roli, neboť v případě selhání tohoto spoje by byla významně snížena tuhost a únosnost zesilovaného dřevěného prvku. Zkoušení vzorků v experimentu bylo provedeno podle EN 302.

V rámci **řešební činnosti** vědeckých článků týkající se předmětné problematiky bylo zjištěno, že pro zvýšení trvanlivosti lepeného spoje epoxidovým lepidlem, je vhodné použít MUF primery s obsahem pevných částic v rozmezí 2% až 3%, u nichž je zajištěno hlubší pronikání do povrchu dřeva a tím i lepší stabilizace buněčných stěn. Při vyšších koncentracích pevných částic nedosahují lepené spoje tak dobrých výsledků, protože nedochází k dostatečnému nasáknutí dřeva epoxidovým lepidlem a pravděpodobně i z důvodu větší vrstvy lepidla. Tyto primery vykazují podobné vlastnosti jako primery MME a jsou velmi vhodné pro použití u prvků, které jsou vystaveny vlhkostnímu zatížení. Pro ředění těchto primerů se používá fenol sulfonan.

Dále byla probána problematika jednosložkových kompozitních 1C PUR lepidel. Výsledky bádání ukazují, že tato lepidla vykazují velmi dobré vlastnosti a lze je aplikovat na dřeva s vyšší vlhkostí, než lepidla na vodní bázi. Optimálních výsledků bylo dosaženo při zjišťování smykové pevnosti u vzorků vystavených cyklickému namáčení a sušení. Tato lepidla velmi dobře pronikají do povrchu dřeva a jsou vhodné pro lepení surového dřeva, bez použití primeru. Lze je tedy velmi snadno aplikovat.

V rámci **experimentální činnosti** byly provedeny zkoušky v požadovaném počtu 100 ks, kdy byl sledován vliv druhu dřeviny na přídržnost s FRP tkaninou, která tvoří vyztužující prvek dřeva. Lepších hodnot bylo dosaženo u dubu, zástupce listnatých dřevin, což je způsobeno jejich pórovitou strukturou. Pro zjištění trvanlivosti byla zvolena zrychlená trvanlivostní zkouška a byl prokázán významný pokles smykové pevnosti a nárůst adhezního poškození smykové plochy.

Všechny cíle této práce byly splněny. Jako zajímavé, lze považovat výsledky při použití MUF primerů. Tyto primery mohou být velmi efektivně použity jako ošetřující nátěr na dřevo pro zvýšení pevnosti epoxidových spojů u vlhkého dřeva a jejich významný vliv bude i nadále zkoumán v následujících pracích. U spoje FRP/dřevo byl po provedení zrychlené trvanlivostní zkoušky prokázán významný vliv na přídržnost spoje. Při zkouškách došlo k převažujícímu koheznímu porušení ve dřevě, nikoliv v namáhané lepené spáře, tudíž lze tento spoj považovat za dostatečně trvanlivý.

8. Literatura

- [1] **Hruška, L.; Skládal, V.; Zapletal, R.:** *Zemědělský slovník*. 1 vydání, SZN Praha 1976, 1102 str., ISBN nevedeno.
- [2] **Šlezingerová, J.; Gandelová, L.:** *Stavba dřeva*. 1 vydání, MZLU Brno 1994, ISBN 80-7157-347-7
- [3] **Balabán, K.:** *Anatomie dřeva*. 1 vydání, SZN Praha 1955, 216 str., ISBN nevedeno..
- [4] **Koželouh, B.:** *Dřevěné konstrukce podle Eurocódu 5*. Navrhování a konstrukční materiály. 1. vydání. Zlín, 1998. ISBN 80-238-2620-4
- [5] **Pecina, J., Pecina P.:** *Materiály a technologie-dřevo*. PdF MU.2007
- [6] **Jermal G. Chandler, Charles R. Filhart.:** Assessment of Increased Wet Wood Bonding for Epoxy-Bonded Samples Using a Melamine-Urea-Formaldehyde Priming Agent, *Wood Adhesives 2005*, San Diego, Holiday Inn on the Bay, 2005.
- [7] **Gabriel J.:** Experience in Engineered Wood Applications with Moisture-Curing One-Component Polyurethane Adhesives in Europe, *Wood Adhesives 2005*, San Diego, Holiday Inn on the Bay, 2005.

9. Seznam norem

- ČSN EN 518 (49 1532) – Konstrukční dřevo – Třídění – Požadavky na normy pro vizuální třídění podle pevnosti.
- ČSN EN 519 (49 1533) - Konstrukční dřevo – Třídění – Požadavky na dřevo strojně tříděné podle pevnosti a třídícího stroje.
- ČSN EN 338 (73 1711) – Konstrukční dřevo – Třídy pevnosti.
- ČSN EN 384 (73 1712) – Konstrukční dřevo – Zjišťování charakteristických hodnot pevnosti, tuhosti a hustoty.
- ČSN EN 386 (73 2833) – Lepené lamelové dřevo – Požadavky na užité vlastnosti a minimální výrobní požadavky.
- ČSN EN 1194 (73 1714) – Lepené lamelové dřevo – Třídy pevnosti a stanovení charakteristických hodnot.
- ČSN EN 385 (73 2826) – Konstrukční dřevo nastavované zubovitým spojem – Požadavky na užité vlastnosti a minimální výrobní požadavky.
- ČSN EN 391 (73 2835) – Lepené lamelové dřevo – Zkouška delaminace lepených spojů.
- ČSN EN 392 (73 2055) – Lepené lamelové dřevo – Smyková zkouška lepených spojů.

ČSN EN 302-1 (66 8531) – Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce – Metody zkoušení – Část 1.: Stanovení podélné smykové pevnosti.

ČSN EN 302-2 (66 8531) – Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce – Metody zkoušení – Část 2.: Stanovení odolnosti proti delaminaci.

ASTM D 3434 - Standard Test Method for Multiple-Cycle Accelerated Aging Test (Automatic Boil Test) for Exterior Wet Use Wood Adhesives.

ASTM D 2559 - Standard Specification for Adhesives for Bonded Structural Wood Products for Use Under Exterior Exposure Conditions.

ASTM D 905 -08e1 Standard Test Method for Strength Properties of Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading.

10. Seznam použitých zkratk

1C PUR – jednosložkové polyuretanové lepidlo;

CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymer

FPL – Forest Product Laboratory

FRP – Fiber Reinforced Polymer

GFRP – Glass Fiber Reinforced Polymer;

GL – glulam (glued laminated timber)

HMR – hydroxymetyl-resorcín

MF – malemin-formaldehyd

MME – hydroxymetylol-melamin-metyl-eter

MUF – melamin-močovino-formaldehyd

PRF – fenol-resorcín-formaldehyd

PUR - polyuretan