

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



Disertační práce

**Analýza mechanicko-termo-sorpční deformace při tečení  
termicky upraveného dřeva**

Autor: Ing. Tomáš Holeček

Školitel: Ing. Vlastimil Borůvka, PhD.

Školitel specialista: doc. Ing. Aleš Zeidler, Ph.D.

2020

"Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma *Analýza mechanicko-termo-sorpční deformace při tečení termicky upraveného dřeva* vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací a doporučení školitele a školitele specialisty. Souhlasím se zveřejněním disertační práce dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby."

V..... dne .....

Podpis autora .....

## Abstrakt

Dřevo je materiál, který podléhá různým vlivům prostředí. Proto je nutné tento materiál různými způsoby upravovat. Jedna z nejekologičtějších metod úpravy je termická modifikace, která zvyšuje jeho odolnost a trvanlivost při venkovní expozici. Pochopení změn v termo dřevě a vliv těchto změn na mechanické vlastnosti otevírá širší možnosti pro jeho využití.

Dřevo patří mezi viskoelastické materiály a při dlouhodobém zatížení teče. Ve dřevě během tohoto zatížení vznikají deformace elastické, elastické v čase a plastické.

Tato práce se zabývá problematikou reologie termo dřeva při dlouhodobém zatížení ve čtyřbodovém ohybu. Práce porovnává jednotlivé poměry deformací v rámci jednotlivých stupňů úpravy. Byly porovnány poměry deformací u teplotních úprav (150, 160, 170, 180, 190 °C) při konstantních vnějších podmínkách za sledované období 760 h při aplikovaném zatížení 25% z meze pevnosti. Při vyhodnocení rostoucích deformací byl použit Burgerův model. Dále byly porovnávány poměry deformací u tepelných úprav (160, 180, 190, 200 °C) ve vnější expozici. Doba měření byla 31951 h při 25% zatížení z meze pevnosti. Pro vyhodnocení byl použit Burgerův model a upravený Burgerův model.

Z výsledku vyplívá, že stupeň úpravy 160 °C je nejvhodnější pro konstrukční užití a v porovnání s neupraveným dřevem teče víc. Při vyšších teplotách úpravy se již projevuje snížení mechanických vlastností. Dále se prokázal stejný trend změn podílu deformací u vzorků v konstantních vnitřních podmínkách, jako u vzorků vystavených vnějším klimatickým podmínkám. Zásadním zjištěním je doba ustálení deformace způsobená mechanickým namáháním. Tato doba u neupraveného dřeva trvala téměř 417 dní oproti tomu termo dřevo v závislosti na stupni úpravy se ustálilo v rozmezí 40 až 58 dní.

Z této práce vyplívají další možnosti využití termo dřeva v praxi, vzhledem k objasnění některých reologických parametrů a trendů, které toto dřevo vykazuje. Rychlost ustálení mechanické deformace svědčí o mnohem větší stabilitě daného materiálu, který je tedy vhodný ke kombinaci s materiály, které vykazují stejné vlastnosti.

Klíčová slova:

Reologie, viskoelastická, deformace, termodřevo, dlouhodobé zatížení, ohyb, modelování, creep

## **Abstract**

Wood is a material that is subject to different environmental influences and therefore it is necessary to treat it in various ways. Thermal modification is one of the most environmentally friendly methods of treatment, which increases its resistance and outdoor exposure durability. Understanding the changes in thermo-wood and understanding the effect of those changes on mechanical properties opens wider possibilities for its use.

Wood is a viscoelastic material and it flows under long-term load. In the case of applying this load, the elastic, elastic over time and plastic deformations arise.

This work deals with the issue of thermo-wood rheology under long-term loading in four-point bending. The thesis, compares the individual deformation ratios within the individual adjustment stages. The deformation ratios of temperature adjustments (150, 160, 170, 180, 190 ° C) were compared under constant external conditions during the monitored period of 760 hours at an applied load of 25% of the strength limit. Burger model was used to evaluate increasing deformations. Furthermore, the deformation ratio of heat treatments (160, 180, 190, 200 ° C) in external exposure was compared. The measurement time was 31951 h at 25% of the breaking load. Burger model and modified Burger model were used for evaluation.

As a result, the degree of treatment of 160 ° C is best suited for construction use and it flows more compared to untreated wood. At higher treatment temperatures, the mechanical properties are already reduced. As well, the same trend of changes in the deformation ratio of the sample under constant external conditions as with the sample exposed to external climatic conditions was demonstrated. The principal finding is the time of deformation stabilization caused by mechanical stress. This time for untreated timber lasted nearly 417 days compared to thermo timber stabilized between 40 and 58 days, depending on the degree of treatment,

Other possibilities of using thermo-wood in practice arise from this work with respect to elucidation of some rheological parameters and trend that this wood shows. The rate of mechanical deformation stabilization indicates a much greater stability of the material and is therefore suitable for combination with materials that exhibit the same properties.

Keywords:

Rheology, viscoelasticide, deformation, thermo-wood, long-term load, bending, modeling, creep

## OBSAH

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>7</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM GRAFŮ</b> .....	<b>11</b>
<b>SEZNAM ZKRATEK</b> .....	<b>12</b>
<b>1 ÚVOD</b> .....	<b>14</b>
<b>2 CÍL PRÁCE</b> .....	<b>15</b>
<b>3 LITERÁRNÍ ROZBOR PROBLEMATIKY</b> .....	<b>16</b>
3.1 Dřevo jako materiál .....	16
3.2 Dřevo z pohledu anatomické stavby .....	17
3.3 Chemické složení dřeva .....	19
3.4 Dřevo a jeho modifikace .....	22
3.4.1 Vliv modifikace dřeva na strukturu .....	26
3.5 Technologie výroby termo-dřeva .....	29
3.6 Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva (termo-dřeva) .....	32
3.7 Reologické modely.....	36
3.8 Možnosti řešení daného problému .....	47
3.9 Způsoby měření a možné chyby při vyhodnocení .....	48
<b>4 Materiál</b> .....	<b>49</b>
4.1 Druh materiálu .....	49
4.2 Příprava zkušebních těles .....	50
4.3 Metoda termické modifikace.....	51
4.4 Zkušební zařízení na dlouhodobé zkoušky .....	53
<b>5 Metodika</b> .....	<b>56</b>
5.1 Metodický postup při měření modulu pružnosti .....	56
5.2 Metodický postup při dlouhodobých experimentech za konstantních podmínek	
	60

5.3	Metodický postup při dlouhodobých experimentech při nekonstantních podmínkách.....	63
<b>6</b>	<b>Výsledky .....</b>	<b>67</b>
6.1	Vyhodnocení vlivu úpravy na modul pružnosti.....	67
6.2	Výsledky dlouhodobých pokusů s konstantním prostředím .....	72
6.3	Výsledky dlouhodobých pokusů s nekonstantními podmínkami .....	77
<b>7</b>	<b>Diskuze .....</b>	<b>82</b>
<b>8</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>86</b>
<b>9</b>	<b>Seznam literatury a použitých zdrojů .....</b>	<b>88</b>
<b>10</b>	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>95</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 3-1 Mikroskopická stavba smrku v rámci jednotlivých řezů při zvětšení 40x (Zeidler 2016) ....	18
Obrázek 3-2 Schematický diagram ilustrující účinek chemické modifikace (Sandberg 2017).....	24
Obrázek 3-3 Schéma výroby ThermoWood(Thermowood Handbook 2003)	
Obrázek 3-4 Schematický diagram ilustrující účinek chemické modifikace (Sandberg 2017).....	24
Obrázek 3-5 Schéma výroby ThermoWood(Thermowood Handbook 2003).....	30
Obrázek 3-6 Sorpčně-desorpční hystereze dřeva bez tepelné úpravy, a s tepelnou úpravou při teplotě 250 °C v atmosféře dusíku po dobu 2 hodin (Hill 2006) .....	33
Obrázek 3-7 Změna hustoty v závislosti na teplotě úpravy (Thermowood Handbook 2003).....	34
Obrázek 3-8 Změna ohybové pevnosti při tepelné úpravě (Thermowood Handbook 2003)	
Obrázek 3-9 Změna hustoty v závislosti na teplotě úpravy (Thermowood Handbook 2003).....	34
Obrázek 3-10 Změna ohybové pevnosti při tepelné úpravě (Thermowood Handbook 2003) .....	35
Obrázek 3-11 Změna modulu pružnosti u borovice vystavená tepelné úpravě.....	36
Obrázek 3-12 Lineárně pružné chování při konstantním napětí (Guedes 2011)	
Obrázek 3-13 Změna modulu pružnosti u borovice vystavená tepelné úpravě. ....	36
Obrázek 3-14 Lineárně pružné chování při konstantním napětí (Guedes 2011).....	37
Obrázek 3-15 Lineárně plastické chování při konstantním napětí (Guedes 2011)	
Obrázek 3-16 Lineárně pružné chování při konstantním napětí (Guedes 2011).....	37
Obrázek 3-17 Lineárně plastické chování při konstantním napětí (Guedes 2011).....	38
Obrázek 3-18 Model St.Venantovy plastické látky (Fsv ČVUT 2010) .....	39
Obrázek 3-19 Tečení a relaxace – závislost deformace a napětí na čase (Lakes 2009) .....	40
Obrázek 3-20 Pracovní diagram dřeva (Požgaj a kol. 1993) .....	41
Obrázek 3-21 Tečení – závislost deformace na čase při rozdílném konstantním zatížení (Lakes 2009) ...	42
Obrázek 3-22 Maxwellův model a průběh jeho odpružení (Požgaj 1985).....	43
Obrázek 3-23 Kelvinův model a průběh jeho odpružení (Požgaj 1985)	
Obrázek 3-24 Maxwellův model a průběh jeho odpružení (Požgaj 1985) .....	43
Obrázek 3-25 Kelvinův model a průběh jeho odpružení (Požgaj 1985).....	44
Obrázek 3-26 Tříprvkový Thomson – Poyntingův model (Sobotka 1981).....	45
Obrázek 3-27 Burgerův model se čtyřmi prvky (Moutee et. al. 2005) .....	46
Obrázek 4-1 Názorné schéma zpracování zkušebních těles do určité fáze přípravy.....	50
Obrázek 4-2 Pořezové schéma finálních těles určených na pokusy.....	51
Obrázek 4-3 Průběh jednotlivých tepelných úprav v závislosti na čase .....	52
Obrázek 4-4 Schéma creepového zařízení použitého při měření ( patent příloha 1) .....	54
Obrázek 4-5 Princip výpočtu potřebného závaží k vyvinutí zatěžované síly.....	55
Obrázek 5-1 Postup měření ultrazvukem na jednotlivých vzorcích.....	56
Obrázek 5-2 způsob získání korekce pro jednotlivé vzorky .....	57

Obrázek 5-3 Metoda měření kolmo na vlákna.....	58
Obrázek 5-4 Metoda měření podél vláken.....	58
Obrázek 5-5 Princip statické ohybové zkoušky.....	59
Obrázek 5-6 Tří bodové schéma zatěžováníObrázek 5-7 Princip statické ohybové zkoušky.....	59
Obrázek 5-8 Tří bodové schéma zatěžování.....	60
Obrázek 5-9 Schéma čtyřbodového ohybu.....	64



## SEZNAM TABULEK

Tabulka 3-1 Vývoj trhu dřevostaveb v České republice (podíl dřevostaveb na trhu rodinných domů).....	16
Tabulka 3-2 Procentuální zastoupení elementů tvořících dřevo jehličnanu z celkového objemu dřeva (Perelygin 1965) .....	17
Tabulka 4-1 Vybrané Mechanické a fyzikální vlastnosti dřeva smrku ztepilého uvedených v literatuře..	49
Tabulka 4-2 Parametry nastavení termokomory při tepelné modifikaci. ....	53
Tabulka 6-1 Duncanův test; proměnná $E_{dyn,w}$ (MPa) difference.....	68
Tabulka 6-2 Jednorozměrné testy významnosti pro $E_{dyn,w}$ (MPa) difference.....	68
Tabulka 6-3 Vážený průměr $E_{dyn,w}$ (MPa) dif.....	68
Tabulka 6-4 Hodnoty korelace dynamického a statického modulu .....	70
Tabulka 6-5 Duncanův test; proměnná Hustota ( $Kg/m^3$ ) .....	71
Tabulka 6-6 Duncanův test na zjištění statisticky významných rozdílů mezi příčným a podélným směrem. ....	71
Tabulka 6-7 Základní popisná statistika hustoty neupraveného dřeva a termicky modifikovaného dřeva uvedená veličina je v $kg/m^3$ . ....	72
Tabulka 6-8 Základní popisná statistika dynamického modulu pružnosti měřený přístrojem FAKOP, uvedená veličina je v MPa. ....	72
Tabulka 6-9 Základní popisná statistika elastického modulu pružnosti u jednotlivých sérií. Uvedená veličina je $E_{el}$ MPa. ....	74
Tabulka 6-10 Základní popisná statistika viskoelastického modulu pružnosti u jednotlivých sérií. Uvedená veličina je $E_{vel}$ MPa.....	74
Tabulka 6-11 Základní popisná statistika relaxačního času u jednotlivých sérií. Uvedená veličina je $\tau$ v hodinách.....	74
Tabulka 6-12 Základní popisná statistika faktoru tečení u jednotlivých sérií. Uvedená veličina je $K(t)$ ...	75
Tabulka 6-13 Základní popisná statistika elastické deformace $\epsilon_{el}$ . ....	75
Tabulka 6-14 Základní popisná statistika viskoelastické deformace $\epsilon_{vel}$ . ....	75
Tabulka 6-15 základní popisná statistika plastické deformace $\epsilon_{pl}$ . ....	75
Tabulka 6-16 Procentuální vyjádření procentuálního podílu jednotlivých deformací u jednotlivých sérií. ....	76
Tabulka 6-17 Procentuální vyjádření podílu deformací vyhodnocený Burgerovým modelem a upraveným Burgerovým modelem u referenčního smrkového dřeva.....	77
Tabulka 6-18 Procentuální vyjádření podílu deformací vyhodnocený Burgerovým modelem a upraveným Burgerovým modelem u tepelné úpravy $160^{\circ}C$ .....	77
Tabulka 6-19 Procentuální vyjádření podílu deformací vyhodnocený Burgerovým modelem a upraveným Burgerovým modelem u tepelné úpravy $180^{\circ}C$ .....	78
Tabulka 6-20 Procentuální vyjádření podílu deformací vyhodnocený Burgerovým modelem a upraveným Burgerovým modelem u tepelné úpravy $190^{\circ}C$ .....	78
Tabulka 6-21 Procentuální vyjádření podílu deformací vyhodnocený Burgerovým modelem a upraveným Burgerovým modelem u tepelné úpravy $200^{\circ}C$ .....	78

Tabulka 6-22 Přehled ustálení mechanické deformace v čase.....	81
--	----

## SEZNAM GRAFŮ

Graf. 6-1 Vliv tepelné úpravy na modul pružnosti v radiálním a tangenciálním směru. ....	67
Graf. 6-2 Vztah mezi vzdáleností měření na korelaci dynamického modulu se statickým modulem.....	69
Graf. 6-3 Vyhodnocení určování dynamického modulu pružnosti pomocí rezonanční metody v příčném a podélném směru.....	70
Graf. 6-4 Změna hustoty jednotlivých těles, vzhledem ke stupni termické úpravy. ....	73
Graf. 6-5 Změna dynamického modulu pružnosti v závislosti na stupni termické úpravy. ....	73
Graf. 6-6 Podíl deformací u neupraveného dřeva a u jednotlivých stupňů úpravy v %.....	76
Graf. 6-7 Grafické znázornění podílu deformací zjištěných pomocí UBM .....	79
Graf. 6-8 Vyhodnocení dat s nekonstantními vnějšími podmínkami 31951 hodin BM.....	79
Graf. 6-9 Vyhodnocení dat s konstantními vnějšími podmínkami 760 hodin BM. ....	79
Graf. 6-10 Graficky znázorněné relaxační časy získané z BM a UBM .....	80
Graf. 6-11 UBM model tvrdí, že deformace roste spolu s vlhkostí. ....	80
Graf. 6-12 UBM model tvrdí, že deformace klesá, pokud roste vlhkost.....	80

## SEZNAM ZKRATEK

**a** Parametr modelové funkce tečení

**b** Šířka zkušebního vzorku [mm]

**b** Parametr modelové funkce tečení

**c** Parametr modelové funkce tečení

$\Delta_w$  Vlhkostní změna

**E** Youngův modul pružnosti (MPa)

**E<sub>cel</sub>** Celkový modul pružnosti (MPa)

**E<sub>el</sub>** Elastický modul pružnosti (MPa)

**E<sub>vel</sub>** Viskoelastický modul pružnosti (MPa)

**E<sub>pl</sub>** Plastický modul pružnosti (MPa)

**E<sub>dyn</sub>** Dynamický modul pružnosti (MPa)

**E<sub>stat</sub>** Statický modul pružnosti (MPa)

$\varepsilon$  Poměrná deformace

$\varepsilon_0$  Počáteční poměrná deformace

$\varepsilon_{cel}$  Celková poměrná deformace

$\varepsilon_{el}$  Pružná poměrná deformace

$\varepsilon_{vel}$  Viskoelastická poměrná deformace (pružná v čase)

$\varepsilon_{pl}$  Plastická poměrná deformace

**F<sub>max</sub>** Maximální zatěžovací síla, vyvolává napětí na mezi pevnosti (N)

**h** Výška zkušebního vzorku (mm)

**$\eta$**  Součinitel dynamické viskozity (vnitřního tření) (Nsm<sup>-2</sup>) (MPa·h)

**$\eta_{vel}$**  Součinitel dynamické viskozity pístu Kelvinova modelu ( $Nsm^{-2}$ ) ( $MPa \cdot h$ )

**$\eta_{pl}$**  Součinitel dynamické viskozity (vnitřního tření) pístu ( $Nsm^{-2}$ ) ( $MPa \cdot h$ )

**I** Moment setrvačnosti ( $kg \cdot m^2$ )

**J** Převrácená hodnota modulu pružnosti ( $m^2 N^{-1}$ )

**K (t)** Faktor tečení

**$K_w$**  Vlhkostní reologická konstanta ( $h^{-1}$ )

**$l_0$**  Vzdálenost podpor (mm)

**M** Ohybový moment (Nm)

**$\mu_{ms}$**  Mechano-sorpční reologická konstanta (MPa)

**Q** Přerážecí práce (J)

**$\rho$**  Hustota ( $kg m^{-3}$ )

**$\sigma$**  Napětí (MPa)

**$\sigma_0$**  Počáteční napětí (MPa)

**t** Čas (s)

**$\tau_{vel}$**  Viskoelastický relaxační čas (h)

**$\tau_w$**  Vlhkostní relaxační čas (h)

**v** Rychlost ( $m s^{-1}$ )

**w** Absolutní vlhkost dřeva (%)

**y** Průhyb neutrální osy (mm)

**BM** Burgeruv model

**UBM** upravený Burgeruv model

**atd.** a tak dále

**např.** například

# 1 ÚVOD

Zdravé vnitřní prostředí, ekologické přírodní materiály z trvale udržitelných zdrojů a eliminace využívání fosilních zásob se v posledním desetiletí staly globální prioritou. Surovinou s nejvyššími předpoklady pro splnění těchto požadavků stále se rozvíjející a zrychlující společnosti je dřevo a materiály na jeho bázi. Zpracování dřeva má v České republice dlouholetou tradici. Vedle přírodně rostlého dřeva jsou zde reprezentovány aglomerované materiály a další modifikace dřeva, které tento materiál upravují tak, aby byl vhodnější k použití ve společnosti. Potřeby společnosti kladou vyšší nároky na materiály jako takové, například pevnost nebo odolnost vůči vnějším podmínkám. Vzhledem k hledání způsobu úpravy, která je k životnímu prostředí šetrná a modifikuje dřevo v celém průřezu, je termická úprava dřeva považována za vhodnou. Tepelně zpracované dřevo neboli Thermowood, z anglického Thermally modified wood, je dřevo, u kterého dochází ke změně vlastností díky modifikaci kontrolovanou pyrolýzou, což je tepelná úprava v teplotním rozmezí 150–230 °C bez vstupu kyslíku. K tepelnému zpracování dřeva slouží několik technologických postupů, které využívají různých prostředků, jako je dusík, plyn, pára či zahřátý olej. Tepelné změny ve dřevě zvyšují dobu trvanlivosti bez použití chemické ochrany. Dalším charakteristickým znakem je odstranění veškeré pryskyřice ze dřeva během ošetřovacího procesu. V kombinaci se zvýšenou stabilitou a odolností lze díky těmto zásahům snížit nároky na údržbu. To znamená, že tento materiál je vhodné použít i do vnitřních konstrukcí dřevostaveb, protože jeho odolnost proti vlhkosti a rozměrová stabilita jsou vhodnými vlastnostmi. Dále tento materiál musí splňovat i pevnostní nároky na dané prvky, potažmo musíme znát přesné reologické vlastnosti tohoto materiálu. Reologie je vědní obor mechaniky spojitých prostředí (mechaniky kontinua), který se věnuje zkoumání a modelování deformačních vlastností látek. Jejím úkolem je stanovit vztah mezi napětím, deformací a rychlostí deformace pro jednotlivé látky. Přesné řešení tohoto úkolu je obvykle nemožné, proto reologie zavádí modely přibližně vystihující charakter deformačního chování různých skupin látek.

## 2 CÍL PRÁCE

Stěžejním cílem této disertační práce bude analyzování a modelování změn deformace při trvalém zatížení dřeva v ohybu při konstantních a měnících se klimatických podmínkách, posouzení vlivu termické úpravy a stupně zatížení na tečení dřeva.

K vyhodnocení reologických procesů bude použit Burgerův model, upravený Burgerův model zohledňující vliv vlhkosti na průběh deformace a případně Burgerův model s „nekonstantními“ parametry, respektive i jiný model, který se ukáže jako výstižnější. Výsledným cílem práce bude porovnání reologických parametrů.

### 3 LITERÁRNÍ ROZBOR PROBLEMATIKY

#### 3.1 Dřevo jako materiál

Dřevo je jedním z nejstarodávnejších přírodních obnovitelných materiálů, který byl a stále je využíván jako stavební materiál ke stavbě nejen lidských obydlí. Využití dřeva pro stavební účely je známo už od počátků architektury, a společně s vývojem lidstva se toto využití postupně zdokonalovalo od prvních primitivních obydlí (zástěny, chýše) přes srubové, nákolní a hrázděné stavby až do současné moderní architektury.

Ze statistik vyplývá, že české stavebnictví v roce 2017 meziročně vzrostlo o 3,3 %. Analogického výsledku bylo dosaženo i v oblasti výstavby rodinných domů. V roce 2017 jich bylo v ČR dokončeno celkem 14 548 bytových jednotek, což bylo meziročně o 533 domů, resp. o 3,8 % více než v roce 2016. Pro dřevostavby je ku prospěchu to, že výstavba rodinných domů s nosnou konstrukcí na bázi dřeva zaznamenala meziroční růst o 7,25 %, zatímco u domů vybudovaných z obvyklých materiálů (cihly, tvárnice a cihelné bloky) byl zaregistrován meziroční nárůst pouze kolem tří procent (měřeno podle indexu počtu dokončených rodinných domů 2016/2017). Z výše uvedených hodnot vyplývá, že dynamika růstu počtu zkolaudovaných rodinných domů – dřevostaveb, je u nás 2,5krát vyšší než u domů postavených konvenčními technologiemi. (ČSÚ, ADMD 2019)

Tabulka 3-1 Vývoj trhu dřevostaveb v České republice (podíl dřevostaveb na trhu rodinných domů)

Rok	Rodinné domy dokončené v ČR (v ks)	Dřevostavby dokončené v ČR (v ks)	Podíl dřevostaveb na trhu v ČR (v %)
1999	8 251	92	1,12
2002	11 499	159	1,38
2005	13 231	384	2,90
2008	19 211	1 008	5,25
2014	13 510	1 281	9,48
2015	13 412	1 791	13,35
2016	14 010	2 013	14,37
2017	14 548	2 159	14,84

Nynější vývoj poměru dřevostaveb je reakcí společnosti na nutnost využívání obnovitelných surovin a na zmenšení uhlíkové stopy jednotlivce. Na přípravu dřeva jako



stavebního materiálu se spotřebuje mnohonásobně méně energie než na materiály jiné. Ve dřevě je také bezpečně uloženo velké množství kyslíčnicku uhličitého, který by se jinak uvolnil do ovzduší. Také likvidace masivní dřevostavby zatěžuje přírodu jen minimálně.

Celkové využití dřeva je obrovské. Již u posuzování kulatin začíná třídění dle kvality. Dále se dřevo musí správně distribuovat do jednotlivých dřevozpracujících podniků, kde se zpracovává na dané sortimenty a podle jeho dalšího zpracování, potažmo využití, až k výslednému výrobku. Avšak dřevo má jisté limity, které vyplývají z jeho anatomické stavby (Zeidler a Borůvka 2016).

### 3.2 Dřevo z pohledu anatomické stavby

Dřevo se dělí na dvě základní skupiny, na dřevo jehličnaté a listnaté. Obě tyto kategorie mají své specifické anatomické znaky, podle kterých se dělí. Pro konstrukční účely se nejčastěji využívá dřevo jehličnanů z důvodu jeho optimálních vlastností (Němec et al. 2005). Z této kategorie je nejvíce využíván Smrk ztepilý (*Picea abies*), který je v našich lesích zastoupen zhruba 44,1 % a využívá se v papírnictví, nábytkářství, stavitelství nebo v chemickém průmyslu. Makroskopická stavba jehličnanů je popisována na třech základních řezech dřeva, a to na radiálním, tangenciálním a příčném. Stavba jehličnanů je vývojově starší než stavba listnatých dřevin. Díky tomu se vyznačuje jednoduchou a pravidelnou stavbou složenou jen ze dvou anatomických elementů, a to z tracheid a parenchymatických buněk, které tvoří jednotlivé buněčné elementy dřeva (Zeidler 2016, Šlezingerová 2008, Gandelová 2014, Čundrlík 2009).

Tabulka 3-2 Procentuální zastoupení elementů tvořících dřevo jehličnanu z celkového objemu dřeva (Perelygin 1965)

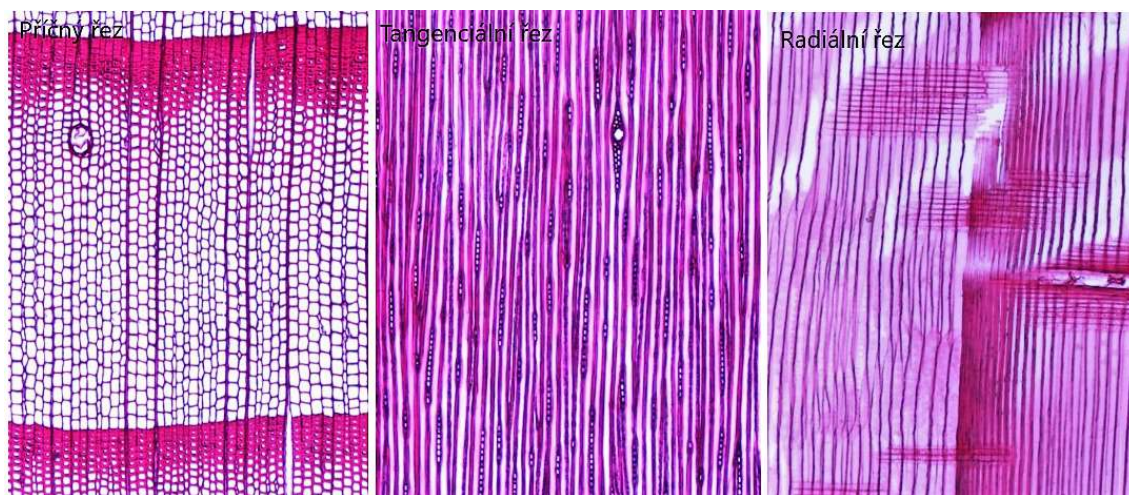
<b>Dřevina</b>	<b>Tracheidy</b>	<b>Dřeňové paprsky</b>	<b>Pryskyřičné kanálky</b>	<b>Dřevní parenchym</b>
<b>Smrk</b>	92,5 - 95 %	5 – 7,2 %	0,2 - 0,3 %	Nepatrně
<b>Borovice</b>	91 %	5,3 -8,4 %	0,5 – 1,1 %	-
<b>Modřín</b>	89 %	10 %	0,1 %	0,9 %

## Tracheidy

Tracheidy neboli cévice tvoří 88–95 % celkového objemu dřeva. Jsou to mrtvé elementy s třívrstvou lignifikovanou buněčnou stěnou. Jejich tvar je podlouhlý s různým zakončením (špičaté, ostře špičaté, oblé, rovné) a s 4–6 úhelníkovým příčným průřezem. Jejich délka je zhruba v rozmezí 2–6 mm a šířka přibližně 0,02–0,1 mm. Tyto elementy se ve dřevě liší k vzhledem jejich funkci. Jarní tracheidy se začnou tvořit na začátku vegetačního období a jejich funkce je vodivá. Průměrná tloušťka buněčných stěn se pohybuje mezi 2-3  $\mu\text{m}$ . Na radiálních stěnách se objevuje větší podíl dvojteček, z důvodu lepší distribuce živin. Funkce jarních tracheid je tedy vodivá. Letní tracheidy zastávají mechanickou funkci a tvoří se v druhé půlce vegetačního období. Jsou delší než jarní tracheidy a povětšinou ostře zakončené. Tloušťka jejich buněčné stěny se pohybuje v průměru cca 7  $\mu\text{m}$ , s menším počtem dvojteček (Zeidler 2016, Šlezingerová 2008, Gandelová 2014, Buchmann 2000, Hofgaard 1993, Heide 1974).

## Parenchymatické buňky

U jehličnanů tvoří parenchymatické buňky 5-12 % stavby dřeva. Jejich nejčastější tvar je hranolovitý, zploštělý váleček, krychle nebo vřeten. Buněčná stěna je tvořená epitelovými buňkami, které vytvářejí pryskyřičné kanálky, jsou lignifikované a s jednoduchými ztenčeninami. Tyto buňky odumírají až při procesu zjaternění. Funkce těchto buněk ve dřevě je především zásobní, ukládají škrob a energeticky bohaté látky. Vytváří dreňové paprsky, které jsou buď jednovrstvé, nebo vícevrstvé (Šlezingerová 2008, Gandelová et al. 2009, Matovič 1993).



Obrázek 3-1 Mikroskopická stavba smrku v rámci jednotlivých řezů při zvětšení 40x (Zeidler 2016)

### 3.3 Chemické složení dřeva

Chemické složení dřeva je proměnlivé v závislosti na druhu dřeviny a ovlivňuje praktické využití daného materiálu, nebo jednotlivých složek. Znalost chemického složení dřeva je důležitá, vzhledem k návaznosti na submikroskopickou stavbu buněčné stěny anatomických elementů dřeva, která ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. (Hon 2000, Boonstra 2006)

Hlavní složky dřeva (90-97 %):

- polisacharidické složky: celuloza (35-55 %), hemicelulosa (20-35 %)
- polyfenolická složka: lignin (15-36 %)

Doprovodné složky dřeva (3-10 %):

- anorganické látky
- organické látky

#### Celulóza

Celulóza je polymer s dlouhým řetězcem  $\beta$ -D-glukóz ve formě pyranóz, které jsou spojeny dohromady  $\beta$ -1,4 glykosidickými vazbami za vzniku buněčných jednotek, které se opakují v celém celulózovém řetězci. Dřevo jehličnanů obsahuje vyšší zastoupení celulózy (46-55 %) než dřevo listnatých stromů (41-48 %). Vlákenné makromolekuly celulózy jsou schopny prostřednictvím intermolekulárních vodíkových vazeb neboli mezi OH skupinami vedlejších makromolekul celulózy, spojovat a vytvářet nadmolekulární strukturu celulózy. Poměr krystalické a amorfní celulózy je jedním z nejvýznamnějších faktorů, ovlivňujících chemické, fyzikální i mechanické vlastnosti dřeva. Zvýšení podílu krystalické části celulózy ovlivňuje hustotu dřeva, modul pružnosti, pevnost v tlaku a bobtnání, potažmo rozměrovou stabilitu dřeva. Naopak pokles jejího podílu má vliv na chemickou reaktivitu, ohybovou pevnost, a houževnatost. Krystalická část celulózy je chemicky velmi stálá, reakce se uskutečňují nejdříve v její amorfní části. Nadmolekulární struktury celulózy jsou původně z anizotropických vlastností celulózy, a závisí na jejím uspořádání v jednotlivých vrstvách buněčné stěny a anatomických elementech dřeva. Způsobují také anizotropii fyzikálních a mechanických vlastností dřeva jako celku. Celulóza a její deriváty mají velmi široké praktické využití. Základem je využití na produkci buničiny, z níž je vyráběn papír, karton a lepenka (Hon 2000, Rowell 2007, Prakash 2008, Lysý a Jirů 1954).

## Hemicelulóza

Hemicelulóza je polysacharid, který se od celulózy liší nižší relativní molekulovou hmotností a stavbou řetězce. Na stavbě polysacharidového řetězce se totiž podílí nejen glukóza, ale i další monosacharidy, jako jsou různé hexózy (manóza, galaktóza), tak i pentózy (arabinóza, xylóza), uronové kyseliny a eventuálně i různé cukerné methylderiváty. Hemicelulóza doprovází celulózu v jednotlivých vrstvách buněčných stěn anatomických elementů dřeva. Vytváří zde tmelící komponent mezi vláknitými strukturami celulózy a ligninu. Vlastnosti hemicelulóz závisí na délce primárního řetězce, stupni rozvětvení a acetylaci. Podle převládajících monosacharidů v hlavním řetězci se nejčastěji dělí na xylany, manany (glukomanany), galaktány.

Xylany jsou tvořeny z D-xylopyranosových jednotek, spojených (1-4)  $\beta$ -glykosidickými vazbami. Dřevo listnatých dřevin obsahuje procentuálně 23-30 % xylanů. Průměrný polymerizační stupeň se v závislosti na druhu dřeva pohybuje v rozmezí 100 až 200. Naopak dřevo jehličnanů obsahuje xylanů výrazně méně, okolo 10-12 %. Xylany jehličnanů mají výrazně nižší polymerizační stupeň v hlavním řetězci, 70 až 130.

Manany mají hlavní řetězec složený z manopyranosových a glukopyranosových jednotek. Jejich vzájemný poměr je příznačný pro jednotlivé druhy dřeva. Primární řetězec je mírně rozvětvený a jejich zastoupení u jehličnatých dřevin, v závislosti na druhu, se pohybuje kolem 20 %. U listnatých dřevin je toto zastoupení výrazně nižší 3-6 %. Průměrný polymerizační stupeň primárního řetězce je 60-70 (Hon 2000).

Galaktany mají ve většině dřevin malý podíl zastoupení 0,5-3 %. Ve vyšším zastoupení se vyskytuje jen u dřeva modřínu, a to v 10-20 %. Vyšší podíl byl dále pozorován v reakčním dřevě. Galaktany mají velmi rozvětvený primární řetězec, který je složen z galaktanových jednotek. Tento řetězec na sebe váže odlišné látky v závislosti na druhu dřeviny, například ve dřevě modřínu kyselinu glukoronovou.

Hemicelulóza ovlivňuje fyzikální a chemické vlastnosti jednotlivých druhů dřeva. Projevuje se to především při technologických procesech sušení, paření, vaření a lisování dřeva (Glasser et al. 1982, Hon 2000, Rowell et al. 2005).

## **Lignin**

Lignin je aromatická látka, které vyplňuje prostor mezi buněčnými membránami dřevnatých rostlin a vytváří pevnost dřeva. Fyzikálně a chemicky je pevně vázán s celulórou, která je díky ligninu stabilní a odolná vůči tlaku. Ukládání ligninu do buněčných stěn se nazývá lignifikace neboli dřevnatění. Tento proces probíhá po dokončení celulosové kostry. Molekuly ligninu jsou prostorově rozložené, proto dobře vyplňují mezery mezi vláknitými strukturami polysacharidů. Lignin se váže jak elektrostatickými interakcemi a silami van der Waalsova typu, tak i chemickými vazbami, zejména na boční řetězce hemicelulózy. Nejvíce ligninu je ve střední lamelle a primární buněčné stěně. Průměrné zastoupení ligninu ve dřevě je velmi variabilní, pohybuje se v rozmezí 15-36 %. Vyšším procentem je zastoupen ve dřevě jehličnanů, než u listnatých stromů. Lignin ve dřevě zvyšuje jeho mechanickou pevnost (tlakovou, ohybovou) a houževnatost, snižuje propustnost a má ochrannou funkci proti mikroorganismům. Lignin je amorfní polyfenolická látka, jejímž základem jsou fenylypropanové jednotky, které mohou být odlišně substituovány. Lignin formuje prostorové makromolekuly pomocí propojení chemickými vazbami, které postrádají pravidelnou strukturu ( Hon 2000, Müller et al.2003).

## **Doprovodné složky dřeva**

Vedle těchto hlavních složek se však ve dřevě vyskytují také doprovodné složky. Tyto chemické látky představují jen asi 1-5% podílu (u tropických dřev až 30 %), mají často velký vliv na barvu dřeva, jeho impregnovatelnost, opracovatelnost, trvanlivost a odolnost vůči abiotickým a biotickým činitelům. Doprovodné složky lze z chemického hlediska rozdělit na anorganické a organické.

Anorganické složky lze ze dřeva získat mineralizací, tj. spalováním, a představují zbytek po spálení dřeva – popel. Zastoupení anorganických látek ve dřevě dřevin mírného pásma je do 1 %, u dřev tropického pásma až 5 %. Nejvíce zastoupenými látkami u dřev mírného pásma jsou vápenaté, draselné a hořečnaté soli (uhličitany, fosforečnany, sírany), které jsou ve formě krystalů uloženy v lumenech dřevňových paprsků parenchymatických buněk nebo v podélném dřevním parenchymu, a to především u listnatých dřevin.

U mnoha dřev tvoří soli vápníku až 50 % z celkového množství anorganického podílu. Nacházíme zde i malá množství Mn, Na, P, Cl a dalších stopových prvků (Hon 2000).

Organické složky, které jsou často označovány jako extraktiva, mohou u dřev mírného pásma dosahovat kolem 5 %, u exotických dřev až 30 %. Tyto látky můžeme rozdělit podle chemické povahy na sacharidy, fenolické látky, terpeny a ostatní látky.

Jedná se zpravidla o další polysacharidy, které slouží v rostoucím stromě živým buňkám jako další stavební látky buněčné stěny (pektiny), zásobárny energie (škrob) nebo jako látky chránící strom před biotickými činiteli (polyuronidy). Pektiny se nachází ve střední lamelle, tedy ve vrstvě, která spojuje sousední buňky k sobě, aby vytvářely rostlinná pletiva. Škrob je zásobní látkou, kterou potřebují živé buňky. Jedná se o směs dvou polysacharidů, konkrétně amylozy a amylopektinu (Hon 2000, Weiland et al. 2003).

Dalšími ze sacharidů ve dřevě jsou monosacharidy (např. glukosa, galaktosa, xylosa, manosa aj.), které se nachází zejména v bělovém dřevě (tvoří 0,1–1 % extraktiv). Dřevo jehličnatých dřevin obsahuje celou řadu jednoduchých fenolů (např. vanilin, koniferylaldehyd, ethylfenol aj.). Významnou skupinou fenolických látek jsou lignany. Vyskytují se zejména v jádrovém dřevě jehličnanů i listnatých stromů, v běli je jejich obsah zanedbatelný. Obsáhlou skupinu extraktiv představují flavonoidy (zahrnují flavony, flavany, flavonoly, flavanony), které byly izolovány z jádrového dřeva jehličnatých i listnatých stromů (Hon 2000, Rowell 2007).

Do této skupiny doprovodných látek se zařazují také taniny, které jsou někdy označovány jako třísloviny. Po chemické stránce mohou mít jednoduchou, ale i velmi složitou strukturu. Vyskytují se zejména v jádrovém dřevě a kůře některých našich listnatých stromů (např. dub, jilm, akát, kaštanovník, ořešák). Další významnou skupinou doprovodných složek dřeva jsou tzv. terpeny.

Terpeny jsou zastoupeny především v jádrovém dřevě jehličnatých dřevin s velkým počtem pryskyřičných kanálků a velkým množstvím pryskyřice. Z chemického hlediska jsou terpeny četnou skupinou různorodých látek, jejichž základní stavební jednotkou je 2-methyl-1,3-butadien neboli izopren.

Vedle zmiňovaných doprovodných složek nacházíme ve dřevě i další chemické látky (alkaloidy, alkoholy, bílkoviny atd.), které jsou však zastoupeny ve značně malém množství a zpravidla se vyskytují jen u určitých druhů dřev (Hon 2000, Rowell 2007).

### **3.4 Dřevo a jeho modifikace**

Dřevo je heterogenní materiál, který má proměnlivé vlastnosti v rámci kmene, potažmo v rámci jednotlivých druhů dřevin. U dřeva se berou jako negativní vlastnosti

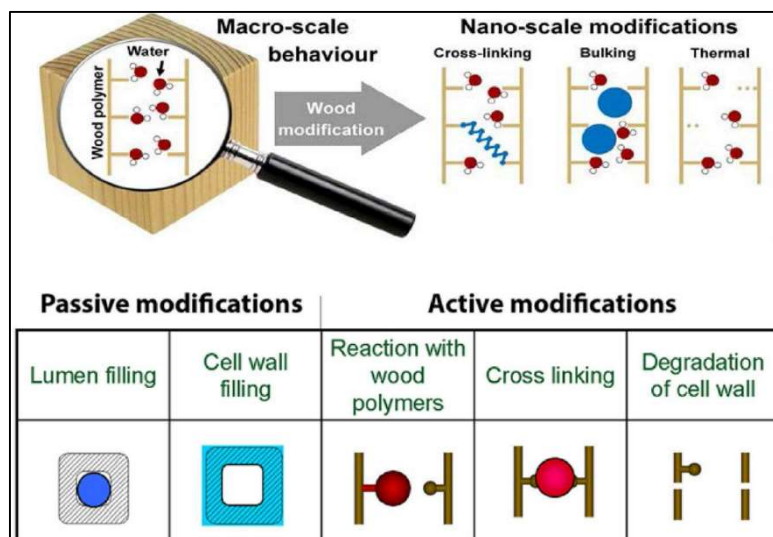
zejména bobtnání a sesychání, respektive jeho rozměrové změny nastávající při změně vlhkosti. Tyto změny jsou způsobené přijímáním molekul vody do buněčné stěny pomocí vodíkových můstků. Modifikací dřeva se tedy snažíme vlastnosti dřeva zlepšit. Jednotlivé způsoby modifikace volíme vzhledem k finálnímu použití daného materiálu. Obecně platí, že při zlepšení některých vlastností se jiné vlastnosti zhoršují, jde tedy o kompromis mezi fyzikálními a mechanickými vlastnosti dřeva. V roce 2003 se v belgickém Gentu z iniciativy předních evropských vědců konala první evropská konference o modifikaci dřeva „European Conference on Wood Modification – ECWM“ (Van Acker 2003). Její účastníci si vytyčili jako hlavní cíle stanovit koncepci a základní směry rozvoje pro oblast modifikace dřeva ze současného pohledu. Bylo poukázáno na to, že nové materiály na bázi masivního dřeva musejí mít vysokou kvalitu a zdravotní nezávadnost, a též že formou nových technologií výroby musí dojít k významnému omezení zátěže životního prostředí. Na závěr bylo dohodnuto, že hlavními tématy modifikace dřeva v budoucnosti budou především tepelné ošetření dřeva, chemická modifikace dřeva a hydrofobizace dřeva, přičemž tento směr modifikace dřeva se zabývá zamezením vázání vody do buněčných stěn ( Weiland et al. 2003, Rowell 2007).

### **Modifikace dřeva v oblasti OH skupin**

Při modifikaci dřeva dochází k fixování chemických látek do struktury dřeva. Podstata fixace může být buď chemická, nebo fyzikální. V případě chemické vazby dochází k fixování látek přes volné vodíkové můstky na jednotlivé složky dřeva za vzniku stabilního komplexu. Při fyzikální fixaci nejsou látky chemicky navázány na jednotlivé složky dřeva. Po odpaření rozpouštědla setrvávají zafixovány ve struktuře dřeva prostřednictvím méně intenzivních sekundárních vazeb, popřípadě jsou zde drženy pouze mechanicky (Antušková 2014, Sandberg 2017).

V případě modifikace dřeva v oblasti OH skupin se jedná o změny dřeva na molekulární úrovni, které vedou k požadovaným změnám specifických vlastností. Rozlišujeme modifikaci aktivní a pasivní. Aktivní forma modifikace dřeva spočívá v chemické reakci stavebních složek buněčné stěny dřeva s chemickou látkou, nebo v chemické reakci v rámci hlavních stavebních složek dřeva viz obrázek 3-2. Zavedení určité látky do dřeva, aniž by došlo k chemické reakci mezi touto látkou a dřevem, může být potom chápána jako modifikace pasivní. Tyto látky působí vůči vnějším vlivům samostatně. Experimenty ukazují, že absolutní hodnota hystereze sorpce se u dřeva

chemicky modifikovaného v oblasti OH skupin ve srovnání s dřevem nemodifikovaným liší jen minimálně (Hill 2006).



Obrázek 3-2 Schematický diagram ilustrující účinek chemické modifikace (Sandberg 2017)

Bobtnání dřeva, jako jedné z negativně vnímaných vlastností, lze zamezit (nebo přesněji řečeno omezit) určitými úpravami na úrovni buněčné stěny dřeva. Procesy úpravy dřeva prováděné v rámci buněčné stěny lze charakterizovat jako:

### Blokování

Blokování je spíše pasivní formou modifikace dřeva. V rámci této metody je fyzikálně bráněno přístupu vody do pórovité struktury dřeva za pomoci synteticky vyrobené, nebo přírodní pryskyřice, která při vytvrnutí zpevní dřevo a brání přístupu vody. Tedy zvyšuje rozměrovou stabilitu dřeva. Výsledný efekt impregnace závisí na druhu dřeva, které je impregnováno, a též na pryskyřici, která je použita. Modifikované dřevo má výrazně zvýšenou tvrdost, pevnost a hustotu. Zpravidla jsou zaplněny lumény buněk nebo je impregnována i buněčná stěna. Při zaplnění 100 % lumenů znamená hmotnostní přírůstek pryskyřice asi 10-20 %, snížení rozměrových změn neboli vyplnění buněčných stěn znamená hmotnostní přírůstek pryskyřice 30 %, a až o 95% snížení rozměrových změn (Kamke 2008). V průběhu impregnace dochází i k plastifikaci dřeva a je tedy možné dřevo ještě před vytvrzením slisovat (Stamm 1951). Výzkum penetrace buněčných stěn pokračuje i v současné době a spíše se ubírá směrem k přírodním pryskyřicím, protože syntetické pryskyřice jsou drahé, při výrobě nebo likvidaci zatěžují životní prostředí. Touto metodou je možné impregnovat i mokré dřevo, a to za použití



organického rozpouštědla, které postupně nahradí vodu ve dřevě, například metylalkohol, a následně se rozpouštědlo smísí s daným monomerem (Sandberg 2017).

### **Sítování**

Sítování se používá při impregnaci látkou, která vzájemně propojí dvě volná reaktivní místa. Impregnovány jsou pouze buněčné stěny dřeva. Výsledkem této metody je dřevo s nižší rovnovážnou vlhkostí, a v závislosti od poklesu vlhkosti se adekvátně zvýší pevnost dřeva. Takto modifikované dřevo má vyšší odolnost proti kyselinám, zásadám, hmyzu a houbám. Nejčastěji je používán dimethyloldihydroxyethylenmočovina nebo furfurylalkohol (Sandberg 2017).

### **Nahrazování**

Tato impregnační metoda dřeva spočívá v nahrazení reaktivní hydroxylovou skupiny jinou skupinou. Takto vytvořené nové skupiny již nemají schopnost poutat molekuly vody ani reagovat s dalšími látkami, které způsobují degradaci dřeva. V důsledku této modifikace se dřevu sníží relativní vlhkost a zvýší se odolnost proti biologickým faktorům. Takto modifikované jsou pouze buněčné stěny dřeva. Dalšími výhodami takto upraveného dřeva je odolnost proti slunečnímu záření, tudíž tmavnutí je velmi pomalé. Jednou z nejvýznamnějších skupin látek, kterými je dřevo takto upravováno, jsou anhydridy, především anhydrid kyseliny octové. Buněčná stěna je po modifikaci vyplněna chemicky vázanými acetylovými skupinami, které zaplňují prostor uvnitř buněčné stěny. Proto je takto modifikované dřevo ve stále nabobtnalém stavu. Toto může být někdy považováno za nevýhodu, protože může docházet ke zhoršení některých mechanických vlastností (Hill 2007, Sandberg 2017).

### **Odbourávání**

Odbourávání je metoda modifikace, kde dochází k depolymeraci především hemicelulózy. K tomuto procesu dochází působením teploty okolo 200 °C, v prostředí inertní atmosféry, kde dochází k chemickým reakcím. Během procesu vystavení vysoké teplotě dochází u všech látek obsažených ve dřevě ke změnám různé úrovně (reakce ligninu za vzniku dehtových látek na bázi aromatických uhlovodíků, zvyšuje se podíl krystalické celulózy). To se projevuje tím, že vzniklé chemické sloučeniny spolu reagují a vytvářejí nové vazby mezi jednotlivými řetězci a zároveň se navazují na volná reaktivní místa, čímž snižují počet volných vazeb, které jsou schopné přijímat molekuly vody. Tento proces modifikace zajišťuje úpravu dřeva v celém průřezu na úrovni molekul. Výsledkem tepelné úpravy je materiál s nižší rovnovážnou vlhkostí, vyšší rozměrovou

stabilitou a vyšší odolností proti houbám či plísním. Změny jednotlivých vlastností jsou závislé na použité teplotě a době, po kterou je dřevo této teplotě vystaveno (Hill 2006, Sandberg 2017).

### **3.4.1 Vliv modifikace dřeva na strukturu**

Struktura dřeva je složitý komplex jednotlivých látek a řetězců, které tvoří celek. Většina dnes známých modifikací dřeva za účelem zlepšení jeho jednotlivých vlastností zásadně nemění jeho strukturu. V základním dělení se tyto modifikace dělí na pasivní a aktivní. Část aktivních modifikací přivádí do struktury dřeva nové látky z venčí, které reagují jenom s volnými OH skupinami a zabraňují jim vázat vodu, ale zásadně nemění strukturu dřeva, zejména jeho základní stavební části. Termická modifikace však využívá vlastní látky obsažené ve dřevě, a za pomoci tepla je transformuje na jiné látky, které mezi sebou formují nové řetězce, čímž řetězce ztrácí schopnost vázat na sebe vodu. Tyto řetězce se vytváří v závislosti na použité teplotě a druhu dřeviny, která je takto modifikovaná. Jednotlivé chemické složky dřeva působí na teplotu odlišně a jiným způsobem se degradují.

#### **Chemická struktura termicky modifikovaného dřeva**

Ve dřevě vystaveném teplotě 100 °C již dochází k drobným změnám struktury, a to zejména díky dehydratačním procesům. Významnější termolytické a termo-oxidační reakce, které zasahují hlouběji do struktury dřeva, nastávají až v rozmezí teplot 150–170 °C. Při teplotách mezi 170–260 °C již dochází k odbourávání hemicelulózy a ligninu, jejich transmutaci na jiné látky (Hakkou et al. 2005, Mburu et al. 2006).

Princip termických reakcí spočívá v přechodu elektronu v kovalentních vazbách polysacharidů a ligninu ze základního do excitovaného stavu (Reinprecht 1996 a).

#### **Celulóza**

Termické změny celulózy, která je základním stavebním kamenem buněčné stěny, při teplotě 170 ± 60 °C se projevuje dehydratačními a depolymerizačními reakcemi, které vedou k poklesu polymerizačního stupně (Fengel 1967). Tedy vytváří glukózy, které se občasně přemění až na 2-furaldehyd (Houminer a Patai 1969), následně vznikají laktony a různé druhy plynů. Přeměnění se tedy amorfní část a z malé části i krystalická část celulózy. K významné degradaci krystalické části dochází až při teplotě vyšší než 300 °C. Při teplotách do 150 °C dochází k dehydrataci v přítomnosti acidobazických katalyzátorů (Weiland a Guyonnet 2003). Výsledkem je pokles polymerizačního stupně a výrazný

nárůst krystalické části celulózy (Fengerl 1967). Při teplotách vyšších než 150 °C dochází k výraznější depolymerizaci v přítomnosti kyslíku a různých anorganických látek. Vytvářejí se volné radikály celulózy schopné reagovat s kyslíkem za vzniku hydroperoxidu, který homolyticky uvolňuje OH a po reorganizaci z nich vzniknou laktony a jiné oxidované formy celulózy. Například funkční skupiny -CH=O, =C=O nebo -COOH. Tyto skupiny se dále pomocí dekarbonizací a dekarboxylací štěpí a vytváří oxid uhelnatý a oxid uhličitý, respektive dehydratací za vzniku vody a plynů CO a CO<sub>2</sub>. Tyto procesy probíhají již při teplotě 170 °C (Kim et al. 2001). Ohřevem dřeva tedy dochází ke zvyšování podílu krystalické celulózy, což je způsobeno reorganizací celulóзовých řetězců (Kubojima et al. 1998) při vystavení smrkového dřeva teplotám od 120 °C do 160 °C sledoval nárůst krystalického podílu celulózy. Naopak u vyšších teplot nebo při dlouhodobějším vystavení teploty doházelo k poklesu i krystalické části celulózy. K podobným výsledkům dospěl i Bhuiyan et al. (2000).

### **Hemicelulóza**

Hemicelulóza je nejméně stabilní složka dřeva při termické modifikaci. Skládá se z heterosacharidů, které jsou tvořeny vícero typy monosacharidů – xylóza, manóza, glukóza a další. Jednotlivé typy monosacharidů mají různou počáteční teplotu rozkladu. Hemicelulóza tedy degraduje ve větším teplotním rozsahu, ale intenzivnější rozklad probíhá v rozsahu teplot od 170 °C do 280 °C. Toto tvrzení prokázali například Bourgeois et al. (1989). Počáteční teplota rozkladu části hemicelulózy byla stanovena na 140 °C (Ramiah 1970). Při termickém rozkladu vznikají monomerní látky, které při vysoké teplotě vstupují do kondenzačních reakcí za vzniku hydrofobnějších struktur, vztažených k původní hemicelulóze. Tyto skupiny zvyšují celkovou hydrofobnost dřeva a zvyšují jeho rozměrovou stabilitu (Ramiah 1970, Rowell 2013).

### **Lignin**

Lignin je přírodní termoplast, tudíž je z hlediska vystavení teplotě nejstabilnější, co se týče chemických změn. Jeho kovalentní vazby dobře odolávají termolýze a termo-oxidaci. Z fyzikálního hlediska snadno přechází do plastického stavu, a to v závislosti na teplotě. K chemickým reakcím v ligninu dochází až při vyšších teplotách, v rozmezí 180 °C až 260 °C, kdy se z ligninu začínají tvořit nižší molekulové polární látky, například koniferylové a syringylové struktury. Probíhají zde zároveň termooxidační reakce, které mají za následek nárůst karbonylových jednotek. Jako poslední zde probíhají kondenzační reakce, které zvyšují hydrofobnost dřeva. Tyto reakce stabilně

vznikají až s teplotou nad 230 °C (Sudo a kol. 1985). Do kondenzačních reakcí ligninu vstupují i jiné látky, které vznikly při rozkladu hemicelulózy, například 2-furaldehyd a látky s karbonylovou funkční jednotkou, přičemž relativní molekulová hmotnost nepatrně roste (Kačík a kol. 2001).

### **Extraktivní látky**

Extraktiva ve dřevě reagují na vystavení tepla fyzikálním, fyzikálně-chemickým a chemickým způsobem. Tuky, vosky a živičné látky se při vystavení teploty 100 až 160 °C dostávají do kapalného a plynného stavu, a začínají se přesouvat na vnější povrch. Vlivem vysokých teplot se některá extraktiva transformují na prchavé organické komponenty a během úpravy se odpařují. Termicky modifikované dřevo tedy obsahuje méně těkavých látek a naopak se zvýší podíl kyseliny octové, která vzniká z acetylových skupin hemicelulózy (Mayes a Oksanen 2002). Nové extraktivní látky vzniklé důsledku termické úpravy vznikají z hemicelulózy (2-furaldehyd, a podobné), z celulózy to jsou laktony a jim podobné sloučeniny, z ligninu vzniká metanol, kyselina mravenčí, monomerní deriváty fenolu a další. Tato přeměna probíhá do teploty 195 °C, poté již dochází k jiným degradacím z důvodu vyšší kondenzace (Reinprecht a Vidholdová 2011).

### **Úbytek hmotnosti dřeva vlivem termické modifikace**

Úbytek hmotnosti se zvyšuje se zvyšující se teplotou úpravy a dobou trvání finální části úpravy. Dalším faktorem ovlivňujícím úbytek hmotnosti je prostředí, ve kterém je termické dřevo upravováno, jako je vzduch, dusík, vakuum, rostlinný olej atd., popřípadě závisí i na způsobu ohřevu, zda se jedná o otevřenou technologii nebo uzavřený reaktor. V neposlední řadě má vliv druh upravované dřeviny a vstupní vlhkost dřeva. Millett a Gerhards (1972) zmonitorovali zhruba 5 % úbytek hmotnosti dřeva, a to při různých teplotách a času. Při vystavení teplotě 115 °C po dobu 190 dní byl úbytek 5%, ale při použití vyšší teploty se čas k dosažení stejného úbytku snižuje. Reinprecht (1992b) prokázal, že při ohřevu topolu na teplotu 210 °C po dobu 3 hodin je úbytek hmotnosti 11,3 %. Dřevo ohříváné v běžné atmosféře s podílem kyslíku se odbourává rychleji. Vlivem malého množství agresivních aditiv, například kyseliny sírové, chlorovodíkové, dusičné, popřípadě kyseliny borité a jejích solí, dochází k výraznějšímu úbytku hmotnosti při termické úpravě ( Reinprecht 1992b, 1996b, Dinwoodie 2000).

### 3.5 Technologie výroby termo-dřeva

Až do nedávna bylo chemické ošetření dřeva jedinou požívanou technologií, která však často používala toxické látky, které zabraňovaly působení plísní a hmyzu ve dřevě. V tomto ohledu je jednou z předních oblastí technologie zpracování dřeva v posledních letech tepelná modifikace dřeva, jejímž výsledkem je ekologický tepelně modifikovaný materiál s biologickou stabilitou, trvanlivostí, rozměrovou stabilitou a atraktivním estetickým vzhledem. Tepelná modifikace dřeva umožňuje prodejcům nabízet produkty, které splňují nejvyšší nároky zákazníků, a také umožňuje vyrábět tepelně modifikovaný materiál s požadovanými vlastnostmi. Uznávaným lídrem ve výrobě tepelně upraveného dřeva na světě je finská společnost VTT, která vyvinula technologii tepelné úpravy dřeva v přehřáté páře Thermowood®. Kromě toho jsou největšími světovými výrobci tepelně upraveného dřeva Lunawood, Valutec a Tekmaheat (Finsko), Baschild (Itálie), Superior Thermowood (Kanada), Muhlbock-Holztrocknungsanlagen (Rakousko), Tre Timber (Estonsko). Mezi hlavními ruskými společnostmi by měly být vyzdviženy Prominvest DIARS a West-Wood Rus LLC. Při samotné výrobě se nepoužívají žádná chemická činidla ani urychlovače, která by podporovala strukturální změnu materiálu. Dá se tedy tvrdit, že tento způsob modifikace je zcela ekologický, a využívá pouze teplo, které je různými systémy dopravované ze zdroje do modifikovaného materiálu. Na výrobu se nejčastěji používá měkké a málo trvanlivé dřevo, například smrk, borovice, olše, buk, ale i jiné dřeviny, které jsou ošetřované primárně pro změnu své barvy a zatraktivnění své struktury, která v přírodním stavu není velmi zajímavá (Reinprecht a Vidholodová 2008). Princip výroby spočívá v záměrném vystavení dřeva teplotám v rozmezí 150-260 °C po určitou dobu tak, aby se požadované vlastnosti vylepšily. Obecně jde o rozměrovou stabilitu a odolnost proti vodě a biologickým faktorům, přičemž unikající spaliny z technologie se upraví a dají využívat k druhotnému spalování, čímž se zajistí větší ekologická šetrnost a menší energetická náročnost. Jednotlivé technologie se dělí dle způsobu distribuce tepla na:

- Úpravu v atmosféře vzduchu (ThermoWood),
- Úpravu v prostředí vodní páry (PlatoWood),
- Úpravu v prostředí inertních plynů (RetificatedWood),
- Úpravu v oleji (OHT-Wood, RoyalWood).

(Hale a kol. 2005, Wang a Cooper 2005, Sper 2006, Reinprecht a kol. 2007, Viitaniemi et al.1997).

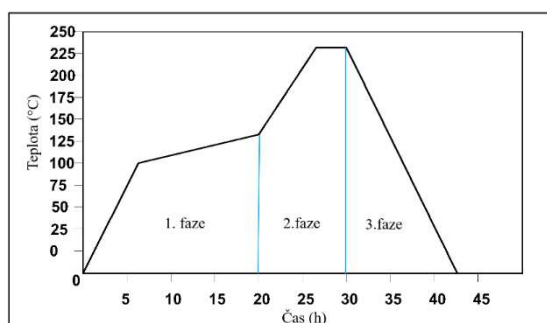
## Technologie výroby v atmosféře vzduchu (ThermoWood)

Tento výrobní proces vznikl na přelomu 90. let ve městě Mänttä ve Finsku. V současné době jsou ustanoveny dvě limitní teploty, a to 180 °C s označením Thermo-S pro vnitřní použití a 220 °C s označením Thermo-D pro vnější použití, jako například k obkladu venkovních fasád budov. Samotný proces výroby termo-dřeva se skládá ze tří základních etap viz obr.3-3 (Gašparík et al. 2015).

První fáze procesu úpravy se dá označit jako sušení a ohřev. Proces sušení je závislý na počáteční vlhkosti upraveného materiálu. Pokud je vlhkost materiálu vysoká, tak musíme začít velmi pomalu, aby nedošlo ve dřevě k výsušným trhlinám, nadměrnému kroucení z příčiny rychlé ztráty vlhkosti ve vnějších vrstvách materiálu, a následnému pohybu vlhkosti po průřezu. Tento proces trvá zhruba do 100 °C, kdy materiál obsahuje již minimální obsah vody. Následně začíná ohřev z teploty 100 °C na 130 °C, který je mnohem pozvolnější a trvá zhruba 12-15 hodin, přičemž se dřevo vysuší téměř na nulový obsah vlhkosti. Ohřev v této fázi zajišťují topná tělesa spolu s vodní parou.

Druhá fáze se označuje jako tepelná úprava. V této fázi se zvyšuje teplota v rozsahu 140-230 °C, až na požadovanou teplotu úpravy. Strmost zvyšování teploty je závislá na geometrii tělesa a materiálu. Tudíž musí být přizpůsobena tak, aby se zabezpečilo prohřátí materiálu v celém objemu. Po dosažení teploty finální úpravy se tato teplota drží 2 až 3 hodiny tak, aby se docílilo požadovaných chemických změn.

Třetí fází je chlazení a vyrovnání vlhkosti. Po uplynutí vrcholové části úpravy se materiál začíná pozvolna chladit tak, aby došlo k ukončení chemických reakcí ve dřevě, které spouští vystavení dřeva vysokým teplotám. Po zchladnutí materiálu zhruba na teplotu 80 °C až 90 °C začíná proces vyrovnání vlhkosti materiálu, a to na vlhkost v rozsahu cca 4-7 %. Přitom dochází k postupnému zchlazení až na teplotu vnějšího prostředí tak, aby nedošlo k teplotnímu šoku při vyjmutí z komory (Thermowood Handbook 2003).



Obrázek 3-5 Schéma výroby ThermoWood(Thermowood Handbook 2003)

### **Technologie výroby v prostředí vodní páry (PlatoWood)**

V současné době lze rozlišit pět různých stupňů procesu, včetně dvou účinných stupňů tepelného zpracování: První fáze: předsušení v konvenční průmyslové peci na dřevo, na obsah vlhkosti 14-18 %; Druhá fáze: stupeň hydrotermolýzy v reaktoru z nerezové oceli, dřevo je zahříváno na 150 ° C - 180 ° C ve vodném prostředí za tlaku 0,6 až 1 MPa (včetně nasycené páry jako topného média); Třetí fáze: stupeň sušení v konvenční průmyslové peci na dřevo za použití běžných postupů, na obsah vlhkosti 8-9 % po dobu tří až pěti dní. Čtvrtá fáze: vytvrzování ve speciální vytvrzovací peci z nerezové oceli, dřevo se znovu zahřeje na 150 ° C až 190 ° C, ale nyní už za suchých a atmosférických podmínek. Pátá fáze: kondicionační stupeň, obsah vlhkosti ve dřevě je zvýšen na úroveň, která je nezbytná pro výrobu (4-6 %). Kondicionování se provádí ve stejné konvenční průmyslové peci na dřevo, jako ve fázi sušení, včetně použití nasycené páry ke zvýšení obsahu vlhkosti ošetřeného dřeva. Ve fázi hydrotermolýzy se nasycená pára používá jako topné médium ke zvýšení teploty dřeva. Chlazení se provádí odpařováním v reaktoru kde je rychlé, ale řízené uvolňování tlaku do atmosférických podmínek, a následuje postřik vnitřního místa reaktoru studenou vodou. Ve fázi vytvrzování je dřevo ohříváno horkým vzduchem, vytvářeným v ohřivači, a který cirkuluje pomocí ventilátorů. Nad 110 °C se jako ochranný plyn přidává přehřátá pára nebo dusík, aby se vyloučil kyslík, a též aby se zabránilo oxidačním reakcím. Jak lze vyvodit z popisu technologie „Plato“, nepoužívají se žádné chemikálie. V zařízeních na úpravu vody jsou řešena malá množství organických sloučenin v kapalné odpadní páře extrahované během hydrotermolýzy (kondenzát), sušení (vlhkost dřeva) a vytvrzování (vlhkost dřeva). Plynné sloučeniny extrahované z vytvrzovací pece se upravují v pračce, aby kondenzovaly vodu z proudu plynu, včetně všech organických a minerálních látek ze dřeva a minimalizovaly zápach (Reinprecht a Vidholdová 2011).

### **Technologie výroby v prostředí inertního plynu (RetificatedWood)**

Retifikované dřevo se vyrábí v inertním prostředí dusíku, a to při vysokých teplotách kolem 260 °C. Retifikační proces je založen na zvyšování teploty dřeva v rozsahu teplot 210 °C až 260 °C, v prostředí dusíku a za nepřítomnosti kyslíku, nebo pouze s minimem kyslíku, a to okolo 2 %. Ve dřevě dochází jen k mírné pyrolýze, přičemž k termooxidačním reakcím ve dřevě dochází pouze v malé míře. Tento postup

termické modifikace zajišťuje výraznější zachování původních vlastností dřeva, a to při vyšších použitých teplotách úpravy (Esteves a Pereira 2009).

### **Technologie výroby v olejové lázni (OHT-Wood)**

Tento proces se provádí v uzavřené procesní nádobě, po jejím naplnění dřevem. Horký olej se čerpá ze zásobní nádoby do procesní, kde je udržován při vysokých teplotách, a cirkulující kolem dřeva. Před ukončením procesu modifikace je horký olej zpět odčerpán do zásobní nádoby. Tedy horký olej zde představuje médium, které dřevo ohřívá a zároveň vniká do dřeva. Je nutné udržovat vnitřní teplotu upravovaného materiálu v rozmezí 180 °C až 220 °C dle daného nastavení, po dobu 2 až 4 hodiny. Celý proces ohřevu a chlazení je časově méně nákladný a trvá zhruba 18 hodin. Průměrná spotřeba oleje se pohybuje okolo 20–60 kg/m<sup>3</sup> a využívají se výhradně rostlinné oleje s nízkým podílem aromatických látek. Zároveň olej zabraňuje přístupu kyslíku k reakcím ve dřevě (Reinprecht a Vidholdová 2011).

### **3.6 Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva (termo-dřeva)**

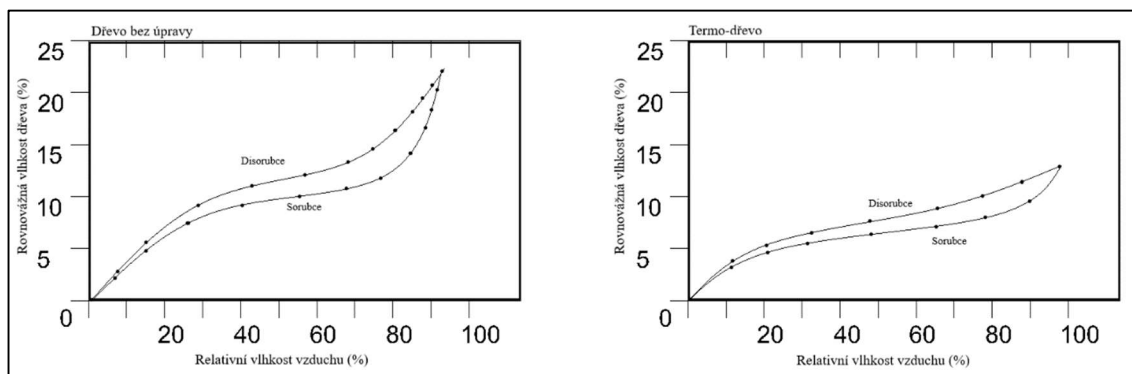
V důsledku vystavení materiálu vysoké teplotě dochází na buněčné úrovni k řadě fyzikálně-chemických změn. Nejprve se rozkládá lignin a hemicelulóza, poté se zanesou mikroporty upravovaného materiálu, a ten tak ztrácí schopnost absorbovat velký objem vlhkosti. Mnoho polysacharidů je modifikováno a rozloženo, dřevo se pro škůdce stane špatně stravitelné nebo případně toxické, a jeho biologické poškození je minimální. Tepelná modifikace probíhá po celé tloušťce materiálu (desky). Obecně dřevo získává následující vlastnosti (viz podkapitoly níže), které jsou ovlivněné vstupním materiálem a použitou technologií úpravy (Hanhijärvi 2000).

#### **Fyzikální vlastnosti termo-dřeva**

##### **Hygroskopicita**

V důsledku tepelného zpracování v atmosféře přesycené páry volné atomy vodíku „ulpívají“ na koncích řetězců uhlík-vodík ve dřevě, což zabraňuje dalšímu přitahování molekul vody a bobtnání materiálu na molekulární úrovni viz obrázek 3-4. Díky tomu získává tepelně upravené dřevo menší hygroskopicitu, tedy ztrácí svojí přirozenou schopnost přijímat a odevzdávat vzdušnou vlhkost z okolí do buněčných stěn ve formě





Obrázek 3-6 Sorpčně-desorpční hystereze dřeva bez tepelné úpravy, a s tepelnou úpravou při teplotě 250 °C v atmosféře dusíku po dobu 2 hodin (Hill 2006)

vázané vody, v porovnání s neupraveným dřevem (Wang a Cooper 2005, Awoyemi 2006). Pokles hygroskopie je větší při použití vyšších teplot a delší doby úpravy.

Změna hygroskopie u tepelně upraveného dřeva je způsobena odbouráváním a blokadí –OH funkčních skupin v buněčné stěně dřeva, které popsal například Pétrissans et al. (2003). Podíl hydroxylových skupin ve dřevě se redukuje v důsledku kondenzačních reakcí a depolymerizačních reakcí ligninu a hemicelulózy, a to zejména při vyšších teplotních úpravách. Zvýšení hygroskopie povrchu upraveného dřeva teplotou 60 – 200 °C po dobu trvání jedné hodiny prokázal Podgorski a kol. (2000), a to na základě zvětšení kontaktního úhlu povrchu dřeva s vodou, a to od 65° pro neupravené dřevo, až na 145° pro dřevo upravené teplotou 200 °C. Toto zvýšení je způsobeno poklesem počtu OH skupin a přesunem hydrofobních látek z vnitřního prostoru materiálu na povrch, zejména tukových látek. Vliv nižší hygroskopie je dobře vidět na sorpčně-desorpční křivce termo-dřeva a neupraveného dřeva na obrázku 3-4. Keith a Chang (1978) stanovili přibližně 50 % snížení bodu nasycení vláken (BNV) u čtyř druhů listnatého dřeva, a to při tepelné úpravě 220 °C po dobu trvání 2 hodin (Couceiro 2011, Ayata et al. 2017, Poncsak et al. 2011, Kučerka et al. 2018).

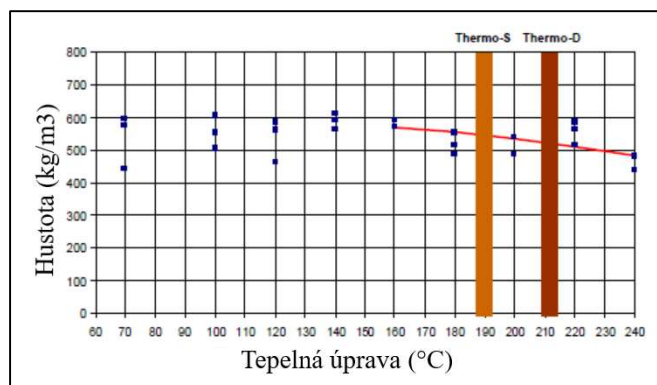
### **Rozměrová stabilita termo-dřeva**

Díky tepelnému zpracování je stabilita geometrických rozměrů v závislosti na změně vlhkosti a okolní teplotě zlepšena 10-15 krát ve srovnání s neošetřeným dřevem. To znamená, že produkt vyrobený z tepelně ošetřeného dřeva se v průběhu času nedeformuje při působení vnějších vlivů. Edvardsen a Sendland (1999) prokázali, že dřevo sušené při teplotě 110 °C získává lepší rozměrovou stabilitu. Při úbytku hmotnosti v rozsahu 15-20 % při použití výrobní technologie ThermoWood a teploty 150 až 300 °C

se dřevo dostává na maximální rozměrovou stabilitu. Podobně jako hygroskopicitu, tak i rozměrovou stabilitu termo-dřeva ovlivňuje částečná degradace hemicelulóz a vznik esterových, éterových příčných vazeb v ligninu, a tím pádem odbourání některých vazeb poutajících na sebe vodu v buněčných stěnách (Hill 2006, Reinprecht a Vidholová 2011).

### Hustota termo-dřeva

Tepelnou modifikací se odbourávají některé složky dřeva, zejména hemicelulóza a některé typy aromatických látek. Při vlhkosti dřeva 0 % se nepatrně projeví pokles hustoty, ale až při vyšších teplotách (Thermowood Handbook 2003). V rámci tepelné modifikace se také mění jednotlivé rozměry, dřevo se smršťuje, čímž se ovlivňuje i celková hustota (Hill 2006). Zjištění finského institutu VTT a helsinského technologického institutu ukazují, že hustota borovicového dřeva klesá asi o 10–20 % viz obrázek 3-5. Jako materiál pro výzkum byla použita finská borovice s hustotou 560 kg/m<sup>3</sup> při obsahu vlhkosti 12 %. Po tepelném zpracování s maximální teplotou 210 °C byl indikátor průměrné hustoty 520 kg/m<sup>3</sup>. Po aplikaci teploty 240 °C byla hustota 480 kg/m<sup>3</sup>.



Obrázek 3-7 Změna hustoty v závislosti na teplotě úpravy (Thermowood Handbook 2003)

### Změna barvy termo-dřeva

Dřevo vystavené tepelné úpravě tmavne. Obecně platí, že čím vyšší je teplota úpravy a doba působení, tím tmavší odstín dřevo získává. Při stejné úpravě mají listnaté dřeviny tmavší barvu než jehličnaté dřeviny, což je způsobeno odlišným chemickým složením (Klement a Marko 2008). Dalším faktorem je použitá technologie tepelné modifikace. V atmosféře vzduchu jsou intenzivnější změny barvy při stejné tepelné úpravě, na rozdíl od ochranného prostředí dusíku. Množství reakcí v chemické struktuře je nižší. Při modifikaci v rostlinných olejích je změna barvy též jiná v důsledku vstupu olejů do reakcí, které je mění (Reinprecht a Vidholová 2011). Barva získaná tepelnou

modifikací ale není stálá, při vystavení povětrnostním podmínkám bez povrchové ochrany barva bledne (Syrjanen a Kangas 2000, Oberhofnerová et al. 2016).

## Mechanické vlastnosti termo-dřeva

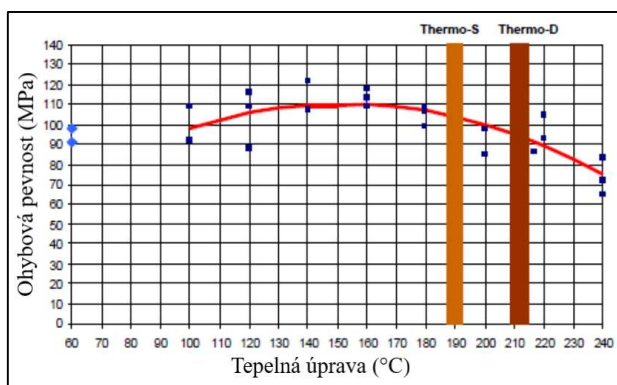
Během tepelného zpracování dochází ke změně buněčné struktury dřeva, což vede ke změně jeho vlastností. U dřevěných materiálů jsou nejdůležitější tyto vlastnosti:

### Rázová houževnatost

Dřevo, které je tepelně upraveno, ztrácí svoji houževnatost a stává se z něho velmi křehký materiál. Seberg et al. (1953) svými experimenty prokázal pokles houževnatosti o 90 % u dřeva upraveného teplotou 300 °C. Reinprecht (1992b) prokázal při ohřevu topolového dřeva na 210 °C po dobu 3h pokles rázové houževnatosti o 61 %.

### Ohybová pevnost

Pevnost dřeva přímo závisí na jeho hustotě. Studie pevnosti byly provedeny na borovici a smrku viz obrázky 3-6. Ohybová pevnost suchého dřeva finské borovice je 90-120 MPa. Po tepelném zpracování teplotou 210 °C se toto číslo mírně snížilo na 85 až 105 MPa a při teplotě 240 °C klesla tahová pevnost v ohybu na 65-85 MPa. Celková pevnost borovice v závislosti na režimu tepelného zpracování klesá z 5 na 30 %. Pokud jde o tvrdé dřevo (jasan, dub), pokles síly je mnohem menší. Je to způsobeno buněčnou strukturou stromu. Jehličnaté buňky jsou umístěny navzájem paralelně, ale v listnatých se prolínají a vytvářejí spolehlivější strukturu dřeva. Pokles pevnosti jasanu a dubu během tepelné úpravy se odhaduje na 3 až 15 % (Thermowood Handbook 2003, Poncsak et al. 2011).



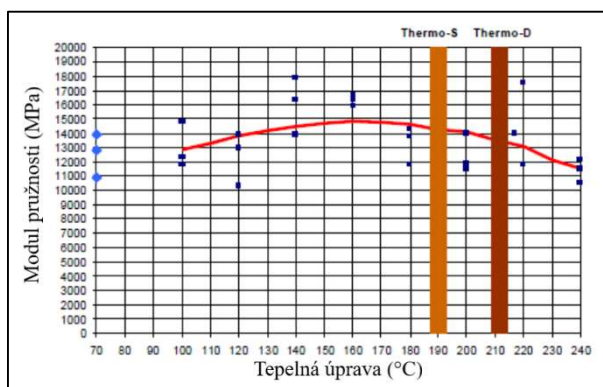
Obrázek 3-10 Změna ohybové pevnosti při tepelné úpravě (Thermowood Handbook 2003)

Bengtsoon et al. (2002) prokázal pokles ohybové pevnosti až o 50 %, a to u dřeva upraveného teplotou 220 °C po dobu 5h. Celkový čas modifikace s ohřevem a chlazením

trval téměř 4 dny. K podobným výsledkům došel Bekhta a Nimz (2003) na smrkovém dřevu při ohřevu na 200 °C (Aytin et al. 2015).

### Modul pružnosti

Při teplotách úpravy, zhruba do 160 °C, a kratší dobou vrcholové části, při použití technologie ThermoWood s přítomností kyslíku, se modul pružnosti výrazně nemění viz obrázek 3-7. Modul pružnosti začíná klesat až při vyšších teplotních úpravách nebo při delším času samotné úpravy, s čímž je spojen i vyšší úbytek hmotnosti modifikovaného dřeva (Millett a Gerhards 1972). Změny modulu pružnosti při úpravě v ochranné atmosféře dusíku jsou nepatrné, a i jeho pokles při vyšších teplotách je nepatrný (Kubojima et al. 2000, Shi et al. 2007).



Obrázek 3-11 Změna modulu pružnosti u borovice vystavená tepelné úpravě.  
(Thermowood Handbook 2003)

### 3.7 Reologické modely

Reologie je pole vědy, která studuje i kvantifikuje tvorbu a transformaci pevných a kapalných skupenství v průběhu času.

Reologické vlastnosti dřeva se projevují v jeho schopnosti deformovat se při zatížení v rámci časového intervalu. Nejpodrobněji studované rysy deformace dřeva jsou podél vláken. Je prokázáno, že hlavním nositelem reologických vlastností dřeva je jeho anizotropní složka, vysoce orientovaný polymer, tj. celulóza (Roszyk 2005).

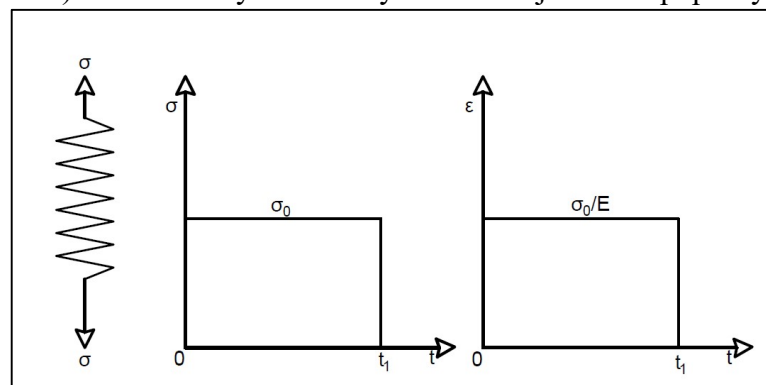
Termín „Reologie“ prvně představil americký vědec Yu Bingam, který studoval reologii kapalin a disperzních systémů. Oficiální termín „Reologie“ byl přijat na 3. sympoziu o plasticitě (1929, USA), avšak některá ustanovení reologie byla stanovena dlouho předtím.

Reologie, jako věda o deformaci a toku napětí v tělese, vychází z přesného zkoumání jevu při mechanickém zatížení. Zabývá se poměrem mezi napětím působícím na těleso a jeho deformací. Matematický model mechanických vlastností daného tělesa je dán rovnicí, která spojuje napětí v blízkosti určitého bodu tělesa a deformace vznikající v důsledku toho působení. Tato rovnice zahrnuje napětí a deformace, tzn. jejich derivace a integrály s ohledem na čas. Tato rovnice se nazývá „reologická“.

Reologie popisuje míru tečení jednotlivých materiálů pomocí základních modelů. Pro materiály se složitější strukturou se tyto základní modely vzájemně kombinují tak, aby došlo k co nejvíce věrohodnému matematickému modelu, který zároveň dobře popisuje skutečné chování pozorovaného tělesa (Požgaj et al. 1993, Lakes 2009, Guedes 2011).

### Viskoelastické modely

Elastická tělesa a viskózní tekutiny se při deformaci výrazně liší svými vlastnostmi. Elastická deformovatelná tělesa se po odstranění aplikovaného zatížení vrátí do svého přirozeného nebo nedeformovaného stavu. Naproti tomu nestlačitelné viskózní kapaliny se po odstranění zátěže do původního stavu vůbec nevracejí. Kromě toho jsou napětí v elastickém tělese přímo spojena s deformacemi, zatímco napětí ve viskózní tekutině závisí (s výjimkou hydrostatické složky) na rychlosti deformace. Chování materiálu, který kombinuje obě tyto vlastnosti, tj. pružnost i viskozitu, se nazývá viskoelastické. Elastické těleso a viskózní tekutina zauímají extrémní protilehlé body v široké škále viskoelastických materiálů. Pro zjednodušení popisu reologického chování viskoelastických materiálu se používají zjednodušené modely základních reologických modelů. Patří sem například tuhé látky (Euklidova hmota), tekutá kapalina (Pascalova tekutina), pružná látka (Hookova hmota), viskózní kapalina (Newtonova kapalina), tvárná látka (St.Venantova hmota) a vláčné látky, které charakterizují viskoelastické modely (FSV ČVUT 2010). Některé z výše uvedených modelů jsou dále popsány podrobněji.



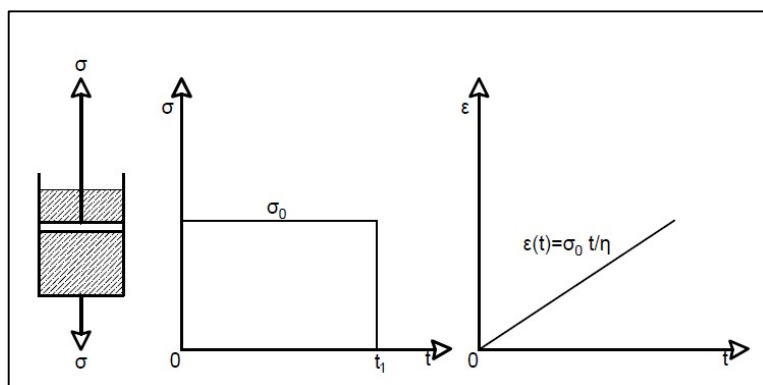
Obrázek 3-14 Lineárně pružné chování při konstantním napětí (Guedes 2011)

Lineární model pružného tělesa je popsán Hookovým zákonem  $\sigma = E \cdot \varepsilon$  kde je napětí  $\sigma$  úměrné deformaci  $\varepsilon$ . Hookův zákon tento model popisuje jako pružnou deformaci materiálu při působení síly za předpokladu malých sil a malých deformací, které po odlehčení zmizí viz obrázek 3-8. Hookův zákon platí pouze pro dokonale pružná tělesa, která navíc mají lineární závislost mezi napětím a deformací. Jelikož u reálných materiálů vždy dojde k překročení meze kluzu, případně meze porušení, je možno uvažovat s Hookovým zákonem pouze do tzv. meze úměrnosti. Za meze kluzu je nutné uvažovat s teorií plasticity. Pro viskózní materiály platí Hookův zákon pouze pro krátkodobá zatížení. Tento vztah je v reologických modelech popisován jako pružina (Ranta-Maunus 1993).

Naproti tomu viskózní kapalina neboli Newtonova hmota je popsána vztahem

$$\sigma = \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (1)$$

Deformace je tedy přímo úměrná na velikosti napětí viz obrázek 3-9.

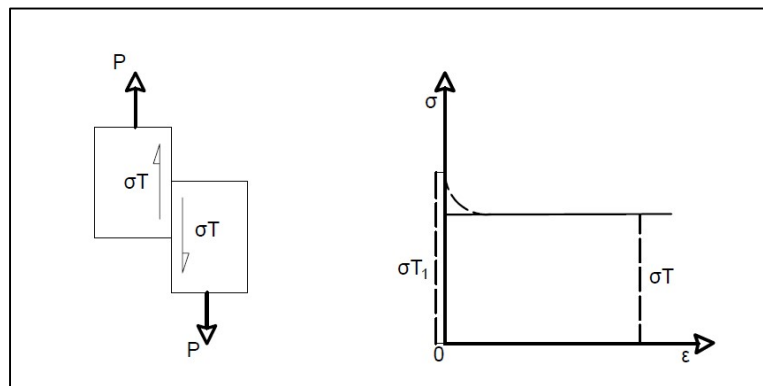


Obrázek 3-17 Lineárně plastické chování při konstantním napětí (Guedes 2011)

Po ukončení zatížení tedy nedojde k žádnému navrácení do původního stavu, vzniklá deformace je trvalá. Toto chování je v reologických modelech znázorňováno jako hydraulický píst s kapalinou stále viskozity (FSV ČVUT 2010).

Saint-Venantova látka je modelová látka, která je pro smykové napětí menší, než je mezní napětí  $\tau_0$ . Chová se jako tuhé těleso, ale při dosažení mezního napětí  $\tau_0$  začne téct, přičemž napětí se udržuje na své mezní hodnotě, kterou nemůže překročit. Předpoklad, že při plastickém toku napětí nepřevyšuje hodnotu  $\tau = \tau_0$ , je idealizace, není to však

předpoklad zcela umělý. Jakmile začne látka plasticky téct, napětí v ní se nemusí dále zvyšovat. V reálných plastických látkách může po překročení mezního napětí dojít jak ke zvýšení, tak i snížení napětí, které je častější. Přesný popis jejich reologického chování je obtížný, přesto nebo možná právě proto, je v nejpodrobněji vypracované teorii plasticity, teorii plasticity kovů, StV-model jedním z užívaných modelů. Chování látky a jeho grafické znázornění v reologických modelech odpovídá dvěma tělesům, která vůči sobě překonávají třecí napětí (Lakes 2009, FSV ČVUT 2010, Guedes 2011).



Obrázek 3-18 Model St.Venantovy plastické látky (Fsv ČVUT 2010)

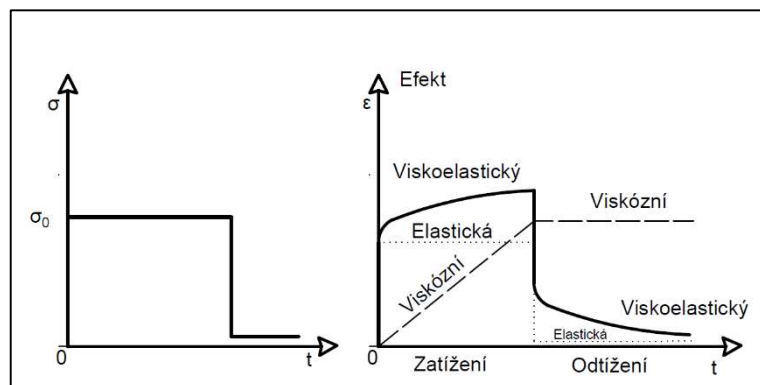
StV-model (obr.3-9) je základním modelem plastické látky, podobně jako H-model (obr. 3-7) a N-model (obr. 3-8) jsou základními modely elastické, resp. viskózní látky. Spojením H-modelů a N-modelů jsme získali reologické modely viskoelastických látek. Spojením StV-modelů s modely H a N získáme reologické modely dalších druhů látek. Takovým modelům budeme říkat obecné reologické modely.

Každá reálná látka se od jednotlivých základních modelů liší. Je nutné je kombinovat vzájemně tak, aby vznikl model nejlépe charakterizující pozorovaný materiál. Základní modely se dají skládat sériově nebo paralelně k sobě tak, aby věrohodně popisovaly tečení materiálu. V našem případě se jedná o dřevo, což je obecně viskoelastický materiál (Lakes 2009, FSV ČVUT 2010, Guedes 2011).

## Vlastnosti viskoelastického materiálu

**Tečení** – je charakterizováno napětím v tělese, které se nemění v čase, pokud se nezmění kvůli vnějším vlivům. Pokud je celková deformace libovolného bodu daného útvaru způsobena vnějšími silami, dosahuje maximální hodnoty při čase zatížení blížíci se nekonečnu. Dále je známo, že všechny materiály mají vlastnost stárnutí, což znamená, že fyzikálně – mechanické vlastnosti se v čase mění, proto je při zlepšování metod pro jejich výpočet důležité zohlednit dočasné procesy vyskytující se ve strukturálních prvcích v průběhu období působení vnějších sil. Tečení je proces zvyšování zbytkové deformace v průběhu času při konstantním zatížení a konstantami, nebo měnicími se okolními podmínkami. Matematicky to lze vyjádřit rovnicí tečení  $J(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0}$ . Fenomén tečení je v zásadě nedílnou součástí všech materiálů, ale ne všechny je mají ve stejném rozsahu. Proces tečení by měl být považován za proces akumulace poškození, vedoucí k úplnému zničení materiálu, když má tento materiál vyčerpanou deformační schopnost (Lakes 2009).

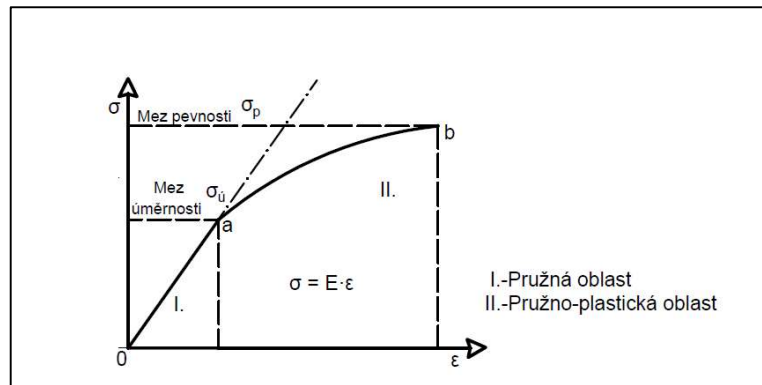
**Relaxace** – pro zajištění stálosti deformací v čase ve vzorku, jak ukazují experimenty, dochází v čase k poklesu napětí (obr. 3-10). Jevy pomalého poklesu napětí ve vzorku s konstantní počáteční deformací se nazývají relaxace. Zátěžové relaxační testy vzorků se provádějí na stejných zkušebních strojích a za stejných podmínek jako creepové testy vzorků. Výskyt relaxace napětí elastického a nevratného účinku, který následuje, je odrazem skutečnosti, že při zatížení a odtížení konečnou rychlostí je materiál v termodynamicky nerovnovázném stavu, protože energie přicházející z vnějšku nemůže být okamžitě rozložena do celého objemu v souladu s principem minimální celkové energie systému. Tento děj se matematicky vyjádří jako  $E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0}$  (Požgaj et al. 1993, Lakes 2009).



Obrázek 3-19 Tečení a relaxace – závislost deformace a napětí na čase (Lakes 2009)



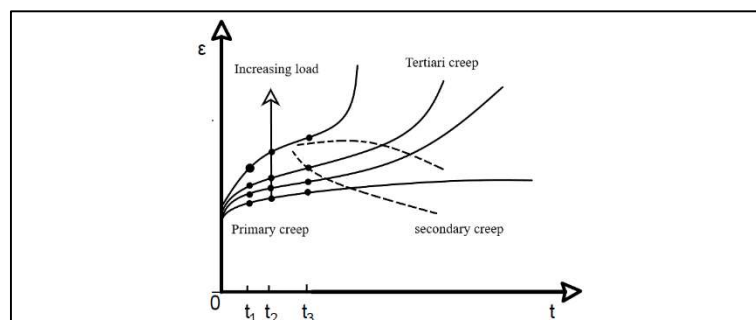
Dřevo namáhané krátkodobým zatížením vykazuje lineární vztah mezi napětím a deformací do meze úměrnosti, viz obrázek 3-11. Mez úměrnosti je takové napětí, kdy v tělese vznikají pouze deformace pružné, případně pružné v čase. Po ukončení silového působení tyto deformace zcela pomíjejí a těleso se vrací do původního stavu. Mez úměrnosti je tedy v pracovním diagramu právě ten bod, kde přímka grafu přechází v oblast křivky. Podoba křivky přitom vypovídá o růstu napětí nad mezí úměrnosti, až do meze pevnosti. Po překročení meze pevnosti těleso pozbývá svoji integritu (Požgaj et al. 1993).



Obrázek 3-20 Pracovní diagram dřeva (Požgaj a kol. 1993)

V materiálu, který je dlouhodobě zatížen pod mezí úměrnosti, vznikají nejen pružné deformace, ale i ty pružné v čase a plastické. Jednotlivé deformace v tělese, tedy jejich velikost v daném čase, určuje rovnice  $\frac{d\sigma}{dt} = 0$ . Z obrázku 3-12 vidíme vliv počáteční velikosti napětí s dobou zatížení na průběh křivky. Nejspodnější křivka popisuje průběh deformací při zatížení pod mezí úměrnosti. Ostatní křivky popisují deformace v čase při počátečním zatížení nad mezí úměrnosti. V čase zatížení blížící se k nule dochází jen k pružné deformaci  $\epsilon_0 = \epsilon_{el}$ , poté se deformace zvětšují. Primární tečení lze popsat jako konkávní křivku  $\epsilon_1$ , která znázorňuje dopružení dřeva složené z deformace pružné v čase a plastické. Po odtížení jsme schopni změřit plastickou deformaci  $\epsilon_{pl}$ . Sekundární tečení je oblast znázorněna přerušovanou čarou, označuje překročení meze úměrnosti. Po překročení této meze se rapidně zvyšuje plastická

deformace  $\varepsilon_{vel}$ . Součtem všech deformací se určí celková deformace a dá se tedy vyjádřit jako  $\varepsilon_{cel} = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{vel} + \varepsilon_{pl}$ . (Požgaj et al. 1993, Lakes 2009).



Obrázek 3-21 Tečení – závislost deformace na čase při rozdílném konstantním zatížení (Lakes 2009)

Z empirického pozorování a analýz dopružování bylo prokázáno, že proces tečení dřeva probíhá nejrychleji během prvních hodin od zatížení a postupem času se zvolňuje. Stejně se chová i po procesu odtížení. Jednotlivé poměry deformací po odpružení jsou přibližně stanoveny následovně: pružná deformace 71%, deformace pružná v čase 12%, a deformace plastická 17%. (Požgaj et al. 1993, Horáček 1998).

Ve struktuře dřeva se z pohledu chemických elementů jednotlivé deformace projevují odlišně. Pružnou deformaci zajišťuje pohyb v kovalentních vazbách a vodíkových můstcích. Deformace pružné v čase se projevují pohybem těchto elementů. Vytvářejí se pohybem makromolekul celulózy, které se vzájemně spojují a rozpojují v místech vodíkových můstků. K trvalým deformacím dochází úplným přerušением vodíkových můstků, popřípadě rozrušením kovalentních vazeb mezi řetězci. Tyto deformace jsou tedy nevratné (Požgaj et al. 1993, Montero et al. 2012).

Na základě pozorování můžeme tvrdit, že při dlouhodobém zatěžování pod mezí úměrnosti, nedojde v materiálu k destrukci. Můžeme tedy brát mez úměrnosti jako trvalou pevnost dřeva. Naopak při dlouhodobém zatěžování nad touto mezí dojde v materiálu za určitý čas ke konečné destrukci (Požgaj et al. 1993, Molliková 2014).

Na celkovou pevnost dřeva má významný vliv i rychlost zatěžování. Což je testováno při ohybových zkouškách, kdy je těleso zatěžováno konstantní rychlostí po dobu trvání 2 až 4 minut, dokud nedojde k celkové destrukci. Touto zkouškou měříme pevnost statickou, kde je klíčový podíl modulu pružnosti a velikosti napětí. Při dlouhodobém zatížení ale musíme uvažovat s trvalou pevností dřeva, která se pohybuje zhruba na úrovni 50 až 60 % z meze pevnosti při krátkodobém statickém namáhání. Jde tedy o napětí, které při nekonečně dlouhém namáhání sice umožní maximální deformaci, ale nedojde k destrukci materiálu (Lakes 2009, FSV ČVUT 2010, Guedes 2011).

## Složené reologické modely

Pokud materiály vykazují při trvalém zatížení pružné i částečně plastické deformace, jako například dřevo, můžeme tento materiál znázornit (modelovat) jako kombinaci pružiny a pístu.

Pokud pružinu a píst zapojíme sériově (spojení za sebou), vznikne Maxwellův model (obr. 3-14). V tomto modelu okamžitou pružnou deformaci popisuje pružina a plastickou deformaci zde zastupuje píst. V Maxwellově modelu platí pro celkové

Napětí:

$$\sigma = \sigma_H = \sigma_N \quad (2)$$

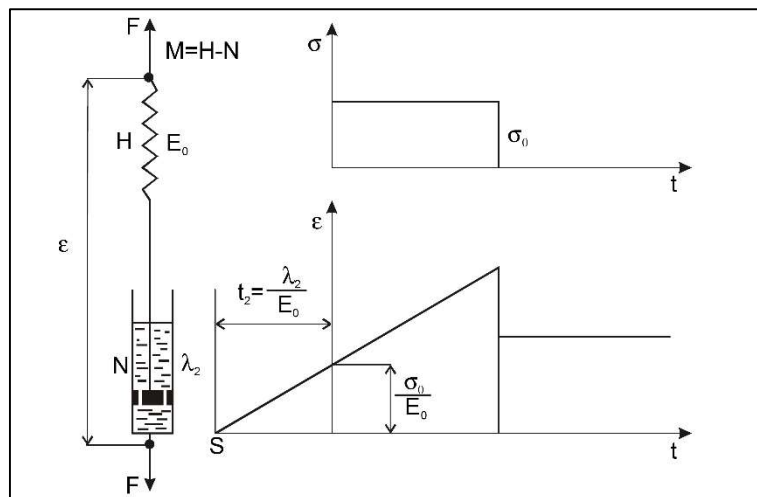
Pro celkovou deformaci:

$$\varepsilon_{cel} = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{cel} = \frac{\sigma}{E_{el}} + \frac{1}{\eta_{pl}} \cdot \int_0^t \sigma \cdot dt \quad (4)$$

Za podmínek  $\sigma = \text{konstantní}$  je  $\frac{d\sigma}{dt} = 0$

$$\varepsilon_{cel} = \frac{\sigma}{E_{el}} + \frac{\sigma}{\eta_{pl}} \cdot t \quad (5)$$



Obrázek 3-22 Maxwellův model a průběh jeho odpružení (Požgaj 1985)

Paralelně zapojená pružina a píst (vedle sebe), dostaneme Kelvinův (Voigtův) model. Současně dochází k pohybu pístu a pružiny a jejich jednotlivé deformace jsou stejné. Síla vyvolávající deformaci se rozkládá mezi dvě tělesa a jejich velikost je součet sil působících na jednotlivé prvky modelu.

Pro celkové napětí platí:

$$\sigma = \sigma_H + \sigma_N \quad (6)$$

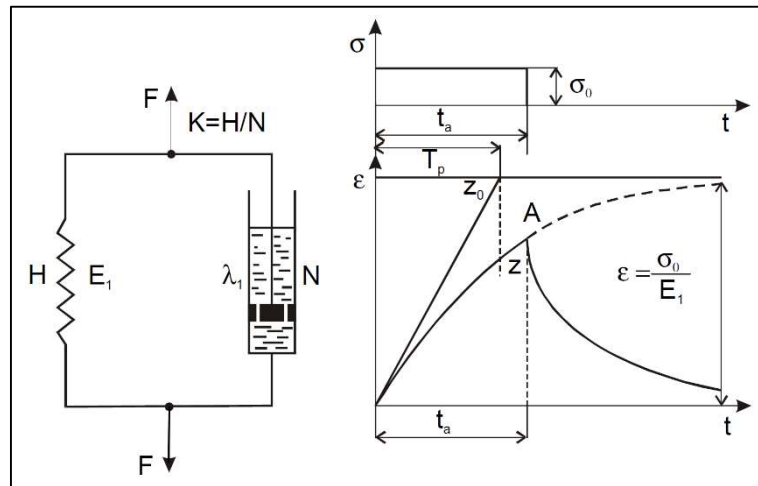
Pro celkovou deformaci platí:

$$\varepsilon_{cel} = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{csl} = e^{\frac{E_{vel} \cdot t}{\eta_{vel}}} \cdot \left[ E_{vel} + \frac{1}{\eta_{vel}} \cdot \int_0^t \sigma \cdot e^{\frac{E_{vel}}{\eta_{ve}} \cdot t} \right] \quad (8)$$

Za podmínek  $t=0$ ,  $\varepsilon_{vel}=0$  a  $\sigma=$  konstantní

$$\varepsilon_{cel} = \frac{\sigma}{E_{vel}} \cdot \left[ 1 - e^{\frac{E_{vel}}{\eta_{vel}} \cdot t} \right] \quad (9)$$



Obrázek 3-25 Kelvinův model a průběh jeho odpružení (Požgaj 1985)

Záporem tohoto modelu je nedostatečné zobrazení závislosti času deformace na zatěžování a odtížení daného prvku. Dále tento model není schopen určit plastické deformace, které v materiálu zůstanou po odtížení (Guedes 2011).

Nevýhodami Kelvinova a Maxwellova modelu je jejich základní zobrazování tečení. Pro věrohodnější popsání deformací při tečení složitějších materiálů, tedy například i dřeva, budeme muset použít komplexnější modely, které vznikají následným přidáním dalších pístů a pružin (Guedes 2011). Složitější viskoelastické látky těžko můžeme charakterizovat modely, které se soustředí pouze na jednotlivé parametry, tím pádem potřebujeme modely, které dokáží pracovat se všemi parametry deformací současně. V praxi se navíc vyskytují i síly setrvačné, které klasické modely nezohledňují (Ďoubal et.al. 2014).

**Poyntingon – Thomsonův model** – tento model vznikne zapojením pružiny a Kelvinova modelu za sebe. Výstižně popisuje chování látek, které jsou složeny z přírodních makromolekul. Popisné rovnice jsou získány z již známých hodnot Kelvinova a Maxwelllova modelu:

Pro tříprvkový model jako celek:

$$\sigma = \sigma_1 = \sigma_2 \quad (10)$$

$$\varepsilon_{\text{cel}} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (11)$$

Pro Kelvinův model uvnitř tříprvkového modelu, čárka znamená derivaci podle času (dt):

$$\dot{\varepsilon}_{\text{cel}} = \dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2 \quad (12)$$

Pro samostatnou pružinu:

$$\sigma_1 = E \cdot \varepsilon_1 \quad (13)$$

Pro Kelvinův model uvnitř tříprvkového modelu:

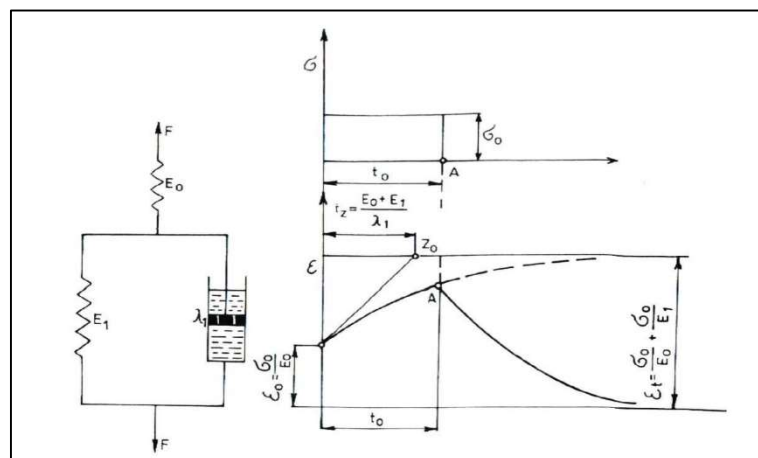
$$\sigma_2 = E_2 \cdot \varepsilon_2 + \eta_2 \cdot \dot{\varepsilon}_2 \quad (14)$$

Pro deformaci Kelvinova modelu:

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E_2} \cdot (\sigma_2 - \eta_2 \cdot \dot{\varepsilon}_2) \quad (15)$$

Po dosazení za  $\varepsilon_1$  a  $\varepsilon_2$  do rovnice, která vyjadřuje celkové deformace, můžeme vypočítat:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{E_2 \cdot t}{\eta_2}} \right) \quad (16)$$



Obrázek 3-26 Tříprvkový Thomson – Poyntingův model (Sobotka 1981)

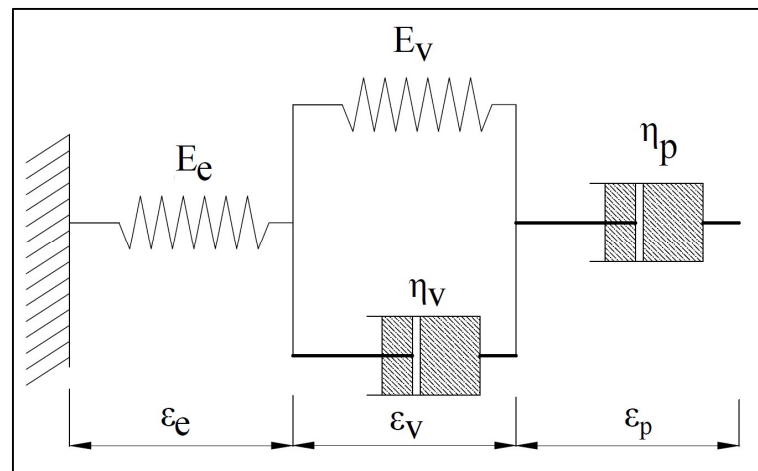
**Čtyřprvkový Burgerův (Tuckettův) model** je dalším ze složených reologických modelů vhodných pro dřevo. Jde o sériové zapojení Kelvinova a Maxwelllova modelu, který je vhodné použít při pozorování tečení při konstantním zatížení. Při použití za konstantních podmínek okolního prostředí je schopný zobrazit všechny tři druhy deformací, tj. elastickou, viskoelastickou i plastickou.

Obecný princip tohoto modelu je, že v čase  $t_0$  je model vystaven konstantnímu napětí  $\sigma$ . V čase  $t_0$  dochází v tělese k okamžité elastické deformaci, kterou v modelu reprezentuje Maxwellova pružina. V následujícím časovém intervalu ( $t_1 - t_0$ ) dochází k pohybu Kelvinova modelu, který je zde charakterizován jako píst s pružinou, se zapojením paralelně vedle sebe. Posledním prvkem v modelu je Maxwellův píst, který zde charakterizuje plastickou deformaci, která je nevratná. Po odstranění napětí v čase  $t_1$  se pružina vrátí do původního stavu. Následně v časovém období ( $t_2 - t_1$ ) dochází k relaxaci, to znamená navrácení pístu a pružiny do původního stavu, neboli navrácení viskoelastické deformace. Poslední prvek modelu se po odtížení nevrací do původního stavu, protože reprezentuje plastickou deformaci, která je po vzniku neměnná. Celková deformace je tedy součtem deformací na jednotlivých prvcích modelu: (Guedes 2011).

$$\varepsilon_{cel} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (17)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}}\right) + \frac{\sigma}{\eta_3} \cdot t \quad (18)$$

$$\varepsilon_{cel} = \frac{\sigma}{E_{el}} + \frac{\sigma}{E_{vel}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{E_{vel} t}{\eta_{vel}}}\right) + \frac{\sigma}{\eta_{pl}} \cdot t \quad (19)$$



Obrázek 3-27 Burgerův model se čtyřmi prvky (Moutee et. al. 2005)

Tento základní Burgerův model lze upravit za předpokladu, že změnu vlhkosti dřeva a reakci na tuto vlhkostní změnu, lze popsat jako viskoelastickou reakci neboli pružnou v čase, který definujeme reologickou konstantou  $K_w = \frac{1}{\tau_w}$ . Tato konstanta charakterizuje dobu, za kterou dojde k vytvoření rovnovážného stavu mezi vnějším prostředím, materiálem a mechanicko-sorpční reologickou konstantou  $\mu_{ms}$ . Za těchto nekonstantních vnějších podmínek můžeme celkovou deformaci vyjádřit jako:

$$\varepsilon_{cel} = \frac{\sigma}{E_{el}} + \frac{\sigma}{E_{vel}} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{E_{vel} \cdot t}{\eta_{vel}}} \right) + \frac{\sigma}{\eta_{pl}} \cdot t + \frac{\sigma}{\mu_{ms}} \cdot |\Delta w| \cdot (1 - e^{-K_w \cdot t}) \quad (20)$$

(Borůvka 2000)

### 3.8 Možnosti řešení daného problému

Nejvhodnějším způsobem řešení se jeví modelování jednotlivých deformací pomocí reologických modelů, které vhodným a poměrně realistickým způsobem popisují jednotlivé deformace dřeva při konstantním zatížení, vzhledem ke konstantním vnějším podmínkám nebo při měnicích se vnějších podmínkách, avšak za konstantního zatížení.

Možnost řešení tečení dřeva pomocí časové řady je následující. Časová řada je věcně a prostorově srovnatelné pozorování dat, která jsou jednoznačně uspořádána z hlediska času ve směru minulost – přítomnost. Obvykle prvním úkolem při analýze časové řady je získat rychlou a orientační představu o charakteru procesu, který tato řada reprezentuje. Časové řady nejsou vhodné k řešení tečení dřeva z těchto důvodů: nedostatečná délka časové řady, např. Boxova – Jenkinsonova metodologie vyžaduje minimálně 50 měření (Cipra 1986), nestejněměrná časová vzdálenost mezi jednotlivými daty, prostor mezi nimi není lineární závislostí času a deformace. Dále je zde malá flexibilita časové řady a nedostatečná interpretace výsledků z pohledu podílu jednotlivých deformací.

Řešení pomocí vyrovnávacích funkcí také není nejvhodnějším způsobem řešení tečení dřeva, neboť základní princip těchto funkcí je hledání nejideálnější funkce. Nejčastěji se jedná o lineární regresní analýzu. Úkolem těchto analýz je najít takovou funkční závislost mezi jednotlivými proměnnými tak, aby průběh funkce nejlépe popisoval měřený průběh jevu. Zpravidla se používá metoda nejmenších čtverců. Pomocí této analýzy jsme schopni měřit jen celkovou deformaci, ale nejsme schopni popsat jednotlivé složky deformace (Požgaj et al. 1993).

Nejvhodnějším přístupem pro danou problematiku bude tedy použití dvou již známých modelů. Těmi jsou čtyřprvkový Burgerův model pro konstantní zatížení a konstantní vnější podmínky, a nelineární Burgerův model nebo tak zvaný upravený Burgerův model pro konstantní zatížení s měnicími se vnějšími podmínkami. Výhody obou modelů jsou v celku přesném popisu podílu jednotlivých deformací v průběhu času (Požgaj et al. 1993).

### 3.9 Způsoby měření a možné chyby při vyhodnocení

Nepřesnost měření neboli chyby jsou součástí každého postupu měření. Vždy má tedy smysl hovořit o přesnosti měření, tj. do jaké míry naše měření odpovídá skutečnosti, což můžeme vyjádřit chybou měření nebo tzv. mírou nejistoty měření. Měření pak bude tím přesnější, čím menší bude jeho absolutní chyba, která je definována jako rozdíl měřené a skutečné hodnoty měřené veličiny (Novák 2001).

Nepřesnost měření se dá tedy rozdělit na dva základní faktory. Jedním z faktorů jsou tak zvané systémové chyby, které jsou způsobené měřicími přístroji nebo metodou měření, popřípadě metodami vyhodnocení. V našem případě se jedná například o toleranci snímacích zařízení, které mají již z výroby danou míru přesnosti měření a pod tuto hodnotu nejsou schopné měřit. Systémové chyby nemají zásadní vliv na výsledky. Na výsledky měření mají však značný vliv chyby nahodilé. Většinou jsou způsobené vlivem vnějších podmínek (vnější zásahy). Jsou to chyby způsobené nečekaným zásahem a většinou jsou neopakovatelné (Meloun 2004).

Pokud soubor naměřených hodnot náhodné veličiny kolísá okolo střední hodnoty, může to být způsobeno mnoha vnějšími vlivy. Přesto, pokud tento soubor odpovídá normálnímu rozdělení, lze přibližně vyjádřit střední kvadratickou chybu aritmetického průměru tímto vztahem:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (21)$$

Na ověření toho, zda má pozorovaná veličina náhodné rozdělení, slouží mnoho statistických testů, obecně jsou to testy dobré shody.

Absolutní chyba ( $\Delta$ ) je rozdíl mezi naměřenou hodnotou ( $M$ ) a skutečnou hodnotou ( $S$ ) měřené veličiny:

$$\Delta = M - S \quad (22)$$

Protože skutečnou hodnotu nelze z fyzikálních důvodů zjistit, nahrazuje se srovnávací hodnotou, tak zvanou konvenční pravou hodnotou. Tuto hodnotu lze zjistit teoretickým výpočtem, nebo aritmetickým průměrem z většího počtu měření. Sama tato hodnota však přesnost měření nevyjadřuje dobře.

V našem případě nepřímé chyby měření respektive veličiny určené z fyzikálního zákona a veličiny získané měřením ( $\Delta\sigma, \Delta\varepsilon, \Delta E, \Delta w$ ) jsou opravdu zanedbatelné (Meloun 2004).



## 4 Materiál

### 4.1 Druh materiálu

Na experimenty bylo použito jako vstupní materiál dřevo Smrku ztepilého, latinským názvem *Picea abies*. Tato dřevina je procentuálně nejvíce zastoupená v lesích ČR. Jedná se o dřevinu, která se průmyslově nejvíce zpracovává, a to především z hlediska využití v konstrukcích dřevostaveb, kde jsou na ni kladeny nároky zejména z hlediska mechanických vlastností (Čundrlík 2009).

Smrky jsou stále zelené jehličnaté dřeviny, které dorůstají do výšky 30 – 50 metrů. Jehlice jsou tmavě zelené, lesklé a zašpičatělé. Na vnější a vnitřní straně jehlic je málo výrazný bílý pruh. Z horní strany větviček vyrůstají jehlice do všech stran a na spodní jsou uspořádané do dvou řad. Jedincům rostoucím v zápoji přeslenitě uspořádané větve postupně odumírají a odpadávají, kdežto solitéry mají větve většinou až k zemi. Kořenový systém nemá hlavní kořen. Jedná se o povrchový kořenový systém, který nezajišťuje dostatečnou stabilitu proti nárazovému větru.

Přirozený výskyt smrku ztepilého jsou horské a podhorské oblasti, ale z hlediska jeho dobrého produkčního výnosu byl lesníky plošně vysazován ve všech oblastech ČR. (Zeidler 2016, Šlezingerová 2008, Gandelová 2014, Borrega a Karenlapi 2008).

Tabulka 4-1 Vybrané Mechanické a fyzikální vlastnosti dřeva smrku ztepilého uvedených v literatuře

Popis	Veličina	Hodnota	Jednotka
Hustota	$\rho$	0,441	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
Objemové sesychání	$\beta_v$	11,7	%
Pevnost v ohybu kolmo na vlákna v tangenciálním směru	$\sigma_{oh \perp T}$	72,9	Mpa
Modul pružnosti v ohybu v podélném směru	$E_{ohL}$	8210	MPa
Modul pružnosti v tlaku v podélném směru	$E_{tL}$	13650	MPa
Poissonovo číslo ve směru vláken	$\mu_{RL}$	0,487	-
	$\mu_{TL}$	0,557	-

## 4.2 Příprava zkušebních těles

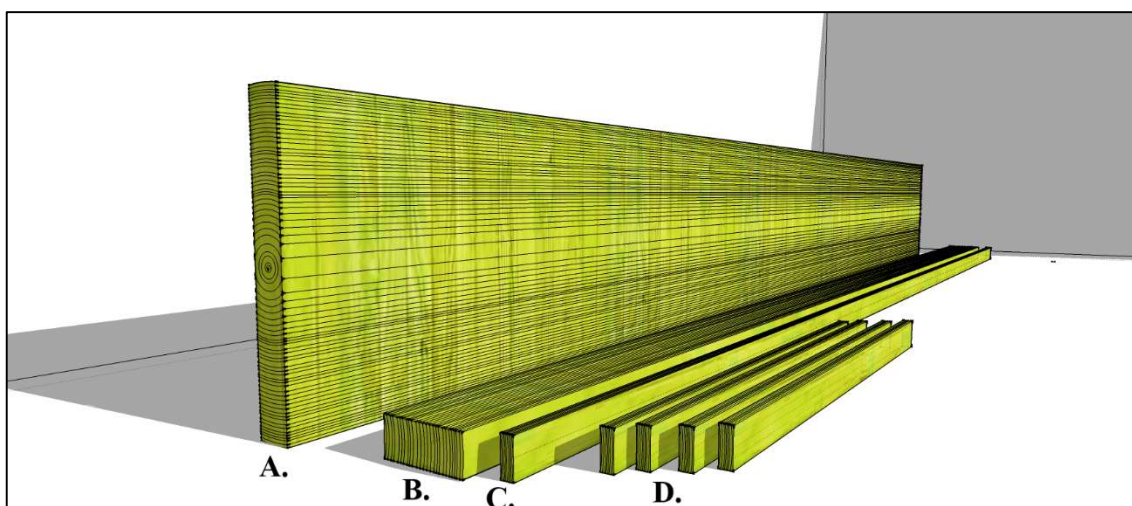
Pro výrobu těles byly použité středové fošny smrku ztepilého o síle 6 cm, které byly zakoupeny ve Školním lesním podniku v Kostelci nad Černými lesy při České zemědělské univerzitě v Praze. Tyto fošny byly vyřezány ze stromů o minimálním průměru 45 cm přímo ze středu kmene, o délce 4 metrů. Byl dbán důraz na vysokou kvalitu vstupní kulatiny tak, aby vyhotovené řezivo neobsahovalo žádné zřejmé vady, jako je tlakové dřevo, hniloba, suky, praskliny, či točivost. Z takto vyhotovených fošen byly vybrány pouze ty, které měly pravidelné přírůsty a neobsahovaly žádné vizuálně zřejmé vady.

Pro přípravu těles byla použita dvě pořezová schémata tak, aby se zajistila co možná nejvyšší paralelnost jednotlivých těles (viz obr 4-1).

V první fázi se z fošen (A.) odřezali krajové části (B.) tak, aby splňovaly povolený odklon vláken. Jednotlivé přířezy byly popsány, a středová část fošny byla vyřazená. Poté byl materiál uložen do doby, kdy se jeho vnitřní vlhkost pohybovala okolo 12%.

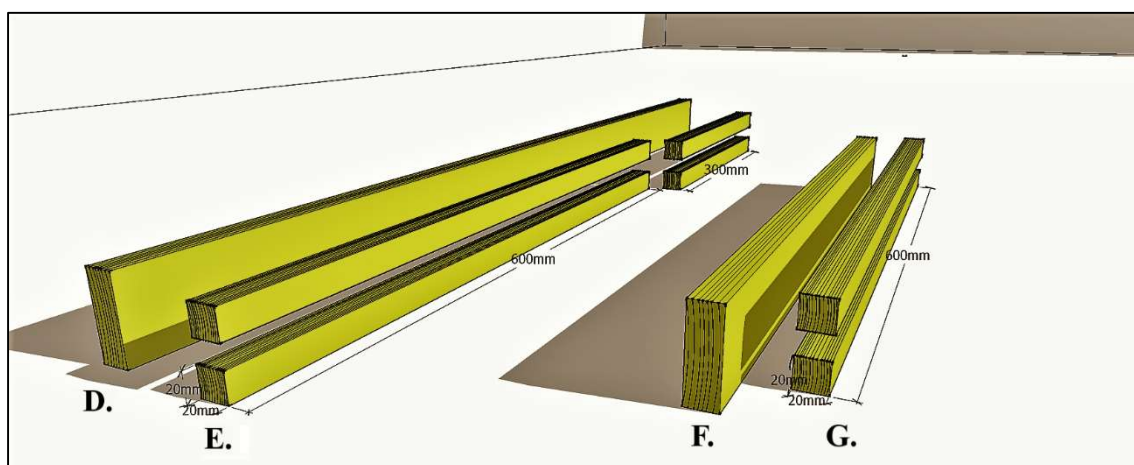
Ve druhé fázi se z takto připravených přířezů (B.) rozmanipulovaly jednotlivé latě (C.) o rozměrech 600x30x4000 mm. V této fázi se jednotlivé latě znovu zkontrolovaly a ty, které obsahovaly vady, byly vyřazeny z dalšího opracování.

Ve třetí fázi byly latě porovnány a protaženy na požadovanou tloušťku zkušebních latí, tedy na rozměr 600x20x4000 mm. Poté byly tyto latě podélně rozmanipulovány na kratší dílce (D.) pro snadnější a přesnější pořez na finální vzorky, viz obr.4-1.



Obrázek 4-1 Názorné schéma zpracování zkušebních těles do určité fáze přípravy.

Čtvrtá fáze spočívala v tom, že jednotlivé přířezy (D.) viz obrázek 4-2 byly podélně rozříznuty a protaženy na finální rozměr 20x20x1000 mm, a následně rozkráceny na finální tělesa o rozměrech 20x20x600 mm. Tato tělesa pak byla použita na dlouhodobé experimenty, a tělesa o rozměrech 20x20x300 mm byla použita na krátkodobé experimenty (E.). Jedna lať (C.) tedy tvoří jednu sadu paralelních těles, která byla následně rozdělena na skupiny podle stupňů termické úpravy.



Obrázek 4-2 Pořezové schéma finálních těles určených na pokusy

Při prvním způsobu vykrácení latě (C.) vzniklo osm dvojic složených z krátkého a dlouhého tělesa, které jsou vůči sobě paralelní. Při druhém způsobu byla lať (C.) rozkrácena na délku 600 mm (F.) a z tohoto přířezu vznikla dvě stejná tělesa o rozměrech 20x20x600 mm. Tímto způsobem vznikla sada o šesti dvojicích, které jsou na sebe paralelní.

Celkový počet jednotlivých sad je 100 kusů, kde 50 kusů je vytvořeno jedním způsobem, a 50 kusů druhým způsobem. Sady byly rozděleny a popsány kódy podle toho na jakou tepelnou úpravu byly určeny tak, aby každá skupina obsahovala paralelní tělesa.

### 4.3 Metoda termické modifikace

Tepelná úprava jednotlivých sérií byla zhotovena v laboratorní komoře v areálu ČZU. Použitý způsob modifikace vychází z patentovaného principu ThermoWood, který byl použit při výrobě těles pro experimentální pokusy.

Komora byla vyrobena firmou KATRES Jihlava a skládá se z hlavní tepelné komory s topnými tělesy a větrákem, který zajišťuje vnitřní cirkulaci vzduchu. Dále je do komory přiveden přívod páry pro regulaci ohřevu a rychlosti sušení materiálu.

Pro samotnou fázi úpravy je v komoře tryska, která v nastavených intervalech vstřikuje do komory vodu a vytváří tak vodní clonu, která brání dřevu se samovznítit.

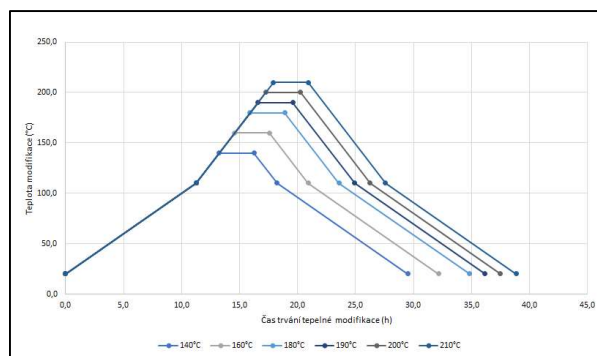
Pro regulaci podmínek úpravy je komora vybavena dvěma teploměry materiálu a dvěma vlhkostními čidly materiálu, které sledují parametry úpravy. Pro sledování vnitřních podmínek komory je osazena jedním suchým a jedním mokřím teploměrem. Rozdíl mezi nimi nám udává schopnost vnitřní atmosféry přijímat nebo odevzdávat vlhkost upravovaného materiálu.

Všechny tyto parametry jsou používány k regulaci procesu s ohledem na nastavený režim úpravy. Z tohoto hlediska je nejdůležitější mít daný režim nastavený tak, aby vnitřní podmínky komory korespondovaly s vnitřními podmínkami materiálu, především s teplotou. Nastavení režimu bylo uzpůsobeno tak, aby k materiálu ve všech fázích bylo co nejšetrnější a nedošlo k porušení celistvosti upraveného materiálu.

První fáze neboli ohřev začíná na teplotě 20 °C. Nastavená strmost tohoto úseku byla 8 °C za hodinu, až komora dosáhla vyrovnané teploty 110 °C. V této fázi se do komory pouštěla pára. Účelem této fáze je zbavit dřevo vlhkosti před finální úpravou. Volná voda ve dřevě při vyšších teplotách způsobuje praskliny materiálu. Tato fáze je přímo úměrná velikosti upravovaných těles a jejich vstupní vlhkosti. V našem případě měla vstupní tělesa vlhkost okolo 10 %.

Druhá fáze: po dosažení 110 °C se komora automaticky přepnula do další fáze, kde strmost růstu teploty byla nastavena na 15 °C za hodinu. Tuto teplotu zvyšovala až do dosažení požadované teploty úpravy, kde tuto teplotu držela po dobu 3 hodin, přičemž byla do komory vstřikována voda jako ochranné médium.

Třetí fáze: Po uplynutí 3 hodin se spustí režim ochlazení, který je rozdělen do dvou částí. První část je prudké ochlazení se strmostí ochlazování 15 °C za hodinu. V této fázi je důležité ochladit upravený materiál tak, aby došlo k ukončení vnitřních chemických změn.



Obrázek 4-3 Průběh jednotlivých tepelných úprav v závislosti na čase

Druhá část je od 110 °C a je mnohem pozvolnější, pokles je pouze 8 °C za hodinu, až na teplotu 20 °C. K materiálu je opět přiváděna vlhkost a je v něm snižována teplota tak, aby nedošlo ke „stresu“ těles při přenosu do jiného prostředí. Viz obrázek (4-3).

Jednotlivé úpravy byly vykonány stejným způsobem, jediný rozdíl byl v teplotě finální vrcholové fáze úpravy. Všechny ostatní parametry byly nastaveny konstantně, viz tabulka 4-2.

Tabulka 4-2 Parametry nastavení termokomory při tepelné modifikaci.

	Paření (%)	podtlak			Vlhčení	
		Nast. (Pa)	Min. (%)	Klapka (%)	Zap. (sekund)	Vyp. (sekund)
<b>První fáze</b>	30	50	4	60	0	0
<b>Druhá fáze</b>	60	40	20	40	2	30
<b>Třetí fáze A</b>	15	30	15	20	2	10
<b>Třetí fáze B</b>	5	50	15	70	2	20

Při úpravě bylo především dbáno na co největší zachování mechanických vlastností dřeva, zvolený režim byl přizpůsoben tak, aby se tohoto cíle co nejrelevantněji dosáhlo. Důležitým faktorem je výše uvedená fáze chlazení.

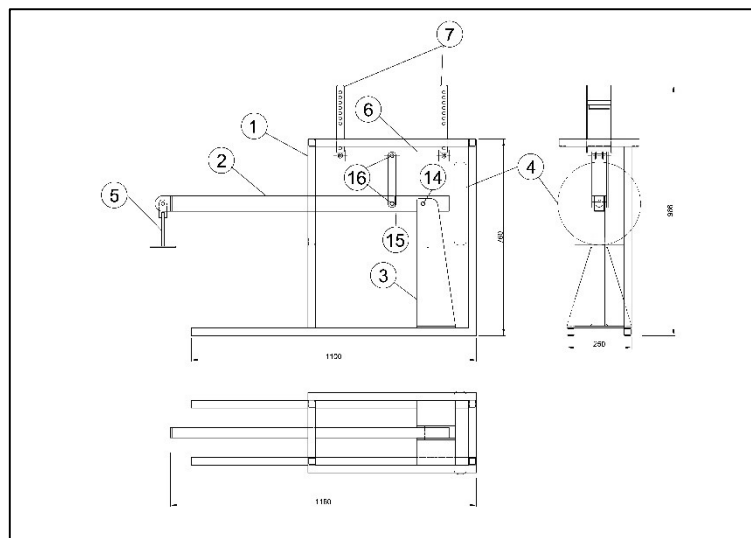
#### 4.4 Zkušební zařízení na dlouhodobé zkoušky

Pro potřeby měření byl vyvinuta creepová jednotka s automatickým zápisem dat do PC. Z hlediska finanční náročnosti na výrobu byly vyrobeny pouze v pěti kusech a určeny byly pro měření průhybu za konstantní podmínek.

Popis zařízení:

Creepové zařízení slouží k dlouhodobému zatěžování materiálu v ohybu, při kterém se zaznamenává změna průhybu v čase. Každá creepová jednotka je samostatné zařízení, které se skládá ze tří základních částí.

Creepová jednotka se skládá z hlavního rámu, na kterém je přichycena páka, která vytváří zatěžovací sílu. Tato páka je na druhé straně opatřena protizávažím, které eliminuje sílu vyvozovanou vlastní tíhou zatěžovacího mechanismu. K páce je přichycen třmen, který tuto sílu přenáší na rameno, kde jsou přichyceny dvě zatěžovací hlavy, které působí na zkušební těleso (obr.4-4). Horní strana rámu je osazena dvěma podpůrnými otočnými podpěrami a držákem potenciometru, který snímá deformace ve středu materiálu. Samotný potenciometr je přichycen k držáku dvěma plastovými kotvami. Ze spodní strany vyjíždí měřící snímač a z horní strany je vývod na kabel, který propojuje snímací zařízení se záznamovou kartou, která data předává do počítače, kde jsou ukládána.



Obrázek 4-4 Schéma creepového zařízení použitého při měření ( patent příloha 1)

Na obrázku 4-4 konkrétně vidíme: 1 – Hlavní rám Creepové jednotky, 2- Hlavní rameno páky, 3 – Držák hlavní páky propojen čepem, 4- Proti závaží, 5- Držák závaží, 6- Dělicí rameno, 7- Třmeny převádějící zatížení na materiál, 8- Polohovací otvor, 9- Kyvná dosedací hlavice, 10- Podpěrné válce, 11- Držák potenciometru, 12- Ložisková pouzdra, 13- Šrouby na možnost aretace.

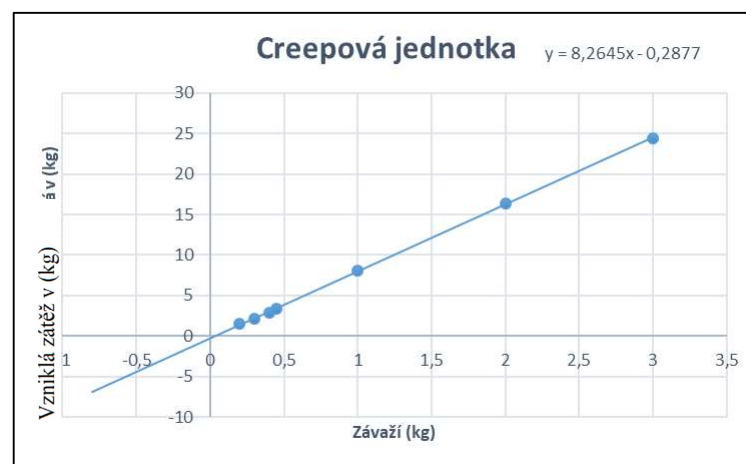
#### **Princip vyvozování zatěžovací síly:**

Zatěžová síla, která je vyvozována pákovým mechanismem, je přímo úměrná vloženému závaží a délce páky od bodu otáčení. Takto vyvinutá síla je na materiál převáděna pomocí dvou zatěžovacích třmenů.

Kalibrace zařízení byla provedena pomocí závěsné váhy, na kterou se zavěsily oba zatěžovací třmeny pomocí kovového řetízku. Poté bylo na rameno páky přikládáno závaží o předem známé hmotnosti počínaje nejmenším, až do hranice rozsahu měření závěsné

váhy. Ze zaznamenaných dat lze tedy vytvořit funkci, která nám přesně udává velikost závaží a velikost vyvozované síly na třmenech, s ohledem na ztrátu síly ve spojích jednotlivých částí zatěžovaného mechanismu. Při obrácení této lineární rovnice dostaneme rovnici, která nám říká, jak velké potřebujeme závaží k tomu, aby nám vyvinulo požadované zatížení.

Pro dlouhodobé zkoušky s nekonstantními podmínkami byly použity obdobné creepové jednotky, které jsou majetkem Katedry nauky o dřevě TU Zvolen, u kterých je průhyb měřen manuálním odčítáním z úchylkoměru a zapisován do tabulky. Kalibrace těchto zařízení proběhla obdobně, jako u našich zařízení. Pro každé zařízení zde vznikla funkce popisující vztah mezi závažím a zatěžovací silou působící na těleso.



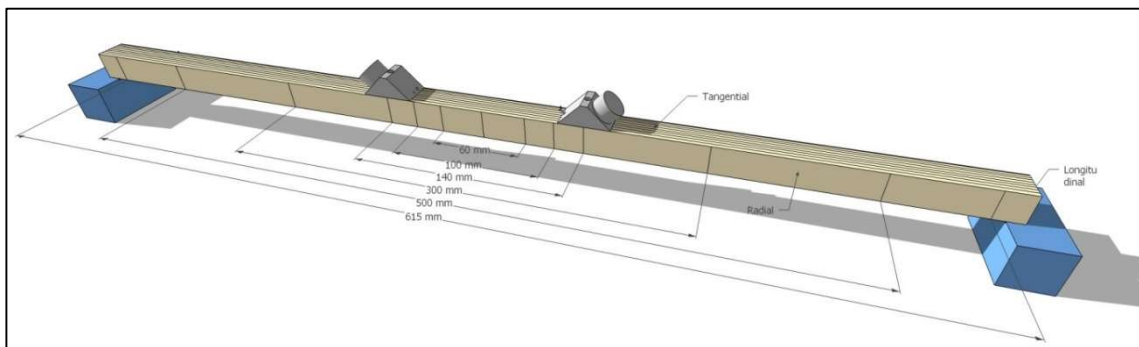
Obrázek 4-5 Princip výpočtu potřebného závaží k vyvinutí zatěžované síly.

## 5 Metodika

### 5.1 Metodický postup při měření modulu pružnosti

#### Ultrazvuk Fakopp

Měření ultrazvukem je nedestruktivní metoda zjišťování dynamického modulu pružnosti dřeva. V principu se jedná o měření času průchodu vlny materiálem z vysílače do přijímače na určitou vzdálenost. V našem případě se prováděla dvě měření. První měření bylo ve vzdálenosti čidel 300 mm od sebe na tangenciální a radiální ploše. Toto měření bylo provedeno jak před termickou úpravou, tak po termické úpravě. Rozdíl mezi získanými moduly by měl ukázat vliv jednotlivých tepelných úprav na dynamický modul měřený touto metodou. Druhé měření proběhlo pouze na radiální ploše, tzn. v tangenciálním směru, ve vzdálenostech 60 mm, 100 mm, 140 mm, 500 mm a 615 mm, vždy se středem měření uprostřed vzorku ( Borůvka et al. 2018, Borůvka et al. 2015).



Obrázek 5-1 Postup měření ultrazvukem na jednotlivých vzorcích

Měření probíhalo dle návodu měřicího zařízení FAKOPP ULTRASONIC TIMER. Vzorek byl podepřen v krajních částech molitanovými podpěrami tak, aby nezasahovaly do polohy čidla a neovlivňovaly průchod vlny materiálem. Čidla se přikládala na předem připravené rysky v jednotlivých vzdálenostech a konstantně byla přitlačována k materiálu. Konstantní přitlak hraje velkou roli při měření, k jeho dosažení pomáhal i molitan, který byl částečně deformován a vyrovnával sílu přitlaku. Přístroj zaznamenal hodnotu času průchodu vlny materiálem v mikrosekundách. Následně byl každý vzorek změřen a zvážen. Takto získané údaje se následně dále zpracovávaly pomocí vzorců. První vzorec slouží k výpočtu rychlosti vlny:

$$V = \frac{1000 \cdot l}{(t-K)} \quad (23)$$



Kde:

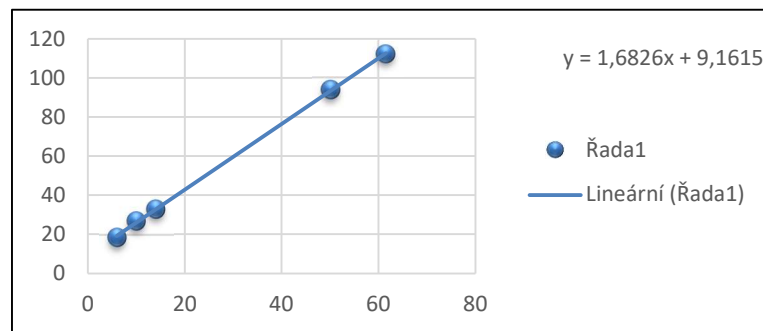
V- rychlost v (m/s),

l - vzdálenost čidel od sebe v (mm),

t - naměřený čas průchodu vlny v ( $\mu$ s),

K - korekce času v sekundách.

Stanovení korekce je velmi důležité, protože má velký vliv na výsledky měření. Výrobce udává dva způsoby výpočtu. První z nich je čistě teoretická metoda stanovení korekce na základě znalosti rychlosti šíření vlny v hliníku, která je 5100 m/s, a vzdálenosti, kterou vlna musí urazit, což je 0,03 m. Výpočet tedy vypadá  $t = l/v = 0,03/5100 = 5,9 \mu\text{s}$   $K=5,9 \mu\text{s}$ .



Obrázek 5-2 způsob získání korekce pro jednotlivé vzorky

Druhý způsob získání korekce je čistě empirický. Naměřená data z jednoho vzorku se vloží do grafu a proloží se lineární funkcí. Získaná rovnice regrese udává korekci času pro konkrétní vzorky. Jedná se o čas nutný k průchodu v nulové vzdálenosti čidel od sebe. Tento způsob korekce je přesnější z hlediska zahrnutí průchodu vlny čidlem a prostorem mezi materiálem, který se měří. Takto získanou korekci je možné dosadit do vzorce pro výpočet rychlosti, nebo lze stanovit průměrnou hodnotu korekce pro danou sérii. V našem případě byla dosazována konkrétní hodnota korekce času pro každý vzorek. Takto získaná rychlost šíření vlny se dosadí do známého vzorce pro dynamický modul pružnosti, který je následující:

$$E_d = (c^2 \cdot \rho)/1000000 \quad (24)$$

Kde písmena označují:

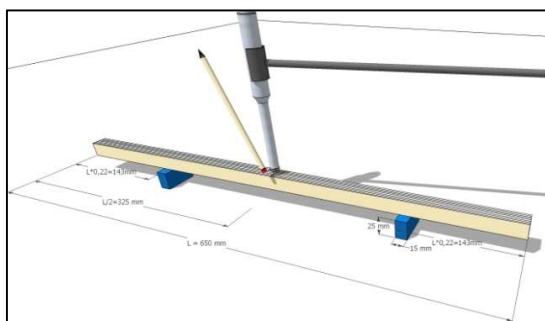
$E_d$  - dynamický modul pružnosti v MPa,

c - rychlost šíření zvuku v  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,

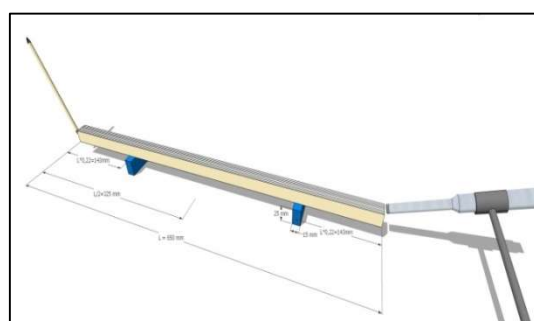
$\rho$  - hustotu dřeva v  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (ČSN 49 0108).

## Vibrační metoda

Jedná se o druhou nedestruktivní zkoušku na určení dynamického modulu pružnosti. Vzorky se přesně podloží pryžovými podpěrami ve vzdálenosti  $L \cdot 0,22$ , což se v našem případě rovná 143 mm. Takovéto podložení vzorku zajistí pravidelné šíření vlny. Poté se nainstaluje mikrofón přibližně ve vzdálenosti 2 mm od zkušebního tělesa a úderem se vytvoří vibrace. V našem případě byl úder vyvolán tužkou, která byla v horní části osazena gumou. Kladivo, které by mělo vyvolat vibraci, má mít hmotnost mezi 0,5-5 % hmotnosti vzorku.



Obrázek 5-3 Metoda měření kolmo na vlákna



Obrázek 5-4 Metoda měření podél vláken

Udeříme těsně vedle mikrofónu na radiální plochu a mikrofón zaznamená následnou odezvu ve formě kmitočtu síly odezvy v Hz viz obrázek 5-3. V podélném směru se mikrofón přiblíží z boční strany vzorku a z druhé strany se udeří kovovou částí tužky na příčný řez viz obrázek 5-4. Mikrofón na druhé straně znovu zaznamená hodnotu odezvy v Hz. Dále se hodnoty již zpracovávají pomocí vzorců podobně jako u předchozí zkoušky. Dynamický modul pružnosti v příčném směru se tedy vypočte jako:

$$MOE_{dyn,bending} = \left( \frac{2f_n}{\gamma_n \pi} \right)^2 \cdot \frac{mL^3}{I} \quad (25)$$

Kde písmena označují:

$f_n$  - frekvence příčné vibrace,

$\gamma$  - opravný koeficient v příčném směru,

$m$  - hmotnost tělesa v kg,

$L$  - délka vzorku v m,

$I$  - moment setrvačnosti v  $m^3$ .

Modul setrvačnosti se vyjádří jako:

$$I = \frac{(a \cdot b^3)}{12} \quad (26)$$

Kde:

a - výška vzorku,

b - tloušťka vzorku.

Dynamický modul pružnosti v podélném směru (měření FFT analýzou) se vypočte podle vzorce:

$$E_{dyn} = \frac{\rho_w \cdot v^2}{10^9} \quad (27)$$

Kde jsou:

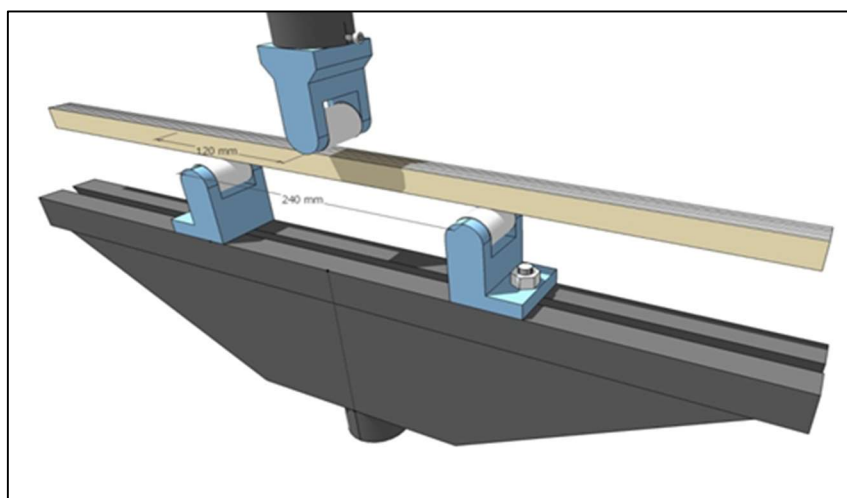
$\rho_w$  - hustota v kg/m<sup>3</sup>,

v - rychlost vlny v m/s, která se vypočte podle vztahu  $v=2 \cdot l \cdot f$ ,

Po dosazení veličin do vzorce dostaneme modul pružnosti v GPa.

### Destruktivní statická zkouška

Pro porovnání nedestruktivních zkoušek určování modulu pružnosti byla nakonec provedena destruktivní zkouška. Statické ohybové zkoušky byly vykonány na zkušebním trhacím stroji TIRA 50 kN (výrobce TIRA GmbH, DE). Zkouška probíhala standartně, podle normy ČSN 310 - ohybová zkouška se vzdáleností podpěr 240 mm (dvanáctinásobek výšky zkušebního tělesa) a s jednou působící silou ve středu podpěr, viz obrázek 5-5. Těleso bylo zatěžováno v tangenciálním směru, tzn., že síla působila na radiální plochu.



Obrázek 5-5 Princip statické ohybové zkoušky

Statický modul pružnosti při působení jednou silou ve středu podpěr se vypočítá podle (ČSN 490116) vzorce:

$$E_{ohw} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta F \cdot l_0^3}{b \cdot h^3 \cdot \Delta y} \quad (28)$$

Kde je znázorněno:

$E_{ohw}$  – modul pružnosti v ohybu při vlhkosti v čase zkoušky v MPa,

$\Delta F$  – rozdíl síly mezi horní a dolní hranicí zatížení v N,

$l_0$  – vzdálenost mezi podpěrami v mm,

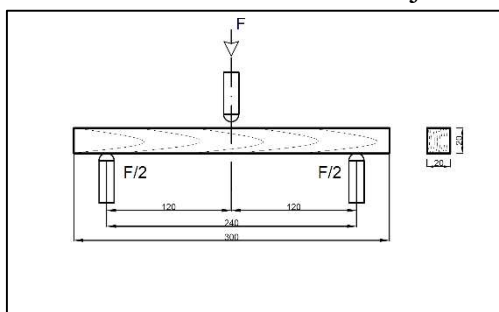
$b, h$  – šířka a výška tělesa v mm,

$\Delta y$  – průhyb zkušební tělesa v zóně čistého ohybu, rovnající se rozdílu hodnot průhybu odpovídajících horní a dolní hranici zatížení v mm.

## 5.2 Metodický postup při dlouhodobých experimentech za konstantních podmínek

Při dlouhodobém testování byly použity vzorky o rozměrech 20x20x600 mm. Pro jejich založení bylo třeba nejprve zjistit jejich maximální pevnost v ohybu, k tomu byla použita jejich paralelní tělesa o rozměrech 20x20x300 mm dle požezového schématu, viz kapitola 4.2 (obr. 4-2, požezové schéma E) (ČSN 490101).

Krátkodobá pevnost v ohybu malých těles byla testována na zkušebním stroji TIRA 50 kN, s lineárně rostoucí zatěžovací silou ve středu zkušební tělesa. Jedná se tedy o třibodový ohyb. Výstupem ze zkoušky je graf napětí, deformace a hodnota meze pevnosti a modulu pružnosti. Schéma zatěžování včetně rozměrů je na obr. 5-6.



Obrázek 5-8 Tří bodové schéma zatěžování

Jednotlivá tělesa byla zatěžována kolmo na vlákna v tangenciálním směru. Vyvozané napětí v tělese roste. Při překročení meze pevnosti dojde k destrukci zkušebního tělesa a zkouška se ukončí. Velikost napětí můžeme vyjádřit dle vztahu z normy ČSN 49 0115.

$$\sigma = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot l_0}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (29)$$

Kde:

$\sigma$  – napětí v ohybu, mez pevnosti (MPa),

$F_{max}$  – maximální zatěžovací síla (N),

$l_0$  – vzdálenost podpěr (mm),

$b, h$  – šířka a výška zkušebního tělesa (mm).

Z této získané pevnosti v ohybu se dále vypočetla zatěžovací síla pro dlouhodobé pokusy. Zatěžování dlouhých těles o rozměrech 20 x 20 x 600 mm bylo stanoveno na 25 % z celkové pevnosti v ohybu získané při krátkodobé zkoušce. Velikost potřebné síly k dlouhodobému zatížení byla vyjádřena ze vztahu napětí v ohybu za použití čtyřbodového zatížení, přičemž působící síly byly ve čtvrtinách od podpěr, přičemž v tomto případě platí vztah:

$$\sigma = \frac{3 \cdot F \cdot l_0}{4 \cdot b \cdot h^2} \quad (30)$$

Po vyjádření síly:

$$F = \frac{4 \cdot \sigma \cdot b \cdot h^2}{3 \cdot l_0} \quad (31)$$

Kde je:

$\sigma$  – napětí v ohybu, mez pevnosti (25 % z celkové) (MPa),

$F$  – zatěžovací síla (N),

$l_0$  – vzdálenost podpěr (mm),

$b, h$  – šířka a výška zatěžovaného tělesa (mm).

(ČSN 49 0115)

Výpočet hmotnosti závaží se lišil v závislosti na použité creepové jednotce. Hmotnost závaží se pohybovala v rozmezí mezi 3 až 15 kg v závislosti na stupni úpravy daných těles. Výpočet byl stanoven dle vztahů získaných z kalibrace zařízení, viz kapitola 4.4. Potřebná hmotnost pro jednotlivé creepové jednotky byla připravena pomocí ocelových kotoučů a uzavřené nádoby s vodou (s tolerancí 1 g).

Strukturovaný postup měření:

- Výpočet nutné síly pro dlouhodobé zatížení (z paralelního tělesa),
- Výpočet nutného závaží pro příslušné těleso a creepovou jednotku,
- Příprava závaží pro jednotlivá tělesa s přesností na 1 g,
- Upnutí těles do creepové jednotky a příprava snímacího zařízení,
- Spuštění programu pro snímání deformací,
- Založení závaží na jednotlivé páky creepové jednotky,
- Zaznamenávání jednotlivých sledovaných parametrů jako je teplota, vlhkost a deformace po celou dobu experimentu (funkce programu).

Pro vyhodnocení získaných výsledků byl použit klasický Burgerův model, který modelově popisuje závislost deformace na čase. Jednotlivé body grafu propojí funkce a umožní určit jednotlivé zastoupení konkrétních druhů deformací (elastická, elastická v čase a plastická) v celkové deformaci. Burgerův model je tedy vhodný k popsání viskoelastického chování dřeva z hlediska dlouhodobého zatížení při konstantních podmínkách. Podrobnější popis viz kapitola (3.7).

Celková deformace Burgerova modelu lze vyjádřit jako:

$$\varepsilon_{cel} = \frac{\sigma}{E_{el}} + \frac{\sigma}{E_{vel}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{E_{vel}t}{\eta_{vel}}}\right) + \frac{\sigma}{\eta_{pl}} \cdot t \quad (32)$$

Jelikož v našem případě považujeme napětí za konstantní, vydělíme tedy rovnici napětím a následně jí upravíme podle Hookova zákona na:

$$\frac{1}{\varepsilon_{cel}} - \frac{1}{E_{el}} = \frac{1}{E_{vel}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{E_{vel}t}{\eta_{vel}}}\right) + \frac{1}{\eta_{pl}} \cdot t \quad (33)$$

Uvažujeme tedy s předpokladem, že první měření deformace ihned po založení vykazuje pouze elastickou deformaci, která je po celou dobu konstantní. Můžeme uvažovat, že levou stranu rovnice a čas zatížení známe. Lze tedy nahradit tyto členy dvěma proměnnými  $v_1$  a  $v_2$  podle:

$$v_1 = t \quad v_2 = \frac{1}{E_{cel}} - \frac{1}{E_{el}} \quad (34)$$

Ostatní reologické parametry můžeme vyjádřit jako:

$$E_{vel} = \frac{1}{a} \quad \eta_{vel} = \frac{1}{a \cdot b} \quad \eta_{pl} = \frac{1}{c} \quad \tau_{vel} = \frac{\eta_{vel}}{E_{vel}} = \frac{1}{b}$$

Kde  $\tau_{ve}$  charakterizuje relaxační čas v hodinách, tedy dobu, za kterou dojde k zániku viskoelastické deformace po odtížení. Po nahrazení dostaneme funkci o dvou neznámých  $v_1$  a  $v_2$  a třech parametrech (a, b, c).

$$v_2 = a \cdot (1 - e^{b \cdot v_1}) + c \cdot v_1 \quad (\text{Borůvka 2000}) \quad (35)$$

Tuto rovnici řešíme pomocí nelineární regrese v programu STATISTICA, který dokáže proložit body křivkou a matematicky jí popsat, z čehož následně získáme jednotlivé parametry (a, b, c), které zpětně vyjádříme jako jednotlivé reologické parametry. Nakonec vypočteme faktor tečení ze vztahu:

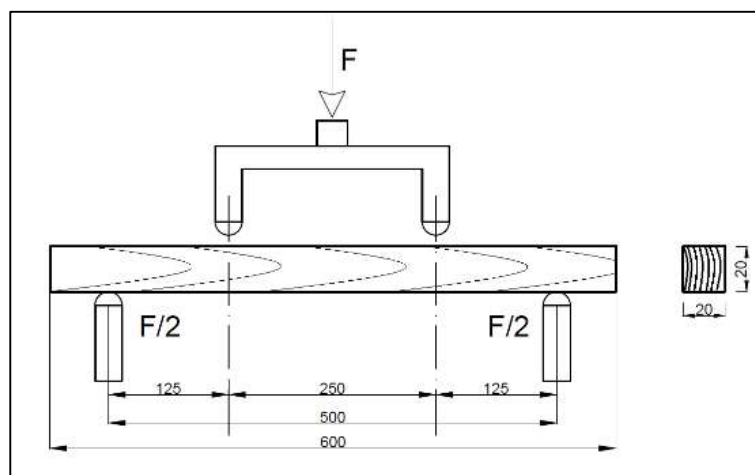
$$K(t) = \frac{\varepsilon_{cel}}{\varepsilon_{el}} \quad (36)$$

Posledním krokem je vyjádření jednotlivých deformací pomocí procentuálního zastoupení tak, aby nám to umožnilo jednodušší porovnání vlivu tepelné úpravy na jednotlivé podíly deformací.

### 5.3 Metodický postup při dlouhodobých experimentech při nekonstantních podmínkách

Dlouhodobé pokusy s nekonstantními podmínkami probíhaly v areálu TU Zvolen na katedře nauky o dřevě ve vnější kryté expozici (balkon). Měření probíhalo na místních creepových jednotkách. Princip zatěžování je obdobné jako u našich jednotek, ačkoli tyto jednotky neobsahují protizávaží, tudíž nejnižší zatěžovací síla se rovná síle vyvinuté vlastní hmotností zatěžovacího mechanismu. Kalibrace zařízení probíhala tak jako je popsáno v kapitole 4.4.

Zjištění krátkodobé pevnosti v ohybu na paralelních tělesech bylo provedeno čtyřbodovým ohybem se vzdáleností podpěr 500 mm a dvěma zatěžovacími hlavami (obr. 5-7), které působily ve čtvrtinách vzdálenosti spodních podpěr, tedy stejně, jako byla zatížena tělesa pro dlouhodobé experimenty.



Obrázek 5-9 Schéma čtyřbodového ohybu

Pevnost u čtyřbodového ohybu se vyjádří podle vztahu:

$$\sigma = \frac{3 \cdot F \cdot l_0}{4 \cdot b \cdot h^2} \quad (37)$$

Z této pevnosti se použilo pouze 25 % pro dlouhodobé pokusy, respektive po úpravě tohoto vzorce můžeme vyjádřit nutnou zatěžovací sílu obdobně, jako je popsáno v kapitole 5.1. Po vypočtení jednotlivých závaží pro každou creepovou jednotku a umístění příslušného tělesa se pokračovalo k samotnému zatížení. Při tomto experimentu se změna průhybu měřila manuálním odčítáním z úchylkoměru s přesností na 0,001 mm, a zapisovala se do tabulky i s přesným časem měření a hmotností těles určených pro stanovení vlhkosti. Bezprostředně po zatížení se zapsala první hodnota, která reprezentuje pružnou deformaci. Poté se hodnoty změny průhybu zapisovaly zhruba po hodině a interval se postupně zvyšoval až na interval dvakrát týdně, s ohledem na možnosti pracovníků katedry.

Tímto způsobem naměřená a zapsaná data byla dále vyhodnocena pomocí upraveného Burgerova modelu, který částečně zohledňuje otázku vlivu vlhkosti na průběh deformace. Předpokládá, že změna deformace způsobené změnou vlhkosti je viskoelastická neboli pružná v čase. Tento model je rozšířen o reologické parametry  $\mu_{ms}$  a  $K_w$ , kde  $K_w$  je obrácenou hodnotou relaxačního času  $\tau_w$ , který říká, za jak dlouho se ustálí rovnovážná vlhkost.



Vzorec pro celkovou deformaci má vztah:

$$\varepsilon_{cel} = \frac{\sigma}{E_{el}} + \frac{\sigma}{E_{vel}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{E_{vel} \cdot t}{\eta_{vel}}}\right) + \frac{\sigma}{\eta_{pl}} \cdot t + \frac{\sigma}{\mu_{ms}} \cdot |\Delta w| \cdot (1 - e^{-K_w \cdot t}) \quad (38)$$

Kde  $\Delta w$  značí absolutní změnu vlhkosti vůči předešlému stavu.

I tento model pracuje s předpokladem, že napětí je po celou dobu konstantní. Za platnosti tohoto předpokladu lze sestavit modelovou rovnicí o třech proměnných a pěti parametrech v následujícím tvaru:

$$\frac{1}{E_{cel}} - \frac{1}{E_{el}} = \frac{1}{E_{el}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{E_{vel} \cdot t}{\eta_{vel}}}\right) + \frac{1}{\eta_{pl}} \cdot t + \frac{1}{\mu_{ms}} \cdot |\Delta W| \cdot (1 - e^{-K_w \cdot t}) \quad (39)$$

Po úpravě dostaneme modelovou rovnici, kterou zadáme do programu STATISTIKA a necháme vypočítat jednotlivé parametry.

Model:

$$v_2 = a \cdot (1 - \exp(-b \cdot v_1)) + c \cdot v_1 + d \cdot v_3 \cdot (1 - \exp(h \cdot v_1)) \quad (40)$$

Kde:

$v_1$  – čas (hod),

$v_2$  – deformace bez pružné deformace,

$v_3$  – změna vlhkosti,

a, b, c, d, h – jednotlivé parametry funkce.

Na základě jednotlivých parametrů lze zpětně dopočítat jednotlivé reologické parametry podle vztahu (a, b, c, d, h) a několik dalších parametrů, které se vypočtou podle vzorců:

$$\mu_{ms} = \frac{1}{a} \quad (41)$$

$$K_w = h \quad (42)$$

$$\tau_w = \frac{1}{K_w} = \frac{1}{h} \quad (43)$$

Dále byl vypočten i u tohoto rozšířeného modelu faktor tečení  $K(t)$ , který se vyjádří jako podíl celkové deformace k prvotní deformaci, tedy elastické deformaci.

$$K(t) = \frac{\varepsilon_{cel}}{\varepsilon_{el}} \quad (44)$$

Výstupem tedy bude vypočítání procentuálního poměru jednotlivých deformací a času ustálení viskoelastické deformace, potažmo ustálení vlhkostní změny a následné porovnání s neupraveným Burgerovým modelem. Dále se sledoval zlom v modelu, kdy již většina změny deformace je způsobena pouze vlhkostní změnou.

Je otázkou, zda takto získaná data jsou statisticky věrohodná, a zda počet vzorků pro jednotlivé série, v našem případě v počtu 3 kusy v sérii, jsou dostatečnou základnou pro věrohodnost výsledků. Je třeba zmínit, že pro dlouhodobé pokusy ve venkovní expozici bylo k dispozici pouze 15 kusů creepových jednotek, pokus trvá již 3,5 roku. Z hlediska délky pokusu, byl stanoven počet vzorků tak, aby zde byly zastoupeny jednotlivé stupně úpravy, plus referenční neupravená tělesa pro porovnání. V rámci toho, že nejsme schopni zopakovat měnící se vnější podmínky, nebylo možné toto měření rozdělit na několik částí s více tělesy v jednotlivé sérii. Pro stanovení počtu vzorků, které by měly reprezentovat jednotlivé série, byl použit následující vzorec:

$$n = \frac{t_{\alpha}^2 \cdot v^2}{d_{\alpha}^2} \quad (45)$$

Kde:

- n – počet vzorků v souboru,
- $t_{\alpha}$  – kvantil studentova rozdělení,
- $d_{\alpha}$  – zvolená hladina významnosti,
- v – variační koeficient.

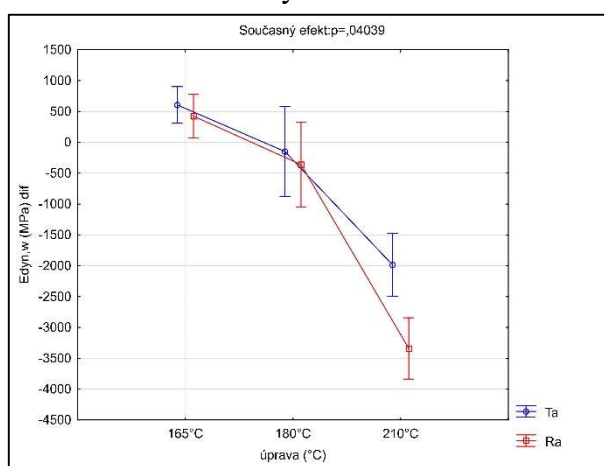
Pro vyhodnocení získaných dat byl použit program STATISTIKA, ve kterém se vyhodnocovaly veškeré výsledky. Reologické modelování bylo prováděno pomocí nelineární regrese. Modul nelineární regrese slouží pro tvorbu a analýzu explicitních nelineárních regresních modelů v obecném tvaru. V našem případě jsme zadali upravený tvar Burgerova modelu a upraveného Burgerova modelu podle vztahu (35,40).

Dále se pomocí funkce ANOVA jednotlivé parametry vyhodnocovaly, zda jsou statisticky významné nebo nevýznamné. Pro tvorbu tabulek byl použit program Microsoft Excel, ve kterém se zároveň připravovala vstupní data pro program STATISTIKA.

## 6 Výsledky

### 6.1 Vyhodnocení vlivu úpravy na modul pružnosti

Jedná se o vyhodnocování vlivu tepelné úpravy na modul pružnosti sledovaný nedestruktivní ultrazvukovou metodou, před a po úpravě, v radiálním a tangenciálním směru. Vliv tepelné úpravy byl vyhodnocen pomocí difference neboli rozdílu dvou stejných hodnot, které jsou vůči sobě závislé. Tato metoda nám umožňuje sledovat přesně jen faktor úpravy bez toho, aby nám do vyhodnocení zasahovaly další proměnné, jako v případě porovnávání s referenčními vzorky.



Graf. 6-1 Vliv tepelné úpravy na modul pružnosti v radiálním a tangenciálním směru.

Na grafu 6-1 je patrný mírný nárůst hodnoty modulu při teplotě úpravy 165 °C, a to v radiálním směru o 3,8 % a v tangenciálním směru o 5,3%. Tento nárůst je způsoben nižší vlhkostí dřeva, kterou způsobila chemická změna při tepelné úpravě. Při teplotě 180 °C je již patrný pokles v tangenciálním směru o 1,1 % a radiálním směru o 3 %. To je způsobeno výraznými chemickými změnami ve dřevě, které narušují jeho integritu. Poslední tepelná úprava při teplotě 210 °C již prokázala významný pokles  $E_{dyn}$  a to v tangenciálním směru o 13,9 % a v radiálním směru o 21,6 %. Dále se prokázalo pomocí Duncanova testu, že teplota 165 °C a 180° C nemá výrazný vliv v rámci směru, naopak teplota 210 °C má statisticky výrazný vliv v radiálním směru oproti tangenciálnímu směru, viz tabulka 6-1, 6-2, 6-3 . Dále se prokázal vliv tepelné úpravy ve všech třech stupních.

Tabulka 6-1 Duncanův test; proměnná Edyn,w (MPa) difference

<b>Přibližné pravděpodobnosti pro post hoc testy</b>								
<b>Chyba: meziskup. PČ = 1913E3, sv = 162,00</b>								
	úprava (°C)	smer Ra/Ta	165°C ta	165°C ra	180°C ta	180°C ra	210°C ta	210°C ra
	Průměr	Edyn, dif	606,24	424,84	-148,7	-360,2	-1986	-3341
<b>1</b>	165°C	ta		<b>0,624</b>	0,052	<b>0,015</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
<b>2</b>	165°C	ra	<b>0,624</b>		0,121	<b>0,043</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
<b>3</b>	180°C	ta	0,052	0,121		<b>0,567</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
<b>4</b>	180°C	ra	<b>0,015</b>	<b>0,043</b>	<b>0,567</b>		<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
<b>5</b>	210°C	ta	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>		<b>0,000</b>
<b>6</b>	210°C	ra	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	

Tabulka 6-2 Jednorozměrné testy významnosti pro Edyn,w (MPa) difference

<b>Více faktorová ANOVA</b>					
<b>Dekompozice efektivní hypotézy</b>					
	SČ	Stupně volnosti	PČ	F	p
<b>Abs. člen</b>	107720307	1	107720307	56,308	<b>0,000</b>
<b>úprava (°C)</b>	308006843	2	154003421	80,501	<b>0,000</b>
<b>smer Ra/Ta</b>	14249828,9	1	14249828	7,449	<b>0,007</b>
<b>úprava (°C)*smer Ra/Ta</b>	12525476,5	2	6262738	3,274	<b>0,040</b>
<b>Chyba</b>	309916334	162	1913063		

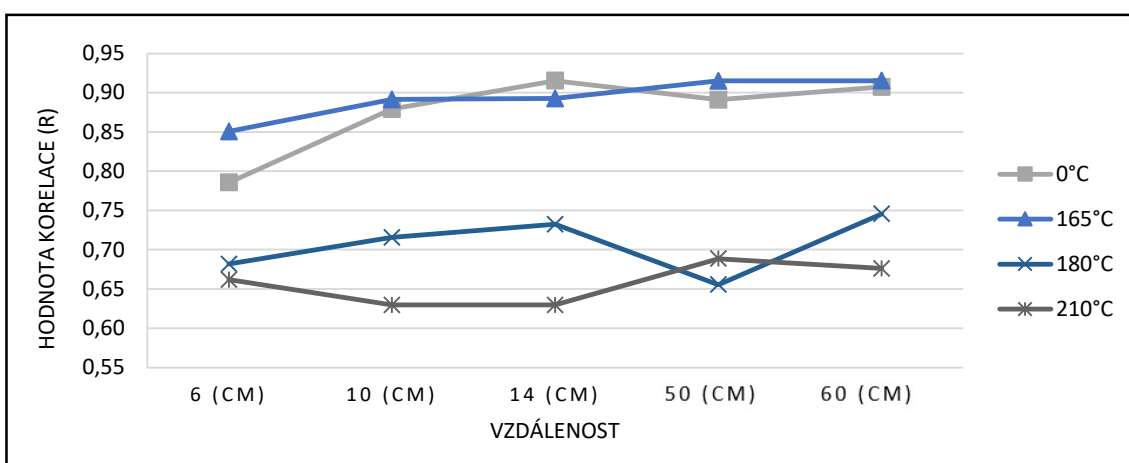
Tabulka 6-3 Vážený průměr Edyn,w (MPa) dif.

<b>úprava (°C)*smer Ra/Ta; Vážené průměry</b>							
<b>Současný efekt: F(2, 162)=3,2737, p=,04039</b>							
<b>Dekompozice efektivní hypotézy</b>							
	úprava (°C)	smer Ra/Ta	Edyn,w (MPa) dif	Edyn,w (MPa) dif	Edyn,w (MPa) dif	Edyn,w (MPa) dif	N
			Průměr	Sm.Ch.	-95,00%	95,00%	
<b>1</b>	165°C	ta	<b>606,24</b>	145,10	308,52	903,95	28
<b>2</b>	165°C	ra	<b>424,84</b>	171,66	72,61	777,06	28
<b>3</b>	180°C	ta	<b>-148,75</b>	355,31	-877,78	580,29	28
<b>4</b>	180°C	ra	<b>-360,20</b>	335,24	-1048,05	327,65	28
<b>5</b>	210°C	ta	<b>-1986,01</b>	248,95	-2496,81	-1475,21	28
<b>6</b>	210°C	ra	<b>-3340,59</b>	242,52	-3838,21	-2842,97	28

**Záporné hodnoty v tabulce znamenají pokles modulu**

Dále byla stanovena korelace dynamického a statického modulu pružnosti v různých vzdálenostech měření dynamického modulu ultrazvukovou metodou.

Data byla vyhodnocena v programu STATISTIKA pomocí korelační matice, která udává vzájemný vztah mezi dvěma veličinami. Pokud se jedna z nich změní, změní se korelativně i druhá, a naopak. Pokud se mezi dvěma veličinami ukáže korelace, je pravděpodobné, že vzájemně na sobě závisí. V našem případě se jedná o vzájemný vztah mezi modulem pružnosti získaném nedestruktivní metodou a modulem pružnosti získaném statickou zkouškou na trhacím stroji TIRA 50 kN.



Graf. 6-2 Vztah mezi vzdáleností měření na korelaci dynamického modulu se statickým modulem.

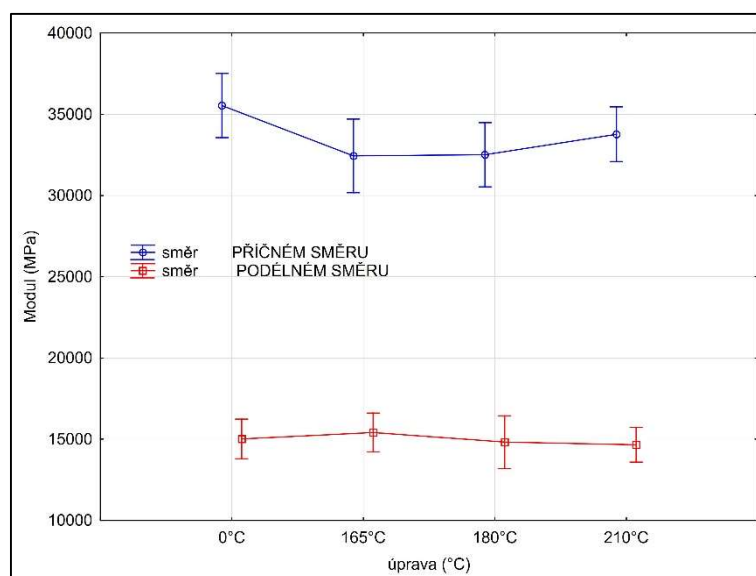
Určování modulu pružnosti ultrazvukem (Fakopp) je nedestruktivní zkouška a hodnota dynamického modulu je v průměru o 66 % nadhodnocená oproti  $E_{stat}$ . Z grafu (6-2) vyplývá, že nejlepší vzdálenost pro měření  $E_{dyn}$  pro neupravené smrkové dřevo je vzdálenost čidel 14 cm od sebe. Z výsledku je patrné, že při vzrůstající teplotě úpravy dřeva se korelace rapidně snižuje a naměřená data méně odpovídají skutečnosti. V poměru lze tvrdit, že vzdálenost 60 cm je neoptimálnější a naměřené hodnoty nejvíce korelují se statickým modulem, naopak vzdálenost 6 cm je nejméně vhodná, a to jak u tepelně upraveného dřeva, tak i u referenčních vzorků. Tato nepřesnost je pravděpodobně způsobena různými typy šíření ultrazvukové vlny (frekvence je větší než 20 kHz). Zvuk se může šířit v podobě podélné vlny, příčné vlny, povrchové vlny a v tenkých materiálech formou deskové vlny. Při malé vzájemné vzdálenosti čidel může povrchové šíření vlny ovlivnit to podélné, a zkreslit tak výsledný čas průchodu vlny materiálem. Při vzrůstající vzdálenosti se povrchové šíření ztrácí, s čímž se snižuje chyba měření.

Tabulka 6-4 Hodnoty korelace dynamického a statického modulu

Hodnoty korelace (r)					
	6 (cm)	10 (cm)	14 (cm)	50 (cm)	61,5 (cm)
<b>skupina</b>	0,738	0,749	0,775	0,768	0,785
<b>0°C</b>	0,786	0,879	0,915	0,891	0,907
<b>165°C</b>	0,851	0,892	0,893	0,915	0,915
<b>180°C</b>	0,682	0,716	0,732	0,656	0,746
<b>210°C</b>	0,662	0,630	0,630	0,689	0,676

Vyhodnocení určování dynamického modulu pružnosti pomocí rezonanční metody.

Touto metodou byl určován modul pružnosti v podélném a příčném směru, přičemž u obou měření se prokázalo, že tato metoda není vhodná pro sledování změn v termo-dřevu, protože rezonanční metodou není možné rozeznat jednotlivé tepelné úpravy od sebe, výsledky vycházejí velmi podobné, přičemž reálně mezi nimi je rozdíl. Při vyhodnocení pomocí více-faktorové ANOVY se nepodařilo prokázat na hladině významnosti 0,05 statisticky významné rozdíly mezi úpravami. Toto tvrzení podporuje i skutečnost, že šíření vibrační vlny nejvíce ovlivňuje hustota materiálu a jeho homogenita. Při použití Duncanova testu na jednotlivé hustoty dřeva v rámci teplotních úprav se potvrdilo, že mezi jednotlivými úpravami není statisticky významný rozdíl.



Graf. 6-3 Vyhodnocení určování dynamického modulu pružnosti pomocí rezonanční metody v příčném a podélném směru

Tabulka 6-5 Duncanův test; proměnná Hustota (Kg/m<sup>3</sup>)

<b>Chyba: meziskup. PČ = 4884,1, sv = 108,00</b>				
<b>úprava (°C)</b>	0°C	165°C	180°C	210°C
<b>Průměr</b>	<b>466,53</b>	<b>454,79</b>	<b>427,86</b>	<b>446,89</b>
<b>0°C</b>		0,531	0,060	0,326
<b>165°C</b>	0,531		0,177	0,673
<b>180°C</b>	0,060	0,177		0,311
<b>210°C</b>	0,326	0,673	0,311	

Při vyhodnocení jednotlivých modulů pružnosti naměřených rezonanční metodou pomocí Duncanova testu se prokázal významný rozdíl v příčném směru měření, a to mezi referenčními vzorky a teplotní úpravou 165 °C a 180 °C. V jiném případě se rozdíl neprokázal. Tento výsledek je zapříčiněn větší citlivostí Duncanova testu vůči odchylkám. Avšak rozdíl je tak malý, že je pro praxi nevýznamný. Při praktickém měření touto metodou může dojít k chybám měření, které jsou větší než tento rozdíl, tudíž nebude možné tuto změnu přiřadit k sledovanému faktoru.

Tabulka 6-6 Duncanův test na zjištění statisticky významných rozdílů mezi příčným a podélným směrem.

<b>směr</b>	<b>úprava (°C)</b>	Příčný	Příčný	Příčný	Příčný	Podélný	Podélný	Podélný	Podélný
		0°C	165°C	180°C	210°C	0°C	165°C	180°C	210°C
<b>Průměr</b>		<b>35537</b>	<b>32440</b>	<b>32510</b>	<b>33771</b>	<b>15016</b>	<b>15414</b>	<b>14820</b>	<b>14663</b>
<b>Příčný</b>	0°C		<b>0,012</b>	<b>0,012</b>	0,126	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
<b>Příčný</b>	165°C	<b>0,012</b>		0,952	0,280	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
<b>Příčný</b>	180°C	<b>0,012</b>	0,952		0,274	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
<b>Příčný</b>	210°C	0,126	0,280	0,274		<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
<b>Podélný</b>	0°C	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>		0,730	0,865	0,776
<b>Podélný</b>	165°C	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,730		0,632	0,561
<b>Podélný</b>	180°C	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,865	0,632		0,892
<b>Podélný</b>	210°C	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,776	0,561	0,892	

## 6.2 Výsledky dlouhodobých pokusů s konstantním prostředím

V této kapitole budou představeny výsledky popisující jednotlivé fyzikální a mechanické vlastnosti, reologické parametry smrkového dřeva a některých tepelných úprav. V první části budou představeny změny některých veličin z hlediska termické úpravy a následně popsány jednotlivé podíly deformací vzniklé za měřené období 760 hodin. Tento časový interval odpovídá 31 dnům, a byl stanoven tak, aby se v rámci 5 creepových jednotek daly stihnout odměřit jednotlivé série. Na základě těchto výsledků byly stanoveny teplotní stupně pro další pokus ve vnějších podmínkách.

Tabulka 6-7 Základní popisná statistika hustoty neupraveného dřeva a termicky modifikovaného dřeva uvedená veličina je v kg/m<sup>3</sup>.

Stupeň úpravy	ref.	150°C	160°C	170°C	180°C	190°C
Počet vzorků	5	5	5	5	5	5
Průměr	<b>527,3</b>	<b>501,0</b>	<b>522,8</b>	<b>523,8</b>	<b>529,6</b>	<b>499,3</b>
Medián	511,2	504,6	526,3	508,6	553,9	492,7
Minimum	501,9	426,9	478,0	497,4	438,1	469,9
Maximum	599,8	567,9	565,9	571,6	571,1	530,2
Směrodatná odchylka	36,7	44,7	28,6	28,9	49,5	22,1
Variační koeficient v (%)	7,0	8,9	5,5	5,5	9,3	4,4

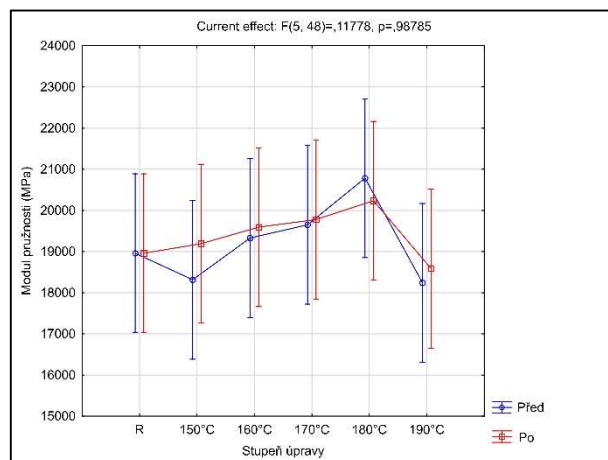
Tabulka 6-8 Základní popisná statistika dynamického modulu pružnosti měřený přístrojem FAKOP, uvedená veličina je v MPa.

Stupeň úpravy	ref.	150°C	160°C	170°C	180°C	190°C
Počet vzorků	5	5	5	5	5	5
Průměr	<b>18960</b>	<b>19192</b>	<b>19593</b>	<b>19778</b>	<b>20235</b>	<b>18584</b>
Medián	18541	19979	19122	19895	22027	18361
Minimum	17738	15500	18313	17982	15483	16167
Maximum	21718	21538	22336	21072	23197	20836
Směrodatná odchylka	1437,0	2087,6	1419,4	1160,1	2908,0	1892,8
Variační koeficient v (%)	7,6	10,9	7,2	5,9	14,4	10,2

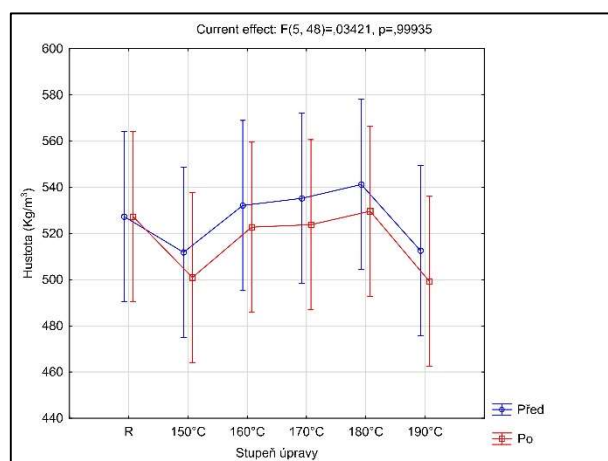
Tabulky 6-7 a 6-8 popisují změnu hustoty a dynamického modulu měřeného po úpravě. Na hustotě není patrný žádný velký pokles vůči neupravenému dřevu, až na teplotu úpravy 190 °C. U dynamického modulu pružnosti je patrný trend odpovídající literární rešerši (Borůvka a kol. 2018), a to ten, že modul pružnosti roste až do teploty 180 °C, kde se trend láme, a teplota 190 °C již vykazuje výrazný pokles. Tyto veličiny



byly měřeny i před samotnou úpravou, a na následujících grafech je znázorněný rozdíl v hodnotách, přímo způsobený tepelnou úpravou.



Graf. 6-5 Změna dynamického modulu pružnosti v závislosti na stupni termické úpravy.



Graf. 6-4 Změna hustoty jednotlivých těles, vzhledem ke stupni termické úpravy.

Z grafu 6-5 je patrný vliv úpravy na dynamický modul pružnosti, který roste do teploty úpravy 170 °C a poté buď klesá, nebo je jeho rozdíl nepatrný. Velikost jednotlivé změny je přímo úměrná ke vstupnímu materiálu a míře chemických reakcí způsobených při termické úpravě. Množství těchto reakcí se nedá předem přesně určit. Avšak trendově odpovídá tomu, co uvádí literatura.

Níže (v tab. 6-9 až 6-15) je přehled reologických parametrů uspořádaných v jednotlivých tabulkách se základní statistikou, a s počtem měření 5-ti kusů pro jednotlivé série. Z hlediska nízkého počtu vzorků některé parametry mají vysoký variační koeficient.

Tabulka 6-9 Základní popisná statistika elastického modulu pružnosti u jednotlivých sérií. Uvedená veličina je  $E_{el}$  MPa.

Stupeň úpravy	ref.	150°C	160°C	170°C	180°C	190°C
Počet vzorků	5	5	5	5	5	5
Průměr	2,80E+05	2,41E+05	2,02E+05	3,21E+05	4,01E+05	4,10E+05
Medián	2,79E+05	2,49E+05	2,26E+05	2,96E+05	4,18E+05	3,50E+05
Minimum	2,44E+05	1,85E+05	8,85E+04	2,43E+05	3,04E+05	2,98E+05
Maximum	3,21E+05	2,70E+05	3,01E+05	4,05E+05	5,08E+05	6,41E+05
Směrodatná odchylka	2,58E+04	2,92E+04	7,14E+04	6,86E+04	7,53E+04	1,25E+05
Variační koeficient v (%)	9,2	12,1	35,3	21,4	18,8	30,4

Tabulka 6-10 Základní popisná statistika viskoelastického modulu pružnosti u jednotlivých sérií.

Uvedená veličina je  $E_{vel}$  MPa

Stupeň úpravy	ref.	150°C	160°C	170°C	180°C	190°C
Počet vzorků	5	5	5	5	5	5
Průměr	2,80E+0 5	2,41E+0 5	2,02E+0 5	1,71E+0 4	1,65E+0 4	1,63E+0 4
Medián	2,79E+0 5	2,49E+0 5	2,26E+0 5	1,66E+0 4	1,57E+0 4	1,44E+0 4
Minimum	2,44E+0 5	1,85E+0 5	8,85E+0 4	1,31E+0 4	1,41E+0 4	1,38E+0 4
Maximum	3,21E+0 5	2,70E+0 5	3,01E+0 5	2,15E+0 4	1,94E+0 4	1,96E+0 4
Směrodatná odchylka	2,58E+0 4	2,92E+0 4	7,14E+0 4	2,69E+0 3	1,85E+0 3	2,69E+0 3
Variační koeficient v (%)	9,2	12,1	35,3	15,7	11,2	16,5

Tabulka 6-11 Základní popisná statistika relaxačního času u jednotlivých sérií. Uvedená veličina je  $\tau$  v hodinách.

Stupeň úpravy	ref.	150°C	160°C	170°C	180°C	190°C
Počet vzorků	5	5	5	5	5	5
Průměr	9,3	17,4	10,6	19,5	5,2	8,6
Medián	10,3	12,0	8,1	17,9	4,5	5,6
Minimum	3,9	8,1	7,0	15,9	4,4	5,1
Maximum	14,0	39,2	16,9	27,3	7,5	16,9
Směrodatná odchylka	3,4	11,4	3,9	4,1	1,2	4,5
Variační koeficient v (%)	37,0	65,5	36,6	21,0	22,6	52,5

Tabulka 6-12 Základní popisná statistika faktoru tečení u jednotlivých sérií. Uvedená veličina je  $K(t)$

Stupeň úpravy	ref.	150°C	160°C	170°C	180°C	190°C
Počet vzorků	5	5	5	5	5	5
Průměr	<b>1,17</b>	<b>1,16</b>	<b>1,21</b>	<b>1,13</b>	<b>1,12</b>	<b>1,12</b>
Medián	1,16	1,16	1,18	1,13	1,12	1,13
Minimum	1,16	1,13	1,10	1,10	1,08	1,09
Maximum	1,19	1,19	1,39	1,14	1,15	1,15
Směrodatná odchylka	0,01	0,02	0,10	0,01	0,02	0,02
Variační koeficient v (%)	1,19	1,71	8,24	1,30	2,00	1,99

Tabulka 6-13 Základní popisná statistika elastické deformace  $\varepsilon_{el}$ .

Stupeň úpravy	ref.	150°C	160°C	170°C	180°C	190°C
Počet vzorků	5	5	5	5	5	5
Průměr	<b>1,37E-03</b>	<b>1,52E-03</b>	<b>1,32E-03</b>	<b>1,23E-03</b>	<b>1,56E-03</b>	<b>1,50E-03</b>
Medián	1,41E-03	1,47E-03	1,38E-03	1,21E-03	1,60E-03	1,31E-03
Minimum	1,29E-03	1,22E-03	1,10E-03	9,98E-04	1,27E-03	1,12E-03
Maximum	1,43E-03	1,78E-03	1,59E-03	1,46E-03	1,75E-03	2,12E-03
Směrodatná odchylka	5,36E-05	1,93E-04	1,85E-04	1,52E-04	1,60E-04	3,92E-04
Variační koeficient v (%)	3,9	12,8	14,1	12,3	10,3	26,2

Tabulka 6-14 Základní popisná statistika viskoelastické deformace  $\varepsilon_{vel}$ .

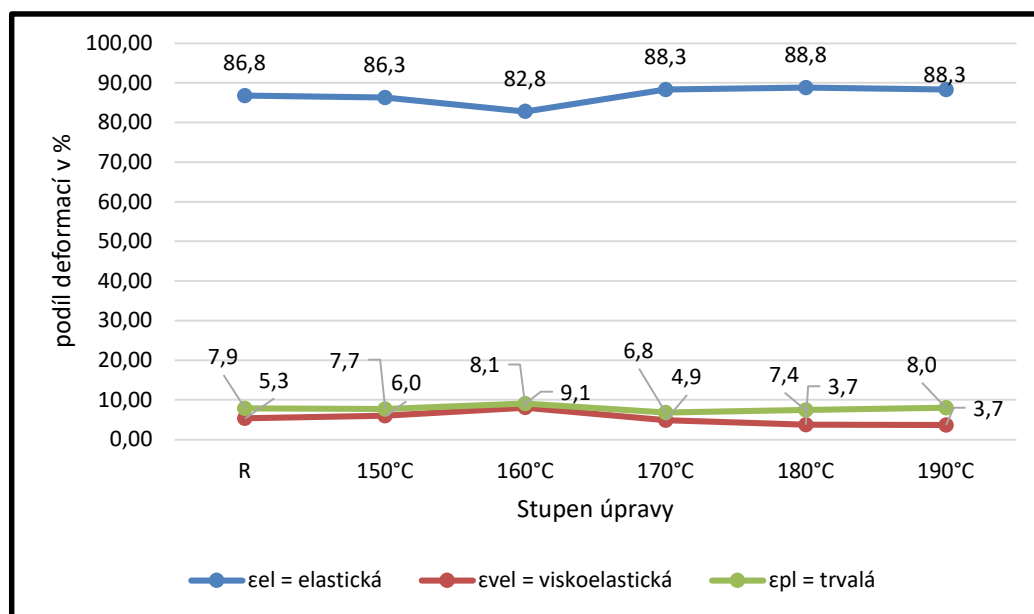
Stupeň úpravy	ref.	150°C	160°C	170°C	180°C	190°C
Počet vzorků	5	5	5	5	5	5
Průměr	<b>8,44E-05</b>	<b>1,06E-04</b>	<b>1,29E-04</b>	<b>6,87E-05</b>	<b>6,63E-05</b>	<b>6,25E-05</b>
Medián	8,44E-05	1,01E-04	9,99E-05	7,62E-05	5,98E-05	5,79E-05
Minimum	7,71E-05	8,26E-05	3,43E-05	4,44E-05	4,83E-05	3,43E-05
Maximum	9,15E-05	1,31E-04	2,97E-04	9,54E-05	9,40E-05	9,85E-05
Směrodatná odchylka	5,87E-06	1,91E-05	8,87E-05	1,93E-05	1,63E-05	2,07E-05
Variační koeficient v (%)	7,0	18,1	68,5	28,0	24,6	33,2

Tabulka 6-15 základní popisná statistika plastické deformace  $\varepsilon_{pl}$ .

Stupeň úpravy	ref.	150°C	160°C	170°C	180°C	190°C
Počet vzorků	5	5	5	5	5	5
Průměr	<b>1,25E-04</b>	<b>1,38E-04</b>	<b>1,51E-04</b>	<b>9,36E-05</b>	<b>1,32E-04</b>	<b>1,35E-04</b>
Medián	1,21E-04	1,35E-04	1,48E-04	1,00E-04	1,19E-04	1,18E-04
Minimum	1,21E-04	8,05E-05	9,10E-05	7,65E-05	9,61E-05	9,10E-05
Maximum	1,35E-04	1,78E-04	2,37E-04	1,07E-04	1,81E-04	2,16E-04
Směrodatná odchylka	5,55E-06	3,59E-05	4,81E-05	1,20E-05	3,35E-05	4,28E-05
Variační koeficient v (%)	4,5	26,0	31,8	12,8	25,3	31,7

Tabulka 6-16 Procentuální vyjádření procentuálního podílu jednotlivých deformací u jednotlivých sérií.

Stupeň úpravy	ref.	150°C	160°C	170°C	180°C	190°C
$\epsilon_{el} =$ elastická	86,8	86,3	<b>82,8</b>	88,3	88,8	88,3
$\epsilon_{vel} =$ viskoelastická	5,3	6,0	<b>8,1</b>	4,9	3,7	3,7
$\epsilon_{pl} =$ trvalá	7,9	7,7	<b>9,1</b>	6,8	7,4	8,0



Graf. 6-6 Podíl deformací u neupraveného dřeva a u jednotlivých stupňů úpravy v %.

Jednotlivé podíly deformací (tab. 6-16) byly vypočítány z velikostí jednotlivých deformací získaných z neupraveného Burgerova modelu. Na grafu 6-6 je graficky znázorněn měnící se podíl jednotlivých deformací v závislosti na tepelné úpravě. Je zde patrné, že teplota úpravy 160 °C má nejnižší podíl elastické deformace, naopak má největší podíl viskoelastické a trvalé deformace. Dále je patrný nejnižší procentuální rozdíl mezi viskoelastickou a trvalou deformací, který činí 1 % oproti jiným stupňům úpravy. Dá se tedy tvrdit, že při vzrůstající teplotě úpravy se podíl viskoelastické deformace zmenšuje ve prospěch elastické deformace. Též lze konstatovat, že materiál s vyšší tepelnou úpravou než 160 °C ztrácí schopnost být pružný v čase, oproti neupravenému smrkovému dřevu. Toto tvrzení potvrzuje i klesající trend faktoru tečení, viz tabulka 6-12, která nám zároveň říká, že nejvyšší faktor tečení má úprava na 160 °C.

### 6.3 Výsledky dlouhodobých pokusů s nekonstantními podmínkami

Tento pokus probíhal ve vnější expozici za měnících se vnějších podmínek. Časový interval měření změny průhybu byl 31951 hodin. Naměřená data změny průhybu spolu se změnou vlhkosti byla vyhodnocena pomocí upraveného Burgerova modelu (UBM) a klasického Burgerova modelu dále jen (BM). Jednotlivé výsledky byly následně porovnány pomocí procentuálního vyjádření jednotlivých podílů deformací, porovnány byly též jednotlivé modely a jejich rozdíly viz tabulka 6-17 až 6-21. Dále byly sledovány parametry, jako je relaxační čas a čas na ustálení rovnovážné vlhkosti v tělese. Posledním sledovaným faktorem byl čas, kdy model začne vykazovat pokles průhybu při zvýšení vlhkosti, tedy čas, kdy deformace způsobená mechanickým zatížením je menší než změna průhybu způsobená v důsledku změny vlhkosti. Je známo, že největší tečení je bezprostředně po zatížení a postupem času se zmenšuje.

Tabulka 6-17 Procentuální vyjádření podílu deformací vyhodnocený Burgerovým modelem a upraveným Burgerovým modelem u referenčního smrkového dřeva.

	BM				UBM			
	1	2	3	Průměr	1	2	3	Průměr
$\epsilon_{el} / \epsilon_{cel} (\%)$	55,0	51,4	51,2	<b>52,6</b>	54,1	50,6	50,8	<b>51,9</b>
$\epsilon_{vel} / \epsilon_{cel} (\%)$	28,8	26,4	27,1	<b>27,5</b>	26,5	25,0	25,2	<b>25,6</b>
$\epsilon_{pl} / \epsilon_{cel} (\%)$	16,1	22,2	21,6	<b>20,0</b>	19,4	24,3	24,0	<b>22,6</b>
<b>T (hod.)</b>	2407	1080	1938	<b>1808</b>	-	-	-	-
<b>T<sub>m</sub> (hod.)</b>	-	-	-	-	674	817	734	<b>742</b>
<b>T<sub>w</sub> (hod.)</b>	-	-	-	-	2001	942	1568	<b>1504</b>

Tabulka 6-18 Procentuální vyjádření podílu deformací vyhodnocený Burgerovým modelem a upraveným Burgerovým modelem u tepelné úpravy 160°C.

	BM				UBM			
	4	5	6	Průměr	4	5	6	Průměr
$\epsilon_{el} / \epsilon_{cel} (\%)$	50,4	62,4	54,7	<b>55,8</b>	54,1	50,6	53,5	<b>52,8</b>
$\epsilon_{vel} / \epsilon_{cel} (\%)$	28,4	21,8	23,5	<b>24,6</b>	26,5	25,0	22,1	<b>24,5</b>
$\epsilon_{pl} / \epsilon_{cel} (\%)$	21,2	15,7	21,8	<b>19,6</b>	19,4	24,3	24,4	<b>22,7</b>
<b>T (hod.)</b>	530,9	166,5	293,9	<b>330</b>	-	-	-	-
<b>T<sub>m</sub> (hod.)</b>	-	-	-	-	463,2	160,9	258	<b>294</b>
<b>T<sub>w</sub> (hod.)</b>	-	-	-	-	3334,3	869,5	3130	<b>2445</b>

Tabulka 6-19 Procentuální vyjádření podílu deformací vyhodnocený Burgerovým modelem a upraveným Burgerovým modelem u tepelné úpravy 180°C.

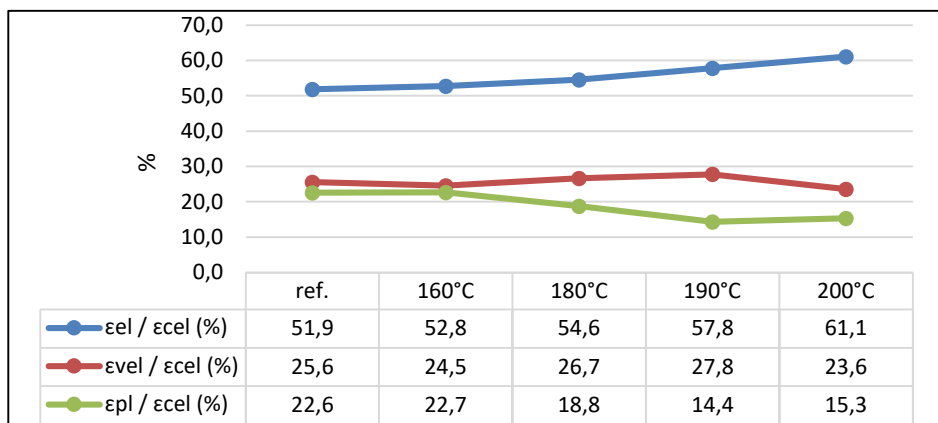
	BM				UBM			
	7	8	9	Průměr	7	8	9	Průměr
$\epsilon_{el} / \epsilon_{cel} (\%)$	59,3	57,6	49,5	<b>55,5</b>	58,1	56,9	48,7	<b>54,6</b>
$\epsilon_{vel} / \epsilon_{cel} (\%)$	26,7	26,0	30,8	<b>27,9</b>	25,4	25,1	29,5	<b>26,7</b>
$\epsilon_{pl} / \epsilon_{cel} (\%)$	14,0	16,4	19,7	<b>16,7</b>	16,4	18,0	21,9	<b>18,8</b>
<b>T (hod.)</b>	270,7	347,7	315,9	<b>311</b>	-	-	-	-
<b>Tm (hod.)</b>	-	-	-	-	249,4	327,2	293,2	<b>290</b>
<b>Tw (hod.)</b>	-	-	-	-	2816,5	2165,3	2580,2	<b>2521</b>

Tabulka 6-20 Procentuální vyjádření podílu deformací vyhodnocený Burgerovým modelem a upraveným Burgerovým modelem u tepelné úpravy 190°C.

	BM				UBM			
	10	11	12	Průměr	10	11	12	Průměr
$\epsilon_{el} / \epsilon_{cel} (\%)$	57,8	64,8	52,6	<b>58,4</b>	57,5	64,3	51,8	<b>57,8</b>
$\epsilon_{vel} / \epsilon_{cel} (\%)$	29,5	23,2	32,8	<b>28,5</b>	29,1	22,7	31,6	<b>27,8</b>
$\epsilon_{pl} / \epsilon_{cel} (\%)$	12,7	12,0	14,6	<b>13,1</b>	13,4	13,1	16,6	<b>14,4</b>
<b>T (hod.)</b>	47,2	360	592,4	<b>333</b>	-	-	-	-
<b>Tm (hod.)</b>	-	-	-	-	463,3	344,7	557,6	<b>455</b>
<b>Tw (hod.)</b>	-	-	-	-	941,4	1124,9	2344,4	<b>1470</b>

Tabulka 6-21 Procentuální vyjádření podílu deformací vyhodnocený Burgerovým modelem a upraveným Burgerovým modelem u tepelné úpravy 200°C.

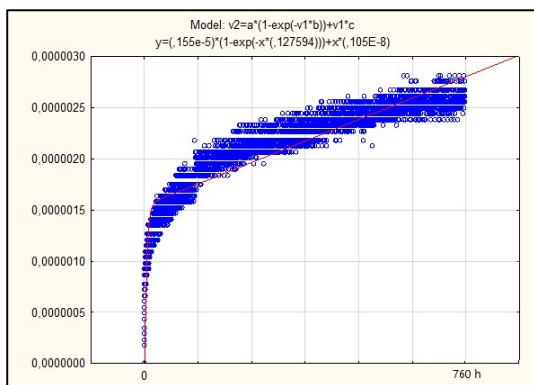
	BM				UBM			
	13	14	15	Průměr	13	14	15	Průměr
$\epsilon_{el} / \epsilon_{cel} (\%)$	59,5	65,9	59,8	<b>61,7</b>	58,7	65,3	59,3	<b>61,1</b>
$\epsilon_{vel} / \epsilon_{cel} (\%)$	26,2	20,7	26,2	<b>24,3</b>	25,3	20,0	25,5	<b>23,6</b>
$\epsilon_{pl} / \epsilon_{cel} (\%)$	14,3	13,4	14,1	<b>13,9</b>	16,0	14,7	15,2	<b>15,3</b>
<b>T (hod.)</b>	468,5	410,2	556,7	<b>478</b>	-	-	-	-
<b>Tm (hod.)</b>	-	-	-	-	2001	386,1	1107,3	<b>1165</b>
<b>Tw (hod.)</b>	-	-	-	-	674	1910,5	1347	<b>1311</b>



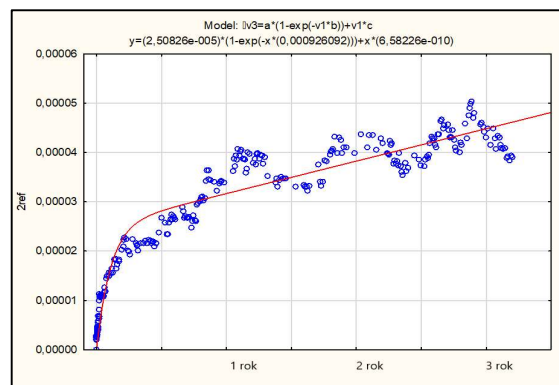
Graf. 6-7 Grafické znázornění podílu deformací zjištěných pomocí UBM

Na grafu 6-7 je znázorněn poměr jednotlivých deformací. Je patrné, že elastická deformace výrazně roste vzhledem ke stupni úpravy na úkor trvalé deformace. Trendově tento podíl deformací odpovídá pokusům s kratší dobou zatížení a s konstantními podmínkami, viz graf 6-6. I zde u teplotní úpravy 160 °C je nejmenší rozdíl mezi viskoelastickou a trvalou deformací, je tedy patrné, že tento jev je způsoben tepelnou úpravou a doba zatížení nemá žádný vliv.

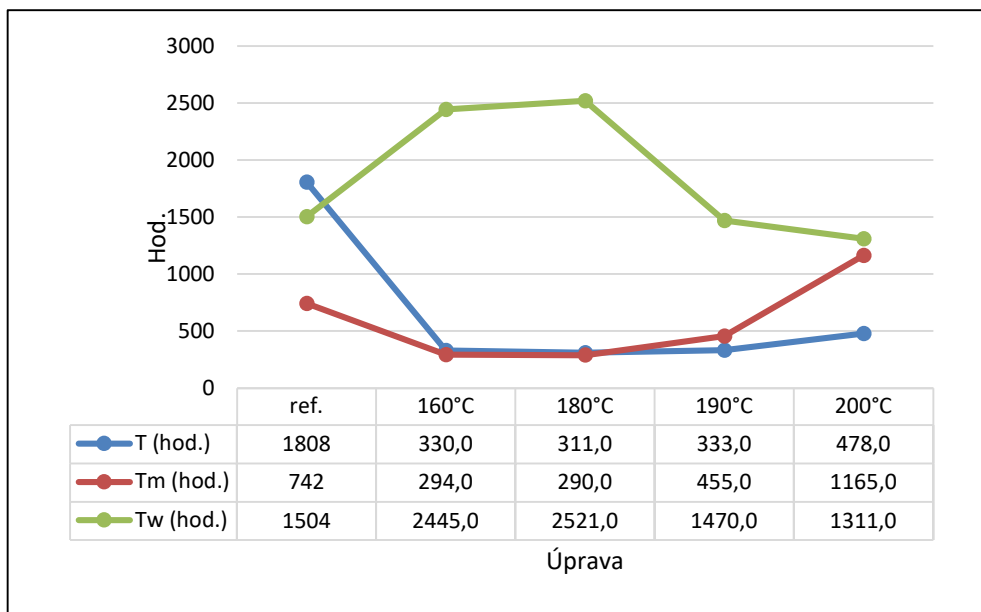
Dále je patrný z tabulek 6-17 až 6-21 rozdíl v podílech deformací vyhodnocených Burgerůvým modelem (BM), jenž ve všech sériích mírně nadhodnocuje elastickou deformaci na úkor trvalé deformace, která je vždy podhodnocena vzhledem k výsledkům z upraveného Burgerova modelu UBM. Tento rozdíl je patrný, avšak ale velmi malý, v řádech 3 %. Je tedy patrné na grafu 6-9 a 6-8, že tento model není schopen uvažovat s vlhkostní změnou, ale při použití dat s větším počtem ročních cyklů je schopný proložit tato data bez ohledu na vlhkostní změnu tak, že i při neuvažování vlivu vlhkosti dokáže celkem přesně odhadnout jednotlivé parametry.



Graf. 6-9 Vyhodnocení dat s konstantními vnějšími podmínkami 760 hodin BM.



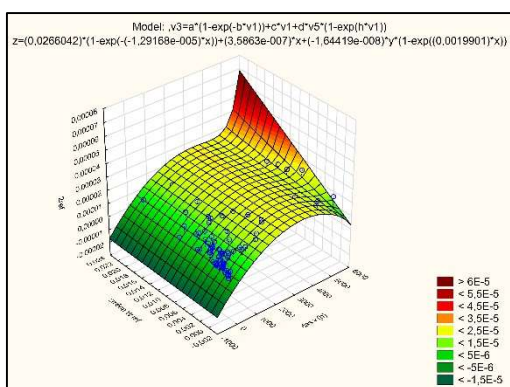
Graf. 6-8 Vyhodnocení dat s nekonstantními vnějšími podmínkami 31951 hodin BM.



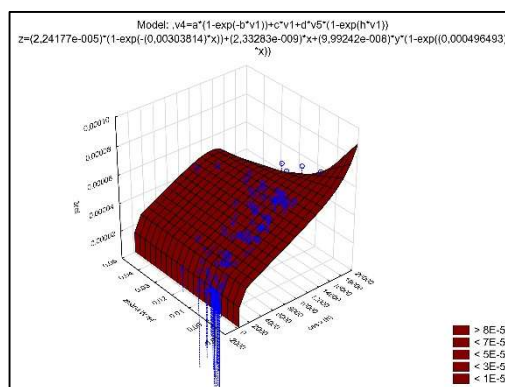
Graf. 6-10 Graficky znázorněné relaxační časy získané z BM a UBM

Upravený Burgerův model graf 6-11 je na toto vyhodnocení mnohem vhodnější, je totiž schopen oddělit deformaci způsobenou vlhkostní změnou, která by měla být v celém objemu viskoelastická, tedy i vratná v čase v celém objemu.

Z grafu 6-7 je patrné že BM není schopen správně odhadnout relaxační čas, oproti UBM, kde  $T_m$  postupně roste, což přímo odpovídá trendu elastické deformace. Naopak  $T_w$ , který nám říká relativní čas ustálení vlhkostní změny, neboli rovnovážný stav, vlivem termické úpravy klesá, což jen potvrzuje fyzikální vlastnosti termického dřeva.



Graf. 6-11 UBM model tvrdí, že deformace roste spolu s vlhkostí.



Graf. 6-12 UBM model tvrdí, že deformace klesá, pokud roste vlhkost.



Dále byl sledován zlom v UBM, který značí čas potřebný k tomu, aby mechanicky způsobená deformace byla menší než deformace způsobená vlhkostní změnou. Tento časový údaj byl zjišťován graficky z modelu při vyhodnocování viz graf 6-11 a 6-12.

Při postupném vyhodnocování jednotlivých zaznamenaných měření a sledování toho, kdy model tvrdí, že při zvětšení vlhkosti deformace roste a kdy začne tvrdit, že při vzrůstající vlhkosti deformace klesá. Je to tedy časový bod, kdy deformace způsobená mechanicky je menší, než změna způsobená změnou vlhkosti.

Sledovaný zlom je velmi pozvolný a pozvolně se i překlápí, tudíž byl sledován bod začátku, kdy model zřetelně tvrdí, že při vzrůstající vlhkosti roste deformace, viz graf 6-10 a bod, kdy zřetelně tvrdí, že při vzrůstající vlhkosti deformace klesá. Velikost časového období mezi těmito dvěma body je určitou charakteristikou vlastností daného materiálu. Je zde třeba uvažovat se značnou tolerancí vůči časovému intervalu mezi jednotlivými měřeními, který je čtyři dny.

Tabulka 6-22 Přehled ustálení mechanické deformace v čase.

úprava	Začátek Zlomu (hod.)	Konec Zlomu (hod.)	Období mezi	
			hod.	dni
ref.	10016	11760	1744	72,7
160°C	1393	1563	170	7,1
180°C	1107	1393	286	11,9
190°C	963	1204	241	10,0
200°C	963	1204	241	10,0

Z tabulky 6-22 je patrný rozdíl ustálení mechanické deformace u neupraveného smrkového dřeva, kterému toto ustálení trvalo téměř 417 dní, a obdobím mezi tím, než se model překlápí, které trvalo 72 dní. Oproti tomu termodřevo vykazuje ustálení mechanické deformace v rozmezí 40 až 58 dnů od zatížení.

Z hlediska interpretace celkových výsledků není podstatná faktická hodnota, ale spíše poměr a trend mezi nimi. Pro celkové pochopení rozdílů v chování neupraveného dřeva a termodřeva je nutné pochopit jednotlivé poměry deformací a rozdíly mezi jednotlivými tepelnými úpravami a zda je mezi nimi zásadní rozdíl či nikoliv. Na základě těchto rozdílů se dá stanovit trend, který nám obecně popisuje změnu ve vlastnostech daného materiálu.

## 7 Diskuze

V této kapitole bude podrobně vysvětlen celkový přínos dané práce pro budoucí výzkum a pro praxi. Bude zde vysvětlen význam reologické studie dřeva, potažmo termodřeva. V této práci se uvažuje s celkovým zatížením pro dlouhodobé pokusy 25 % z celkové pevnosti. Tato hodnota byla stanovena na základě zjištěných skutečností vyplývajících z diplomové práce Ing. Terezy Berkové, která v rámci své práce řešila reologické parametry některých tepelných úprav (při zatížení 40 % z krátkodobé pevnosti, po dobu zhruba 600 hodin). Bylo zjištěno, že při vyšších teplotních stupních dochází k předčasné destrukci vzorků. Při malém množství creepových jednotek jsme si nemohli dovolit počet ještě snižovat z hlediska předčasného ukončení pokusů. Druhým důvodem, proč zvolit 25 % zatížení, byla hranice při navrhování dřevěných konstrukcí, kdy se standardně dimenzují jednotlivé prvky tak, aby vyhovovaly zatížení na úrovni cca 20 až 25 %.

Tímto se dostáváme k dalšímu podstatnému praktickému využití. Dnes se s reologií v konstrukcích počítá jen okrajově a víceméně spadá do opravného neboli bezpečnostního koeficientu, jímž je každý prvek vynásoben pro bezpečnost a dlouhodobou stabilitu. Při zahrnutí reologických poznatků o používaných materiálech přímo do výpočtu by bylo možné dimenze jednotlivých prvků zmenšit při zachování stejné míry bezpečnosti a stability.

Porovnání získaných výsledků s odbornou literaturou je v podstatě nemožné. Řešení reologických parametrů u termowoodu z hlediska dlouhodobých pokusů ve vnější expozici se v literatuře nevyskytuje. Dalším problémem je doba zatížení a procentuální zatížení z celkové pevnosti. Oba dva faktory výrazně ovlivňují jednotlivý podíl deformací, a pro porovnání by musely být totožné. Pro porovnání neupraveného dřeva lze použít například (Kollmann et al. 1968), ale výsledky jsou odlišné z důvodu odlišné doby trvání zatížení, v našem případě 760 a 31951 hodin. V neposlední řadě záleží na použitém modelu pro vyhodnocení jednotlivých parametrů. Proto pro porovnání je lepší používat poměr jednotlivých deformací, a ne faktickou hodnotu (Shao 2005). Existují obdobné výzkumy, například tečení smrkového dřeva při vysokých teplotách okolního prostředí v rozsahu 120 °C až 180 °C, při testech trvajících 3 dny a vyhodnoceny stejným Burgerovým modelem (Lagaña et al. 2008). Podobných prací, které řeší chování dřeva při vystavení vysokým teplotám je mnohem více, ale jsou spíše koncipovány jako míra

protipožární odolnosti z hlediska únikového času, ale z hlediska dlouhodobého zatížení v rámci několika let se této problematice nikdo nevěnuje.

Část této práce je věnovaná tepelné modifikaci a sledování jejího vlivu na materiál. Z hlediska tepelné modifikace pro nekonstrukční prvky, zejména palubky, je v odborné literatuře dostatek zdrojů, avšak pro naše účely jsme museli tento postup upravit tak, aby došlo k tepelné úpravě, ale s co nejmenším vlivem na mechanické vlastnosti. Jednotlivé fáze úpravy byly mnohem pozvolnější a šetrnější k upravovanému materiálu, zejména se jedná o poslední fázi tepelné úpravy, nazývanou kondicionování. Tato fáze hraje největší roli při zachování co možná nejlepších mechanických vlastností. Otázkou je, kam se dostaneme s náklady na takto upravený materiál, a zda je to v této době ekonomicky únosné pro širší využití.

Záměrem této práce bylo objasnit reologické vlastnosti termodřeva a zhodnotit, zda některé vlastnosti nemají širší využití. Dále by tato práce měla sloužit jako výchozí bod pro další výzkum, a z hlediska případného vylepšení postupu měření nebo modifikací jednotlivých modelů pomoci tak, aby věrohodněji popisovaly skutečnost.

Reologické parametry se využívají nejen v konstrukcích, ale častěji se využívají při technickém zpracování dřeva. Lze je využít při sušení dřeva (Moutee et al. 2005 a 2007). Dále se tímto problémem zabýval Honfí et al.(2014). Dalším podstatným využitím je výroba aglomerovaných materiálů, zejména v části navrhování vhodných lisovacích parametrů třískových a vláknitých desek. Dále lze tyto poznatky využít při lisování, ohýbání dřeva, nebo tvarování překližovaných desek. Všechny tyto zpracovatelské provozy se reologií zabývají a řeší částečný návrat do původního stavu po odtížení. Tento efekt je projevem elastické deformace a znalost velikosti této deformace umožňuje nastavení lisu tak, že po odtížení se materiál ustálí na požadovaném rozměru.

Závěry, které jsme schopni interpretovat z pokusů trvajících 760 hodin při konstantních vnějších podmínkách jsou následující:

Tepelná úprava při 160 °C se zdá nejvhodnější pro vnější konstrukce, má sice nejvyšší faktor tečení, tj. 1,21, ale podíl jednotlivých deformací je nejpříjemnější (82,8 % elastická, 8,1% viskoelastická, 9,1% plastická). Též je přijatelně vyvážený zejména malý rozdíl mezi viskoelastickou a trvalou deformací, přičemž tento efekt se potvrdil i při pokusech ve vnější expozici a s mnohem delší dobou zatížení viz graf 6-7.

To, že vyšší teplotní úpravy mají nižší podíl trvalé deformace, svědčí o tom, že takto upravený materiál není schopen převádět dlouhodobé napětí na trvalou deformaci, a znamenalo by to, že tento materiál je více plastický. Otázka je, zda při opravdu dlouhém zatížení v řádu desítek let nedojde k nepředvídatelné destrukci, způsobené stárnutím materiálu bez vnějšího zásahu.

Pokusy ve vnější expozici s dobou trvání 31951 hodin vykazují totožný trend, jako pokusy při konstantních podmínkách, jen s výraznějším rozdílem v jednotlivých podílech deformací. Zde byl sledován čas relativního ustálení deformace způsobené mechanickým zatížením, kde smrkové dřevo bez úpravy vykazovalo lomení přibližně v čase 10016 hodin, což je zhruba 14 měsíců od zatížení. Od tohoto bodu se začíná ustalovat, a v 11760 hodinách již vykazuje minimální vliv na deformaci. Od tohoto bodu je jakákoliv změna průhybu způsobena převážně vlhkostní změnou. Období ustálení tedy trvalo cca 72,7 dne. Oproti tomu u termo-dřeva je to závislé na stupni úpravy, viz tabulka 6-22, v době do dvou měsíců od zatížení. Tedy dá se tvrdit, že termodřevo ustálí svoji deformaci vzniklou mechanickým namáháním sedmkrát rychleji než dřevo bez úpravy. Tento fakt je vhodný zejména v konstrukcích, kde nebude docházet k pracování konstrukce tak dlouhou dobu, a při správné konstrukční ochraně v této konstrukci bude docházet jen k nepatrnému pohybu způsobenému změnou vlhkosti konstrukce. Pokud do toho zahrneme rychlost ustálení rovnovážného stavu vlhkosti v termodřevě s okolním prostředím, můžeme tuto změnu téměř zanedbat. Výsledkem je tedy materiál, který se rychle ustálí a poté v podstatě nemění tvar.

Tak jako uvádí Holzer et al. (1989), kde popisuje dlouhodobé předpovědi chování dřevěných struktur, je termodřevo v jistém ohledu alternativou pro rychlejší stabilizaci a menší rozměrové pnutí daných konstrukcí. Je tedy otázkou, zda termodřevo využívat pouze z hlediska fyzikálních vlastností tak, jak se děje doposud, nebo se snažit využít tento materiál i z hlediska jeho mechanických vlastností.

V našem případě tři vzorky splňovaly statistickou významnost. Na hladině významnosti dosáhly hodnoty 0,95 s přesností chyby 10 % parametru podílu deformací. Ostatní parametry, které vychází pouze z matematických a fyzikálních vztahů tuto hranici nesplňovaly. Lze je tedy brát v potaz pouze jako odlišné charakteristiky jednotlivých úprav v závislosti na paralelnosti jednotlivých skupin. Pokud uvážíme velikost

jednotlivých parametrů a jejich nominální rozestup od sebe z hlediska jednotlivých materiálů, tak můžeme tvrdit, že i s mírou chyby se nepřekrývají.

V návaznosti na tuto práci vyplívá několik poznatků pro budoucí výzkum. Prvním poznatkem je zopakovat některý z pokusů na více vzorcích pro větší věrohodnost, zejména faktických hodnot reologických parametrů. Na základě této práce doporučuji se podrobněji věnovat tepelné úpravě v rozmezí 160 °C až 170 °C.

Dalším aspektem je otázka způsobu tepelné modifikace materiálů, respektive zda by nebyl vhodnější způsob úpravy, například technologie výroby v olejové lázni (OHT-Wood), kde literatura uvádí vyšší zachování mechanických vlastností při stejné tepelné úpravě.

Z hlediska pozitivních vlastností termodřeva, jako je nižší rovnovážná vlhkost, nebo rozměrová stabilita, vyplívá otázka, jak se tento materiál chová při vystavení extrémním změnám vnějšího prostředí, respektive pokud se bude měnit skokově teplota v rozsahu 1 °C až 40°C a vlhkost prostředí v rozsahu 10% až 90% v krátkých cyklech odpovídající ustálení vlhkosti materiálu s vnějším prostředím a počtem cyklů například 50x. Vzhledem k této práci můžeme doporučit teplotní stupně úpravy 160 °C a 190°C. Předpokládané využití by spočívalo v kombinaci rostlého dřeva a termodřeva při výrobě lepených nosníků (zastřešení plaveckých bazénů). Obdobný problém řešil Sayed-Ahmed a Sennah (2013) kteří řešili Vliv teploty a relativní vlhkosti na deformaci v tečení u permanentních dřevěných základových panelů kde by termo dřevo mělo reálné opodstatnění.

## 8 Závěr

Hlavním cílem této práce bylo stanovit a popsat jednotlivé reologické parametry neupraveného a termicky upraveného dřeva. Vstupním materiálem pro dlouhodobé pokusy byl smrk ztepilý, který se termicky modifikoval v laboratorní termo komoře v areálu České zemědělské univerzity. Jednotlivé cykly úpravy byly navoleny tak, aby si materiál zachoval co nejlepší mechanické vlastnosti. Pro samotné měření byly vykonány krátkodobé zkoušky, ze kterých se vycházelo při stanovení zatěžovací síly pro dlouhodobé zatížení. Měření průhybu probíhalo na creepových jednotkách. Vstupními údaji pro samotné modelování byl průhyb, čas a změna vlhkosti.

Nedestruktivní zkoušky určování modulu pružnosti sloužily jako kontrola materiálu po termické úpravě a názorně nám ukazují, k jakým změnám dochází vlivem jednotlivých tepelných úprav. Nejlépe to ukazuje ultrazvuková metoda za použití přístroje Fakopp viz graf 6-5. Vibrační metoda zjišťování modulu pružnosti se ukázala méně efektivní vzhledem k paralelnosti jednotlivých těles, nebyla dostatečně citlivá na to, aby se projevil vliv tepelné modifikace.

Dlouhodobé zkoušky ve čtyřbodovém ohybu s konstantami vnějšími podmínkami probíhaly v klimatizované komoře při zatížení 25 % z meze pevnosti po dobu 760 hodin. Průhyb byl měřen výsuvným potenciometrem a data byla průběžně ukládána ovládacím softwarem do počítače. Takto získaná data byla následně vyhodnocena pomocí Burgerova modelu, který popisuje skutečné tečení materiálu pomocí pružin a hydraulických pístů s viskózní kapalinou. Jednotlivé prvky tohoto modelu charakterizují reologické parametry – elastický a viskoelastický modul pružnosti, viskoelastický a plastický koeficient viskozity a relaxační čas.

Dlouhodobé zkoušky čtyřbodovém ohybu s nekonstantními vnějšími podmínkami probíhaly v areálu TU Zvolen ve vnější kryté expozici. Zde byly zatíženy vzorky upravené teplotou 160, 180, 190 a 200 °C a neupravené vzorky pro porovnání. Velikost zatížení byla stanovena na 25 % z meze pevnosti paralelních těles po dobu 31951 hodin. Po celou dobu tyto vzorky prošly třemi ročními cykly, kde se postupně měnila jejich vlhkost. Výstupem tedy byla data měnícího se průhybu v závislosti na

změně vlhkosti. Pro vyhodnocení byl použit Burgerův model a upravený Burgerův model, který dokáže zohlednit změnu vlhkosti.

Experimenty probíhaly na celkem 20 creepových jednotkách, kde 5 kusů bylo v komoře s řízeným prostředím a 15 kusů bylo umístěno ve venkovní expozici. Počet vzorků pro jednotlivé série byl stanoven tak, aby se z hlediska časové náročnosti jednotlivých pokusů stihly vyzkoušet všechny zamýšlené stupně úpravy.

Výsledkem je především porovnání podílu jednotlivých deformací a faktoru tečení mezi testovanými stupni termické úpravy a neupraveným materiálem. Rozdíl mezi jednotlivými úpravami je statisticky významný a prokazuje se, že nejvíce teče vzorek upravený teplotou 160 °C. Tělesa upravená vyšší teplotou tečou méně. Nejvýznamnějším zjištěním je doba ustálení deformace způsobená mechanickým zatěžováním, kde termo dřevo vykazuje mnohem rychlejší ustálení, a to v řádu 40 až 58 dní oproti dřevu neupravenému, které se ustálilo za 417 dní.

Tento výzkum objasňuje další vlastnosti termo dřeva a otevírá další možnosti jeho využití při technickém zpracování termo dřeva zejména při sušení, lisování a ohýbání. Zejména však při praktickém využití termo dřeva v konstrukcích jako celistvého materiálu, nebo jako část lepených nosníků, popřípadě jako ochranných vrstev konstrukčních sendvičových desek.

## 9 Seznam literatury a použitých zdrojů

ANTUŠKOVÁ, V.; KUČEROVÁ, I. *The impact of inorganic compounds used for protection of wood on cellulose*. *Koroze a ochrana materialu*, 2014, 58.2: 36-42.

ARMINES, *Procédé de fabrication dun materiau ligno-cellulosives par traitement thermique et matéria obtenu par ce procédé*. French Patent No 86 14 138

AWOYEMI, L.; JONES, I. P. *Anatomical explanations for the changes in properties of western red cedar (Thuja plicata) wood during heat treatment*. *Wood science and technology*, 2011, 45.2: 261-267.

AYATA, U.; GURLEYEN, L.; ESTEVES, B.; GURLEYEN, T.; & CAKICIER, N. *Vliv tepelného zpracování (ThermoWood) na některé povrchové vlastnosti parketového buku (Fagus orientalis Lipsky.) S různými aplikovanými vrstvami UV systému*. *BioResources*, (2017). 12 (2), 3876-3889.

AYTIN, A., et al. *Účinky tepelného zpracování metodou ThermoWood® na rovnovážný obsah vlhkosti a rozměrovou stabilitu třešňového dřeva*. *BioResources*, 2015, 10.2: 2083-2093.

BEKHTA, P.; NIEMZ, P. *Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood*. *Holzforschung*, 2003, 57.5: 539-546.

BENGTSSON, Ch.; JERMER, J.; BREM, F. *Bending strength of heat-treated spruce and pine timber*. In: IRG Annual Meeting. 2002, IRG, WP, 02-40242, 9s.

BERKOVÁ, T. *Reologické charakteristiky neupraveného a termicky upraveného dřeva při dlouhodobém zatížení v ohybu*. Diplomová práce, Česká zemědělská univerzita v Praze 2016

BOONSTRA M. J.; TJEERDSMA B. *Chemical analysis of heat treated softwoods*. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 2006, 64.3: 204.

BORREGA, M., KÄRENLAMPI, P. P. *Mechanical Behavior of Heat-treated Spruce (Picea Abies) at Constant Moisture Content and Ambient Humidity*. *Holz- als Rohund Werkstoff : European Journal of Wood and Wood Products*. Springer-Verlag, 2008, vol. 66, str. 63-69.

BORŮVKA V.; ZEIDLER A.; HOLEČEK T.; DUDÍK R. *Elastic and Strength Properties of Heat-Treated Beech and Birch Wood*. *Forests* [online]. 2018, 9(4), 197- [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1999-4907/9/4/197>. DOI: 10.3390/f9040197. ISSN 1999- 4907.

BORŮVKA, V. *Chování dřeva při dlouhodobém zatížení v ohybu*. Disertační práce. TU Zvolen, 2000.

BORŮVKA, V., ZEIDLER, A., HOLEČEK T. *Comparison of Stiffness and Strength Properties of Untreated and Heat-Treated Wood of Douglas Fir and Alder*. *BioResources*. Elsevier, 2015, vol. 10 (4), str. 8281-8294.

BORŮVKA, V.; DUDÍK, R.; ZEIDLER, A.; & HOLEČEK, T. *Influence of Site Conditions and Quality of Birch Wood on Its Properties and Utilization after Heat*



*Treatment. Part I—Elastic and Strength Properties, Relationship to Water and Dimensional Stability.* Forests, 10(2), 189. ISSN 1999-4907

BORŮVKA, V.; ZEIDLER, A.; HOLEČEK, T. *Comparison of stiffness and strength properties of untreated and heat-treated wood of Douglas fir and alder.* BioResources, 2015, 10.4: ISSN: 8281-8294.

BORŮVKA, V.; ZEIDLER, A.; HOLEČEK, T.; & DUDÍK, R. *Elastic and strength properties of heat-treated Beech and Birch wood.* Forests, 9(4), 197.2018 ISSN: 1999-4907

BUCHMANN, N. *Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in Picea abies stands.* Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32.11-12: 1625-1635.

CIPRA, T. *Analýza časových řad s aplikacemi v ekonomii.* SNTL (Alfa), Praha, 1986

COUCEIRO MOURIÑO, J. M. *Influence of Pressurized Heat Treatment in Chemical and Mechanical Properties of Wood.* Master's Thesis, Luleå University of Technology, 2011. 51 s.

ČESKÝ STATISTYCKÝ ÚŘAD.;ADMD *přehledu dokončených rodinných domů a dřevostaveb od roku 1999* [cit. 2019-10-10]. Dostupné na: <https://www.admd.cz/drevostavby-opet-lamou-rekordy>

ČSN 49 0101 *Drevo. Všeobecné požiadavky na fyzikálne a mechanické skúšky.*1980

ČSN 49 0108 *Drevo. Zisťovanie hustoty.* 1993

ČSN 49 0115. *Drevo. Zisťovanie medze pevnosti v statickom ohybe.* Praha: Vydavateľství úřadu pro normalizaci a měření, 1979.

ČSN 49 0116 *Drevo. Metóda zisťovania modulu pružnosti pri statickom ohybe.*1982

ČSN 49 0116. *Drevo. Zisťovanie modulu pružnosti pri statickom ohybe.* Praha: Vydavateľství úřadu pro normalizaci a měření, 1982.

ČSN EN 310 *Desky ze dřeva. Stanovení modulu pružnosti v ohybu a pevnosti v ohybu.* 1996

ČUNDERLÍK, I. *Štruktúra dreva.* Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2009. 135 s. ISBN 978-80-228-2061-5.

DINWOODIE, J. M. *Timber: Its nature and behavior.* Taylor & Francis New York, USA, 2000. 258 s. ISBN: 0-419-25550-8.

ĎOUBAL, S., KLENERA, P., ĎOUBAL, J. *Viskoelasticita – teorie, měření, aplikace.* DELTER v.o.s., 2014, 139 s.

ESTEVEES, B. M., PEREIRA, H. M. *Wood Modification by Heat Treatment: A Review.* BioResources. Elsevier, 2009, vol. 4 (1), str. 370-404.

Fakulta stavební ČVUT. *Mechanika hornin 6 – Reologie.* [online]. Vystaveno 14.5.2010 [cit. 2016-03-18]. Dostupné na: [http://departments.fsv.cvut.cz/k135/data/wp\\_upload/2010/05/mechanika-hornin-6.pdf](http://departments.fsv.cvut.cz/k135/data/wp_upload/2010/05/mechanika-hornin-6.pdf)

FENGEL, D. *Über die Veränderungen des Holzes und seiner Komponenten im Temperaturbereich bis 200° C-Vierte Mitteilung: Das Verhalten der Cellulose im Fichtenholz bei thermischer Behandlung.* Holz Roh-Werkstoff, 1967, 25.3.

FENGEL, D.; WEGENER, G. *Wood chemistry. Ultrastructure, Reactions*, 1984, 227-239.

Finnish ThermoWood Association. *Thermowood Handbook*. Finnish ThermoWood Association, Helsinki, 2003. 66 s. 67 Forest Service US Dept. of Agriculture. (1999). *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*, Madison, Wisconsin, 508 pp. ISBN: 978-1-59124-170-6.

GANDELOVÁ, L., HORÁČEK, P., ŠLEZINGEROVÁ, J. *Nauka o dřevě*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2009. 176 s. ISBN 978-80-7375-312-2.

GANDELOVÁ, L.; ŠLEZINGEROVÁ J. *Stavba dřeva. 2.*, nezměn. vyd. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2014. 187 s. ISBN 978-80-7375-966-7.

GLASSER W. G.; SARAF V. P.; NEWMAN W. H. *Hydroxy propylated lignin-isocyanate combinations as bonding agents for wood and cellulosic fibers*. The Journal of Adhesion, 1982, 14.3-4: 233-255.

GŠPARÍK M.; BARCÍK Š.; BORŮVKA V.; & Holeček T. *Impact of thermal modification of spruce wood on screw direct withdrawal load resistance*. BioResources, 10(1), 2015 ISSN 1790-1802.

GUEDES, M. R. *Creep and fatigue in polymer matrix composites*. 1. Vydání. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2011. 584 s. ISBN: 978-1-84569-656-6.

HAKKON, M.; PÉTRISSANS, M.; ZOULALIAN, A.; & GÉRARDIN, P. *Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis*. Polymer degradation and stability, 2005, 89(1), 1-5.

HALE, M. D.; GHOSH, S. C.; SPEAR, M. J. *Effects of artificial UV weathering and soft rot decay on heat-treated wood*. 2005.IRG, WP, 05-40302, 13s

HANHIJÄRVI, A. Advances in the Knowledge of Influence of Moisture Changes on the Long-term Mechanical Performance of Timber Structures. *Materials and Structures*, RILEM, 2000, vol. 33, str. 43-49.

HEIDE, O. M. *Growth and dormancy in Norway spruce ecotypes (Picea abies) I*. Interaction of photoperiod and temperature. *Physiologia Plantarum*, 1974, 30.1: 1-12.

HILL, C. A. S. *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*. John Wiley & Sons, Ltd., 2006, 260 s. ISBN: 13-978-0-470-02172-9.

HILL, C. AS. *Wood modification: chemical, thermal and other processes*. John Wiley & Sons, 2007.

HOFGAARD, A. *Structure and regeneration patterns in a virgin Picea abies forest in northern Sweden*. *Journal of Vegetation Science*, 1993, 4.5: 601-608.

HOLEČEK, T.; GAŠPARÍK, M.; LAGANA, R.; BORŮVKA, V.; & Oberhofnerova, E. Measuring the Modulus of Elasticity of Thermally Treated Spruce Wood using the Ultrasound and Resonance Methods. *BioResources*, 12(1), 2017 ISSN 819-838.

HOLZER, M. S., LOFERSKI, J. R., DILLARD, D. A. *A Review of Creep in Wood: Concepts Relevant to Develop Long-term Behavior Predictions of Wood Structures*. *Wood and Fiber Science*. Society of Wood Science and Technology, 1989, vol. 21 (4), str. 376-392.

HON, D. N.-S.; SHIRAISHI N. *Wood and cellulosic chemistry, revised, and expanded*. CRC press, 2000. ISBN 9780824700249

HONFI, D.; MÅRTENSSON, A.; THELANDERSSON, S.; KLIGER, R. *Modeling of Bending Creep of low- and high- temperature-dried Spruce Timber*. *Wood Science and Technology*. Springer Verlag, 2014, vol. 48, str. 23-36.

HORÁČEK, Petr. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1998. 128 s. ISBN 80-7157-347-7.

HOUMINER, Y.; PATAI, S. *Thermal polymerization of levoglucosan*. *Journal of Polymer Science Part A-1: Polymer Chemistry*, 1969, 7.10: 3005-3014.

KAČÍK, F.; CHÁBELOVÁ, S.; VELKOVÁ, V. *Analytická chémia*. Technická univerzita, 2001.

KAČÍKOVÁ, D; KAČÍK F. *Chemické a mechanické zmeny dreva pri termickej úprave*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2011 71 s. ISBN 978-80-228-2249-7.

KAMKE, F. A.; HARRISON SIZEMORE, I. I. I. *Viscoelastic thermal compression of wood*. U.S. Patent No 7,404,422, 2008.

KLEMENT, I.; MARKO, P. *Zmena farby bukového dreva v procese sušenia*. *Changes of colour of*, 2008.

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, W. A. Jr. *Principles of Wood Science and Technology I Solid Wood*. Springer Verlag, New York, 1968. 1. Vydání. 591 s. ISBN: 978-3-642-87930-2.

KUBOJIMA, Y.; OKANO, T.; OHTA, M. *Vibrational properties of Sitka spruce heat-treated in nitrogen gas*. *Journal of wood science*, 1998, 44.1: 73-77.

KUČERKA, M.; OČKAJOVÁ, A. *Tepelná odolnosť a zrnitosť abrazívneho drevěného prachu*. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen res Publica Slovaca*, 2018, 60.2: 43-51.

LAGAÑA, R.; BABIAK, M.; KRAKOVSKY, A. *Creep Parameters of Spruce Wood in High Temperature Environment*. *Maderas Ciencia y tecnología*, 2008, vol. 1, str. 19-24.

LAKES, R. *Viscoelastic materials*, Cambridge University Press, New York, 2009. 461 s. ISBN: 978-0-521-88568-3.

LYSÝ, F., JÍRŮ, P. *Nauka o dřevě*. Státní nakladatelství technické literatury, Praha, 1954, 758 s. 68

MA, Y., LUO, Y.; LI, X. *Advances and Expectations of Study on Wood Rheology*. *Journal of Central South University of Technology*. Springer Verlag, 2008, vol. 15 (s1), str. 545-549.

MATOVIČ A. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva: Určeno pro posl. les. fak. obor dřevař a les*. Brno: Vysoká škola zemědělská, 1993. 212 s. ISBN 80-7157-086-9.

MBURU, F.; DUMARCA Y, S.; HUBER, F.; PETRISSANS, M.; & GÉRARDIN, P. *Improvement of Grevillea robusta durability using heat treatment* (Doc. No. IRG/WP 06-40333). International Research Group on Wood Preservation, 2006.

MELOUN, M.; MILITKÝ, J.; KOČMÍDOVÁ, H. *Statistické zpracování experimentálních dat*. Plus, 2004. ISBN 80-200-1254-0

MOLLIKOVÁ, E. *Konstrukční plasty v letectví* [online]. Vystaveno 20.10.2014 [cit.2019-03-28]. Dostupné na: [http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/12\\_KONSTRUKCNI% 20PLASTY.ppt](http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/12_KONSTRUKCNI%20PLASTY.ppt)

MONTERO, C. et al. *Influence of Hydromechanical History on the Longitudinal Mechanosorptive Creep of Wood*. Holzvorschung. Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf 2012, vol. 66, str. 757-764.

MOUTEE, M.; FORTIN, Y.; FAFARD, M. A. Global Rheological Model of Wood Cantilever as Applied to Wood Drying. *Wood Science and Technology*. Springer-Verlag, 2007, vol. 41, str. 209-234.

MOUTEE, M.; FORTIN, Y.; FAFARD, M. Creep Behavior of Wood Cantilever Loaded at Free End During Drying. *Wood and Fiber Science*. Society of Wood Science and Technology, 2005, vol. 37 (3), str. 521-534.

MÜLLER U, et al. *Yellowing and IR-changes of spruce wood as result of UV-irradiation*. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2003, 69.2: 97-105.

NAVI, P., SANDBERG, D., *Thermo-Hydro-Mechanical Wood Processing*. CRC Press, 2012, 1. vydání, 280 s. ISBN: 978-1-4398-6042-7.

NĚMEC J.; JANDÁČEK V.; HURDA B. *Dřevo: historický lexikon* : [tradice z pohledu dneška. Praha: Grada, 2005. 80 s. ISBN 80-247-1187-7.

NOVÁK, J. *Základy teorie chyb a zpracování fyzikálních měření*. Praha: České Vysoké Učení technické, 2001.

OBERHOFNEROVÁ, E, et al. *Determination of correlation between destructive and nondestructive test methods applied on modified wood exposed to natural weathering*. BioResources, 2016, 11.2: ISSN 5155-5168.

PEREIRA H.; GRAÇA J.; RODRIGUES J. C. *Wood chemistry in relation to quality*. Wood quality and its biological basis, 2003, 53-86. ISBN 1 1405147814

PODGORSKI, L.; CHEVET, B.; ONIC, L.; & MERLIN, A. *Modification of wood wettability by plasma and corona treatments*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2000, 20(2), 103-111.

PONCSAK, S.; KOCAEFE, D.; YOUNSI, R. *Improvement of the heat treatment of Jack pine (Pinus banksiana) using ThermoWood technology*. European Journal of Wood and Wood Products, 2011, 69.2: 281-286.

PONCSAK, S.; KOCAEFE, D.; YOUNSI, R. *Zlepšení tepelného zpracování borovice Jack (Pinus bankiana) pomocí technologie ThermoWood*. European Journal of Wood and Wood Products , 2011, 69,2: 281-286.

POŽGAJ, A. a kol. *Štruktúra a vlastnosti dreva*, Príroda a.s., Bratislava, 1997. 485 s. ISBN: 80-07-00600-1.

POŽGAJ, A., *Metódy zjišťovania mechanických vlastností dreva a drevných veľkoplošných kompozitných materiálov*, Vysoká škola lesnícka a drevárska Zvolen, 1987, 3. vydání, 170 s., ISBN: 85-1589-87

PRAKASH, G. K.; MAHADEVAN K. M. *Enhancing the properties of wood through chemical modification with palmitoyl chloride*. Applied Surface Science, 2008, 254.6: ISBN1751-1756.

RAMIAH, M. V. *Thermogravimetric and differential thermal analysis of cellulose, hemicellulose, and lignin*. Journal of Applied Polymer Science, 1970, 14.5: 1323-1337.

RANTA-MAUNUS, A. *Rheological Behavior of Wood in Directions Perpendicular to Grain*. Materials and Structures. Springer Verlag, 1993, vol. 26, str. 362-369.

REINPRECHT, L.; VIDHOLDOVÁ, Z.. *Termodrevo – Příprava, vlastnosti a aplikace*. TU Zvolen 2011, ISBN: 978-80-228-1920-6.

ROSZYK, E. *Effect of Bending Stresses on the Wood Creep In Conditions of Assymetric Changes of Moisture Content*. Folia ForestaliaPolonica. AR Poznań, 2005, série B, sešit 36, str. 15-26.69

ROWELL R. M., et al. *Cell wall chemistry*. Handbook of wood chemistry and wood composites, 2005, 2. ISBN 9780203492437

ROWELL R.M. *Chemical modification of wood*. Handbook of engineering biopolymers, homopolymers, blends, and composites. Cincinnati, OH: Hanser Gardner Publications, Inc., 2007: Pages 673-691, 2007.

ROWELL, R. M. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. Taylor & Francis New York, 2013. ISBN: 978-1-4398-5380-1

SANDBERG, D.; KUTNAR, A.; MANTANIS, G. *Wood modification technologies-a review*. iForest-Biogeosciences and Forestry, 2017, 10.6: 895.

SAYED-AHMED, M.; SENNAH, K. *Effect of Temperature and Relative Humidity on Creep Deflection for Permanent Wood Foundation Pannels*. 3rd Specialty Conference on Material Engineering & Applied Mechanics. Montréal, Québec, 29.5.-1.6.2013.

SEBORG, R. M.; TARKOW, H.; STAMM A.J. *Effect of heat upon teh dimensional stabilization of wood*. Journal of teh Forest Products Research Socieety, 1953, 3 (3) , 59-67s.

SHAO, Z. *The Variable Parameter Rheological Model of Wood*. *Science and Technology*. Springer-Verlag, 2005, vol. 39, str. 19-26.

SHI, J. Li.; KOCAEFE, D.; ZHANG, J. *Mechanické chování dřevin Quebecu tepelně ošetřených pomocí procesu ThermoWood*. Holz als Roh-und Werkstoff , 2007, 65,4: 255-259.

SOBOTKA, Z. *Reologie hmot a konstrukcí*. Academia, 1981, Praha, 1. vydání, 499 s.

STAMM, A. J.; SEBORG, R. M. *Resin treated laminated, compressed wood—Compreg*. Forest Products Laboratory Report, 1951, 1381: 13.

SVOBODA, Pravdomil. *Lesní dřeviny a jejich porosty: část II*. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1955. 573 s. Lesnická knihovna (Státní zemědělské nakladatelství).

SYRJÄNE, T.; KANGAS, E. *Heat treated tinber in Findland*. IRG, WP, 00-40158, 10s.

ŠLEZINGEROVÁ, J.; GANDELOVÁ, L. Stavba dřeva: (cvičení). 2., nezměn. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2008. 129 s. ISBN 978-80-7375-168-5.

Thermowood Handbook. Helsinki: Finnish Thrmowood Association 2003 [online].[cit. 6. 4. 2018]. Dostupné z: <https://www.thermowood.fi/esitteet-ja-kirjat>

UGOLEV, B.; GALKIN, V.; GORBACHETA, G.; KALININA, A. Frozen Shrinkage of Wood. In *Proceedings of the 6th IUFRO Symposium „Wood Structure and Properties '10“ held on September 6-9, 2010 in Podbanské, High Tatras, Slovakia organized jointly by the Faculty of Wood Sciences and Technology of the Technical University in Zvolen and IUFRO Research Groups 5.01. “Wood Quality“*. Kúdela, J., Lagaňa, R. Arbora Publishers, 201, Zvolen, Slovensko, str. 73-78

*User's Guide FAKOPP ULTRASONIC TIMER* [online]. Fakopp Bt., Agfalva, Hungary. Vystaveno 18.8.2009 [cit. 2019-04-10]. Dostupné na: [http://www.fakopp.com/site/downloads/Ultrasonic\\_Timer.pdf](http://www.fakopp.com/site/downloads/Ultrasonic_Timer.pdf)

VIITANIEMI, P.; RANTA-MAUNUS, A.; JÄMSÄ, S.; EK, P. *Method for Processing Wood at Elevated Temperatures*. Patent EP 0759137 B1, 1998, Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, 10 s.

WANG, J.; COOPER R. *Properties of hot oil treated wood and teh possible chemical reaktions between wood and soybean oil during heat trement*. 2005 IRG, WP, 05-40304, 11s

WEILAND J-J.; GUYONNET R. *Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy*. Holz als Roh-und Werkstoff, 2003, 61.3: 216-220.

ZEIDLER A.; BORŮVKA V. *Stavba a vlastnosti dřeva hospodářsky významných dřevin - podklady pro cvičení*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2016. 89 s. ISBN 978-80-213-2674-3.

## 10 Seznam příloh

Příloha 10-1 Patentový spis CZ306990B6.....	96
Příloha 10-2 Ovládací rozhraní termo-komory (KATRES).....	105
Příloha 10-3 Termo-komora vnitřní prostor.....	105
Příloha 10-4 Creepové jednotky ve vnější kryté expozici TU Zvolen.....	106
Příloha 10-5 Měření pruhybu pomocí úchylkoměru.....	106
Příloha 10-6 Detail zatěžovacích hlavy, podpěr a držáku potenciometru.....	107
Příloha 10-7 Creepové jednotky v klimatizované komoře v budově FLD.....	107
Příloha 10-8 Propojení potenciometru s PC.....	108
Příloha 10-9 Sběrná karta převádí signál z potenciometru do PC.....	108
Příloha 10-10 TIRA 2850S.....	109
Příloha 10-11 FAKOPP přístroj na měření dynamického modulu.....	109
Příloha 10-12 Publikační činnost.....	110

## PATENTOVÝ SPIS

(11) Číslo dokumentu:

**306 990**(13) Druh dokumentu: **B6**

(51) Int. Cl.:

*G01N 3/20* (2006.01)  
*G01N 33/46* (2006.01)

(19)  
 ČESKÁ  
 REPUBLIKA



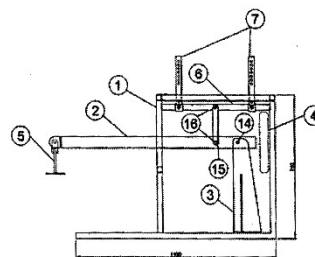
ÚŘAD  
 PRŮMYSLOVÉHO  
 VLASTNICTVÍ

(21) Číslo přihlášky: **2016-139**  
 (22) Přihlášeno: **09.03.2016**  
 (40) Zveřejněno: **01.11.2017**  
**(Věstník č. 44/2017)**  
 (47) Uděleno: **20.09.2017**  
 (24) Oznámení o udělení ve věstníku: **01.11.2017**  
**(Věstník č. 44/2017)**

(56) Relevantní dokumenty:  
 BORŮVKA, Vlastimil; ZEIDLER, Aleš; HOLEČEK, Tomáš. Comparison of Stiffness and Strength Properties of Untreated and Heat-Treated Wood of Douglas Fir and Alder. BioResources, 2015, 10.4: 8281-8294..  
 US 2006/0213281 A1; GB 1 202 929; CZ 24898 U1.

(73) Majitel patentu:  
 Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha 6 -  
 Suchbát, CZ

(72) Původce:  
 Ing. Vlastimil Borůvka, Ph.D., Zvolen, SK  
 Ing. Tomáš Holeček, Volyně, CZ  
 Ing. Míloslav Linda, Ph.D., Slaný, CZ



(54) Název vynálezu:  
**Creepové zkušební zařízení pro dlouhodobé  
 zatížení dřeva v ohybu**

(57) Anotace:  
 Creepové zkušební zařízení pro dlouhodobé zatížení dřeva v ohybu se skládá ze třech základních částí: creepové jednotky, tj. upínacího a zatěžovacího systému, snímače deformace a záznamového zařízení. Jednotka je zhotovena z rámu (1) k jehož spodní části je přivařen držák (3) hlavní páky (2), přičemž rameno hlavní páky (2) je spojeno s držákem (3) hlavní páky čepem (14), na kterém se může otáčet. Hlavní páka je umístěna nastojato. Hlavní páka (2) je zakončena závitovou tyčí, na které je umístěno protizávaží (4) kulatého tvaru, které slouží k vyvážení pákového mechanismu tak, aby se eliminovala síla vyvinutá vlastní tíhou pákového mechanismu. Na hlavní páce (2) jsou umístěny dva vertikální třmeny (15), které přenášejí sílu vyvinutou závažím uloženým na držáku závaží na dělicí rameno, které dělí vyvinutou sílu na dvě stejné velké síly. Na dělicím rameni (6) jsou dva posuvné třmeny (7) s arcačnickými šrouby (13), které převádějí sílu na zatěžovaný materiál. Posuvné třmeny (7) zajistí zatěžování v požadované navolené vzdálenosti. Na vrchní straně hlavního rámu (1) jsou dvě volně posuvné podpěry (10), které se dají zajistit šrouby. Posuvné podpěry jsou tvořeny podpěrnými válci z obou stran uloženými v pouzdrech s ložisky tak, aby byl zajištěn volný prokluz zkušebních vzorků během zatěžování.

**CZ 306990 B6**



## Creepové zkušební zařízení pro dlouhodobé zatížení dřeva v ohybu

### Oblast techniky

5 Technické řešení se zabývá Creepovým zkušebním zařízením pro dlouhodobé zatížení dřeva, případně DKM (dřevních kompozitních materiálů), v ohybu, při kterém se měří průhyb, na základě jehož vyhodnocení s použitím například Teologických modelů se stanovují příslušné reologické parametry tečení materiálu (modulů pružnosti, koeficientů viskozity, relaxačního času, atd.).

### Dosavadní stav techniky

15 Existují podobná zařízení pro výše uvedené experimenty, ať už jedno-pákových, dvoj--pákových nebo s vyvozením zatížení napřímo. Výhodou jedno-pákových zařízení (viz například zdroj literatury 1, 6 a 8) oproti dvoj-pákovým (viz například zdroj literatury 4 a 7) spočívá v úspoře pracovního prostoru a v jednoznačně symetrickém rozložení zatěžovací síly, a oproti zařízením s vyvozením zatížení napřímo (viz například zdroj literatury 2, 3, 4 a 5) v úspoře množství závaží

20 potřebných pro vyvození síly. Ne všechna zařízení, na které je odkazováno, jsou určena pro zkoušení dřeva, ale princip zatěžování je zachován.

Uvedené předmětné zařízení i s příslušenstvím je jako celek jedinečné a není kopii žádného existujícího.

### Literatura:

1. Fragiaco, M., Amadio, C., Macorini, L. (2007). Short- and long-term performance of the "Tecnaria" stud connector for timber-concrete composite beam, *Materials and Structures*, Volume 40(10), p. 1013-1026.
2. Honfi, D., Mártensson, A., Thelandersson, S., Kliger, R. (2014). Modelling of bending creep of low- and high- temperature-dried spruce, *Wood Science and Technology*, Volume 48(1), p. 23-36.
3. Chovančík, V. (2014). Návrh konstrukce přípravku pro měření creepového chování sendvičových struktur, *Bakalářská práce*, UTB ve Zlíně.
- 35 4. Madsen, B. (1992). *Structural Behaviour of Timber*, Amer Society of Civil Engineers, pp. 405, ISBN 0969616201.
5. Marák, M. (2010). Experimentální studium krátkodobého tečení polypropylenu při ohybu, *Diplomová práce*, UTB ve Zlíně.
6. Creep Testing Machines - For Metal [online]. (2016). [cit. 2016-12-5]. Dostupné na: <http://www.mcstestingmachines.com/creep-testing-machines.html>.
7. Creep test rigs for comparative determination of the long-term deformation behaviour of wood gluelines [online]. (2016). [cit. 2016-12-5]. Dostupné na: [http://www.mpa.uni-stuttgart.de/organisation/fb\\_l/abt\\_12/index.en.html](http://www.mpa.uni-stuttgart.de/organisation/fb_l/abt_12/index.en.html).
8. 0HSM34 Creep Testing Machine [online]. (2016). [cit. 2016-12-5]. Dostupné na: <http://www.p-a-hilton.co.uk/products/HSM34-Creep-Testing-Machine>.

### Podstata technického řešení

50 Každé zařízení je samostatná jednotka, která na základě závaží a pákového mechanismu vyvozuje zatěžovací sílu, která ve dvou bodech působí na testovaný materiál. Zařízení se skládá ze třech základních částí a to z creepové jednotky (upínacího a zatěžovacího systému), snímače deformace (lineárního potenciometru) a záznamového zařízení s příslušenstvím.

## Creepová jednotka

Jednotka je zhotovena z hlavního rámu obdélníkového tvaru, který je svařen z jeklu o průměru 30 x 30 mm. Ke spodní části hlavního rámu je přivařen držák hlavní páky kuželovitěho tvaru, přičemž rameno hlavní páky je spojeno s držákem hlavní páky čepem, na kterém se může otáčet. Hlavní páka obdélníkového tvaru z jeklu o průřezu 60 x 40 mm je umístěna nastojato, přičemž její délka od středu otáčení k závaží je 1,000 mm a na druhou stranu ramene je vzdálenost 100 mm. Hlavní páka je zakončena závitovou tyčí, na které je umístěno protizávaží kulatého tvaru, které slouží k vyvážení pákového mechanismu tak, aby se eliminovala síla vyvinutá vlastní tíhou pákového mechanismu. Na hlavní páce jsou umístěny dva vertikální třmeny ve vzdálenosti 100 mm od čepu držáku hlavní páky, které přes čepy třmenů na hlavní páce přenášejí sílu vyvinutou závažím uloženým na držáku závaží na dělicí rameno, které dělí vyvinutou sílu na dvě stejné velké síly. Na dělicím rameni jsou dva posuvné třmeny se šrouby zajišťující aretaci, které převádějí sílu na zatěžovaný materiál. Posuvné třmeny zajistí zatěžování v požadované navolené vzdálenosti. Na vrchní straně hlavního rámu jsou dvě volně posuvné podpěry, které se dají zajistit šrouby zajišťující aretaci. Posuvné podpěry jsou tvořeny podpěrnými válci z obou stran uloženými v pouzdrech s ložisky tak, aby byl zajištěn volný prokluz zkušebních vzorků během zatěžování.

## 20 Snímače deformace a záznamové zařízení

Snímač, tj. potenciometr je přichycen k hlavnímu rámu creepové jednotky pomocí držáku, který se dá pevně přitáhnout k hlavnímu rámu šrouby zajišťující aretaci tak, aby nedocházelo k posunu během měření. Samotný potenciometr je uchycen k držáku dvěma originálními svorkami, které jsou součástí potenciometru.

Při samotném měření vyjíždí ze spodní strany potenciometru měřicí hlava a z jeho horní strany je vývod pro kulatý stíněný kabel, který přenáší změnu průhybu zkušebního materiálu do měřicí USB karty s vlastním napájením a z ní pomocí USB kabelu do počítače, kde se data zapisují zároveň s daty pořízených z vedlejších snímačů. Jedná o vlhkostní a teplotní senzor s ethernetovým rozhraním a vlastním napájením, které měří během pokusu teplotu a relativní vlhkost vzduchu v prostředí zkušební místnosti, dále samotný potenciometr pracuje na principu měření elektrického odporu a USB karta snímané údaje převádí na průhyb v mm.

35 Objasnění výkresů

Obr. 1 – tři základní pohledy na hlavní creepovou jednotku

40 Obr. 2 – detail podpěrných válců

Obr. 3 – detail držáku potenciometru

45 Obr. 4 – detail třmenu převádějícího zatížení na materiál

Obr. 5 – schéma zapojení od potenciometru k PC

50 Příklady uskutečnění vynálezu

Creepová jednotka je zhotovena z hlavního rámu 1 obdélníkového tvaru, který je svařen z jeklu o průměru 30 x 30 mm, přičemž ke spodní části hlavního rámu 1 je přivařen držák 3 hlavní páky kuželovitěho tvaru a rameno 2 hlavní páky je spojeno s držákem hlavní páky čepem 14, na kterém se může otáčet. Dále je creepová jednotka tvořena hlavní pákou 2 obdélníkového tvaru z jeklu o průřezu 60 x 40 mm, která je umístěna nastojato, přičemž její délka od středu otáčení k

závaží je 1000 mm a na druhou stranu ramene je vzdálenost 100 mm. Hlavní páka 2 je zakončena závitovou tyčí, na které je umístěno protizávaží 4 kulatého tvaru, které slouží k vyvážení pákového mechanismu, přičemž na hlavní páce 2 jsou umístěny dva vertikální třmeny 15 ve vzdálenosti 100 mm od čepu 14 držáku 3 hlavní páky, které přes čepy 16 třmenů na hlavní páce 2 přenášejí sílu vyvinutou závažím uloženým na držáku 5 závaží na dělicí rameno 6, které dělí vyvinutou sílu na dvě stejné velké síly. Na dělicím rameni 6 jsou dva posuvné třmeny 7 se šrouby 13 zajišťující aretaci, které převádějí sílu na zatěžovaný materiál, přičemž posuvné třmeny 7 zajistí zatěžování v požadované navolené vzdálenosti. Na vrchní straně hlavního rámu 1 dvě volně posuvné podpěry 10, které se dají zajistit šrouby 13 zajišťující aretaci. Posuvné podpěry 10 jsou tvořeny podpěrnými válci z obou stran uloženými v pouzdrech s ložisky 12 tak, aby byl zajištěn volný prokluz zkušebních vzorků během zatěžování.

Snímač, tj. potenciometr 17 je přichycen k hlavnímu rámu 1 creepové jednotky pomocí držáku 11, který se dá pevně přitáhnout k hlavnímu rámu 1 šrouby 13 zajišťující aretaci tak, aby nedocházelo k posunu během měření, přičemž samotný potenciometr 17 je uchycen k držáku dvěma originálními svorkami, které jsou součástí potenciometru.

Při samotném měření vyjíždí ze spodní strany potenciometru 17 měřicí hlava a z jeho horní strany je vývod pro kulatý stíněný kabel 18, který přenáší změnu průhybu zkušebnímu materiálu do měřicí USB karty 19 s vlastním napájením 20 a z ní pomocí USB kabelu 21 do počítače 22, kde se data zapisují zároveň s daty pořízených z vedlejších snímačů 23. Jedná o vlhkostní a teplotní senzor s ethernetovým rozhraním a vlastním napájením, které měří během pokusu teplotu a relativní vlhkost vzduchu v prostředí zkušební místnosti, dále samotný potenciometr 17 pracuje na principu měření elektrického odporu a USB karta 2 snímá údaje převádí na průhyb v mm.

#### Průmyslová využitelnost

Předmětné zařízení je objektivně realizovatelné a reprodukovatelné podle tohoto příkladu technického řešení.

Creepové zařízení slouží k dlouhodobému zatížení materiálu (dřeva, případně DKM) v ohybu, při kterém se měří deformace (průhyb), na základě jehož vyhodnocení s použitím například reologických modelů se stanovují příslušné reologické parametry tečení materiálu (modul pružnosti, koeficientů viskozity, relaxačního času, atd.), respektive podíly jednotlivých typů deformací. Stanovení reologických konstant je důležité pro stanovení podmínek spolehlivosti dřevěných konstrukcí (mezní stav použitelnosti) a výpočet průhybu od účinku zatížení. Význam je samozřejmě možný i z hlediska uplatnění při technologickém zpracování dřeva (sušení dřeva, lisování dřeva a vláknitého koberce, tvarovém lisování a ohýbání dřeva), například stanovení relaxačního času má význam pro určení poměru jednotlivých složek deformace při lisování vláknitého nebo třískového koberce (proces tzv. "zpětného skoku", což je projev okamžité pružné deformace).

## PATENTOVÉ NÁROKY

1. Creepové zkušební zařízení pro dlouhodobé zatížení dřeva v ohybu se vyznačuje tím, že je creepová jednotka zhotovena z hlavního rámu (1) obdélníkového tvaru, který je svařen z jeklu o průměru 30 x 30 mm, přičemž ke spodní části hlavního rámu (1) je přivařen držák (3) hlavní páky kuželovitého tvaru a rameno (2) hlavní páky je spojeno s držákem hlavní páky čepem (14), dále je creepová jednotka tvořena hlavní pákou (2) obdélníkového tvaru z jeklu o průřezu 60 x 40 mm, která je umístěna nastojato, přičemž její délka od středu otáčení k závaží je

1000 mm a na druhou stranu ramene je vzdálenost 100 mm, dále je hlavní páka (2) zakončena závitovou tyčí, na které je umístěno protizávaží (4) kulatého tvaru, přičemž na hlavní páce (2) jsou umístěny dva vertikální třmeny (15) ve vzdálenosti 100 mm od čepu (14) držáku (3) hlavní páky, dále jsou na dělicím rameni (6) dva posuvné třmeny (7) s aretačními šrouby (13), dále jsou na vrchní straně hlavního rámu (1) dvě volně posuvné podpěry (10), které jsou tvořeny podpěrnými válci z obou stran uloženými v pouzdrech s ložisky (12).

2. Creepové zkušební zařízení pro dlouhodobé zatížení dřeva v ohybu, podle nároku 1, se vyznačuje tím, že je snímač, tj. potenciometr (17) přichycen k hlavnímu rámu (1) creepové jednotky pomocí držáku (11), který se dá pevně přitáhnout k hlavnímu rámu (1) aretačními šrouby, přičemž samotný potenciometr (17) je uchycen k držáku dvěma originálními svorkami, které jsou součástí potenciometru.

15

4 výkresy

20

## Seznam vztahových značek:

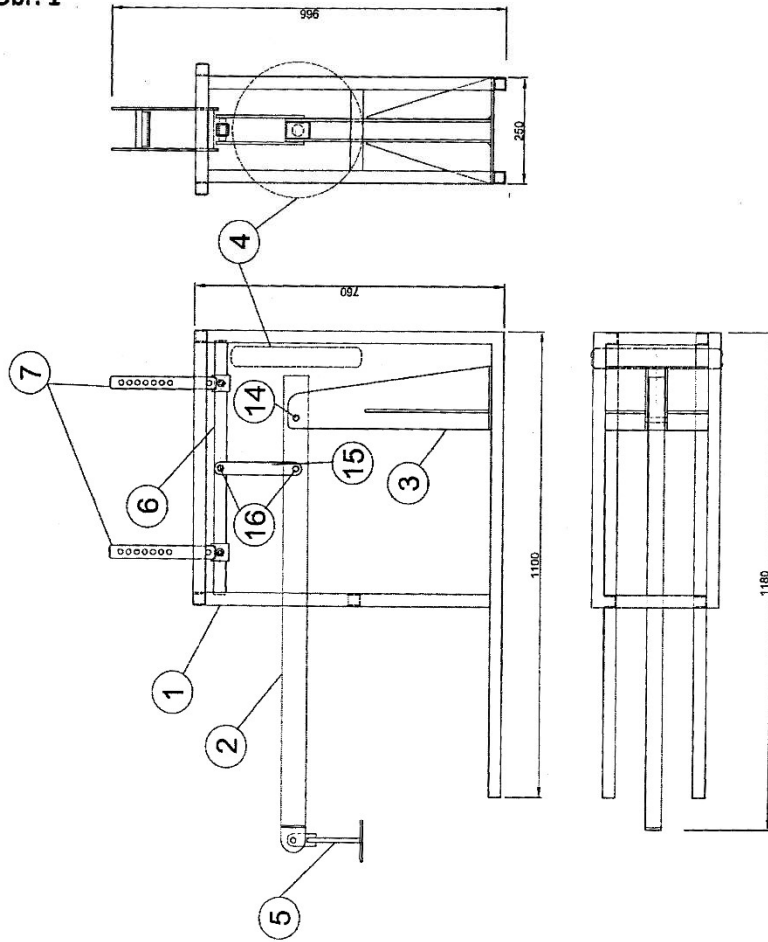
- 1 – Hlavní rám
- 2 – Hlavní páka
- 3 – Držák hlavní páky
- 4 – Protizávaží
- 5 – Držák závaží
- 6 – Dělicí rameno
- 7 – Posuvné třmeny
- 8 – Polohovací otvory pro různou tloušťku materiálu
- 9 – Kyvná dosedací hlavice zajišťující dosednutí třmenu k materiálu
- 10 – Posuvné podpěry
- 11 – Držák potenciometru
- 12 – Ložisková pouzdra
- 13 – Šrouby zajišťující aretaci
- 14 – Čep držáku hlavní páky
- 15 – Vertikální třmeny na hlavní páce
- 16 – Čepy třmenů na hlavní páce
- 17 – Potenciometr
- 18 – Kulatý stíněný kabel 19-USB karta
- 19 – Vlastní napájení USB karty
- 20 – USB kabel
- 21 – Počítač
- 22 – Vedlejší snímače

35

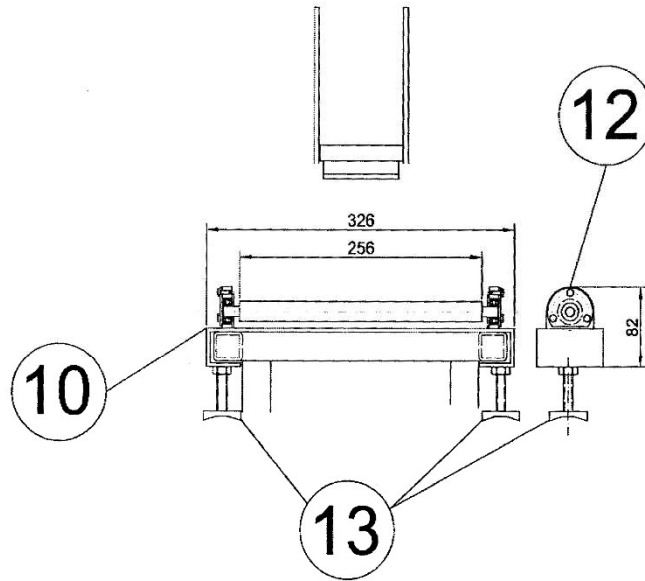
40



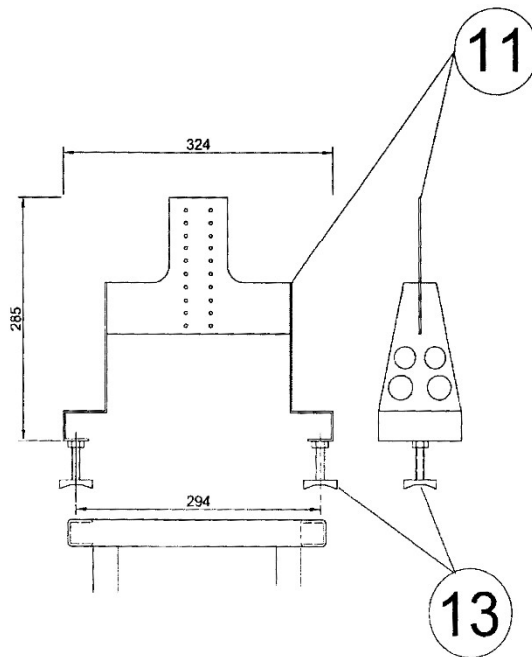
Obr. 1



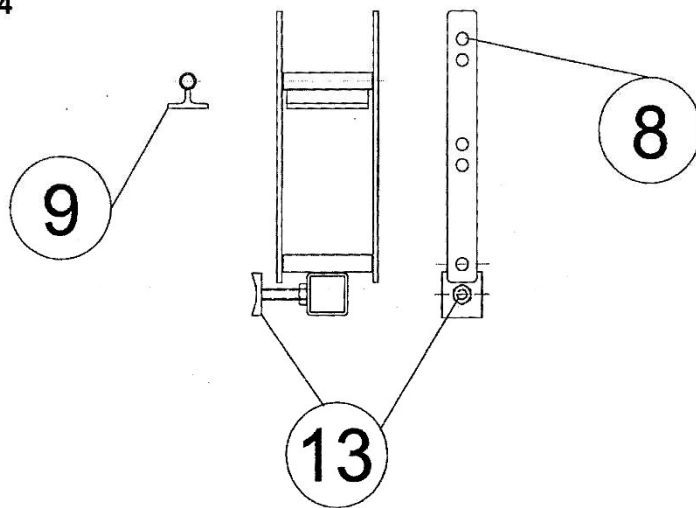
Obr. 2



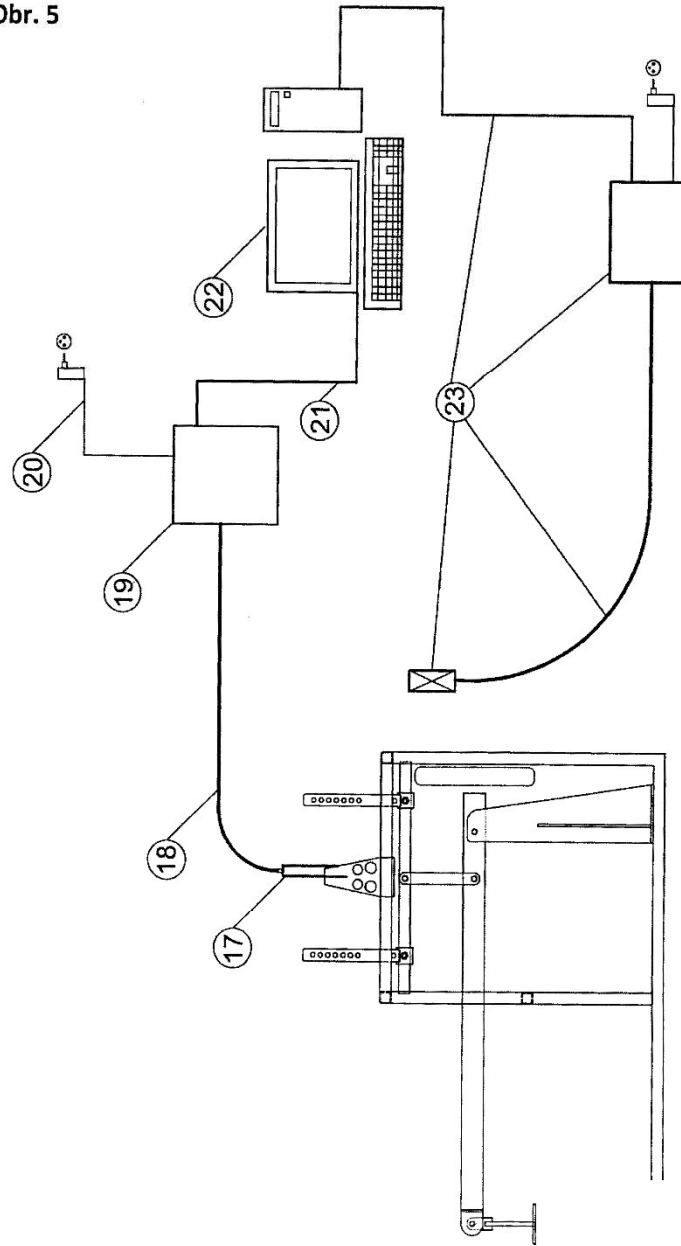
Obr. 3



Obr. 4



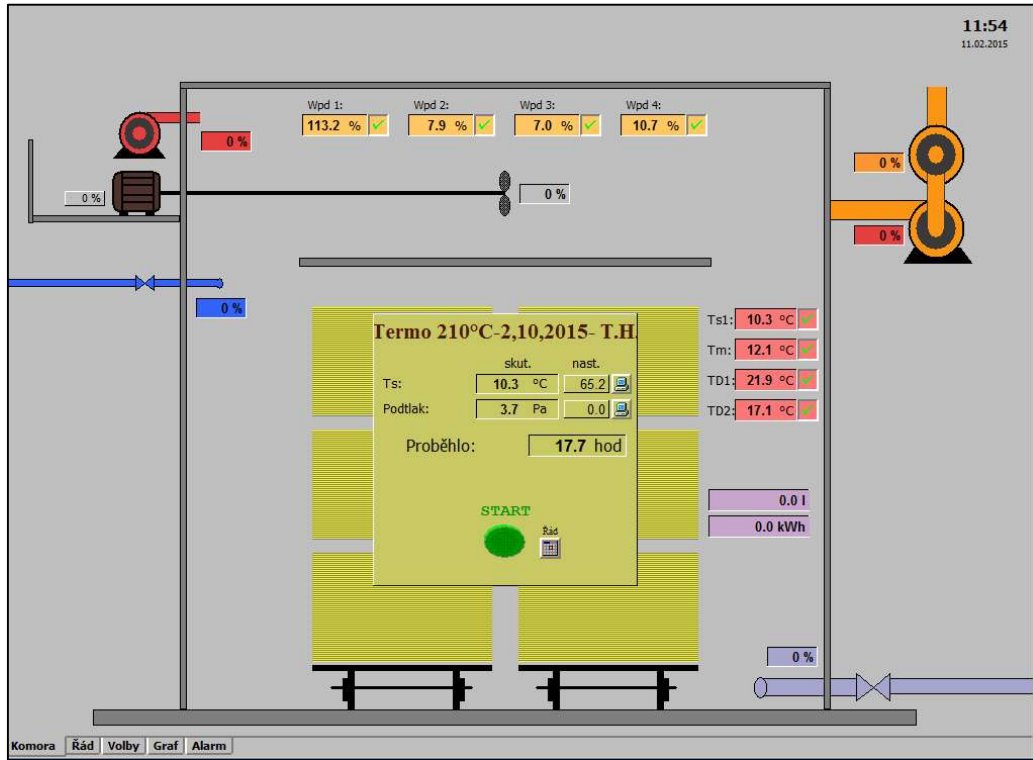
Obr. 5



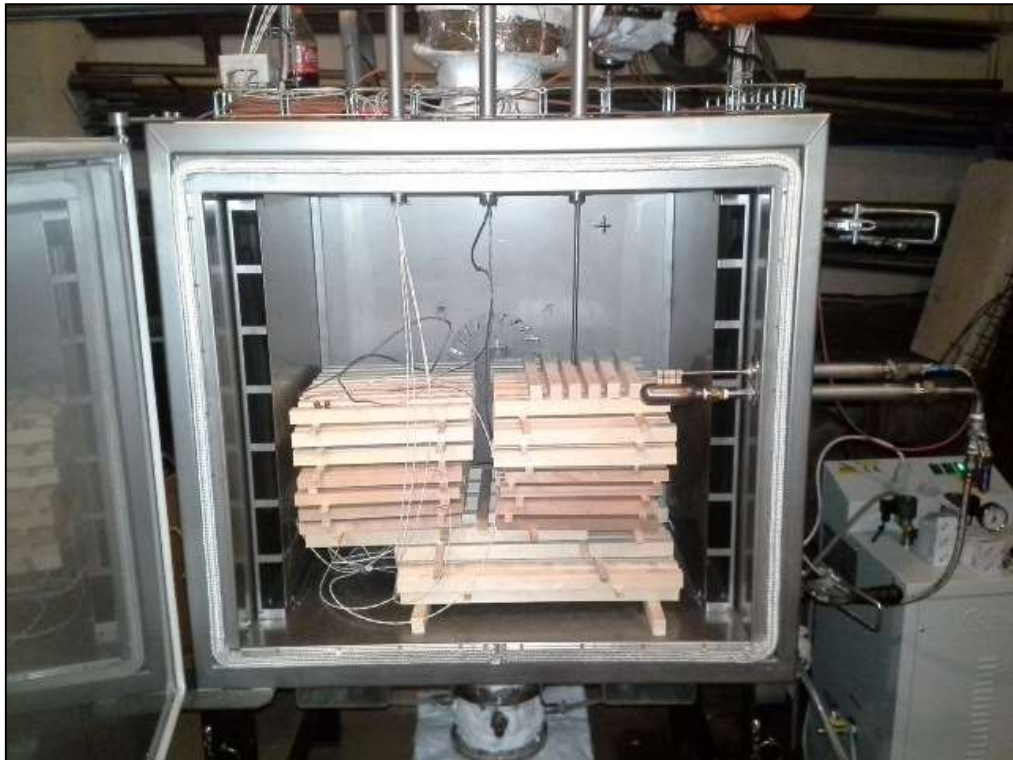
Konec dokumentu



## Příloha 10-2 Ovládací rozhraní termo-komory (KATRES)



## Příloha 10-3 Termo-komora vnitřní prostor



Příloha 10-4 Creepové jednotky ve vnější kryté expozici



Příloha 10-5 Měření pruhybu pomocí



Příloha 10-7 Creepové jednotky v klimatizované komoře

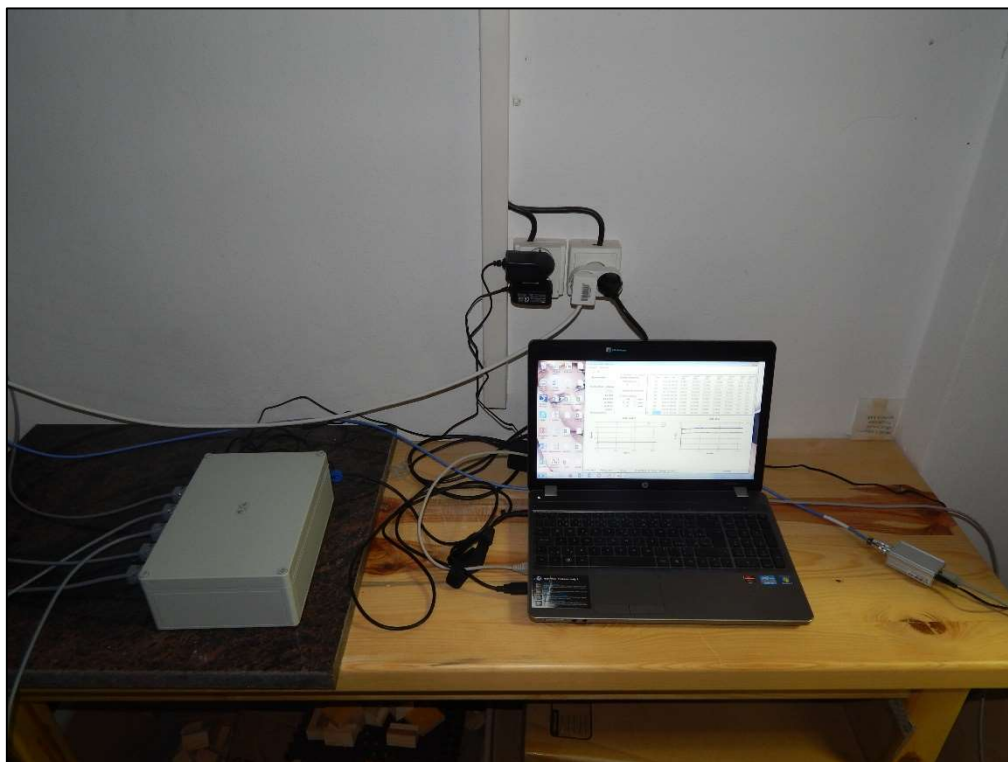


Příloha 10-6 Detail zatěžovací hlavy, podpěr a držáku potenciometru





Příloha 10-8 Propojení potenciometru s PC



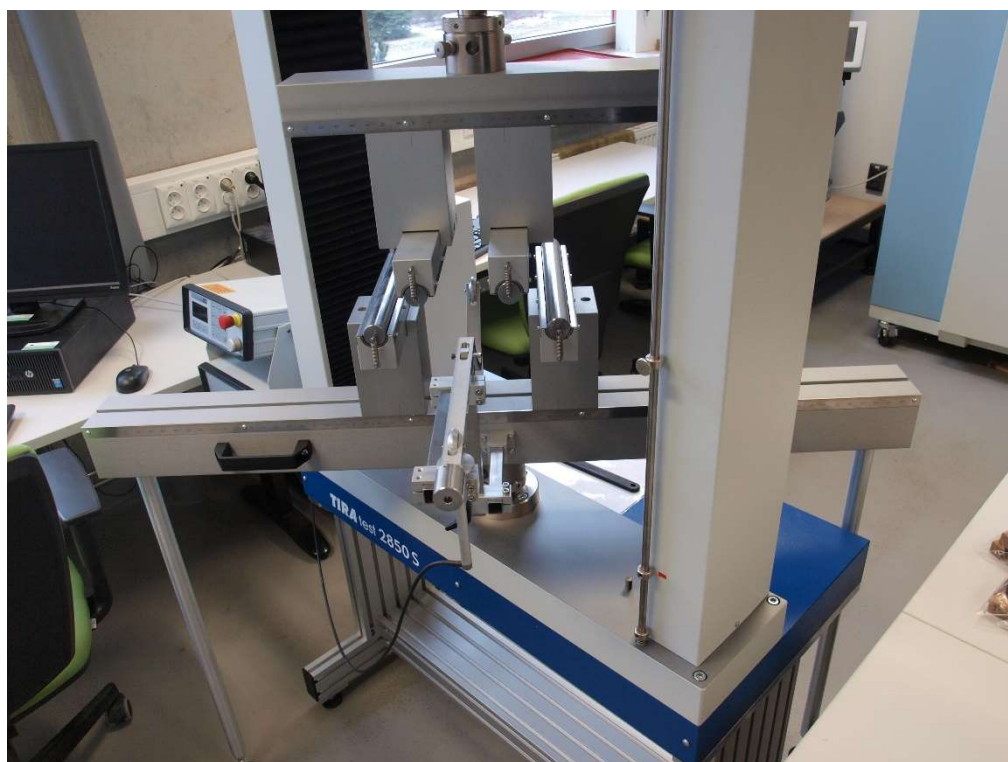
Příloha 10-9 Sběrná karta převádí signál z potenciometru do PC



Příloha 10-11 FAKOPP přístroj na měření dynamického modulu.



Příloha 10-10 TIRA 2850S





## Impact of Thermal Modification of Spruce Wood on Screw Direct Withdrawal Load Resistance

Miroslav Gašparík\*, Štefan Barčík, Vlastimil Borůvka, and Tomáš Holeček

This paper reports on the dependence of screw direct withdrawal load resistance on thermal modification of spruce wood. Screw direct withdrawal load resistance was measured in native and thermally modified spruce wood. The thermal modification was performed at three different temperatures: 140, 180, and 220 °C. Tests were carried out using two types of screws in three anatomical directions. The effect of the thermal modification was unambiguous: the screw direct withdrawal load resistance decreased with increasing modification temperatures. The largest decline 44.2% was found in the axial direction and at a temperature of 200 °C, while the lowest decrease 4.1% was found in radial direction and at temperature 140 °C for conventional screws without pre-drilling. The highest values were identified in the radial direction, and the lowest in the axial direction. While conventional screws without pre-drilled holes may be regarded as the most suitable, the self-drilling screws achieved the lowest values.

*Keywords:* Screw; Direct withdrawal load resistance; Spruce wood; Thermal modification; Temperature; Anatomical direction

*Contact information:* Department of Wood Processing, Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences in Prague, Kamýcká 1176, Praha 6 - Suchbát, 16521 Czech Republic;

\* Corresponding author: gathiss@gmail.com

### INTRODUCTION

Spruce is one of the most commonly used wood species in both construction and furniture manufacturing. Spruce wood has a good solidity yet it is light, making it easier to handle while working and jointing various components. On the other hand, spruce wood is relatively soft and less resistant to biotic influences, which are mostly faced when used in exteriors.

The ThermoWood process, invented in Finland, fundamentally changes properties of wood. This method produces a virtually new material with altered properties and resistances to various influences without adding any chemical or other substance. The wood biological resistance can thus be increased to the level of hardwoods. The first sign of the modification is a darkening in coloration. In addition to a change in color, there are also changes in the primary physical and mechanical properties of the wood (Požgaj *et al.* 1993; Vernois 2001; Yildiz *et al.* 2006; Phuong *et al.* 2007; Esteves and Pereira 2009; Gaff and Matlák 2014; Fekiač *et al.* 2015). The most significant effects registered have been in wood density, dimensional stability, and moisture absorption. The advantage is a reduced absorption of moisture as well as wood shrinkage (Mayes and Oksanen 2003), which increases the dimensional stability of wood in exteriors. Another excellent ability is the resistance to biotic influences, which is the main reason for the application. The high temperature alters the structure so much that the resistance to fungi, mold, and rot is increased substantially (Reinprecht and Vidholdová 2008). Among mechanical



## Comparison of Stiffness and Strength Properties of Untreated and Heat-Treated Wood of Douglas Fir and Alder

Vlastimil Borůvka, Aleš Zeidler,\* and Tomáš Holeček

This paper investigates the effect of heat treatment temperature on the stiffness and strength properties of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* Franco) and common alder (*Alnus glutinosa* Gaertn.) woods. Two temperatures of heat treatment were used: 165 and 210 °C. The effects of dynamic elasticity modulus, static elasticity modulus, impact toughness, bending strength, and density were evaluated. It is already understood that the mechanical properties, primarily the bending strength, decreases with increasing temperature. In contrast to the favorable stability in shape and dimension that was achieved, the changes in the woods' properties with temperature were mostly negative. Higher heat treatment temperatures corresponded with lower stiffness and strength properties. For higher temperature treatments, above 200 °C, deterioration of the tested properties was noticeable as a result of the significant changes in the wood chemical structure. Even the positive effect of the equilibrium moisture decrease was not able to counterbalance the unfavorable changes. Moreover, it was observed that as the hemicellulose content is higher in alder wood, density, static bending strength, and toughness all decreased steadily at high temperatures, compared to Douglas fir wood.

**Keywords:** Heat treatment; Thermowood properties; Dynamic and static elasticity moduli; Impact toughness; Bending strength; Density

**Contact information:** Department of Wood Processing, Czech University of Life Sciences in Prague, Kamýčská 1176, Praha 6 - Suchbát, 16521 Czech Republic; \*Corresponding author: zeidler@fd.czu.cz

### INTRODUCTION

Heat-treated wood is a well known material that is commonly utilized in industry. The heat treatment method changes, by means of appropriate action of the heat, some of the wood's properties that are important from the view of its specific utilisation. The process does not use any chemicals, which is one of its many advantages. This aids in retaining the natural character of the wood. Thermowood has been utilized for several years, primarily in Western Europe. The most extensive and complete study of the wood heat treatment process took place in Finland. Heat-treated wood typically has a longer lifetime; therefore, it is a material suitable for outdoor exposure with no ground contact (ITA 2003; Barčík *et al.* 2014).

The influencing factors that affect the chemical reactions of the wood components during the heat treatment process (Fig. 1, Kačíková and Kačík 2011) include the wood species, ambient pressure, heat supply intensity, oxygen access to wood, and the wood's initial moisture content (Reinprecht and Vidholdová 2008, 2011). The heat treatment process (for Thermowood production), utilizing only wood and steam, changes the wood's internal structure (Gaff and Gašparík 2013; Gašparík and Gaff 2013). This causes a significant reduction in the hygroscopicity (up to 50%). Wood treated with this method



## Determination of Correlation between Destructive and Nondestructive Test Methods Applied on Modified Wood Exposed to Natural Weathering

Eliška Oberhofnerová,<sup>a,\*</sup> Karolina Arnetová,<sup>a</sup> Tomáš Holeček,<sup>b</sup> Vlastimil Borůvka,<sup>b</sup> and Jan Bomba<sup>a</sup>

The objective of this study was to determine a correlation between the dynamic modulus of elasticity (MOEd) and the static modulus of elasticity (MOEs), and to assess the potential of using nondestructive (NDT) methods as a grading tool for both treated and untreated wood exposed to weathering. In the experiment, test samples made from spruce and oak were exposed for four months to natural weathering. Half of the specimens were treated with a silicon-based nano-protection. The MOEd was determined using acoustic NDT methods—ultrasound transmission (MOEd<sub>u</sub>) and the vibration methods (MOEd<sub>v</sub>), while the MOEs was determined by a destructive three-point bending test. The results showed that there was no statistical significance for the influence of the time of exposure and the surface treatment on the modulus of elasticity. The ultrasound method, measured in the longest distance of the sample, had the most significant correlation with the MOEs. The vibration method also reached a similar correlation with the MOEs. The mean values of the MOEd<sub>u</sub> and MOEd<sub>v</sub> were higher than the MOEs. The influence of density on the acoustic wave velocity was not confirmed.

*Keywords:* Dynamic and static modulus of elasticity; Ultrasound transmission method; Longitudinal vibration method; Surface treatment; Weathering

*Contact information:* a: Department of Wood Products and Wood Constructions, Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences Prague, Kamýcká 1176, 165 21 Praha 6–Suchbát, Czech Republic; b: Department of Wood Processing, Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences Prague, Kamýcká 1176, 165 21 Praha 6–Suchbát, Czech Republic;

\* Corresponding author: oberhofnerova@fdl.czu.cz

### INTRODUCTION

Wood is an organic material that is characterized by a high natural durability, good mechanical and physical properties, and in favorable conditions it can last for centuries. When wood is exposed to the outdoors, it is subjected to weathering: a combination of chemical, mechanical, and light energy factors (Feist 1990). As a result the wood degrades and it slowly loses its original properties (Williams 2005).

Solar radiation, mainly UV light, and water from precipitation and air humidity are the factors with the most significant impact on the degradation of wood and other coatings in exterior conditions (Evans and Banks 1988; Dunningham *et al.* 1992; Evans *et al.* 1992; Feist 1992; Temiz *et al.* 2005; Williams 2005). Weathering is first manifested by a change in the color of the wood, which is followed by a loosening of wood fibers and then gradual erosion of the wood surface (Williams and Feist 1999). A loss in the mechanical properties during weathering is associated with a light-induced degradation of the lignin and cell wall constituents, as well as the subsequent breakdown of wood's microstructure (Yildiz *et al.*



## Measuring the Modulus of Elasticity of Thermally Treated Spruce Wood using the Ultrasound and Resonance Methods

Tomáš Holeček,<sup>a</sup> Miroslav Gašparík,<sup>a,\*</sup> Rastislav Lagaňa,<sup>b</sup> Vlastimil Borůvka,<sup>a</sup> and Eliška Oberhofnerová<sup>c</sup>

The effect of thermal treatment temperatures on the dynamic and static modulus of elasticity (MOE) of Norway spruce wood (*Picea abies* (L.) H. Karst.) was evaluated. The dynamic MOE was measured using ultrasound and resonance methods in the longitudinal and transverse directions. The static MOE was determined by the three-point bending test. The dynamic MOE values determined by the ultrasound method were higher than the static MOE values in each case. As the temperature of the thermal treatment increased, the difference between the dynamic and static MOE values decreased. The MOE increased with increasing temperature, and it was more pronounced on a tangential surface. Increasing the sensor distance had a positive effect on the correlation between the static and dynamic MOE, and the effect from the increased temperature decreased. Measurement by the resonance method showed twice as high MOE values in the transverse direction than in the longitudinal direction. The thermal treatment caused a significant decrease in the MOE only in the transverse direction, and the differences were insignificant in the longitudinal direction. The dynamic MOE values measured by the resonance method were higher than the static MOE values but slightly lower than the values measured by the ultrasound method.

**Keywords:** Modulus of elasticity; Thermal treatment; Spruce wood; Ultrasound method; Resonance method

**Contact information:** a: Department of Wood Processing, Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences in Prague, Kamýcká 1176, Praha 6 - Suchbát, 16521, Czech Republic; b: Department of Wood Science, Faculty of Wood Sciences and Technology, Technical University in Zvolen, T. G. Masaryka 2117/24, Zvolen, 960 53, Slovakia; c: Department of Wood Products and Wood Constructions, Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences in Prague, Kamýcká 1176, Praha 6 - Suchbát, 16521, Czech Republic; \*Corresponding author: gathiss@gmail.com


### INTRODUCTION

Although wood is a versatile natural material with desirable properties, there are some manufacturing processes that change the structure of wood and thus, its characteristic properties. Some of these changes are targeted (plasticization, densification, pressing, impregnation, etc.), which improve certain properties of the wood and its resistance (Borůvka *et al.* 2015). However, the side effects of processes such as drying, surface embossing, and others may result in unwanted changes (cracks, staining, surface roughness, etc.) (Gaff and Gáborik 2014).

A typical example of such processes is thermal treatment, which changes the physical and mechanical properties of the wood through high temperatures with oxidation or an inert atmosphere (Ates *et al.* 2009; Rousset *et al.* 2009). Thermal treatment

Article

# Elastic and Strength Properties of Heat-Treated Beech and Birch Wood

Vlastimil Borůvka <sup>1</sup> , Aleš Zeidler <sup>1,\*</sup>, Tomáš Holeček <sup>1</sup> and Roman Dudík <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Wood Processing, Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences Prague, 16500 Prague, Czech Republic; boruvka@fd.czu.cz (V.B.); holecek@fd.czu.cz (T.H.)

<sup>2</sup> Department of Forestry and Wood Economics, Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences Prague, 16500 Prague, Czech Republic; dudik@fd.czu.cz

\* Correspondence: zeidler@fd.czu.cz; Tel: +420-224-383-742

Received: 20 February 2018; Accepted: 8 April 2018; Published: 10 April 2018



**Abstract:** This paper deals with the impact of heat treatment on the elastic and strength properties of two diffuse porous hardwoods, namely *Fagus sylvatica* and *Betula pendula*. Two degrees of the heat treatment were used at temperatures of 165 °C and 210 °C. The dynamic and static elasticity modulus, bending strength, impact toughness, hardness, and density were tested. It is already known that an increase in treatment temperature decreases the mechanical properties and, on the other hand, leads to a better shape and dimensional stability. Higher temperatures of the heat treatment correlated with lower elastic and strength properties. In the case of higher temperature treatments, the decline of tested properties was noticeable as a result of serious changes in the chemical composition of wood. It was confirmed that at higher temperature stages of treatment, there was a more pronounced decrease in beech properties compared to those of the birch, which was the most evident in their bending strength and hardness. Our research confirmed that there is no reason to consider birch wood to be of a lesser quality, although it is regarded by foresters as an inferior tree species. After the heat treatment, the wood properties are almost the same as in the case of beech wood.

**Keywords:** heat treatment; beech; birch; thermowood; density; moisture content; mechanical properties; specific strength

## 1. Introduction

Beech (*Fagus sylvatica* L.) ranks among the most important European hardwoods and the most important deciduous species for Czech forestry, occupying 8.3% of total forest area [1]. It plays an important role in industry. In contrast, birch (*Betula pendula* Roth) is regarded as an inferior species in this region and its wood is mostly used as fuel. One of the reasons for this is its low durability and low resistance against biological agents. One of the ways to improve wood properties is thermal treatment, a natural and an environmentally friendly method of wood modification.

In many kinds of processing, wood is exposed to a treatment at elevated temperatures, e.g., drying, pulping, size stabilization, and production of particle- and fiberboard. Due to the fact that temperature influences the physical, structural, and chemical properties of wood, a number of publications are devoted to this topic [2–24], etc. The above mentioned processes are carried out at temperatures that usually do not exceed 200 °C because thermal degradation is undesirable.

Wood heating will lead to different processes that always depend on the heating mode used. It is recognized that hemicelluloses are degraded to a greater extent than other macromolecular components, but the relative stability of cellulose and lignin is much more difficult to determine. As is not the case above, when the wood is heated, heat-labile wood polymeric components (hemicelluloses) begin to decompose, resulting in the production of methanol, acid, and various volatile heterocyclic compounds



Article

# Influence of Site Conditions and Quality of Birch Wood on Its Properties and Utilization after Heat Treatment. Part I—Elastic and Strength Properties, Relationship to Water and Dimensional Stability

Vlastimil Borůvka <sup>1</sup>, Roman Dudík <sup>2</sup>, Aleš Zeidler <sup>1,\*</sup> and Tomáš Holeček <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Wood Processing and Biomaterials, Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences Prague, 16500 Prague, Czech Republic; boruvkav@fd.czu.cz (V.B.); holecekt@fd.czu.cz (T.H.)

<sup>2</sup> Department of Forestry and Wood Economics, Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences Prague, 16500 Prague, Czech Republic; ro.dudik@gmail.com

\* Correspondence: zeidler@fd.czu.cz; Tel: +420-224-383-742

Received: 22 January 2019; Accepted: 20 February 2019; Published: 20 February 2019



**Abstract:** This work deals with the quality of birch (*Betula pendula*) wood from different sites and the impact of heat treatment on it. Two degrees of heat treatment were used, 170 °C and 190 °C. The resulting property values were compared with reference to untreated wood samples. These values were wood density, compressive strength, modulus of elasticity (MOE), bending strength (MOR), impact bending strength (toughness), hardness, swelling, limit of hygroscopicity, moisture content and color change. It was supposed that an increase in heat-treatment temperature could reduce strength properties and, adversely, lead to better shape and dimensional stability, which was confirmed by experiments. It was also shown that the properties of the wood before treatment affected their condition after heat treatment, and that the characteristic values and variability of birch properties from 4 sites, 8 stems totally, were reflected in the properties of the heat-treated wood. Values of static MOR were the exception, where the quality of the input wood was less significant at a higher temperature, and this was even more significant in impact bending strength, where it manifested at a lower temperature degree. Impact bending strength also proved to be significantly negatively affected by heat treatment, about 48% at 170 °C, and up to 67% at 190 °C. On the contrary, the most positive results were the MOE and hardness increases at 170 °C by about 30% and about 21%, respectively, with a decrease in swelling at 190 °C by about 31%. On the basis of color change and other ascertained properties, there is a possibility that, after suitable heat treatment, birch could replace other woods (e.g., beech) for certain specific purposes, particularly in the furniture industry.

**Keywords:** heat treatment; site conditions; birch; thermowood; density; moisture content; dimensional stability; color; mechanical properties

## 1. Introduction

With anticipated climate change, tree species with a wide ecological valence are starting to become the focus of forest management. One of these species is birch (*Betula pendula*). In complex forest management, it is necessary to look at these tree species not only as a substitute from an ecological aspect, but also from a production aspect (i.e., to provide enough material for the processing industry). For the processing industry, not only the quantity of raw materials, but in particular qualitative criteria are important for products with higher added value. There are a lack of studies from the Czech Republic addressing the issue of birch trees in a comprehensive way, including also wood quality.