

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**



**DŘEVĚNÉ LEPENÉ NOSNÉ  
SLOUPY A NOSNÍKY**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Vedoucí diplomové práce: Ing. David Herák, Ph.D.**

**Autor diplomové práce: Bc. Petr Sasínek**

**Praha 2009**

|   |                           |
|---|---------------------------|
| Vysoká škola: Česká zemědělská univerzita v Praze | Fakulta: technická        |
| Katedra: mechaniky a strojnictví                  | Akademický rok: 2007/2008 |

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant: **Bc. Petr Sasínek**

Studijní obor: Silniční a městská automobilová doprava

Název práce: Dřevěné lepené nosné sloupy a nosníky

### Zásady pro vypracování:

Cíl práce:

Vytipování výrobně jednoduchých a na úsporu materiálu zaměřených dřevěných profilů.

Osnova práce:

1. Sestavení modelu jednoduchého zkušební sloupu.
2. Návrh experimentální zkušební metody. Použitelná podobnostní kriteria
3. Výroba, proces vyzrání, zatěžování zkušební sloupu.
4. Zpracování výsledků měření, porovnání s teoretickým výpočtem stability.
5. Diskuze a závěr.

Metodika práce:

Shromáždění poznatků o technologii zpracování dřeva vhodného k výrobě lepených profilů. Druhy a únosnosti lepidel. Zajištění výroby zkušebních sloupů. Návrh metody zkoušení ztráty stability. Sestavení podobnostních kritérií.

Rozsah práce: 50 stran textu včetně obrázků, grafů a tabulek

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Dřevěné konstrukce podle Eurokódu 5, STEP 1, Navrhování a konstrukční materiály, 1998 /autorizovaný překlad z anglického vydání Timber Engineering STEP 1, 1995/. ISBN 80-238-2620-4.
2. Dřevěné konstrukce podle Eurokódu 5, STEP 2, Navrhování detailů a nosných systémů, 2004 /autorizovaný překlad z anglického vydání Timber Engineering STEP 2, 1995/. ISBN 80-86-769-13-5.
3. Kuklík, P.: Navrhování dřevěných konstrukcí, ČKAIT, 1997. ISBN 80-86-047-19-9.
4. Zachariáš, L.: Části strojů, ČZU v Praze, 2005. ISBN 80-213-1342-0.
5. Webové stránky: <http://taros-nova.cz>

Vedoucí diplomové práce: Ing. David Herák, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 30. 11. 2007

Termín odevzdání diplomové práce: 30. 4. 2009



  
prof. Ing. Radomír Adamovský, DrSc.

vedoucí katedry

  
prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

děkan

V Praze dne 23. 3. 2009

|   |                           |
|---|---------------------------|
| Vysoká škola: Česká zemědělská univerzita v Praze | Fakulta: technická        |
| Katedra: mechaniky a strojnictví                  | Akademický rok: 2007/2008 |

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant: **Bc. Petr Sasínek**

Studijní obor: Silniční a městská automobilová doprava

Název práce: Dřevěně lepené nosné sloupy a nosníky

### Zásady pro vypracování:

Cíl práce:

Vytipování výrobně jednoduchých a na úsporu materiálu zaměřených dřevěných profilů.

Osnova práce:

1. Sestavení modelu jednoduchého zkušebního sloupu.
2. Návrh experimentální zkušební metody. Použitelná podobnostní kritéria
3. Výroba, proces vyztváření, zatěžování zkušebního sloupu.
4. Zpracování výsledků měření, porovnání s teoretickým výpočtem stability.
5. Diskuze a závěr.

Metodika práce:

Shromáždění poznatků o technologii zpracování dřeva vhodného k výrobě lepených profilů. Druhy a únosnosti lepidel. Zajištění výroby zkušebních sloupů. Návrh metody zkoušení ztráty stability. Sestavení podobnostních kritérií.

Rozsah práce: 50 stran textu včetně obrázků, grafů a tabulek

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Dřevěné konstrukce podle Eurokódu 5, STEP 1, Navrhování a konstrukční materiály, 1998 /autorizovaný překlad z anglického vydání Timber Engineering STEP 1, 1995/. ISBN 80-238-2620-4.
2. Dřevěné konstrukce podle Eurokódu 5, STEP 2, Navrhování detailů a nosných systémů, 2004 /autorizovaný překlad z anglického vydání Timber Engineering STEP 2, 1995/. ISBN 80-86-769-13-5.
3. Kuklík, P.: Navrhování dřevěných konstrukcí, ČKAIT, 1997. ISBN 80-86-047-19-9.
4. Zachariáš, L.: Části strojů, ČZU v Praze, 2005. ISBN 80-213-1342-0.
5. Webové stránky: <http://taros-nova.cz>

Vedoucí diplomové práce: Ing. David Herák, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 30. 11. 2007

Termín odevzdání diplomové práce: 30. 4. 2009



  
prof. Ing. Radomír Adamovský, DrSc.

vedoucí katedry

  
prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

děkan

V Praze dne 23. 3. 2009

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing.Davida Heráka Ph.D. a použil jen pramenů citovaných v přiložené bibliografii.

**V Praze 20. dubna 2009**

**Bc. Petr Sasínek**

**Podpis:**

## **Poděkování**

Za pomoc při zpracování děkuji svému vedoucímu Ing. Davidu Herákovi PhD. Za odborné konzultace děkuji Ing. Janu Reisnerovi PhD. z katedry zpracování dřeva Lesnické a dřevařské fakulty a pracovišti Kloknerova ústavu ČVUT. Dále děkuji Ing. Luboši Sedláčkovi a katedře strojírenské technologie Technické fakulty za pomoc s provedením zkoušek na zkušebních tělesech.

**Bc. Petr Sasínek**



# DŘEVĚNÉ LEPENÉ NOSNÉ SLOUPY A NOSNÍKY

## **Abstrakt:**

Tato diplomová práce obsahuje teoretický návrh a výpočet dřevěných konstrukčních prvků podle metodiky normy Eurokód 5 (Dřevěné konstrukce, Navrhování a konstrukční materiály), dále se zabývá mechanickými a fyzikálními vlastnostmi dřeva, jeho zpracováním pro lepení dřevěných konstrukcí, druhy lepidel a způsobem jejich použití. V této práci je zpracován i způsob a postup výroby lamelového dřeva. Dále tato diplomová práce obsahuje i teoretický návrh jednoho z typů nosníků a návrh modelu jednoduchého zkušebního sloupu. Na základě výpočtu modelu jednoduchého zkušebního sloupu byly vyrobeny zkušební vzorky, na nichž se zkouškami ověřoval teoretický výpočet.

## **Klíčová slova:**

Sloup – svislý konstrukční prvek namáhaný na tlak nebo na vzpěr,

Nosník – vodorovný nebo šikmý konstrukční prvek namáhaný převážně na ohyb,

Vzpěr – způsob namáhání štíhlého tlačného prutu,

Dřevěné lepené konstrukce - konstrukční prvky vyrobené z dřevěných prken (nekonečných lamel) spojovaných speciálními lepidly pomocí lisování.



# **BONDED WOODEN BALKS AND TIMBERS COLUMNS**

## **Summary:**

This diploma work includes theoretical proposal and calculation of the timber work elements according to the methodology of the Eurokód 5 standard (Timber work, Designing and construction materials), further it deals with mechanical and physical characteristics of wood, its processing for gluing of timber works, types of glues and their methods of application. In this work is also elaborated the way of multi-plate wood processing. It also contains theoretical proposal one type of griders and model proposal of the simple experimental column. On the basis of the calculation of the proposal of the simple experimental column were made several specimens which verified theoretical calculation.

## **Key words:**

Column – vertical constructional element subjected to compression or buckling

Grider – horizontal or transversal constructional element subjected especially to bending.

Buckling – the way of subjection of the slender thrust member.

Timber bonded work – constructional element made of wooden boards (neverending multi-plates) bonded with special glues by pressing.

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1.    | Úvod.....   | 1  |
| 2.    | Materiály pro výrobu lepených nosníků a sloupů .....                  | 2  |
| 2.1   | Dřevo .....   | 2  |
| 2.1.1 | Smrkové dřevo.....  | 2  |
| 2.1.2 | Borové dřevo.....   | 2  |
| 2.1.3 | Jedlové dřevo.....  | 3  |
| 3.    | Technologie zpracování dřeva pro výrobu lepených profilů. ....        | 4  |
| 3.1   | Příprava řeziva.....  | 4  |
| 3.1.1 | Vlhkost .....   | 4  |
| 3.1.2 | Třídění a třídy pevnosti .....  | 5  |
| 3.1.3 | Strojní třídění .....   | 7  |
| 3.2   | Výroba lepeného lamelového dřeva.....                                 | 7  |
| 3.3   | Zkouška lepených spojů.....   | 11 |
| 4.    | Druhy a únosnosti lepidel.....  | 12 |
| 4.1   | Druhy lepidel .....   | 12 |
| 4.2   | Únosnosti lepidel a podmínky použití.....                             | 13 |
| 4.3   | Minimální smyková síla v tahu na zkušebních tělesech podle EN 302 ... | 13 |
| 4.4   | Příklad použitelného lepidla .....                                    | 14 |
| 5.    | Konstrukce z lepeného lamelového dřeva .....                          | 15 |
| 5.1   | Lepené lamelové nosníky .....   | 15 |
| 5.1.1 | Pultové nosníky, zakřivené nosníky a sedlové nosníky .....            | 15 |
| 5.1.2 | Příhradové vazníky .....  | 16 |
| 5.1.3 | Rovinné rámy a oblouky.....   | 17 |
| 5.2   | Lepené sloupy.....  | 18 |
| 6.    | Výpočet Nosníku podle Eurokódu 5.....                                 | 19 |
| 7.    | Teorie k výpočtu tlačných prvků.....                                  | 21 |
| 7.1   | Pozadí čar vzpěrného napětí v Eurokódu 5 .....                        | 21 |
| 7.2   | Teorie výpočtu tlačných prutů podle Eurokódu 5 .....                  | 23 |
| 7.2.1 | Relativní štíhlostní poměr:.....                                      | 23 |
| 7.2.2 | Kombinace ohybu a osového tlaku .....                                 | 23 |
| 7.3   | Kombinace způsobů uložení a kritické osově síly dle Leonarda Eulera.. | 24 |
| 7.4   | Pružné chování podle Eulera .....                                     | 26 |
| 7.5   | Převod z prostého tlaku na vzpěr.....                                 | 27 |
| 8.    | Návrh jednoduchých zkušebních prvků.....                              | 28 |
| 8.1   | Stanovení pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny dle ČSN EN 408 .....   | 28 |
| 8.1.1 | Zkušební těleso.....  | 28 |
| 8.1.2 | Zkušební postup .....   | 28 |
| 8.1.3 | Vyjádření výsledků.....   | 29 |
| 8.2   | Výroba zkušebních těles .....   | 29 |
| 8.3   | Výsledky měření .....   | 30 |
| 8.4   | Statistické vyhodnocení měření .....                                  | 31 |
| 8.5   | Způsoby porušení jednotlivých vzorků .....                            | 33 |
| 8.6   | Stanovení modulu pružnosti dřeva v tlaku podle ČSN EN 408 .....       | 35 |
| 8.6.1 | Zkušební těleso.....  | 35 |
| 8.6.2 | Zkušební postup .....   | 35 |
| 8.6.3 | Vyjádření výsledků.....   | 35 |
| 8.7   | Určení optimální velikosti zkušebních těles.....                      | 36 |
| 8.8   | Vzorový výpočet jednoho prvku podle Eurokódu 5 .....                  | 36 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 8.9  | Zpracování teoretických výpočtů podle Eurokódu 5 pro sadu vzorků ..... | 38  |
| 8.10 | Naměřené hodnoty na zkušebních tělesech .....                          | 39  |
| 8.11 | Porovnání naměřených hodnot s výpočty .....                            | 42  |
| 9.   | Diskuze .....  | 44  |
| 10.  | Závěr .....  | 45  |
|      | Seznam použité literatury:.....  | 47  |
|      | Seznam tabulek:.....   | 48  |
|      | Seznam grafů:.....   | 48  |
|      | Seznam obrázků: .....  | 49  |
|      | Přílohy:.....  | I   |
|      | Příloha A: (normativní) .....  | I   |
|      | Příloha B: (normativní) .....  | II  |
|      | Příloha C: Výroba dřevěného lepeného vazníku nebo sloupu.....          | III |
|      | Příloha D: Použitá označení ve vzorcích.....                           | VI  |

# 1. Úvod

Tato diplomová práce pojednává o dřevěných lepených nosných sloupech a nosnících navržených s důrazem na úsporu materiálu. Úvodem jsou vysvětleny nejdůležitější základní fyzikální vlastnosti dřeva a chování dřeva v závislosti na změně vlhkosti při použití profilů, které byly vytvořeny slepením z jednotlivých lamel. Dále je vysvětlen způsob výroby lepeného lamelového dřeva a jsou popsány druhy a únosnosti lepidel, která se k lepení dřevěných konstrukcí používají. Následuje rozdělení nosníků a profilů sloupů a výpočty pro návrh vybraných profilů.

Hlavním úkolem práce je sestavení modelu jednoduchého zkušební sloupu, návrh zkušební metodiky, popis postupu výroby zkušebních těles a sestavení teoretického výpočtu. Cílem práce je návrh postupu a provedení zkoušek tlačných prvků s ohledem na vzpěr a porovnání teoretických výpočtů se skutečně naměřenými hodnotami získaných na zkušebních tělesech - modelech sloupů.

## 2. Materiály pro výrobu lepených nosníků a sloupů

Základem pro výrobu dřevěných lepených konstrukčních prvků je přírodní materiál dřevo a speciální druhy lepidel. Využití spojení obou materiálů umožňuje zlepšení některých vlastností dřeva a návrh konstrukčních prvků téměř libovolného tvaru.

Pod pojmem **lepené lamelové dřevo** se rozumí dřevo, které se vyrábí ve specializovaném závodě, z dřevěných prken předepsané tloušťky a šířky, lepením speciálními lepidly. Slepováním prken zubovitým spojem vzniká tzv. nekonečná lamela.

### 2.1 Dřevo

Dřevo můžeme charakterizovat jako přirozený organický materiál, tvořený buněčnou strukturou. Je složeno z kompozitu celulosy, hemicelulosy, ligninu a dalších doplňujících látek. Jeho základní výhodou je, že se jedná o obnovitelný zdroj. Naproti tomu musíme počítat s jeho značnou nehomogenitou, anizotropií a hydroskopičností. Z jehličnatých rostlin je dřevo měkké, z listnatých rostlin tvrdé. Pro dřevěné prvky se nejčastěji používá řezivo z dřevin jehličnatých. Pro výrobu dřevěných lepených konstrukčních prvků se používá dřevo v doporučené třídě pevnosti, podle jednoho z možných označení SB a SA, hoblované, tříděné, průkazně odzkoušené. Norma ČSN EN 338 (73 1711), „Konstrukční dřevo – Třídy pevnosti“ udává pro každou z devíti tříd pevnosti dřeva charakteristické hodnoty jehličnatého a listnatého dřeva.

#### 2.1.1 Smrkové dřevo

Používá se na konstrukce nejčastěji. Dřevo je mírně smolnaté s pevně vrostlými suky, poměrně měkké, pružné, snadno se zpracovává a je vhodné k lepení. V suchu má velkou trvanlivost, ve vlhku rychle podléhá hnilobě.

#### 2.1.2 Borové dřevo

Dřevo je poměrně značně sukovité, díky vysokému obsahu pryskyřice dobře odolává vlhkosti. Nevýhodou je poměrně vysoká křehkost a menší pružnost, proto se nepoužívá na prvky namáhané na ohyb. Je velmi odolné proti častému střídání vlhkosti.

### **2.1.3 Jedlové dřevo**

Oproti dřevu smrkovému bývá zpravidla vyšší jakosti, má menší množství pryskyřice. Celkově je náročnější na zpracování a má menší trvanlivost oproti dřevu smrkovému nebo borovému.

### 3. Technologie zpracování dřeva pro výrobu lepených profilů.

**Lepené lamelové dřevo** - užitné vlastnosti výrobků předepisuje norma ČSN EN 386 (73 2052) „Lepené lamelové dřevo – Požadavky na užitné vlastnosti a minimální výrobní požadavky“. Třídy pevnosti pro lamelové dřevo jsou uvedeny v normě EN 518 „Konstrukční dřevo. Třídění. Požadavky na normy pro vizuální třídění podle pevnosti“, v ČR jako ČSN EN 518. Pro navrhování kombinovaných průřezů jsou stanoveny různé skladby podle EN 338 (Konstrukční dřevo – Třídy pevnosti). Požadavky předepsané normou ČSN EN 385,386, slouží k zajištění výroby spolehlivých trvanlivých lepených spojů tak, aby jakost lepení byla zachována minimálně po dobu životnosti stavebního objektu. Dále jsou předepsány zkoušky lepených spojů podle ČSN EN 391 zkouška delaminace a ČSN EN 392 smyková zkouška.

#### 3.1 Příprava řeziva

Zajištění potřebné vlhkosti a jakosti řeziva.

##### 3.1.1 Vlhkost

Vlhkost řeziva se zjišťuje elektrickým vlhkoměrem tzv. pracovní metodou pro vlhkosti 6 - 28% ( $\pm 2\%$ ), nebo pro přesnější měření tzv. kontrolní váhovou metodou dle ČSN EN 13183-1. Pro lepené konstrukce je nezbytné zajistit vlhkost nižší než 15% z důvodu možného následného sesychání.

Vlhkost, které bude konstrukční prvek vystaven má na návrh konstrukce významný vliv. S rostoucí vlhkostí klesá pevnost. Proto se konstrukce rozdělují do tří tříd podle daných podmínek prostředí. Vlhkost dřeva je v rovnováze s relativní vlhkostí okolního vzduchu a teplotou.

**Třída vlhkosti 1** – vlhkost materiálu odpovídající teplotě 20 °C a relativní vlhkost vzduchu >65% pouze několik týdnů v roce. Průměrná vlhkost u dřeva je 12%.

**Třída vlhkosti 2** – vlhkost materiálu odpovídající teplotě 20 °C a relativní vlhkost vzduchu >85% pouze několik týdnů v roce. Průměrná vlhkost u dřeva je 20%.



**Třída vlhkosti 3** – klimatické podmínky vedou k vlhkosti vyšší než ve třídě vlhkosti 2.

### 3.1.2 Třídění a třídy pevnosti

Třídění vychází ze zjištění (odhadu) skutečných mechanických vlastností řeziva a řídí se normou ČSN EN 518 respektive ČSN 73 2824-1. Používají se parametry jako :

- Sukovitost
- Rozměry trhlin
- Zabarvení dřeva
- Tloušťka letokruhů
- Rozsah poškození vláken (hmyzem, hnilobou a pod.)
- Zakřivení způsobené sesycháním

|               |     |     |     |
|---------------|-----|-----|-----|
| ČSN 49 1531-1 | S0  | S1  | SII |
| ČSN 73 2824-1 | S13 | S10 | S7  |
| ČSN EN 338    | C27 | C22 | C16 |

Tab. 1: Třídy pevnosti a jakostní tříd, označení podle staré a nové normy

| Označení      |              | C14   | C16   | C18   | C22    | C24    | C27    | C30    | C35    | C40    |
|---------------|--------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $f_{m,k}$     | [ $N/mm^2$ ] | 14    | 16    | 18    | 22     | 24     | 27     | 30     | 35     | 40     |
| $f_{t,0,k}$   |              | 8     | 10    | 11    | 13     | 14     | 16     | 18     | 21     | 24     |
| $f_{t,90,k}$  |              | 0,3   | 0,3   | 0,3   | 0,3    | 0,4    | 0,4    | 0,4    | 0,4    | 0,4    |
| $f_{c,0,k}$   |              | 16    | 17    | 18    | 20     | 21     | 22     | 23     | 25     | 26     |
| $f_{c,90,k}$  |              | 4,3   | 4,6   | 4,8   | 5,1    | 5,3    | 5,6    | 5,7    | 6,0    | 6,3    |
| $f_{v,k}$     |              | 1,7   | 1,8   | 2,0   | 2,4    | 2,5    | 2,8    | 3,0    | 3,4    | 3,8    |
| $E_{0,mean}$  | [ $N/mm^2$ ] | 7 000 | 8 000 | 9 000 | 10 000 | 11 000 | 12 000 | 12 000 | 13 000 | 14 000 |
| $E_{0,05}$    |              | 4 700 | 5 400 | 6 000 | 6 700  | 7 400  | 8 000  | 8 000  | 8 700  | 9 400  |
| $E_{90,mean}$ |              | 230   | 270   | 300   | 330    | 370    | 400    | 400    | 430    | 470    |
| $G_{mean}$    |              | 440   | 500   | 560   | 630    | 690    | 750    | 750    | 810    | 880    |
| $\rho_k$      | [ $kg/m^3$ ] | 290   | 310   | 320   | 340    | 350    | 370    | 380    | 400    | 420    |

Tab. 2: Třídy pevnosti a charakteristické hodnoty podle EN 338. Jehličnaté a topolové dřevo.[1]

| Třída pevnosti |              | GL20   | GL24   | GL28   | GL32   | GL36   |
|----------------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $f_{m,g,k}$    | [ $N/mm^2$ ] | 20     | 24     | 28     | 32     | 36     |
| $f_{t,0,g,k}$  |              | 15     | 18     | 21     | 24     | 27     |
| $f_{t,90,g,k}$ |              | 0,35   | 0,35   | 0,45   | 0,45   | 0,45   |
| $f_{c,0,g,k}$  |              | 21     | 24     | 27     | 29     | 31     |
| $f_{c,90,g,k}$ |              | 5,0    | 5,5    | 6,0    | 6,0    | 6,3    |
| $f_{v,g,k}$    |              | 2,8    | 2,8    | 3,0    | 3,5    | 3,5    |
| <hr/>          |              |        |        |        |        |        |
| $E_{0,mean,g}$ | [ $N/mm^2$ ] | 10 000 | 11 000 | 12 000 | 13 500 | 14 500 |
| $E_{0,05,g}$   |              | 8 000  | 8 800  | 9 600  | 10 800 | 11 600 |
| $\rho_{g,k}$   | [ $kg/m^3$ ] | 360    | 380    | 410    | 440    | 480    |

Tab. 3: Třídy pevnosti a charakteristické hodnoty podle prEN 1194 pro lepené lamelové dřevo.[1]

Průkazné zkoušky pro skutečné ověření mechanických a fyzikálních vlastností např. zjištění statického modulu pružnosti  $E_{stat}$  pomocí ohybové nebo tlakové zkoušky je předepsáno normou ČSN EN 408 Dřevěné konstrukce – Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo – Stanovení některých fyzikálních vlastností.

$\gamma_m$  – doporučený dílčí součinitel pro vlastnost materiálu a únosnost

Pro rostlé dřevo je hodnota 1,3 a pro lepené lamelové 1,25.

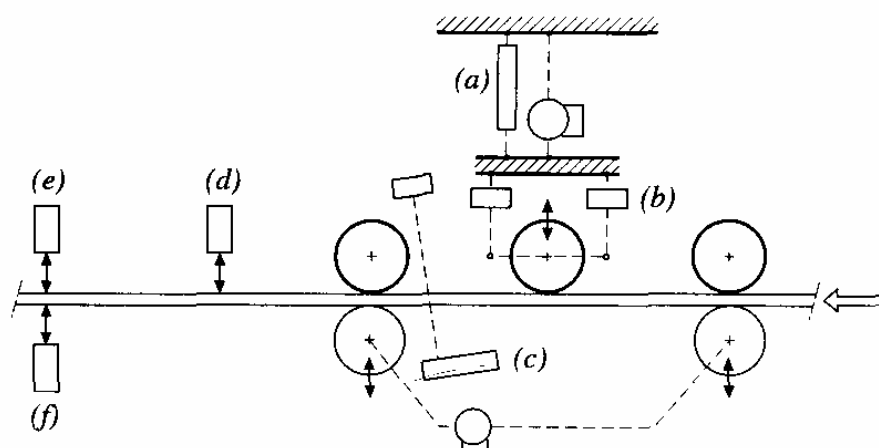
$k_{mod}$  – modifikační součinitel pevnosti pro třídy provozu a třídy trvání zatížení, je zobrazen v tabulce 4.

| Materiál              | Norma      | Třída provozu | Třída trvání zatížení |                     |                      |                     |                     |
|-----------------------|------------|---------------|-----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
|                       |            |               | Stálé zatížení        | Dlouhodobé zatížení | Střednědobé zatížení | Krátkodobé zatížení | Okamžikové zatížení |
| Rostlé dřevo          | EN 14081-1 | 1             | 0,60                  | 0,70                | 0,80                 | 0,90                | 1,10                |
|                       |            | 2             | 0,60                  | 0,70                | 0,80                 | 0,90                | 1,10                |
|                       |            | 3             | 0,50                  | 0,55                | 0,65                 | 0,70                | 0,90                |
| Lepené lamelové dřevo | EN 14080   | 1             | 0,60                  | 0,70                | 0,80                 | 0,90                | 1,10                |
|                       |            | 2             | 0,60                  | 0,70                | 0,80                 | 0,90                | 1,10                |
|                       |            | 3             | 0,50                  | 0,55                | 0,65                 | 0,70                | 0,90                |

Tab. 4: Hodnoty modifikačního součinitele pevnosti v závislosti na délce trvání zatížení.

### 3.1.3 Strojní třídění [ 10 ]

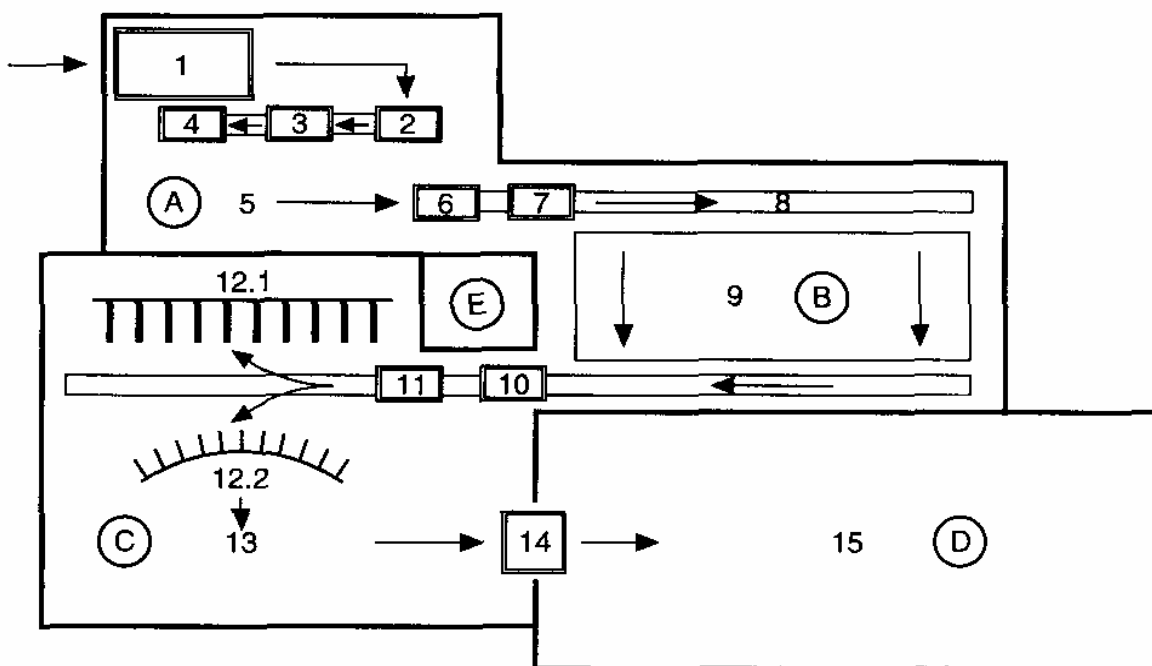
Je základní nedestruktivní operací pro zlepšení jakosti řeziva. Na základě strojního třídění je z lamely odstraněna část s horšími mechanickými vlastnostmi, než je požadováno a následně je lamela připravena „cinkováním“ na spoj do nekonečného prkna, které je dále kráceno dle požadované délky.



Obr. 1: 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.[ 1 ]

### 3.2 Výroba lepeného lamelového dřeva [ 10 ]

Výroba lepeného lamelového dřeva sestává z procesů znázorněných na obr. 4 – z pracovních postupů dále popsanych



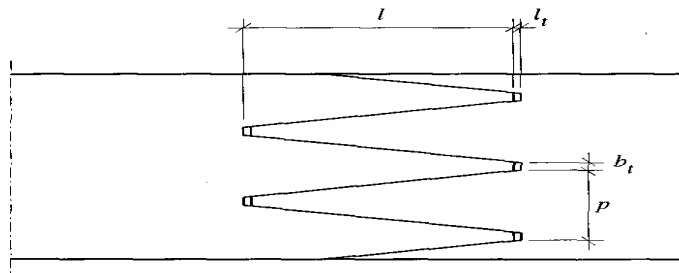
Obr. 2: Výroba lepeného lamelového dřeva. [ 1 ]

#### *Příprava řeziva (prostor A)*

Lepené lamelové dřevo sestává z řeziva s konečnou tloušťkou nejvýše 45 mm a délkou mezi 1,5 a 5,0 m. Řezivo přicházející ze skladu ve venkovním prostředí, se uměle vysouší (1). Důvodem je, že používaná lepidla vyžadují vlhkost dřeva nejvýše 15%. Po sušení se řezivo předběžně frézuje (2) a třídí (3). Kontroluje se vlhkost dřeva, řezivo se kapuje (4) a ukládá do hrání (5).

#### *Nastavování zubovitým spojem (prostor B)*

Přířezy se na čelních koncích vzájemně spojují zubovitým spojem a vytvářejí tak tzv. nekonečnou lamelu. Typický zubovitý profil s označením podle prEN 385 „Konstrukční dřevo nastavované zubovitým spojem - Požadavky na užitné vlastnosti a minimální výrobní požadavky“, je znázorněn na obr. 3.

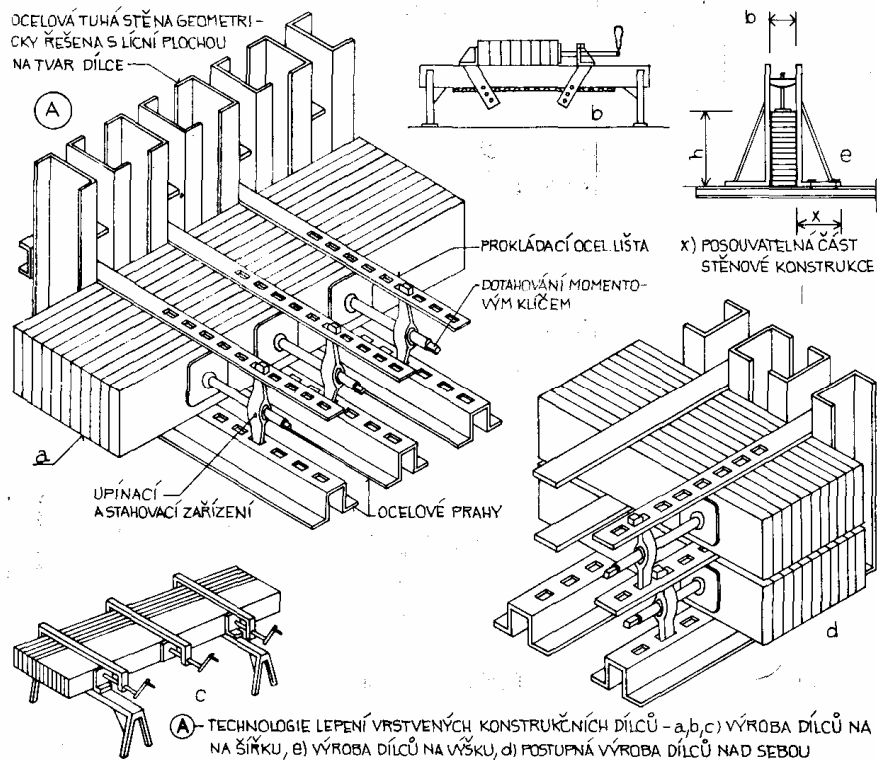


Obr. 3: Zubovitý profil ( $l$  = délka ozubu,  $p$  = rozteč ozubů,  $b_t$  = šířka tupého zakončení ozubů,  $l_t$  = vůle v zubovitém spoji [ 1 ]

Zubovitý profil se vyfrézuje v čele přířezu a nanese se lepidlo (6). Potom se přířezy slisují po dobu nejméně dvou sekund (7), takže jsou třením působícím mezi ozuby drženy pohromadě. Z výsledné nekonečné lamely se odřezávají lamely požadované délky (8) a ukládají se do hráni (9). Doba tohoto meziskladování musí být zvolena tak, že je zaručeno vytvrzení lepidla, než se bude pokračovat v dalším zpracování lamel.

#### *Lepení (prostor C)*

Lamely se frézují (10) a nanáší se lepidlo (11). Lamely se uloží nastojato vedle sebe a zalisují se. Lisovací přípravky umožňují výrobu přímých (12.1) a zakřivených (12.2) prvků. Po lisování (většinou až do příštího dne) se nosníky skladují až do konečné úpravy.



Obr. 4: Technologie lepení vrstvených konstrukčních prvků [ 6 ]

Proces lepení sestává ze dvou stupňů:

- nanesení tekutého lepidla, které smáčí povrchy spojovaných částí tak, že ve styčných plochách vznikají přitažlivé síly mezi lepidlem a molekulami dřeva
- vytvrzování – přechod tekutého lepidla vyplňující spáry mezi jednotlivými částmi do pevné fáze s dostatečnou pevností požadovanou po celou životnost konstrukce.

#### Konečná úprava (prostor D)

Nosníky se frézují z bočních stran (14) pro odstranění zbytků lepidla a dosažení rovinných povrchů. Nakonec následuje konečná úprava nosníků (15). Konečná úprava zahrnuje všechna předběžná a přípravná opatření, která se nemusí provádět na staveništi (např. vrtání otvorů pro spojovací prostředky nebo aplikace ochranných látek na dřevo).

### *Příprava lepidel (prostor E)*

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 (smíchání pryskyřice a tvrdidla). Kromě toho musí být vytvořeny možnosti pro vhodné skladování pryskyřice a tvrdidla a prostor pro čištění zařízení na lepení.

Požadavky na užité vlastnosti a výrobní požadavky:

Požadavky předepsané v EN 386 „Lepené lamelové dřevo - Požadavky na užité vlastnosti a minimální výrobní požadavky“ slouží k dosažení výroby spolehlivých a trvanlivých lepených spojů, tak aby jakost lepení byla zachována po uvažovanou dobu životnosti stavebního objektu.

### **3.3 Zkouška lepených spojů**

Zkoušky jsou založeny na zkouškách spojů na zkušebním tělese plného průřezu, které se odřízne z konstrukčního prvku z lepeného lamelového dřeva v místě spoje. Podle třídy použití se provádí zkouška delaminace dle ČSN EN 391 (73 2053) nebo bloková smyková zkouška podle ČSN EN 392 (73 2055).



## 4. Druhy a únosnosti lepidel

Lepidla slouží ke zlepšení základních vlastností dřeva jako konstrukčního materiálu. Pro klasifikaci lepidel pro dřevěné konstrukční prvky existuje pouze jedna zavedená evropská norma ČSN EN 301( 66 8504) „ Fenolická a aminová lepidla pro dřevěné konstrukce - Klasifikace a technické požadavky“. Používaná lepidla mají vyšší pevnost než základní materiál dřevo.

### 4.1 Druhy lepidel [ 10 ]

Současné používané druhy lepidel pro nosné dřevěné konstrukční prvky:

- Rezorcinolformaldehydová a fenolrezorcinolformaldehydová pryskyřičná lepidla
- Melaminmočovinoformaldehydová pryskyřičná lepidla
- Kaseinová lepidla – nejstarší průmyslově vyráběné lepidlo, používané při výrobě lamelového dřeva již před rokem 1920 pro použití v interiéru i exteriéru. Pro zamezení napadení spojů plísněmi je nutno použít vhodné fungicidy. EN se připravuje.

Nová lepidla vhodná pro nosné dřevěné prvky:

- Epoxidová lepidla, dvousložková
- Polyuretanová lepidla, dvousložková
- Polyuretanová lepidla, jednosložková
- Emulzní polymerní isokyanatany, dvousložková lepidla

Lepidla pro nosné dřevěné prvky se používají pro vzájemné spojování více dřevěných částí takovým způsobem, že ve výsledku staticky působí jako celek. Lepidlo vyplňuje spáry mezi jednotlivými prvky a vytváří adhezní spojení mezi jednotlivými prvky, které je stejně pevné a trvanlivé jako soudržné síly uvnitř prvků. Samotná vrstva lepidla musí vykazovat dostatečnou pevnost a trvanlivost, aby při uvažovaném použití konstrukčních prvků byla v průběhu předpokládané životnosti konstrukce trvale účinná. Pro zajištění trvalého kontaktu, který je pro výrobu lepených spojů potřebný, musí být lepidlo v určitém stadiu procesu lepení v tekutém stavu.

## 4.2 Únosnosti lepidel a podmínky použití

Lepidla musí splňovat požadavky pro použití v klimatických podmínkách, typ lepidla I nebo II, uvedené v ČSN EN 301(66 8504) a ČSN EN 302 část1-4 (66 8531). Případně podle typu použitého lepidla i národní normy např. BS a DIN)

| Teplota | Odpovídající klimatické <sup>1)</sup> podmínky | Příklady  | Typ lepidla /<br>Třída vlhkosti |
|---------|--|---|---------------------------------|
| >50 °C  | nespecifikovány                                | prodloužené vystavení vlivu vysoké teploty  | <b>I / 1,2,3</b>                |
| <50 °C  | >85 % relativní vlhkosti při 20 °C             | úplné vystavení vlivu povětrnosti   | <b>I / 1,2,3</b>                |
| <50 °C  | <85 % relativní vlhkosti při 20 °C             | vyhřívána a větraná budova; exteriér chráněný před vlivem povětrnosti; Krátkodobé vystavení vlivu povětrnosti | <b>II / 1,2</b>                 |

<sup>1)</sup> 85 % relativní vlhkosti při 20 °C má za následek obsah vlhkosti přibližně 20 % u měkkých a většiny tvrdých dřev a o něco nižší obsah vlhkosti u dřevěných dílců

Tab. 5: Rozdělení lepidel podle tříd a jejich použití [ 7 ]

## 4.3 Minimální smyková síla v tahu na zkušebních tělesech podle EN 302

Norma udává hodnoty pevnosti v tahu pro tenkou a silnou vrstvu lepidla na zkušebních tělesech z buku. Hodnoty jsou zobrazeny v tabulce 2.

| Podmínky expozice<br>(viz příloha A) | Typ lepidla  |                                     |                          |                                     |
|--------------------------------------|--|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|
|                                      | I  | II                                  | I                        | II                                  |
|                                      | tenká vrstva lep. 0,1mm                              |                                     | silná vrstva 1,0 ±0,1 mm |                                     |
|                                      | Minimální pevnost při přetržení [N/mm <sup>2</sup> ] |                                     |                          |                                     |
| A1                                   | 10,0   | 10,0                                | 8,0                      | 8,0                                 |
| A2                                   | 6,0  | 6,0                                 | 4,0                      | 4,0                                 |
| A3                                   | 8,0  | 8,0                                 | 6,4                      | 6,4                                 |
| A4                                   | 6,0  | Nepožaduje se pro tento typ lepidla | 4,0                      | Nepožaduje se pro tento typ lepidla |
| A5                                   | 8,0  |                                     | 6,4                      |                                     |

Tab. 6: Min. smyková síla na zkušebních tělesech [ 7 ]

| Podmínky expozice<br>(viz příloha B) | Typ lepidla                               |  |
|--------------------------------------|---|--|
|                                      | I   | II                                     |
|                                      | Maximální delaminace u každého vzorku [%] |  |
| BI                                   | nepožaduje se pro tento<br>typ lepidla    | 10                                     |
| B2                                   | 5   | nepožaduje se pro tento<br>typ lepidla |

Tab. 7: Požadavky na odolnost proti delaminaci. [ 7 ]

#### 4.4 Příklad použitelného lepidla

PU lepidlo na dřevo D4 obchodní značka Fix Flex výrobce Den Braven

##### Technická data:

|                   |                                 |
|-------------------|---------------------------------|
| Základ / Materiál | polyuretan                      |
| Tepelná odolnost  | -30 / +100 °C (po vytvrzení)    |
| Aplikační teplota | +5 / +30 °C                     |
| Otevřený čas      | 30 minut                        |
| Lisovací čas      | 8 – 12 hodin                    |
| Úplné vytvrzení   | 24 – 48 hod.                    |
| Pevnost v tahu    | 160 kg/cm <sup>2</sup> za 7 dní |
| Spotřeba lepidla  | 150-250 g/m <sup>2</sup>        |
| Třída namáhání    | D4 podle ČSN EN 204             |

##### Použití:

Pro lepení plošných spojů s požadavkem odolnosti proti povětrnostním vlivům a teplotním výkyvům. Jednosložkové lepidlo na bázi polyuretanu, vytvrzující absorpcí vzdušné vlhkosti, vytvářející pevný a vodovzdorný spoj. Lze použít pro lepení veškerých dřevěných konstrukcí, sendvičových hranolů a trámů, ráků oken a dveří.

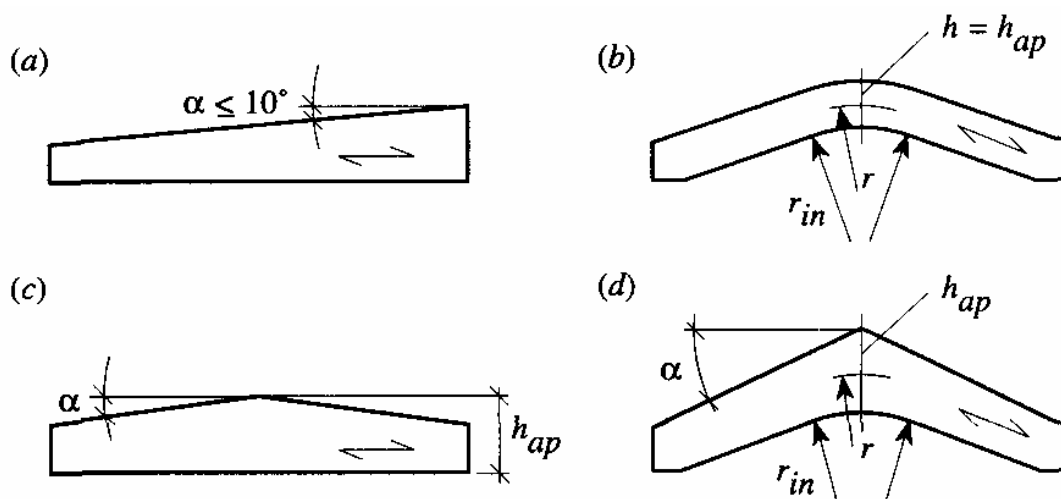
## 5. Konstrukce z lepeného lamelového dřeva

Příklady použití lepeného lamelového dřeva na nosníky, vazníky, rámové konstrukce a sloupy.

### 5.1 Lepené lamelové nosníky [ 10 ]

#### 5.1.1 Pultové nosníky, zakřivené nosníky a sedlové nosníky

Lepené lamelové nosníky jsou často vyráběny s proměnnou výškou, s přímým nebo zakřiveným dolním okrajem, tak aby vyhovovaly architektonickým požadavkům návrhu, nebo pro vytvoření sedlových střech s co největším vnitřním prostorem a pro zmenšení výšky vnějších stěn v podporách. Nejčastěji používanými tvary nosníků jsou pultový nosník, zakřivený nosník stálé výšky a sedlový nosník s přímým nebo zakřiveným dolním okrajem (viz obr. 5).

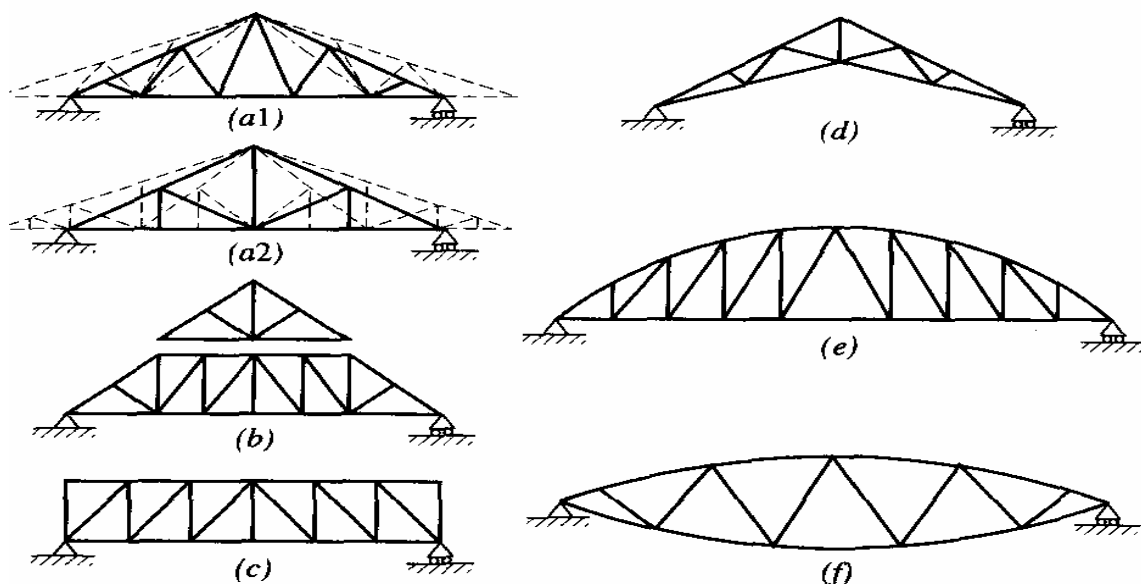


Obr. 5: (a) Pultový nosník (b) Zakřivený nosník stálé výšky (c) Sedlový nosník s přímým dolním okrajem (d) se zakřiveným dolním okrajem

U těchto nosníků se v závislosti na tvaru a na způsobu výroby vyskytují oblasti s přeřezanými vlákny dřeva a vrcholové oblasti se zakřivenými lamelami nebo bez zakřivení. Přeřezaná vlákna mají být v tlačené oblasti nosníku, aby lamely v tažené oblasti probíhaly rovnoběžně s okrajem nosníku.

### 5.1.2 Příhradové vazníky

Příhradové vazníky se vyrábějí z rostlého dřeva i z lamelového dřeva. Pro výrobu příhradových vazníků s větším rozpětím než 30 m a konstrukce, u nichž má povrch zůstat bez trhlin se používají pruty z lepeného lamelového dřeva. Pro příhradové nosníky značně zatížené s velkými rozpětí lze použít členěné průřezy z lamelového dřeva. U příhradových nosníků lze přizpůsobit konstrukční výšku, průřez a jakost materiálu požadovanému ohybovému momentu. Výhodou oproti plnostěnným nosníkům je možnost vedení instalačních potrubí, např. větracích. Nejčastěji používaným dřevěným příhradovým vazníkem je trojúhelníkový vazník (viz obr. 6). Uspořádání mezipásových prutů se má zvolit tak, aby bylo možné co nejhospodárnější dimenzování průřezů prutů a spojů. Pro minimalizaci ohybových napětí pásu a vzpěrných délek tlačенého pásu se může volbou vzdálenosti vaznic popř. soustředěných zatížení předem stanovit uspořádání mezipásových prutů i vzdálenosti styčniců. Směr mezipásových prutů se má zvolit tak, aby krátké mezipásové pruty byly namáhány tlakem a dlouhé mezipásové pruty tahem, aby nebylo nutné přidavné vyztužení mezipásových prutů s ohledem na vzpěr.

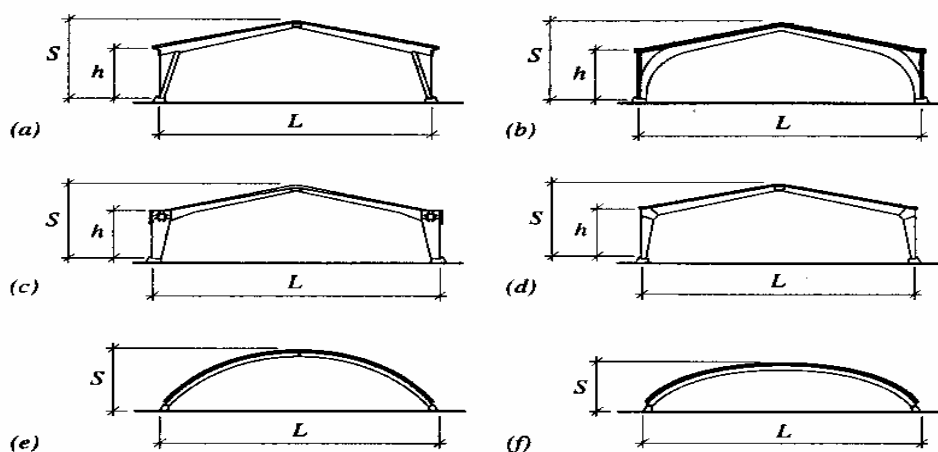


Obr. 6: Typy příhradových vazníků: (a1, a2) trojúhelníkový vazník, (b) složený trojúhelníkový vazník, (c) přímopásový příhradový vazník, (d) nůžkový vazník, (e) obloukový vazník, (f) nosník čočkového tvaru. [ 1 ]

### 5.1.3 Rovinné rámy a oblouky

Rámy a oblouky jsou často hlavními nosnými prvky prostorových konstrukcí hal s obdélníkovou nebo kruhovou půdorysnou plochou, používaných typickým způsobem pro sportovní, plavecké nebo skladovací haly. Rozpětí jsou v rozmezí 20 až 100 m, délka haly bývá 2 až 3 násobkem rozpětí. Konstrukční výška je zpravidla mezi 10 a 30 m. Z výrobních a přepravních důvodů se rámy obvykle vytvářejí jako trojkloubové s jedním kloubem v každé podpoře a jedním kloubem ve vrcholu. Šířka průřezu z lepeného lamelového dřeva může být přitom až 240 mm a jeho výška až 2 m.

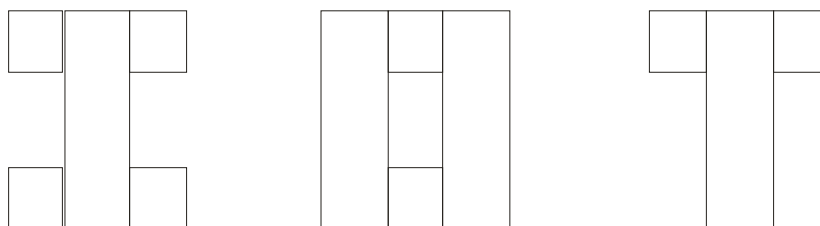
Na obr. 7 je znázorněno šest rozdílných konstrukčních typů ráků. Obr. (a) ukazuje rák s rozebíratelným rámovým rohem, u kterého je rohový moment ráku přenášen jedním taženým a jedním tlačným prutem. Na obr. (d) jsou stojka a příčle spojeny rohovým prvkem pomocí zubovitého spoje. Na obr. (c) je jednodílný průřez příčle vložen mezi dvojdílnými stojkami z lepeného dřeva, které jsou po jejich výšce spojeny poddajně. Rohový spoj je vytvořen kruhovitě uspořádanými hmoždíky. Zakřivený rák podle obr. (b) nakonec vede k obloukům, které jsou znázorněny jako trojkloubová varianta na obr. (e) a jako dvojkoubová varianta na obr. (f). Poslední varianta se může používat pouze pro ploché střechy, protože konstrukční výška je zpravidla omezena z přepravních důvodů.



Obr. 7: Ráky: (a) s rozebíratelným rámovým rohem, (b) se zakřiveným rámovým rohem, (c) s kruhem hmoždíků, (d) s rámovým rohem se zubovitým spojem; Oblouky: (e) trojkloubový, (f) dvojkoubový plochý.

## 5.2 Lepené sloupy

Základem pro výrobu lepených sloupů je lepené lamelové dřevo. Výhodou použití tohoto materiálu je především vyšší únosnost a tím efektivnější využití materiálu. Lepením je možné vytvořit různé profily např. písmene I, T nebo uzavřený dutý profil. Další možností je kombinace s jinými dřevěnými materiály, jakou jsou překližky a tím zvýšit únosnost v nejméně zatíženém okraji sloupu. Příklady některých možných průřezů sloupů jsou na následujícím obrázku číslo 8.



*Obr. 8: Některé z možných tvarů které lze lepením vytvořit I profil, uzavřený profil a T profil*

Při lepení libovolných profilů je nutné zajistit, aby lepená smyková plocha měla minimálně takovou pevnost jako je pevnost dřevěného materiálu rovnoběžně s vlákny a pevnost v tahu kolmo na vlákna.



## 6. Výpočet Nosníku podle Eurokódu 5 [ 10 ]

Příklad teoretického návrhu zakřiveného nosníku stálé výšky

Materiál : Lepené lamelové dřevo smrku, třída pevnosti GL 28

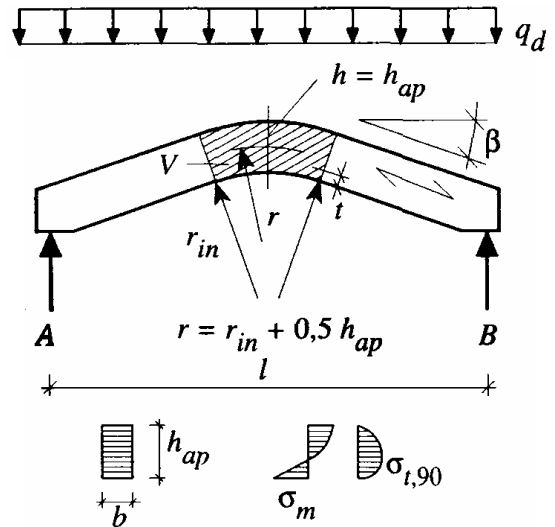
geometrické a materiálové parametry:

$$\begin{aligned} l &= 20\text{m} & q_d &= 7\text{kN/m} \\ h &= 1,0\text{m} & b &= 0,2\text{m} \\ t &= 30\text{mm} & k_{mod} &= 0,8 \\ r &= 20\text{m} & r_{in} &= 19,5\text{m} \end{aligned}$$

$$\alpha = 10^\circ$$

$$k_4, k_5 \text{ a } k_7 = 0, \text{ protože } \alpha = 0^\circ$$

$$M_{ap,d} = \frac{1}{8} q_d l^2 \quad M_{ap,d} = 350 \text{ kNm}$$



Napětí za ohybu ve vrcholové části

$$k_l = k_1 + k_2 \frac{h_{ap}}{r} + k_3 \left( \frac{h_{ap}}{r} \right)^2 + k_4 \left( \frac{h_{ap}}{r} \right)^3 = 1 + 0,35 \frac{1}{20} + 0,6 \left( \frac{1}{20} \right)^2 = 1,019 \quad 6.1$$

$$k_r = 1,0 \left( \frac{r_{in}}{t} > 240 \right) \quad 6.2$$

$$\sigma_{m,d} = k_l \frac{6M_{ap,d}}{bh_{ap}^2} = 1,019 \frac{6 \cdot 350 \cdot 10^6}{200 \cdot 1000^2} = 10,7 \text{ N/mm}^2 \quad 6.3$$

Napětí v tahu kolmo k vláknům ve vrcholové části

$$V = \frac{\beta\pi}{180} b(h_{ap}^2 + 2r_{in}h_{ap}) = \frac{10 \cdot \pi}{180} 0,2(1^2 + 2 \cdot 19,5 \cdot 1) = 1,4 \text{ m}^3 \quad 6.4$$

$$k_{dis} = 1,4$$

$$k_{vol} = \left( \frac{V_{ol}}{V} \right)^{0,2} = \left( \frac{0,01}{1,4} \right)^{0,2} = 0,37 \quad 6.5$$

$$k_p = k_5 + k_6 \left( \frac{h_{ap}}{r} \right) + k_7 \left( \frac{h_{ap}}{r} \right)^2 = 0,25 \left( \frac{1}{20} \right) = 0,013 \quad 6.6$$

Ohybový moment ve vrcholu

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \frac{6M_{ap,d}}{bh_{ap}^2} = 0,013 \frac{6 \cdot 350 \cdot 10^6}{200 \cdot 1000^2} = 0,131 \text{ N/mm}^2 \quad 6.7$$

Charakteristické vlastnosti materiálu (GL28,prEN 1194)

$$f_{m,g,k} = 24 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{t,90,g,k} = 0,45 \text{ N/mm}^2$$

Návrhová pevnost v tahu kolmo k vláknům

$$f_{t,90,g,d} = \frac{k_{\text{mod}} f_{t,90,g,k}}{\gamma_m} = \frac{0,8 \cdot 0,45}{1,3} = 0,277 \text{ N/mm}^2 \quad 6.8$$

Návrhová pevnost v ohybu

$$f_{m,g,d} = \frac{k_{\text{mod}} f_{m,g,k}}{\gamma_m} = \frac{0,8 \cdot 28}{1,3} = 17,2 \text{ N/mm}^2 \quad 6.9$$

**Ověření únosnosti:**

$$\sigma_{t,90,d} = 0,131 \text{ N/mm}^2 \leq k_{\text{Vol}} k_{\text{dis}} f_{t,90,g,d} = 0,37 \cdot 1,4 \cdot 0,277 = 0,144 \text{ N/mm}^2$$

**VYHOVUJE**

$$\sigma_{m,d} = 10,7 \leq k_r f_{m,g,d} = 1,0 \cdot 17,2 = 17,2 \text{ N/mm}^2$$

**VYHOVUJE**

## 7. Teorie k výpočtu tlačných prvků

U štíhlých tlačných prvků existuje riziko, že při nadměrném zatížení může dojít k jejich vybočení. Pro návrh tlačných dřevěných prvků je důležitá nejen pevnost dřeva v tlaku ale i v ohybu.

Základem pro výpočet jsou dvě metody, a to výpočet tlačného prutu podle teorie II. řádu (rovnováha průřezových veličin se určuje na přetvořené soustavě), nebo tzv. postup náhradního prutu. Zde se únosnost prutu oproti prutu s nekonečnou tuhostí redukuje součiniteli vzpěrnosti. To znamená, že ověření na vzpěr se provádí stejně jako ověření na tlak, s tím rozdílem, že pro výpočet uvažujeme redukovanou pevnost v tlaku. Rozsah zmenšení únosnosti ovlivňuje nejvíce štíhlostní poměr a byl odvozen pro oboustranně kloubově uložený prut. Pro ostatní typy uložení, nebo pro rámy lze použít postup pro náhradní prut, za předpokladu určení nejprve vzpěrné délky a následného ověření jako u oboustranně uloženého prutu.

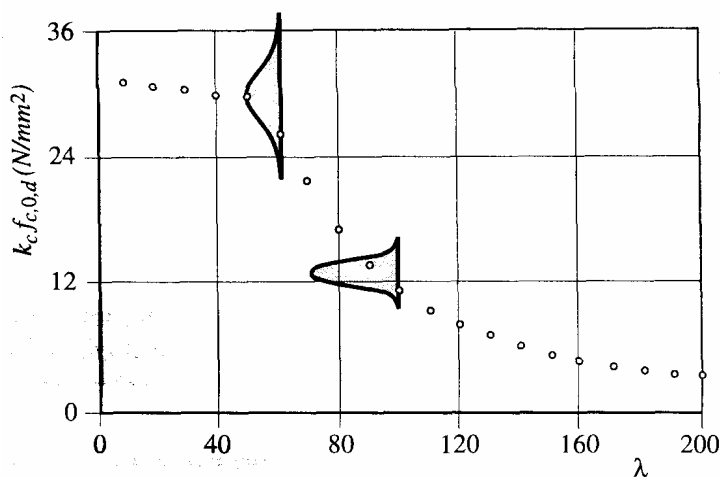
### 7.1 Pozadí čar vzpěrného napětí v Eurokódu 5 [ 1 ]

Čáry vzpěrného napětí všeobecně udávají vliv štíhlosti na charakteristickou únosnost oboustranně kloubově uložených sloupů. Každá hodnota určité čáry vzpěrného napětí přitom odpovídá charakteristické únosnosti sloupů příslušného štíhlostního poměru. Štíhlostní poměr je definován jako poměr vzpěrné délky a poloměru setrvačnosti. Pro stanovení charakteristických hodnot únosnosti tlačných prutů existují různé přístupy.

Pro odvození čar vzpěrného napětí v Eurokód 5 byla použita jiná metoda (Blass, 1987; Blass, 1988a; Blass 1988b). Tato metoda je založena na simulaci zkoušek počítačem.

K tomu byly modelovány sloupy tak, že jim byly přisouzeny vlastnosti konstrukčního materiálu a geometrické imperfekce, které vycházejí z pozorování skutečně provedených sloupů. To znamená, že hodnoty pevnosti a tuhosti, jakož i počátečního zakřivení nebo odchylek od jmenovitých rozměrů průřezu pro určitý sloup byly vybrány náhodně. Přiřazené vlastnosti musí být ovšem realistické. To znamená, že při simulačním procesu byly uváženy existující korelační závislosti

mezi různými přiřazenými vlastnostmi. Tak např. sloupy s vysokým modulem pružnosti zpravidla vykazují také vysoké pevnosti. Simulovaný sloup potom vykazuje, tak jako skutečný sloup, soubor vlastností, které určují jeho únosnost. Statistické rozdělení únosnosti sloupů určitého štíhlostního poměru popř. určité třídy pevnosti se určí tak, že se simuluje velký počet tlačných prutů a vypočtou se jejich mezní únosnosti. Rozptyl hodnot meze únosnosti je způsoben rozptylem charakteristik pevnosti a tuhosti dřeva, jakož i rozptylem geometrických imperfekcí. Ze statistického rozdělení hodnot meze únosnosti sloupů se určí 5%ní kvantil jako charakteristická hodnota. Tato charakteristická hodnota potom odpovídá určitému bodu čáry vzpěrných napětí. Provedou-li se příslušné simulace a výpočty meze únosnosti také pro ostatní štíhlostní poměry, vychází na základě z toho vyplývajících charakteristických hodnot průběh únosnosti sloupu v závislosti na štíhlostním poměru. Příklad průběhu charakteristických hodnot vzpěrného napětí, určeného simulačními výpočty, je ukázán na obr.9



Obr. 9: Průběh charakteristických hodnot vzpěrného napětí v závislosti na štíhlostním poměru a zobrazení hodnot z průběhu 2 zkoušek s vyznačením 5%ního kvantilu.

Protože pro navrhování v praxi je jednodušší použít vzorce než diagramu, byly k průběhu charakteristických napětí na mezi únosnosti přiřazeny přibližné křivky. Tvar těchto návrhových vztahů přitom odpovídá vztahům v Eurokódu 3 pro posouzení ocelových sloupů. Příklad průběhu charakteristických napětí na mezi únosnosti s odpovídající přibližnou křivkou.

## 7.2 Teorie výpočtu tlačných prutů podle Eurokódu 5

### 7.2.1 Relativní štíhlostní poměr:

$$\lambda_{rel,y} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,crit,y}}} \quad 7.10$$

a

$$\lambda_{rel,z} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,crit,z}}} \quad 7.11$$

kde

$$\sigma_{c,crit,y} = \pi^2 \cdot \frac{E_{0,05}}{\lambda_y^2} \quad 7.12$$

$$\sigma_{c,crit,z} = \pi^2 \cdot \frac{E_{0,05}}{\lambda_z^2} \quad 7.13$$

$\lambda_y$  a  $\lambda_{rel,y}$  odpovídá vzpěru k ose y (prut vybočuje v ose z) [-] a

$\lambda_z$  a  $\lambda_{rel,z}$  odpovídá vzpěru k ose z (prut vybočuje v ose y) [-]

Pak pro  $\lambda_{rel,y} \leq 0,3$  a  $\lambda_{rel,z} \leq 0,3$  mají napětí splňovat následující podmínky.

### 7.2.2 Kombinace ohybu a osového tlaku

Pro  $\lambda_{rel,y} \leq 0,3$  a  $\lambda_{rel,z} \leq 0,3$  mají napětí splňovat následující podmínky:

$$\left( \frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad 7.14$$

$$\left( \frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad 7.15$$

Pro ostatní případy  $\lambda_{rel,y} > 0,3$  a  $\lambda_{rel,z} > 0,3$  platí:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad 7.16$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad 7.17$$

Kde:

$\sigma_{c,0,d}$  - návrhové napětí v tlaku [N/mm<sup>2</sup>].

$f_{c,0,d}$  - návrhová pevnost v tlaku [N/mm<sup>2</sup>].

$\sigma_{m,y,d}$ ,  $\sigma_{m,z,d}$  - jsou návrhové hodnoty napětí v ohybu [N/mm<sup>2</sup>].

$f_{m,y,d}$ ,  $f_{m,z,d}$  - jsou návrhové pevnost v ohybu [N/mm<sup>2</sup>], ty se musí případně redukovat součinitelem  $k_{crit}$  s ohledem na příčnou a torzní stabilitu podle způsobu namáhání.

$k_m$  - je součinitel pro šikmý ohyb [-], pro obdélníkové a čtvercové průřezy

$k_m=0,7$  a pro ostatní je  $k_m=1$ .

$k_{c,y}$ , a  $k_{c,z}$  - součinitelé vzpěrnosti [-], určí se ze vztahů.

$$k_{c,y(z)} = \frac{1}{k_{y(z)} + \sqrt{k_{y(z)}^2 - \lambda_{rel,y(z)}^2}} \quad (\text{podobně pro } k_{c,z}) \quad 7.18$$

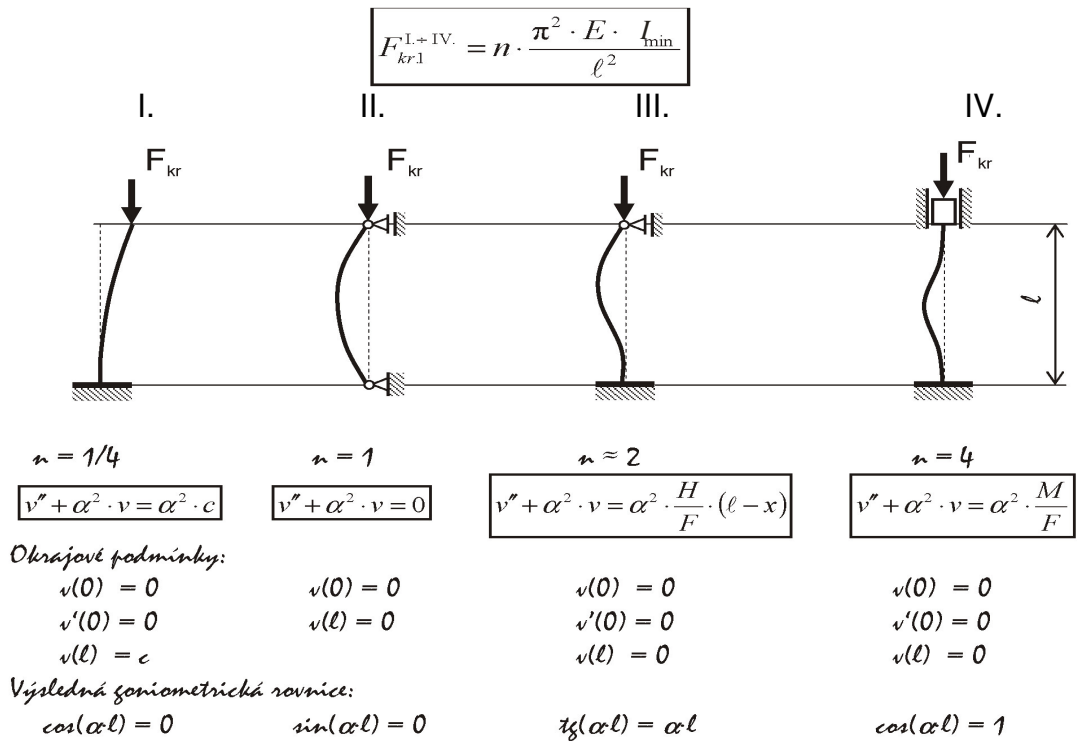
$$k_{y(z)} = 0,5 \left[ 1 + \beta_c (\lambda_{rel,y(z)} - 0,5) + \lambda_{rel,y(z)}^2 \right] (\text{podobně pro } k_z) \quad 7.19$$

$\beta_c$  – je součinitel [-] platný pro prvky splňující amplitudy zakřivení měřené uprostřed mezi podpěrami, kde může nastat příčná nestabilita nesmí být amplitudy větší než : pro rostlé dřevo 1/500 délky pak  $\beta_c = 0,2$  a pro lepené lamelové 1/300 délky pak  $\beta_c = 0,1$ .

### 7.3 Kombinace způsobů uložení a kritické osově síly podle Leonarda Eulera

V závislosti na způsobu uložení se zvětšuje nebo zmenšuje vzpěrná délka a tím je přímo ovlivněna únosnost tlačенého prvku.

Při způsobu uložení I. je výsledná kritická síla v Newtonech nejnižší protože je  $n = 1/4$ , naproti tomu případ IV. charakterizující dvojité vetknutí. Je prvek nejstabilnější a součinitel  $n = 4$ , což odpovídá čtyřnásobné únosnosti oproti dvoukloubovému uložení, pro které je odvozena většina vzorců a postupů.



[9]

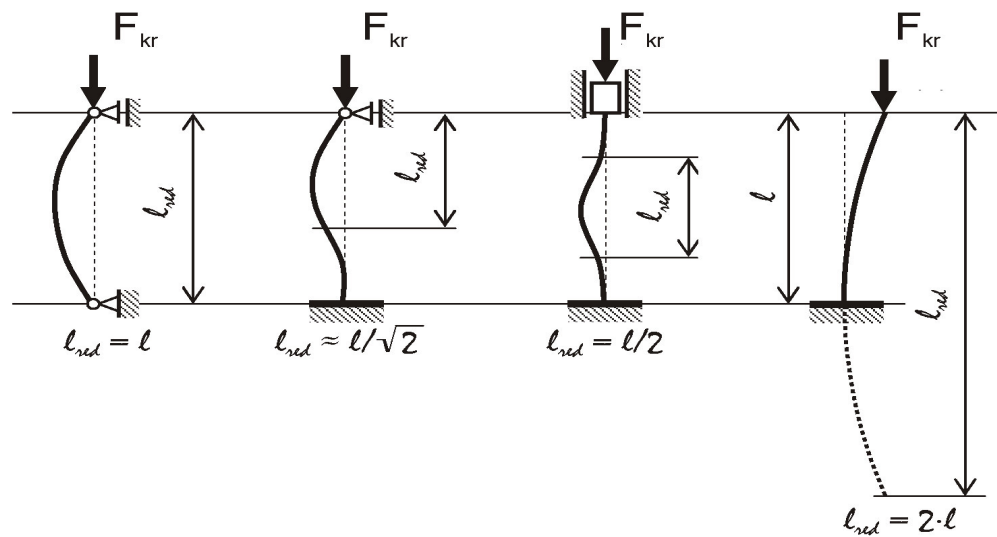
Dříve se používala pouze redukovaná vzpěrná délka a z ní se poté počítala kritická síla, při které dojde k vybočení a následné ztrátě stability sloupu.

$l_{red} = \frac{\ell}{\sqrt{n}}$

resp.

$n = \left( \frac{\ell}{l_{red}} \right)^2$

$F_{kr,1}^{I,IV} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{\min}}{l_{red}^2}$



[9]

## 7.4 Pružné chování podle Eulera

U ideálního, přímého, prizmatického, dostředně tlačného prutu s kloubovým uložením na obou koncích můžeme podle Eulerova vztahu určit kritickou osovou sílu, při které dojde k vybočení ve směru hlavní centrální osy.

$$N_{c,crit} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad 7.20$$

kde:  $I$  - nejmenší moment setrvačnosti průřezu prutu [mm<sup>4</sup>].

$E$  – modul pružnosti materiálu v ohybu [N/mm<sup>2</sup>].

$l$  – délka prutu [mm]

Dále je možné stanovit kritické napětí prutu

$$\sigma_{c,crit} = \frac{N_{c,crit}}{A} = \frac{\pi^2 EI}{l^2 A} \quad \text{po úpravě ( } \lambda = \frac{l}{i} \text{ )} \quad 7.21$$

$$\sigma_{c,crit} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad 7.22$$

kde:  $A$  - plocha průřezu prutu [mm<sup>2</sup>]

$\lambda$  - štíhlost prutu [-]

$l$  – vzpěrná délka [mm]

$i$  – poloměr setrvačnosti průřezu [mm]

U dřeva závisí modul pružnosti v ohybu a mez pevnosti na vlhkosti a s přibývajícím vlhkostí dřeva se tyto hodnoty snižují. Současně tyto hodnoty ovlivňuje i délka trvání zatížení. Podle předchozí ČSN 73 1701 se předpokládá, že při vlhkosti 25% a krátkodobém zatížení poměr mezi modulem pružnosti v ohybu a mezí pevnosti dřeva v tlaku je přibližně 312, stejně tak pro dlouhodobé zatížení. Za tohoto předpokladu lze určit hodnoty součinitele vzpěrnosti pro oblast elastických deformací ze vztahu (5.23).

$$k_c = \frac{\pi^2 \cdot 312}{\lambda^2} = \frac{3100}{\lambda^2} \quad 7.23$$

kde:  $\lambda$  - štíhlost prutu [-]

Eulerův vztah pro kritické napětí  $\sigma_{c,crit}$  (7.23) lze použít pouze pro štíhlé pruty, kde je kritické napětí menší než mez úměrnosti dřeva v tlaku. Podle známých



experimentálních zkoušek víme, že poměr mezi mezí úměrnosti dřeva a pevností dřeva v tlaku  $\sigma_{c,f}$  je  $1/2$  až  $2/3$ . Z toho plyne rozhraní pro konstrukce namáhané vzpěrem v oblasti pružné a plastické  $\sigma_{c,crit} = \sigma_{c,f} / 2$  a je dáno mezním štíhlostí prutu.

$$\lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 2E}{\sigma_{c,f}}} \cong 75 \quad 7.24$$

Pro pruty s nižší štíhlostí musíme uvážit fyzikálně nelineární chování dřeva. Proto byl podle ČSN 73 1701 na základě zkoušek odvozen vzorec pro výpočet součinitelů vzpěrnosti pro oblast plastických deformací (7.25).

$$k_c = 1 - 0,8 \left( \frac{\lambda}{100} \right)^2 \quad 7.25$$

### 7.5 Převod z prostého tlaku na vzpěr

Pro převod z prostého tlaku na vzpěrný použijeme součinitel vzpěrnosti  $k_c$ .

$$k_c = \frac{\sigma_{c,crit}}{\sigma_{c,f}} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2 \sigma_{c,f}} \quad 7.26$$

kde:  $\sigma_{c,f}$  - mez pevnosti materiálu v tlaku [N/mm<sup>2</sup>]  
 $\sigma_{c,crit}$  - kritické napětí v prutu při ztrátě stability [N/mm<sup>2</sup>]  
 E - modul pružnosti materiálu v ohybu [N/mm<sup>2</sup>].

## **8. Návrh jednoduchých zkušebních prvků**

Zkušební prvky budou vyrobeny ze smrkového dřeva. Sada vzorků pro ověření únosnosti dřeva jako materiálu bude vyrobena podle normy ČSN EN 408 (73 1741) Dřevěné konstrukce – Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo – Stanovení některých fyzikálních vlastností, o rozměrech 20 x 20 x 120 mm. Druhá sada vzorků pro ověření chování dřevěných prvků na vzpěr bude profilu obdélníku 10x17mm v délkách od 50 do 400 mm, tak aby bylo možno ověřit teoretický výpočet s naměřenými hodnotami. U druhé sady budou vždy tři vzorky vyrobeny se stejnou délkou z důvodu snížení vlivu nehomogenity materiálu. Podmínky měření a způsob zkoušení neodpovídají přesně požadavkům ČSN EN 408, a proto se jedná o zkoušky modifikované.

### **8.1 Stanovení pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny dle ČSN EN 408**

**[ 8 ]**

#### **8.1.1 Zkušební těleso**

Zkušební těleso musí mít plný průřez konstrukčního prvku a délku odpovídající šesti násobku menšího průřezového rozměru. Čelní plochy musí být přesně provedeny tak, aby byly rovinné, vzájemně rovnoběžné a kolmé k ose tělesa.

#### **8.1.2 Zkušební postup**

Zkušební těleso se musí zatěžovat dostředně pomocí kulově uložených zatěžovacích hlav nebo jiného zařízení, umožňujícího zavedení tlakové síly bez vyvození ohybu. Po zavedení počátečního zatížení se zatěžovací hlavy musí zajistit, aby se zabránilo šikmému posunutí. Použité upínací zařízení a skutečné podmínky zatěžování se musí zaznamenat ve zkušebním protokolu.

Použité zatěžovací zařízení musí umožňovat měření zatížení s přesností 1 % zatížení působícího na zkušební těleso.

Zatěhuje se při konstantní rychlosti posunutí zatěžovací hlavy, která se nastaví tak, aby se dosáhlo největšího zatížení v průběhu ( $300 \pm 120$ ) s.

POZNÁMKA: Tato rychlost se má stanovit z výsledků předběžných zkoušek. Účelem je, aby doba do dosažení  $F_{max}$  byla pro každé zkušební těleso 300 s.

Doba do porušení každého zkušební tělesa se musí zaznamenat a průměr těchto dob se musí zaznamenat ve zkušebním protokolu. Každé zkušební těleso s odchylkou doby větší než 120 s od jmenovité doby 300 s se musí zaznamenat ve zkušebním protokolu.

### 8.1.3 Vyjádření výsledků

Pevnost v tlaku  $f_{c,0}$  je dána vztahem 8.1

$$f_{c,0} = \frac{F_{\max}}{A} \quad 8.1$$

kde :  $F_{\max}$  - maximální síla dosažená při zkoušce na zkušebním tělese [N].

$A$  - průřezová plocha zkušební tělesa [ $\text{mm}^2$ ]

$f_{c,0}$  - charakteristická pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ].

Pevnost v tlaku musí být vypočtena s přesností 1 %.

Charakter porušení a růstové charakteristiky v místě porušení se musí zaznamenat pro každé zkušební těleso ve zkušebním protokolu.

## 8.2 Výroba zkušebních těles

Zkušební tělesa byla vyrobena rozřezáním dřevěných prken vyrobených z napojovaného dřeva z důvodu zajištění odpovídajícího materiálu pro zkoušky. Prkna byla pečlivě vybrána, aby splňovala rovnoběžnost vláken s delší stranou zkušebních těles a tak byla zaručena rovnoběžnost vláken s působením zatěžovací síly při zkouškách. Byly vyrobeny profily 22 x 22 mm, které byly následně upraveny frézováním, z důvodu zajištění hladkého povrchu a jednotné velikosti průřezů 20 x 20 mm. Nakonec byly dlouhé profily zkráceny na požadovanou zkušební délku 120 mm na formátovací pile, tak aby konce byly pravoúhlé. Celkem čtyři vzorky byly ještě upraveny, dva byly zaříznuty tak, aby při zkoušce byl obsažen napojovaný spoj a další dva vzorky byly navíc podélně rozříznuty, tak aby vznikly čtyři lamely profilu 12 x 22 mm. Ty byly následně podélně slepeny frézovanou stranou k sobě, tak aby byla zaručena rovinnost spoje. Po nanesení lepidla byly lamely k sobě stlačeny přes přípravky pomocí truhlářských svorek, aby byl zajištěn dostatečný tlak v lepeném spoji. Vzorky byly

lisovány po dobu osmi hodin tak, aby lepidlo dostatečně vytvrdlo. Následně byla zkušební tělesa opracována frézováním na požadovaný rozměr tj. 20 x 20 mm.

### 8.3 Výsledky měření

Zkoušky byly provedeny na zkušebních tělesech čtvercového průřezu 20 x 20 x 120 mm na zkušebním trhacím lisu označení VPMA Nr.2207/58/R1. s maximálním rozsahem 0 - 50 000 N. Jedná se o trhací lis s mechanickým převodem. Zkoušky byly provedeny v měřicím rozsahu 0 – 25 000 N s přesností na 50 N. Teplota okolní místnosti 20°C, relativní vlhkost 80 %, vlhkost měřených vzorků 8 – 10 %. Vzorky byly vyrobeny s přesností na 0,5 mm rozřezáním dřevěného cinkovaného prkna z důvodu zaručení rovnoběžnosti vláken s profilem a zaručené vlhkosti. Problematické bylo dodržet způsob uchycení vzorků do trhacího zařízení, z tohoto důvodu nebyl splněn požadavky bod 8.1.2. Vzorky byly vystředěny a vloženy přímo mezi plochy lisovacího zařízení. Výsledky naměřených hodnot jsou tabulce 8.

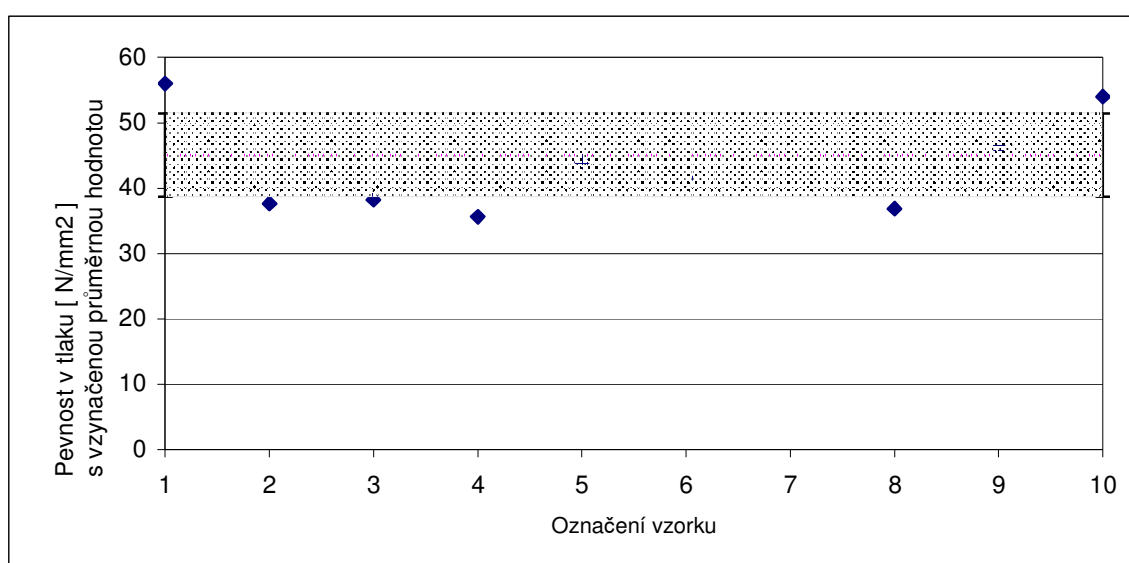
| Označení vzorku | Kritická síla $F_{max}$ [N] | Průřezová plocha A [mm <sup>2</sup> ] | Štíhlostní poměr I | $f_{c,0}$ [N/mm <sup>2</sup> ] |
|-----------------|-----------------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------------------|
| 1 <sub>L</sub>  | 22400                       | 400                                   | 41,57              | 56                             |
| 2 <sub>L</sub>  | 15050                       |                                       |                    | 37,625                         |
| 3 <sub>Z</sub>  | 15300                       |                                       |                    | 38,25                          |
| 4               | 14250                       |                                       |                    | 35,625                         |
| 5               | 17600                       |                                       |                    | 44                             |
| 6               | 16600                       |                                       |                    | 41,5                           |
| 7               | 24250                       |                                       |                    | 60,625                         |
| 8               | 14750                       |                                       |                    | 36,875                         |
| 9 <sub>Z</sub>  | 18500                       |                                       |                    | 46,25                          |
| 10              | 21600                       |                                       |                    | 54                             |

**Tab. 8:** Zobrazuje výsledky měření a přepočty na charakteristickou pevnost v tlaku

Index L označuje vzorky, které byly podélně lepeny ze dvou profilů 10 x 20 mm z cinkovaného dřeva a index Z označuje vzorky, které byly vytvořeny napojením cinkovaným spojem. Při zkouškách se lepené vzorky chovaly stejným způsobem

jako vzorky bez lepených spojů. Jediným ale zásadním rozdílem byl způsob porušení těchto vzorků.

Z následujícího grafu 1 je zřetelná pevnost jednotlivých vzorků, jejich průměrná hodnota a návrhová hodnota, kterou budu dále uvažovat v následujících výpočtech. Průměrná hodnota je vyznačena fialově a statistický rozptyl hodnot je vyšrafován.



Graf 1: Zobrazení charakteristické pevnosti zkušebních vzorků s vyznačenou průměrnou hodnotou a rozptylem.

#### 8.4 Statistické vyhodnocení měření

Pro statistické vyhodnocení byl použit aritmetický průměr výběrového souboru pro nejpravděpodobnější hodnotu měřené veličiny podle vzorce 8.2.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad 8.2$$

kde:  $x_i$  jsou naměřené hodnoty

$n$  počet měření.

Mírou rozptylu je směrodatná odchylka  $\sigma$  základního souboru, která odpovídá poloze inflexního bodu na Gaussově křivce. Rozptyl hodnot výběrového souboru je charakterizován směrodatnou odchylkou výběrového souboru  $s_x$ . Ta je dána vztahem 8.3.

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad 8.3$$

Pro opakovaná měření se používá častěji směrodatná odchylna aritmetického průměru výběrového souboru  $s_{\bar{x}}$  8.4 pro kterou platí.

$$s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad 8.4$$

Směrodatnou odchylnu  $\sigma$  základního souboru podle vztahu 8.5.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad 8.5$$

Na základě směrodatné odchylny spočítáme chybu  $\Delta x$  podle vzorce 8.6 vymezující kolem aritmetického průměru interval spolehlivosti. Skutečná střední hodnota měřené veličiny leží s pravděpodobností  $P = 1 - \alpha$  v intervalu  $\langle \bar{x} - \Delta x; \bar{x} + \Delta x \rangle$ .

$$\Delta x = t_{\alpha}(f) s_{\bar{x}} = t_{\alpha}(f) \frac{s_x}{\sqrt{n}} \quad 8.6$$

kde:  $t_{\alpha}(f)$  - koeficient Studentova rozdělení (Studentův koeficient) ,

$\alpha$  - zvolená hladina významnosti (riziko),

$f = n - 1$  je počet stupňů volnosti,

$n$  - počet měření.

Pro vyhodnocení provedených zkoušek jsem zvolil  $\alpha = 0,05$ , z čehož plyne  $P = 0,95$ , s pravděpodobností  $P = 1 - \alpha = 95\%$ . Skutečná hodnota měřené veličiny v intervalu  $(x \pm \Delta x)$ . Pro počet měření  $n = 10$ , z tabulky Studentových koeficientů odečteme hodnotu  $t_{\alpha}(f) = 2,262$ .

Výsledné hodnoty vzorců jsou uvedeny v tabulce 9.

| $\bar{x}$ | $\sigma$ | $S_x$    | $S_{\bar{x}}$ | $\Delta x$ |
|-----------|----------|----------|---------------|------------|
| 45,075    | 8,454326 | 8,911642 | 2,818         | 6,37       |

Tab. 9: Výsledné statistické hodnoty zkoušek

Výsledná statistická charakteristická pevnosti zkušebních vzorků je **45,075 ± 6,37 N/mm<sup>2</sup>** což odpovídá typickým hodnotám pro jehličnaté dřevo, které se pohybují mezi 40 – 50 N/mm<sup>2</sup>.

### 8.5 Způsoby porušení jednotlivých vzorků

Vzorky číslo 1<sub>L</sub> a 2<sub>L</sub>, které byly slepeny ze dvou lamel, tvořených z napojovaného dřeva, se porušily „delaminací“ a následnou ztrátou stability. U vzorku 1<sub>L</sub> byla navíc patrná ztráta stability jedné z lamel porušením nad zubovým spojem podobně jako u vzorků se zubovým spojem.

Vzorky 3<sub>Z</sub> a 9<sub>Z</sub>, které obsahovaly lepený zubový spoj, se porušily oba těsně nad zubovým spojem.

Ostatní vzorky, které byly z rostlého dřeva, se porušily v různých výškách průřezu. Některé vzorky - č.4,5,6, se porušily úhlopříčně přes hranu, i když má těleso v tomto směru nejvyšší moment setrvačnosti. Většinou se způsob porušení projevil rozdrčením části vláken na straně jedné a na druhé přetržením. Výjimku tvořil vzorek č. 8, který se porušil místním vybočením vláken. U vzorků č. 7 a 10 nastalo porušení v horní části způsobené nedostatečnou adhezí mezi plochou lisu a vzorkem, i tak došlo k porušení vzorku.

Různorodost porušení je doložena na následujících obrázcích 10 a 11. Způsoby porušení vzorků dokazují nestejnorodost dřeva jako materiálu. Z tohoto důvodu byla také porušení různého typu, i když byly profily zkušebních těles stejné.



Obr. 10: Způsoby porušení vzorků 1-5. Vzorky označené L a Z byly lepené.



Obr. 11: Způsoby porušení vzorků 6-10. Vzorky označené L a Z byly lepené.



## 8.6 Stanovení modulu pružnosti dřeva v tlaku podle ČSN EN 408 [ 8 ]

Fyzikální stanovení modulu pružnosti dřeva v tlaku by mělo být provedeno podle normy ČSN EN 408.

### 8.6.1 Zkušební těleso

Zkušební těleso musí mít plný průřez konstrukčního prvku a délku odpovídající šesti násobku menšího rozměru průřezu. Čelní plochy musí být přesně provedeny tak, aby byly rovinné, vzájemně rovnoběžné a kolmé k ose tělesa.

### 8.6.2 Zkušební postup

Zkušební těleso se musí zatěžovat dostředně pomocí kulově uložených zatěžovacích hlav nebo jiného zařízení, umožňujícího zavedení tlakové síly bez vyvození ohybu. Po zavedení počátečního zatížení se zatěžovací hlavy musí zajistit, aby se zabránilo šikmému posunutí. Použité upínací zařízení a skutečné podmínky zatěžování se musí zaznamenat ve zkušebním protokolu.

Rychlost zatěžování musí být konstantní. Rychlost posunutí zatěžovací hlavy nesmí být větší než 0,00005 l mm/s. Použité zatěžovací zařízení musí umožňovat měření zatížení s přesností 1 % zatížení působícího na zkušební těleso nebo, pro zatížení menší než 10 % největšího zatížení působícího na zkušební těleso s přesností 0,1 % největšího působícího zatížení.

Deformace se musí měřit uprostřed tělesa na délce odpovídající čtyř násobku menšího rozměru průřezu tělesa. Musí se použít dva průtahoměry umístěné tak, aby se minimalizoval vliv kroucení.

Deformace se musí stanovit s přesností 1 % nebo, deformace menší než 2 mm, s přesností 0,02 mm.

### 8.6.3 Vyjádření výsledků

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

$$E_{c,0} = \frac{l_1(F_2 - F_1)}{A(w_2 - w_1)} \quad 8.7$$

kde:  $F_2 - F_1$  je přírůstek zatížení na přímkové části křivky zatížení-deformace v [N]

$w_2 - w_1$  - přírůstek deformace odpovídající  $F_2 - F_1$  v milimetrech

$l_1$  – měřicí základna pro stanovení modulu pružnosti v milimetrech  
Pokud je  $E_{c,0}$  vypočten z lineární regrese zatížení/deformace, má být druhá mocnina součinitele korelace větší než 0,99.

Modul pružnosti v tlaku se musí vypočítat s přesností 1 %.

Vzhledem k problematickému způsobu měření byl modul pružnosti vypočten z průběhů tlakových zkoušek těles. Průměrná hodnota vyšla 10 000 MPa.

### 8.7 Určení optimální velikosti zkušebních těles

K určení optimální velikosti zkušebních těles byl použit nadstavbový modul instalovaný pod MS Excel. Ten umožnil zadat přesně způsob uložení, vlastnosti materiálu, rozměry modelu sloupu (zkušebních těles) a výsledkem byly vypočtené hodnoty maximálních únosností podle několika metod. Výsledné hodnoty byly zobrazeny jako průsečíky jednotlivými průběhovými křivkami několika způsobů výpočtu kritického napětí v závislosti na štíhlostním poměru  $\lambda$ .

Ve výpočtu jsou použity výpočty podle Johnsona, Tetmajera, Eulera a Secant vzorec, který navíc zahrnuje excentricitu, kdy síla nepůsobí přesně v ose. Poslední jmenovaná metoda se nejvíce svým průběhem podobala výpočtu podle Eurokódu 5.

Za pomoci tohoto programu se podařilo zvolit maximální možný obdélníkový průřez, který splňoval podmínky namáhání v oblastech plastické i elastické deformace a zároveň odpovídal podmínkám zkušebního zařízení, na kterém byly fyzicky vzorky zkoušeny. Podmínkám nejlépe vyhověl profil 10 x 17 mm.

### 8.8 Vzorový výpočet jednoho prvku podle Eurokódu 5

Materiál : Dřevo smrk, třídy C 22

$$a = 10 \text{ m} \quad b = 17 \text{ mm} \quad \gamma_m = 1,3$$

$$l = 250 \text{ mm} \quad f_{c,0,k} = 20 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad k_{mod} = 1,1$$

$$E_{0,05} = 6 \text{ 700 MPa} \quad \beta_c = 0,2$$

$\gamma_m$  – doporučený dílčí součinitel pro vlastnost materiálu a únosnost

$k_{mod}$  – modifikační součinitel pevnosti pro třídy provozu a třídy trvání zatížení podle EN 14081-1 pro rostlé dřevo a EN 14080 pro lamelové.

parametry průřezu 10 x 17mm, vzpěrná délka 250 mm, předpoklad oboustranného kloubového uložení  $n = 1$ .

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d}$$

$$I_{\min} = \frac{1 \cdot a^3 \cdot b}{12} = \frac{1 \cdot 10^3 \cdot 17}{12} = 1416,7 \text{ mm}^4$$

$$i_{\min} = \sqrt{\frac{I_{\min}}{A}} = \sqrt{\frac{1416,7}{10 \cdot 17}} = 2,887 \text{ mm}$$

$$f_{c,0,d} = k_{\text{mod}} \cdot \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_m} = 1,1 \cdot \frac{20}{1,3} = 16,92 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\lambda_y = \frac{l}{i} = \frac{250}{2,887} = 86,58$$

$$\sigma_{c,crit,y} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} = \frac{3,14^2 \cdot 6700}{86,58^2} = 8,81 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\lambda_{rel,y} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,crit,y}}} = \sqrt{\frac{20}{8,81}} = 1,5 \geq 0,3 - \text{nutno posoudit na vzpěr}$$

$$k_y = 0,5 \left[ 1 + \beta_c (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2 \right] = 0,5 \left[ 1 + 0,2(1,5 - 0,3) + 1,5^2 \right] = 1,75$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{1,75 + \sqrt{1,75^2 - 1,5^2}} = 0,377$$

Stanovení únosnosti navrženého sloupu, s ohledem na vybočení ve směru osy z (štíhlost k ose y je větší).

$$\sigma_{c,0,d} \leq k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}, \quad \sigma_{c,0,d} \leq 0,377 \cdot 16,92 \Rightarrow \sigma_{c,0,d} \leq 6,37 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$N_c = \sigma_{c,0,d} \cdot A = 6,37 \cdot 170 = 1083,45 \text{ N}$$

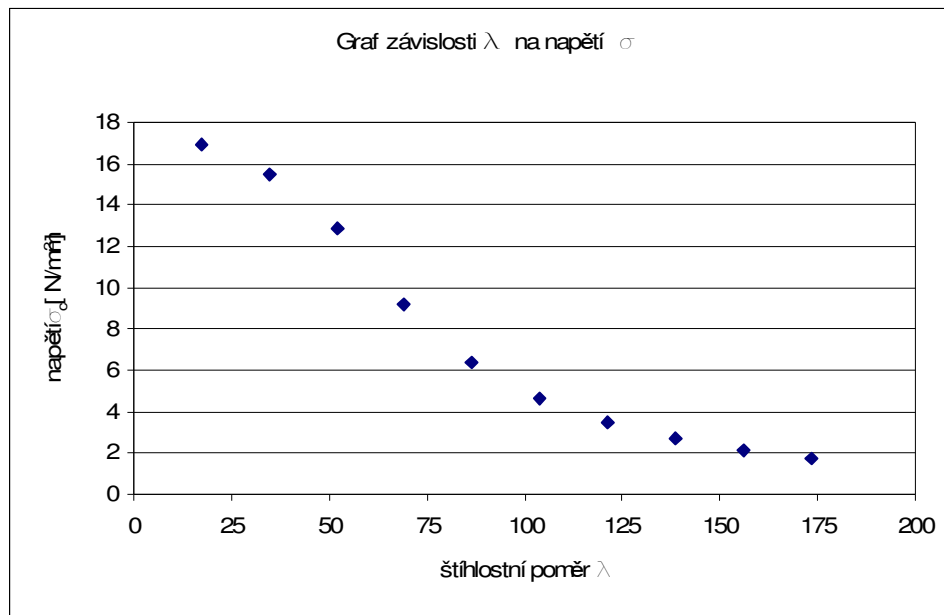
Návrhové maximální zatížení pro tento případ je, s ohledem na vzpěr 1083 N.

## 8.9 Zpracování teoretických výpočtů podle Eurokódu 5 pro sadu vzorků

|  |          |          |         |         |         |          |          |          |
|--|----------|----------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| b [mm]                                     | 17       | 17       | 17      | 17      | 17      | 17       | 17       | 17       |
| a [mm]                                     | 10       | 10       | 10      | 10      | 10      | 10       | 10       | 10       |
| A [mm <sup>2</sup> ]                       | 170      | 170      | 170     | 170     | 170     | 170      | 170      | 170      |
| I <sub>yc</sub> [mm <sup>4</sup> ]         | 1416,67  | 1416,67  | 1416,67 | 1416,67 | 1416,67 | 1416,67  | 1416,67  | 1416,67  |
| I <sub>zc</sub> [mm <sup>4</sup> ]         | 4094,17  | 4094,17  | 4094,17 | 4094,17 | 4094,17 | 4094,17  | 4094,17  | 4094,17  |
| i <sub>yc</sub> [mm]                       | 2,8868   | 2,8868   | 2,8868  | 2,8868  | 2,8868  | 2,8868   | 2,8868   | 2,8868   |
| i <sub>zc</sub> [mm]                       | 4,9075   | 4,9075   | 4,9075  | 4,9075  | 4,9075  | 4,9075   | 4,9075   | 4,9075   |
| L <sub>v</sub> [mm]                        | 50       | 100      | 150     | 200     | 250     | 300      | 350      | 400      |
| λ <sub>y</sub> [-]                         | 17,3205  | 34,6410  | 51,9615 | 69,2820 | 86,6025 | 103,9230 | 121,2436 | 138,5641 |
| λ <sub>z</sub> [-]                         | 10,1885  | 20,3771  | 30,5656 | 40,7541 | 50,9427 | 61,1312  | 71,3197  | 81,5083  |
| σ <sub>c,crit,y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] | 220,4212 | 55,1053  | 24,4912 | 13,7763 | 8,8168  | 6,1228   | 4,4984   | 3,4441   |
| σ <sub>c,crit,z</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] | 637,0172 | 159,2543 | 70,7797 | 39,8136 | 25,4807 | 17,6949  | 13,0004  | 9,9534   |
| λ <sub>rel,y</sub> [-]                     | 0,3012   | 0,6024   | 0,9037  | 1,2049  | 1,5061  | 1,8073   | 2,1086   | 2,4098   |
| λ <sub>rel,z</sub> [-]                     | 0,1772   | 0,3544   | 0,5316  | 0,7088  | 0,8860  | 1,0631   | 1,2403   | 1,4175   |
| k <sub>c,y</sub> [-]                       | 0,9997   | 0,9169   | 0,7590  | 0,5416  | 0,3766  | 0,2717   | 0,2041   | 0,1585   |
| k <sub>c,z</sub> [-]                       | 1,0260   | 0,9877   | 0,9407  | 0,8729  | 0,7711  | 0,6423   | 0,5184   | 0,4178   |
| k <sub>y</sub> [-]                         | 0,5455   | 0,7117   | 0,9687  | 1,3164  | 1,7548  | 2,2840   | 2,9039   | 3,6145   |
| k <sub>z</sub> [-]                         | 0,5034   | 0,5682   | 0,6644  | 0,7920  | 0,9510  | 1,1414   | 1,3632   | 1,6164   |
| f <sub>c,0,d</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]    | 16,9231  | 16,9231  | 16,9231 | 16,9231 | 16,9231 | 16,9231  | 16,9231  | 16,9231  |
| σ <sub>c,o,d</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]    | 16,92    | 15,52    | 12,84   | 9,16    | 6,37    | 4,60     | 3,45     | 2,68     |
| N <sub>c</sub> [N]                         | 2876     | 2638     | 2184    | 1558    | 1083    | 782      | 587      | 456      |

Tab. 10: Teoretický výpočet tlačných prvků podle normy ČSN EN 338.

V následujícím grafu 2 jsou zobrazeny výsledné hodnoty z tabulky 10. Je patrné, že výpočet podle Eurokódu 5, je pro návrh štíhlých prutů jednodušší, protože již v sobě zahrnuje kritický přechod na rozdíl od dimenzování podle Eulera a Tetmajera, kde je nutné kolem štíhlostního poměru  $l = 75$  (v závislosti na profilu) provést změnu ve způsobu výpočtu (zvolit jinou metodu), protože již v dané oblasti výpočet neplatí. V grafu 2 je pro zvolený profil tento přechod patrný inflexním bodem křivky.



Graf 2: Závislost napětí na štíhlostním poměru.

Aby bylo možné porovnat teoretický výpočet s naměřenými hodnotami, bylo nutné teoretické hodnoty přepočítat na mezní materiálové hodnoty podložené předchozím měřením.

### 8.10 Naměřené hodnoty na zkušebních tělesech

Po vynesení naměřených hodnot do grafu bylo zjištěno, že všechna zkušební tělesa unesla několikanásobně větší zatížení než předpokládal výpočet. Proto byly upraveny vstupní hodnoty, především  $f_{c,0,k}$  charakteristická pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny a E modul pružnosti v tlaku podle předchozích zkoušek, aby se výpočet více přiblížil skutečně naměřeným hodnotám. Následující tabulka 11 zobrazuje naměřené hodnoty při deformaci zkušebních těles.

| Vzorek číslo | Rozměry vzorků |        |                      | Síla při které došlo k porušení |
|--------------|----------------|--------|----------------------|---------------------------------|
|              | a [mm]         | b [mm] | výška $l = L_v$ [mm] | $N_c$ [N]                       |
| 1            | 9,95           | 17,5   | 52,3                 | 7830                            |
| 2            | 9,95           | 16,7   | 52,3                 | 10550                           |
| 3            | 9,95           | 16,8   | 52,3                 | 10050                           |
| 4            | 10             | 16,8   | 97,6                 | 7950                            |
| 5            | 9,95           | 16,75  | 97,6                 | 10700                           |
| 6            | 10             | 17,15  | 97,6                 | 8600                            |
| 7            | 10             | 17     | 150                  | 10350                           |
| 8            | 10             | 16,95  | 150                  | 10050                           |
| 9            | 10             | 16,95  | 150                  | 6500                            |
| 10           | 10             | 16,95  | 200,5                | 9300                            |
| 11           | 10             | 16,95  | 200,5                | 10450                           |
| 12           | 10             | 17,1   | 200,5                | 7725                            |
| 13           | 10             | 16,95  | 250                  | 7225                            |
| 14           | 9,95           | 16,95  | 250                  | 6875                            |
| 15           | 9,95           | 16,9   | 250                  | 7750                            |
| 16           | 10             | 17,2   | 300                  | 3670                            |
| 17           | 10             | 17,1   | 300                  | 5720                            |
| 18           | 10             | 17     | 300                  | 6780                            |
| 19           | 10             | 17,4   | 349,2                | 5695                            |
| 20           | 10             | 17,45  | 349,2                | 4700                            |
| 21           | 10             | 17     | 349,2                | 5130                            |
| 22           | 10             | 16,9   | 400,5                | 3760                            |
| 23           | 10             | 17,15  | 400,5                | 2925                            |
| 24           | 10             | 16,85  | 400,5                | 4080                            |

Tab. 11: Hodnoty naměřené při deformaci na zkušebních tělesech

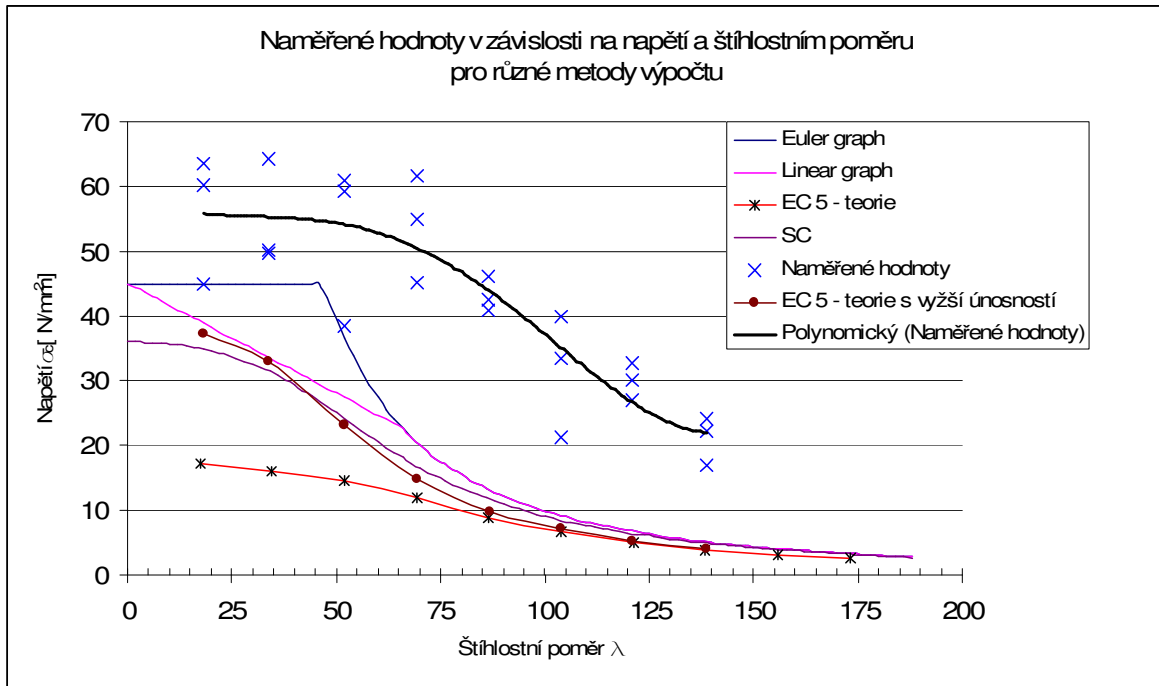
Průměrné hodnoty ze tří měření jsou v následující tabulce 12 porovnány s upraveným výpočtem podle Eurokódu 5 a výpočtem podle Eulera.

Z výše uvedených hodnot tabulky 11 je patrná nerovnoměrnost v rozměrech vzorků, která byla způsobena při výrobě. Z tohoto důvodu byly výpočty přepočítány na skutečné rozměry.

|   |                      |               |               |               |               |               |               |               |
|---|----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| průměrné hodnoty<br>b [mm]                          | <b>17</b>            | <b>16,63</b>  | <b>16,967</b> | <b>17</b>     | <b>16,933</b> | <b>17,1</b>   | <b>17,283</b> | <b>16,966</b> |
| průměrné hodnoty<br>a [mm]                          | <b>9,95</b>          | <b>9,98</b>   | <b>9,983</b>  | <b>10</b>     | <b>9,966</b>  | <b>10</b>     | <b>10</b>     | <b>10</b>     |
| A [mm <sup>2</sup> ]                                | 169,15               | 165,96        | 169,381       | 170           | 168,754278    | 171           | 172,83        | 169,66        |
| I <sub>yc</sub> [mm <sup>4</sup> ]                  | 1395,523             | 1377,535      | 1406,718      | 1416,667      | 1396,739      | 1425          | 1440,25       | 1413,833      |
| I <sub>zc</sub> [mm <sup>4</sup> ]                  | 4073,696             | 3824,952      | 4063,451      | 4094,167      | 4032,193      | 4166,843      | 4302,057      | 4069,651      |
| i <sub>yc</sub> [mm]                                | 2,8723               | 2,8810        | 2,8818        | 2,8868        | 2,8769        | 2,8868        | 2,8868        | 2,8868        |
| i <sub>zc</sub> [mm]                                | 4,9075               | 4,8007        | 4,8980        | 4,9075        | 4,8881        | 4,9363        | 4,9892        | 4,8977        |
| L <sub>v</sub> [mm]                                 | <b>52,3</b>          | <b>97,6</b>   | <b>150</b>    | <b>200,5</b>  | <b>250</b>    | <b>300</b>    | <b>349,2</b>  | <b>400,5</b>  |
| λ <sub>y</sub> [-]                                  | 18,2083              | 33,8774       | 52,0500       | 69,4552       | 86,8980       | 103,9230      | 120,9664      | 138,7373      |
| λ <sub>z</sub> [-]                                  | 10,6572              | 20,3305       | 30,6251       | 40,8560       | 51,1442       | 60,7737       | 69,9916       | 81,7737       |
| σ <sub>c,crit,y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]          | 297,6880             | 85,9963       | 36,4299       | 20,4593       | 13,0701       | 9,1385        | 6,7448        | 5,1276        |
| σ <sub>c,crit,z</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]          | 868,9864             | 238,7830      | 105,2316      | 59,1272       | 37,7317       | 26,7220       | 20,1469       | 14,7595       |
| λ <sub>rel,y</sub> [-]                              | 0,3891               | 0,7240        | 1,1123        | 1,4843        | 1,8571        | 2,2209        | 2,5851        | 2,9649        |
| λ <sub>rel,z</sub> [-]                              | 0,2278               | 0,4345        | 0,6545        | 0,8731        | 1,0930        | 1,2988        | 1,4958        | 1,7476        |
| k <sub>c,y</sub> [-]                                | 0,9795               | 0,8656        | 0,6061        | 0,3862        | 0,2585        | 0,1851        | 0,1386        | 0,1065        |
| k <sub>c,z</sub> [-]                                | 1,0155               | 0,9681        | 0,8968        | 0,7797        | 0,6202        | 0,4824        | 0,3811        | 0,2889        |
| k <sub>y</sub> [-]                                  | 0,5846               | 0,8045        | 1,1999        | 1,7200        | 2,3801        | 3,1583        | 4,0700        | 5,1618        |
| k <sub>z</sub> [-]                                  | 0,5187               | 0,6078        | 0,7496        | 0,9385        | 1,1766        | 1,4433        | 1,7382        | 2,1717        |
| f <sub>c,0,d</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]             | 38,14                | 38,14         | 38,14         | 38,14         | 38,14         | 38,14         | 38,14         | 38,14         |
| σ <sub>c,0,d</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]             | 37,36                | 33,02         | 23,12         | 14,73         | 9,86          | 7,06          | 5,29          | 4,06          |
| N <sub>c</sub> teoretická [N]                       | <b>6319,2</b>        | <b>5479,5</b> | <b>3915,8</b> | <b>2504,3</b> | <b>1663,7</b> | <b>1206,9</b> | <b>913,8</b>  | <b>689,3</b>  |
| N <sub>c</sub> skutečná [N]                         | <b>9476,7</b>        | <b>9083,3</b> | <b>8966,7</b> | <b>9158,3</b> | <b>7283,3</b> | <b>5390,0</b> | <b>5175,0</b> | <b>3588,3</b> |
| f <sub>c,0,k</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]             | 45,075               | 45,075        | 45,075        | 45,075        | 45,075        | 45,075        | 45,075        | 45,075        |
| N <sub>c</sub> krit. dle Eulera [N]                 | výpočet nelze použít | <b>6170,6</b> | <b>3478,1</b> | <b>2205,6</b> | <b>1562,7</b> | <b>1165,7</b> | <b>869,9</b>  |               |
| σ <sub>c</sub> krit dle Eulera [N/mm <sup>2</sup> ] | výpočet nelze použít | 36,43         | 20,46         | 13,07         | 9,14          | 6,74          | 5,13          |               |

Tab. 12: Naměřené únosnosti a vypočítané hodnoty únosnosti.  $N_{c \text{ teoretická}}$  – hodnota vypočítaná podle Erokódu 5,  $N_{c \text{ skutečná}}$  – naměřená hodnota na zkušebních tělesech,  $N_{c \text{ krit. podle Eulera}}$  – kritická síla vypočítaná podle Eulera.

Z výše uvedené tabulky jsou velice patrné rozdíly mezi jednotlivými teoretickými výpočty a skutečně naměřenými hodnotami. V následujícím grafu 3 je patrné, že pro prvky s vyšší štíhlostí je výpočet podle Eurokódu 5 proveden s vyšší bezpečností.



Graf 3: Zobrazuje skutečně naměřené hodnoty společně s teoretickými výpočty napětí v závislosti na štíhlostním poměru. Euler – výpočet podle Eulera, Linear – výpočet podle Tetmajera, EC 5 - teorie – teoretický výpočet podle tabulkových hodnot Eurokódu 5, SC – secant vzorec pro výpočet, kdy síla nepůsobí přesně v ose, Naměřené hodnoty – vzorky 10x17mm, EC 5 - teorie – teoretický výpočet s vyšší hodnotou napětí 45,075 N/mm<sup>2</sup>, Polynom 4. stupně prokládající naměřené hodnoty.

### 8.11 Porovnání naměřených hodnot s výpočty

Z výše uvedených tabulek a grafů je patrné, že i když byly použity pro výpočet hodnoty získané z měření a ne tabulkové vstupní hodnoty, byly získány početně stále nižší únosnosti, než které byly naměřeny na sadě vzorků. Porovnání teoretických únosností s naměřenými hodnotami vede k závěru, že výpočet podle Eurokódu 5 má v sobě zahrnut bezpečnostní koeficient, který zajišťuje se vzrůstající hodnotou vzpěru i rostoucí bezpečnost, jak je zřejmé z grafu číslo 4.

Dále je z grafu 3 vidět přechod přes kritický štíhlostní poměr, kde je patrný pokles únosnosti způsobený vzrůstajícím vzpěrem a rostoucím nebezpečím vybočení s následnou ztrátou stability.

Výsledné hodnoty jsou proloženy polynomickou křivkou čtvrtého stupně s rovnicí:

$$y = 7E-07x^4 - 0,0002x^3 + 0,0128x^2 - 0,374x + 59,391$$

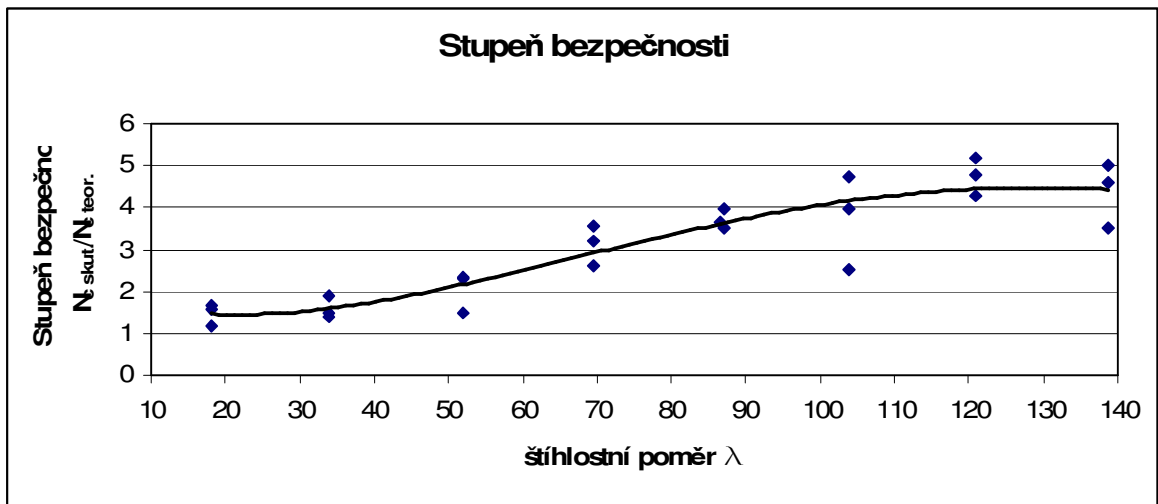
a hodnotou spolehlivosti



$R^2 = 0,7697$ , která nejlépe odpovídá předpokládanému průběhu napětí v závislosti na štíhlostním poměru.

Podle teoretického výpočtu by měla stačit polynommická rovnice stupně třetího, té by se dosáhlo zvýšením počtu zkušebních těles a počtu zkoušek.

Stupeň bezpečnosti vypočítaný z naměřených hodnot je zobrazen v následujícím grafu 4.



Graf 4: Zobrazuje bezpečnost zahrnutou ve vzorcích pro výpočet tlacených prutů podle EC 5 v závislosti na štíhlostním poměru.

## 9. Diskuze

Pro návrh zkušebních těles byly zvoleny záměrně prvky o malých rozměrech (10 x 17 mm), protože byly limitovány technickými parametry zkušebního lisu na ČZU, který byl pro zkoušení k dispozici. V praxi se však ale používají dřevěné sloupy, které mají řádově větší rozměry. Zjištění, která byla získána ze zkoušek na zkušebních tělesech malých rozměrů by bylo nutné ještě potvrdit na tělesech větších rozměrů - skutečných konstrukčních prvcích. Zkoušky na těchto tělesech je schopno provést (jak se průzkumem podařilo zjistit) pouze vědecko výzkumné pracoviště Kloknerova ústavu ČVUT, kde je k dispozici dostatečně vysoké lisovací zařízení. Při kontaktování tohoto pracoviště bylo zjištěno, že pro tuto diplomovou práci není možné zkoušky, pro zjištění únosnosti v závislosti na vzpěru, provést z ekonomických důvodů. Přepočtením formou matematického modelu je vzhledem k fyzikálním vlastnostem dřeva (zejména - nehomogenita, anizotropie, hydroskopičnost) značně složitý a přesahující rámec této práce.

Byly zkoušeny také vzorky vyrobené z lepeného dřeva. Zjištěné poruchy jednoduchých vzorků nemusejí odpovídat poruchám na skutečných velkých sloupech. S většími rozměry sloupů by se měnil počet lamel, ze kterých by byl sloup vyroben, což by ovlivnilo chování zkušebních prvků při zkoušce.

Z výše uvedených důvodů byly zkoušky provedeny právě na tělesech 10 x 17 x 50.-.400 mm. Z předchozího teoretického výpočtu vyplývá, že by tento rozsah měl dostatečně pokrýt obě části namáhání, a to jak pružného, tak plastického a zároveň zobrazit přechod mezi oběma oblastmi. Výsledky provedených zkoušek tento předpoklad potvrdily, i když by přechod měl být u nižší hodnoty  $\lambda$ .

Velmi problematické bylo dodržet způsob uchycení vzorků v trhacím zařízení (vyžadovalo by speciální kloubová uložení). Ve skutečnosti tím mohl být ovlivněn teoretický předpoklad uložení a předpokládané vzpěrné délky zkušebních těles. To by mohlo mít za následek zkreslení provedených měření.

## 10. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo shromáždit poznatky o dřevěných lepených prvcích, o jejich teoretickém návrhu a metodikách výpočtu. V oblasti experimentálních zkoušek byly testům podrobeny jednoduché zkušební vzorky na trhacím zkušebním lisu s mechanickým převodem.zařízením. Výsledné hodnoty byly zaneseny do tabulek a grafů. Lepení bylo u některých těles použito z důvodu zlepšení fyzikálních vlastností řeziva jako vstupního materiálu pro další zpracování a zajištění jeho efektivnějšího využití. Pro zjištění teoretických a skutečných hodnot bylo nutné nejprve pochopit chování dřeva a jeho fyzikální vlastností. Nejdůležitější je pro jakékoli zkoušky znát alespoň vlhkost dřeva, protože je s ní přímo svázána jeho únosnost. Proto byla všechna zkušební tělesa vyrobena již z vysušeného dřeva se zaručenou vlhkostí pod 12%. Byla sestavena zkušební metodika pro porovnání teoreticky vypočtených hodnot s hodnotami naměřenými na zkušebních vzorcích s následným hodnocením výsledků. Pro potřeby teoretického výpočtu bylo nutné stanovit únosnost zkušebního materiálu, která byla zjištěna na podle normy na vyrobených zkušebních tělesech. Výsledkem bylo zjištění, že teoretický výpočet předpokládá únosnosti mezi 16 a 26 MPa. Na deseti zkušebních vzorcích bylo zjištěno, že průměrná statistická hodnota činila 45,075 MPa. Z tohoto zjištění vyplynulo, že pro dřevěné konstrukce namáhané na tlak je už v základní vstupní návrhové hodnotě dostatečná bezpečnost vykrývající případné nestejnorodosti vstupního materiálu. Následně byly zpracovány teoretické návrhové výpočty zkušebních těles, podle teorie Eurokódu 5, zohledňující zatížení na vzpěr. Výpočet má již v sobě zahrnut bezpečnostní koeficienty zohledňující toto namáhání prostřednictvím vzpěrného koeficientu  $k_c$ . Po zjištění, že zkušební tělesa namáhaná na vzpěr unesla mnohonásobně vyšší zatížení, než jsme předpokládali, byly vstupní údaje teoretického výpočtu upraveny na hodnoty blížíící se více skutečnosti, z důvodu lepšího porovnání výsledků. Tyto hodnoty únosnosti materiálu jsme získali předchozími zkouškami na tělesech 20x20x120mm. Následně byly graficky a početně porovnány upravené výpočtové hodnoty podle Eurokódu 5, návrhu kritické síly podle Eulera a hodnoty získané při provedených zkouškách se závěrem, že výpočet podle Eurokódu 5 se

jeví jako nejbezpečnější. Teoretickým hodnotám se podařilo přiblížit nejvíce u krátkých zkušebních těles, u kterých se vzpěr tlačných prvků projevily nejméně. Největším překvapením bylo zjištění plynoucí z grafu číslo 4, kde při dosažení materiálových zkušebních hodnot se bezpečnost ve výpočtovém vzorci Eurokódu 5 s rostoucí vzpěrnou délkou zvyšovala. To je patrné i z výše uvedených výsledků. Základní výhodou, proč byl zvolen výpočet podle Eurokódu 5 je bezpochyby skutečnost, že návrhový vzorec lze použít pro celou oblast pružných i plastických deformací, což například metoda výpočtu podle Eulera neumožňuje. Výpočet podle Eulera lze použít maximálně v oblasti elastických deformací do kritického štíhlostního poměru  $\lambda$ . Pro oblast plastických deformací je pak nutno použít přímkovou náhradu podle Tetmajera. Dalším zjištěním bylo potvrzení klesající únosnosti prvků s rostoucí vzpěrnou délkou a přechod mezi plastickým a elastickým chováním zkušebních vzorků přes kritický štíhlostní poměr. Ten je zřejmý i z průběhu naměřených hodnot.

Pro měření byly použity co nejjednodušší profily vzorků z důvodu omezené možnosti délky zkušebních těles s ohledem na vzpěr.

Pro potvrzení závěrů zjištěných na zkušebních tělesech by bylo nutné ještě provést zkoušky na tělesech větších rozměrů, kde by se eliminovala eventuelní nehomogenita dřeva zjištěná při zkouškách na zkušebních vzorcích a zároveň by se zkoušky více přiblížily skutečně používaným rozměrům konstrukcí. Tento typ zkoušek však vyžaduje především zkušební zařízení (lisovací zařízení) s možností zatěžování vzorků v řádu několika metrů vysokých.

Nehomogenita dřeva se nejvíce projevila na první sadě zkušebních vzorků pro zjištění únosnosti, kde při stejných rozměrech vzorků docházelo k různým způsobům porušení.

Diplomová práce výpočtem a provedením jednoduchých zkoušek potvrdila, že návrh dřevěných prvků podle Eurokód 5 plně nahrazuje starší výpočtové metody a je na straně vyšší bezpečnosti.

Vypracoval: Bc. Petr SASÍNEK

V Praze 20. dubna 2009

## Seznam použité literatury:

- [1] Dřevěné konstrukce podle Eurokódu 5, STEP 1, Navrhování a konstrukční materiály, 1998 / autorizovaný překlad z anglického vydání Timber Engineering STEP1, 1995/ ISBN 80-238-2620-4
- [2] Kuklík Petr: Navrhování dřevěných konstrukcí, ČKAIT, 1997/ ISBN 80-86-047-19-9
- [3] Kuklík Petr: Dřevěné konstrukce, ČVUT 2005/ ISBN 80-01-03310-4
- [4] Kuklík Petr, Kuklíková Anna, Mikeš Karel: Dřevěné konstrukce 1 Cvičení, ČVUT 2008/ ISBN 978-80-01-03980-9
- [5] Dvořák Tomáš: Dřevěné konstrukce, ČVUT, 1992,
- [6] Jelínek František: Konstrukce pozemních staveb, Prvky zastřešení, ČVUT, 1978
- [7] ČSN EN 301 (66 8504) Fenolická a aminová lepidla pro dřevěné konstrukce - Klasifikace a technické požadavky
- [8] ČSN EN 408 (73 1741) Dřevěné konstrukce – Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo – Stanovení některých fyzikálních vlastností
- [9] Řezáček Jan: Přednášky z pružnosti a pevnosti I, ČVUT
- [10] Sasínek Petr: Bakalářská práce, Konstrukce z dřevěných lepených vazníků, ČZU, 2006
- [11] Výpočtový nadstavbový modul pro MS Excel, výpočet vzpěru od firmy MITCalc, <http://www.mitcalc.cz/>

## Seznam tabulek:

|  |    |
|--|----|
| Tab. 1: Třídy pevnosti a jakostní tříd, označení podle staré a nové normy.....   | 5  |
| Tab. 2: Třídy pevnosti a charakteristické hodnoty podle EN 338. Jehličnaté a topolové dřevo.....   | 5  |
| Tab. 3: Třídy pevnosti a charakteristické hodnoty podle prEN 1194 pro lepené lamelové dřevo.....   | 6  |
| Tab. 4: Hodnoty modifikačního součinitele pevnosti v závislosti na délce trvání zatížení.....  | 6  |
| Tab. 5: Rozdělení lepidel podle tříd a jejich použití .....  | 13 |
| Tab. 6: Min. smyková síla na zkušebních tělesech .....   | 13 |
| Tab. 7: Požadavky na odolnost proti delaminaci. ....   | 14 |
| Tab. 8: Zobrazuje výsledky měření a přepočítání na charakteristickou pevnost v tlaku .....   | 30 |
| Tab. 9: Výsledné statistické hodnoty zkoušek .....   | 33 |
| Tab. 10: Teoretický výpočet tlačných prvků podle normy ČSN EN 338.....   | 38 |
| Tab. 11: Hodnoty naměřené při deformaci na zkušebních tělesech.....  | 40 |
| Tab. 12: Naměřené únosnosti a vypočítané hodnoty únosnosti. $N_{c \text{ teoretická}}$ – hodnota vypočítaná podle Erokodu 5, $N_{c \text{ skutečná}}$ – naměřená hodnota na zkušebních tělesech, $N_{c \text{ krit. podle Eulera}}$ – kritická síla vypočítaná podle Eulera..... | 41 |

## Seznam grafů:

|   |    |
|---|----|
| Graf 1: Zobrazení charakteristické pevnosti zkušebních vzorků s vyznačenou průměrnou hodnotou a rozptylem.....  | 31 |
| Graf 2: Závislost napětí na štíhlostním poměru .....  | 39 |
| Graf 3: Zobrazuje skutečně naměřené hodnoty společně s teoretickými výpočty napětí v závislosti na štíhlostním poměru. Euler – výpočet podle Eulera, Linear – výpočet podle Tetmajera, EC 5 - teorie – teoretický výpočet podle tabulkových hodnot Eurokódu 5, SC – secant vzorec pro výpočet, kdy síla nepůsobí přesně v ose, Naměřené hodnoty – vzorky 10x17mm, EC 5 - teorie – teoretický výpočet s vyšší hodnotou napětí 45,075 N/mm <sup>2</sup> , Polynom 4. stupně prokládající naměřené hodnoty. .... | 42 |
| Graf 4: Zobrazuje bezpečnost zahrnutou ve vzorcích pro výpočet tlačných prutů podle EC 5 v závislosti na štíhlostním poměru.....  | 43 |

## Seznam obrázků:

|  |    |
|--|----|
| Obr. 1: 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. ....                                      | 7  |
| Obr. 2: Výroba lepeného lamelového dřeva. ....   | 8  |
| Obr. 3: Zubovitý profil ( $l$ = délka ozubu, $p$ = rozteč ozubů, $b_t$ = šířka tupého zakončení ozubů, $l_t$ = vůle v zubovitém spoji) .....   | 9  |
| Obr. 4: Technologie lepení vrstvených konstrukčních prvků .....  | 10 |
| Obr. 5: (a) Pultový nosník (b) Zakřivený nosník stálé výšky (c) Sedlový nosník s přímým dolním okrajem (d) se zakřiveným dolním okrajem.....   | 15 |
| Obr. 6: Typy příhradových vazníků: (a1, a2) trojúhelníkový vazník, (b) složený trojúhelníkový vazník, (c) přímopásový příhradový vazník, (d) nůžkový vazník, (e) obloukový vazník, (f) nosník čočkového tvaru..... | 16 |
| Obr. 7 Rámy: (a) s rozebíratelným rámovým rohem, (b) se zakřiveným rámovým rohem, (c) s kruhem hmoždíků, (d) s rámovým rohem se zubovitým spojem; Oblouky: (e) trojkloubový, (f) dvojklobový plochý.....           | 17 |
| Obr. 8: Některé z možných tvarů které lze lepením vytvořit I profil, uzavřený profil a T profil.....   | 18 |
| Obr. 9: Průběh charakteristických hodnot vzpěrného napětí v závislosti na štíhlostním poměru a zobrazení hodnot z průběhu 2 zkoušek s vyznačením 5%ního kvantilu.....  | 22 |
| Obr. 10: Způsoby porušení vzorků 1-5. Vzorky označené L a Z byly lepené. ....  | 34 |
| Obr. 11: Způsoby porušení vzorků 6-10. Vzorky označené L a Z byly lepené. ....   | 34 |

## Přílohy:

### Příloha A: (normativní) [ 7 ]

#### Úprava vzorků před smykovou zkouškou

Adherendy<sup>1)</sup> se slepí a potom kondicionují 7 dní ve standardním prostředí 20/65. Připraví se zkušební tělesa a exponují se za podmínek předepsaných v tabulce A1.

| Označení   | Expozice  |
|--|---|
| A1   | - 7 dní ve standardním prostředí (20/65)  |
| A2   | - 7 dní ve standardním prostředí (20/65)<br>- 4 dny ve vodě při (15 +5) °C Zkouší se v mokrém stavu   |
| A3   | - 7 dní ve standardním prostředí (20/65)<br>- 4 dny ve vodě při (15 ±5) °C<br>- 7 dní sušení ve standardním prostředí (20/65) Zkouší se v suchém stavu                |
| A4   | - 7 dní ve standardním prostředí (20/65)<br>- 6 h ve vařící vodě<br>- 4 h ve vodě při (15 ±5) °C Zkouší se v mokrém stavu   |
| A5   | - 7 dní ve standardním prostředí (20/65)<br>- 6 h ve vařící vodě -2h.ve.vodě.při(15±5) °C<br>- 7 dní sušení ve standardním prostředí (20/65) Zkouší se v suchém stavu |
| Standardní prostředí (20/65) je definováno při teplotě (20 +2) °C a relativní vlhkosti (65 ±5) % |   |

*Tab. A1 Typ a doba expozice před smykovou zkouškou v tahu*

<sup>1</sup> ADHEREND - materiál slepený nebo určený ke slepení s jiným materiálem



## Příloha B: (normativní) [ 7 ]

### Cykly úpravy vzorků pro stanovení delaminace

Adherendy<sup>2</sup> se slepí a potom se kondicionují minimálně 7 dní ve standardním prostředí 20/65. Připraví se zkušební tělesa a exponují se v cyklech předepsaných v tabulce B1.

| Typ expozice                   | Parametr                     | Jednotka                                 | Označení   |       |
|--------------------------------|------------------------------|--|------------|-------|
|                                |                              |  | B1         | B2    |
| ponoření ve vodě<br>(15 ±5) °C | absolutní tlak               | kPa                                      | 25 ±5      | 25 ±5 |
|                                | doba                         | min                                      | 15         | 5     |
|                                | absolutní tlak               | kPa                                      | 600 ±25    |       |
|                                | doba                         | h  | 2          | 1     |
|                                | počet cyklů ponoření         |  | 2          | 2     |
| sušení                         | teplota                      | °C                                       | 28 ±1      | 65 ±5 |
|                                | vlhkost vzduchu              | %  | 30 ±5      | 15    |
|                                | rychlost proudění<br>vzduchu | m/s                                      | 2,25 ±0,25 |       |
|                                | doba                         | h  | 96         | 22    |
|                                | počet cyklů a doba           | počet cyklů<br>(2x ponoření a 1x sušení) |            | 2     |
| celková doba                   |                              | dny                                      | 8          | 3     |

Tab B1: Souhrn podmínek při hodnocení delaminace

<sup>2</sup> ADHEREND - materiál slepený nebo určený ke slepení s jiným materiálem

## Příloha C: Výroba dřevěného lepeného vazníku nebo sloupu

Výroba dřevěného lepeného vazníku je složena z několika po sobě následujících výrobních procesů. Fotodokumentace autora z návštěvy výrobního závodu TESKO, 3 listy fotodokumentace s popisem výroby

### POPIS VÝROBY LEPENÉHO VAZNÍKU K FOTODOKUMENTACI

Přivezené a uskladněné řezivo o délce 1,5 až 5m foto č.1 projde procesem parního sušení, při kterém je zbaveno přebytečné vlhkosti až na normou stanovenou max. hodnotu 15%. Ve skutečnosti se řezivo vysouší na vlhkost 12 % z důvodu vyloučení možných tvarových změn vzniklých dodatečným vysycháním.(rovnovážná vlhkost dřeva ve vytápěných místnostech je 9 až 12 %)

- 1) Po sušení je řezivo předběžně frézováno a tříděno. Následuje kontrola vlhkosti dřeva.
- 2) Poté řezivo prochází automatickou a manuální kontrolou jakosti s označením nevyhovujících částí. Následuje jejich automatické odstranění foto č.2 a kapování.Vyhovující přířez je postaven na výšku a následuje proces cinkování.
- 3) Při zpětném průjezdu cinkovacího zařízení je na jednu stranu přířezu nanesena jedna ze složek dvousložkového lepidla. Následuje proces cinkování opačné strany a nanesení druhé složky lepidla foto č.3.
- 4) Lamela je podle potřeby zkracována na požadovanou délku budoucích vazníků. Po určité délce je vždy jeden cinkovaný spoj vyříznut a zařazen do souboru spojů, na kterých bude destruktivně provedena zkouška
- 5) Poté následuje postupné slisování jednotlivých částí, takže jsou třením působícím mezi ozuby drženy pohromadě. Tím vzniká nekonečná lamela foto č.4.
- 6) Následuje technologický proces vyžrávání lepidla ve spojích před samotným použitím do lepeného vazníku.
- 7) Na vyžralé lamely se nanese kontinuálně přesná vrstva lepidla z nanášecího zařízení foto č.5 a dále jsou přepraveny na manipulační

prostor, kde jsou zarovnány a vyrovnány do budoucí skladby vazníku foto č.6.

- 8) Následuje přesunutí lamelového dřeva vazníku buď do lisovacího zařízení, nebo ke speciální konstrukci, k níž bude vazník vyrovnán a předem stanoveným momentem (závisí na počtu, velikosti lamel a typu vazníku) přitažen foto č.7. Tím se zabezpečí rovnoměrné spojení jednotlivých lamel. U vazníků obloukových se vazníky přitahují postupně k předem připravenému rámu o poloměru o něco menším než je poloměr vazníku. Počítá se s drobným dotvarováním po uvolnění již vyztuženého vazníku od výrobní konstrukce.
- 9) Následují dva procesy hoblování, nejprve hrubý k vyrovnání lamel a poté jemný k pohledové povrchové úpravě.
- 10) Poté jsou konce vazníků zakráčeny na přesné požadované rozměry a úhly.
- 11) Následuje vyvrtání otvorů pro kování, povrchové úpravy vazníků (ochrana proti dřevokazným houbám a hmyzu).
- 12) Montáž kování.
- 13) Nakonec jsou vazníky zabaleny do fólie a jako celek připraveny pro přepravu na místo určení.



*foto č.1 uskladněné řezivo v hráních*



*foto č.2 měření vlhkosti a zjištění nevyhovujících částí s vyznačením a následným odstraněním*



*foto č.3 cinkovací stroj*



*foto č.4 vytvoření tzv.nekonečného prkna z lamel s lepidlem*



*foto č.5 nanášecí zařízení  
(lamela projede skrz lepidlo)*



*foto č.6 lamely s naneseným lepidlem (neslepený vazník)*



*foto č.7 slepený stažený vazník*

## Příloha D: Použitá označení ve vzorcích

|  |  |
|--|--|
| $f_{m,k}, f_{m,g,k}$                         | charakteristická pevnost v ohybu $[N/mm^2]$ .  |
| $f_{t,0,k}, f_{t,0,g,k}$<br>$[N/mm^2]$ .     | charakteristická pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny  |
| $f_{t,90,k}, f_{t,90,g,k}$                   | charakteristická pevnost v tahu kolmo na vlákna $[N/mm^2]$ .   |
| $f_{c,0,k}, f_{c,0,g,k}$                     | charakteristická pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny $[N/mm^2]$ .  |
| $f_{c,0,d}$                                  | návrhová pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny $[N/mm^2]$ .  |
| $f_{c,90,k}, f_{c,90,g,k}$                   | charakteristická pevnost v tlaku kolmo na vlákna $[N/mm^2]$ .  |
| $f_{v,k}, f_{v,g,k}$                         | charakteristická pevnost ve smyku $[N/mm^2]$ .   |
| $E_{0,mean}, E_{0,mean,g}$                   | průměrná hodnota modulu pružnosti $[N/mm^2]$ .   |
| $E_{0,05}, E_{0,05,g}$                       | hodnota 5%kvantilu modulu pružnosti $[N/mm^2]$ .   |
| $E_{90,mean}, E_{90,mean,g}$<br>$[N/mm^2]$ . | průměrná hodnota modulu pružnosti kolmo na vlákna  |
| $G_{mean}, G_{mean,g}$                       | průměrná hodnota modulu pružnosti ve smyku $[N/mm^2]$ .  |
| $\rho_k, \rho_{g,k}$                         | charakteristická hustota $[kg/m^3]$  |
| index $g$                                    | označuje parametry lepeného dřeva  |
| $\lambda_y$ a $\lambda_{rel,y}$              | odpovídá vzpěru k ose $y$ (prut vybočuje v ose $z$ ) [-]   |
| $\lambda_z$ a $\lambda_{rel,z}$              | odpovídá vzpěru k ose $z$ (prut vybočuje v ose $y$ ) [-]   |
| $\sigma_{c,0,d}$                             | návrhové napětí v tlaku rovnoběžně s vlákny $[N/mm^2]$ .   |
| $\sigma_{m,y,d}, \sigma_{m,z,d}$             | návrhové hodnoty napětí v ohybu $[N/mm^2]$ .   |
| $f_{m,y,d}, f_{m,z,d}$                       | návrhové pevnost v ohybu $[N/mm^2]$ ,  |
| $k_{crit}$                                   | součinitel s ohledem na příčnou a torzní stabilitu podle způsobu namáhání.   |
| $k_m$  | součinitel pro šikmý ohyb [-]  |
| $k_{c,y}$ , a $k_{c,z}$                      | součinitelé vzpěrnosti [-]   |
| $\beta_c$                                    | součinitel [-] platný pro prvky splňující amplitudy zakřivení měřené uprostřed mezi podpěrami, kde může nastat příčná nestabilita nesmí být amplitudy větší než : pro rostlé dřevo 1/500 délky pak $\beta_c = 0,2$ a pro lepené lamelové 1/300 délky pak $\beta_c = 0,1$ . |
| $I$  | nejmenší moment setrvačnosti průřezu prutu $[mm^4]$ .  |
| $E$  | modul pružnosti materiálu v ohybu $[N/mm^2]$ .   |
| $l$  | délka prutu $[mm]$   |
| $A$  | plocha průřezu prutu $[mm^2]$  |
| $\lambda$                                    | štíhlost prutu [-]   |
| $l, L_v$                                     | vzpěrná délka $[mm]$   |
| $i$  | poloměr setrvačnosti průřezu $[mm]$  |
| $\sigma_{c,f}$                               | mez pevnosti materiálu v tlaku $[N/mm^2]$  |

|                       |   |
|-----------------------|---|
| $\sigma_{c,crit}$     | kritické napětí v prutu při ztrátě stability [N/mm <sup>2</sup> ] |
| $F_{max}, N_{c,krit}$ | maximální síla dosažená při zkoušce na zkušební tělese [N].       |
| $h_{ap}$              | poměru výšky ve vrcholu nosníku [mm]                              |
| $\sigma_{m,d}$        | Napětí za ohybu ve vrcholu [N/mm <sup>2</sup> ]                   |
| $M_{ap,d}$            | návrhová hodnota ohybového momentu ve vrcholu [Nm]                |
| $a, b$                | rozměry zkušebních vzorků sloupů [mm]                             |

### Obecné značení v Eurokódu 5: [ 3 ]

#### Značky:

|           |   |
|-----------|---|
| $F$       | - zatížení [kN, kN/m, kN/m'];                       |
| $G$       | - stálé zatížení [kN, kN/m, kN/m <sup>2</sup> ];    |
| $Q$       | - nahodilé zatížení [kN, kN/m, kN/m <sup>2</sup> ]; |
| $K$       | - modul prokluzu [N/mm];                            |
| $V$       | - posouvající síla [kN, N];                         |
| $f$       | - pevnost materiálu [N/mm <sup>2</sup> , MPa];      |
| $k$       | - součinitel (vždy s indexem);                      |
| $s$       | - rozteč [mm];                                      |
| $u, v, w$ | - složky přemístění bodu [mm].                      |

#### Indexy:

|                     |                      |        |   |
|---------------------|----------------------|--------|---|
| $G$                 | - stálé zatížení;    | $mod$  | - modifikační;                                      |
| $Q$                 | - nahodilé zatížení; | $nom$  | - nominální;  |
| $c$                 | - tlak;              | $ser$  | - použitelnost;                                     |
| $cr$ (nebo $crit$ ) | - kritický;          | $t$    | - tah;  |
| $d$                 | - návrhový;          | $tor$  | - kroucení;   |
| $ef$                | - účinný;            | $u$    | - mez   |
| $f$                 | - pás, plášť;        | $v$    | - smyk;   |
| $h$                 | - otlačení;          | $y$    | - plastický;  |
| $k$                 | - charakteristický;  | $0,90$ | - příslušné směry ve vztahu ke směru vláken;        |
| $m$                 | - ohyb;              | $05$   | - příslušné procento pro charakteristickou hodnotu. |
| $mean$              | - průměrný;          |        |   |