

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra základního zpracování dřeva

**Reologické charakteristiky
neupraveného
a termicky upraveného dřeva při
dlouhodobém zatížení v ohybu**

Diplomová práce

Autor: Bc. Tereza Berková

Vedoucí práce: Ing. Vlastimil Borůvka, Ph.D.

2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Tereza Berková

Dřevařské inženýrství

Název práce

Reologické charakteristiky neupraveného a termicky upraveného dřeva při dlouhodobém zatížení v ohybu

Název anglicky

Rheological characteristics of untreated and thermally modified wood under long-term loading in bending

Cíle práce

Cílem práce je stanovit a vzájemně porovnat reologické parametry (moduly pružnosti, koeficienty viskozity, relaxační časy) neupraveného a termicky upraveného dřeva. Kromě vykonání dlouhodobých experimentů namáhání v ohybu, za konstantních klimatických podmínek, provést i experimenty krátkodobého zatížení (dynamický modul pružnosti, statický modul pružnosti a mez pevnosti ve statickém ohybu) a to relevantně na paralelních vzorcích vzhledem k dlouhodobým experimentům. K vyhodnocení reologických procesů použít Burgerův model, případně i jiný model, který se ukáže jako výstižnější. Porovnat zjištěné výsledky s dostupnými údaji v odborné literatuře.

Metodika

1. Zpracovat literární rešerši o zkoumané problematice, tj. termické úpravě dřeva (termo-dřevu), reologii (respektive tečení dřeva při dlouhodobém zatížení), dalších hodnocených vlastnostech a o faktorech ovlivňujících jejich proměnlivost.
2. Zajistit reprezentativní vzorky dřeva pro vykonání zkoušek a na relevantním počtu provedení termické úpravy dřeva (2 teplotní stupně).
3. Vykonat všechny plánované krátkodobé a dlouhodobé experimenty.
4. Vyhodnotit vykonané zkoušky (tečení dřeva modelováním, ostatní standardizovanými postupy v normách).
5. Výsledky statisticky zpracovat a interpretovat v textové, tabelární a grafické podobě.

Doporučený rozsah práce

60 – 80 stran

Klíčová slova

reologie, tečení dřeva, termodřevo, dlouhodobé zatížení, ohyb, deformace, modelování

Doporučené zdroje informací

- Dinwoodie, J. M. (2000). Timber: Its nature and behavior, Taylor & Francis New York, USA, 258 s. ISBN 0-419-25550-8.
- Findley, W. N. and coll. (1989). Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials, North-Holland Publishing Company, Amsterdam 1976, 371 s. ISBN: 0-486-66016-8.
- Forest Service US Dept. of Agriculture. (1999). Wood Handbook: Wood as an Engineering Material, Madison, Wisconsin, 508 pp. ISBN: 978-1-59124-170-6.
- Horáček, P. (1998). Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 124 s. ISBN 80-7157-347-7.
- Lakes, R. (2009). Viscoelastic materials, Cambridge University Press, New York, 461 s. ISBN: 978-0-521-88568-3.
- Požgaj, A. a kol. (1997). Štruktúra a vlastnosti dreva, Príroda a.s., Bratislava 1993, 485 s. ISBN 80-07-00600-1.
- Reinprecht, L., Vidholdová, Z. (2008). Termodrevo – Příprava, vlastnosti a aplikácie, TU Zvolen 2008, ISBN: 978-80-228-1920-6.
- Reinprecht, L., Vidholdová, Z. (2011). Termodrevo. Česká republika. ŠMÍRA-PRINT, 2011. 89 s. ISBN: 978-80-87427-05-7.
-

Předběžný termín obhajoby

2015/16 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Vlastimil Borůvka, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra základního zpracování dřeva

Konzultant

Dr.h.c. prof. RNDr. Marian Babiak, CSc.

Elektronicky schváleno dne 31. 3. 2015

Ing. Milan Gaff, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 30. 10. 2015

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 14. 03. 2016

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Reologické charakteristiky neupraveného a termicky upraveného dřeva při dlouhodobém zatížení v ohybu vypracovala samostatně pod vedením Ing. Vlastimila Borůvky, Ph.D. a použila jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědoma, že zveřejněním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze dne 20. 4. 2016

Podpis autora

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala svému vedoucímu práce Ing. Vlastimilu Borůvkovi, PhD. za osobní přístup, vstřícné a odborné vedení, za poskytnutí nezbytných materiálů a za veškerý čas, který mé práci ochotně věnoval. Děkuji také Ing. Tomáši Holečkovi za přípravu vzorků pro měření, poskytnutí výsledků svého výzkumu a konzultace výsledků. Dík patří i celé mé rodině a Tomáši Strakovi za podporu a pochopení.

Abstrakt

Termická úprava patří mezi nejekologičtější metody ochrany dřeva a zvýšení jeho přirozené trvanlivosti při expozici venkovním podmínkám. Zkoumání mechanických vlastností termodřeva otvírá dveře k jeho širšímu využití v praxi.

Dřevo patří mezi viskoelastické materiály a vlivem dlouhotrvajícího zatížení teče. Ve dřevě tak současně vznikají deformace elastické, elastické v čase a plastické.

Tato práce představuje prvotní náhled do problematiky reologie termodřeva a zkoumá jeho chování pod dlouhodobým zatížením v ohybu. Práce porovnává poměry jednotlivých typů deformací vzniklých při 600 h aplikaci zatížení o velikosti 40% meze pevnosti u dřeva neupraveného a termicky modifikovaného na šest různých stupňů (140; 160; 180; 190; 200, 210°C). Měření proběhlo za konstantních okolních podmínek v klimatizační komoře. Pro vyhodnocení rostoucích deformací při konstantním zatížení byl použit Burgerův model.

Z výsledků vyplývá, že nižší stupně úpravy (140 a 160°C) se projevují pozitivně pro konstrukční užití. Takto upravené dřevo teče více než dřevo neupravené. Při vyšších stupních (200 a 210°C) termické úpravy se projevuje snížení mechanických vlastností – následek změn struktury dřeva při termické úpravě.

Z této práce vyplývají podněty pro další výzkum této problematiky. Při dalším zkoumání je třeba dbát na vysokou kvalitu vzorků (bez vad) a zvolit tak hranolovou paralelnost místo podélné. Také zatížení 40% meze pevnosti se ukázalo jako příliš vysoké, vlivem vad může být mez pevnosti na dlouhých vzorcích značně posunuta.

Klíčová slova:

Reologie, viskoelasticita, termodřevo, tečení dřeva, dlouhodobé zatížení, deformace, ohyb, modelování

Abstract

Heat-treatment belongs to the most ecological methods of wood preservation methods and increase of its natural stability in exposition to outdoor conditions. Research of mechanical properties opens new possibilities of thermowood usage in general.

Wood appertains to viscoelastic materials and due to long-term loading creeps. There currently rise both elastic deformation, deformation elastic in time and plastic deformation. Partially there are irreversible changes due to stress even after unloading.

This work presents first insight to the matters of thermowood rheology and inspects its behavior under long-term loading in bending. This paper compares ratio of these three types of deformation in untreated wood and thermally modified wood in seven different temperatures (140; 160; 180; 190; 200, 210°C). The samples were exposed to 600 hours applied loading covering 40% of ultimate stress (modulus of rupture). Test were performed under constant conditions in special creep units in conditioning kiln. Increasing deformation under constant load was analyzed by Burger rheological model.

The results show that samples treated under lower temperatures (140 and 160°C) exhibit greater creep than untreated wood. This result is positive for structural usage of wood. On the other hand the samples treated under higher temperatures levels (200 an 210°C) display deterioration of mechanical properties. This is due to changes in wood structures caused by heat-treatment.

The most important impact of this work goes to future research of this field. Next development has to apply for the best quality of samples and also select rather prismatic parallelism than transversal one. Also application of 40% ultimate stress loading appeared as too high and together with wood defects led to destruction of samples.

Key words:

Rheology, viscoelasticity, termowood, creep of wood, long-term load, strain, bending, modelling

OBSAH

SEZNAM TABULEK, OBRÁZKŮ A GRAFŮ	9
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	12
1. ÚVOD	14
2. CÍLE PRÁCE	15
3. ROZBOR PROBLEMATIKY	16
3.1. MECHANICKÉ VLASTNOSTI DŘEVA	17
3.1.1. REOLOGIE DŘEVA	18
3.1.2. VISKOELASTICKÉ MODELY	18
3.1.3. VLIV OKOLNÍCH PODMÍNEK NA REOLOGII DŘEVA	24
3.1.4. REOLOGICKÉ MODELY	25
3.2.1. VLIV TERMICKÉ ÚPRAVY NA STRUKTURU DŘEVA	33
3.2.2. VLIV TERMICKÉ ÚPRAVY NA VLASTNOSTI DŘEVA	36
3.2.3. TECHNOLOGIE VÝROBY	38
4. METODIKA	39
4.1. TESTOVANÝ MATERIÁL	39
4.2. ZKUŠEBNÍ TĚLESA	40
4.3. METODICKÝ POSTUP	41
4.3.1. KRÁTKODOBÉ TESTOVÁNÍ	42
4.3.2. DLOUHODOBÉ TESTOVÁNÍ	44
4.3.2.1. ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ	45
4.3.2.2. BURGERŮV MODEL	47
5. VÝSLEDKY	49
6. DISKUZE	60
7. ZÁVĚR	64
8. SEZNAM LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ	66
9. SEZNAM PŘÍLOH	70
10. PŘÍLOHY	72

SEZNAM TABULEK, OBRÁZKŮ A GRAFŮ

- Obr. 1** Submikroskopická a mikroskopická stavba dřeva (ROWELL 2013)
- Obr. 2** Lineárně pružné chování při konstantním napětí (GUEDES 2011)
- Obr. 3** Lineárně plastické chování při konstantním napětí (GUEDES 2011)
- Obr. 4** Model St. Venantovy plastické látky – zleva: dvě přitlačené destičky; destička přitlačená na podložku; pracovní diagram plastické látky (Fsv ČVUT 2010).
- Obr. 5** Tečení a relaxace – závislost napětí a deformace na čase (LAKES 2009)
- Obr. 6** Diagram napětí – deformace dřeva (POŽGAJ a kol. 1993, překreslil BORŮVKA 2000)
- Obr. 7** Tečení – závislost deformace na čase při různé velikosti konstantního zatížení (LAKES 2009)
- Obr. 8** Vztah mezi napětím a deformací při krátkodobém a trvalém zatížení (POŽGAJ a kol. 1993, překreslil BORŮVKA 2000)
- Obr. 9** Poměrná deformace (relative creep) v čase při cyklických změnách vlhkosti – změřené (čárkovaně), simulované (plná čára), HT – vzorky sušené při 115°C (30h), LT – sušeno při 70°C (168h) (HONFI et al. 2014)
- Obr. 10** Maxwellův model (GUEDES 2011)
- Obr. 11** Kelvinův (Voigtův) model (GUEDES 2011)
- Obr. 12** Tříprvkový Thomson-Poyntingův model (SOBOTKA 1981)
- Obr. 13** Čtyřprvkový Burgerův (Tuckettův) model (GUEDES 2011)
- Obr. 14** Příklad upraveného Burgerova modelu rozšířeného o mechano-sorpční deformaci a volné sesychání/bobtnání (MOUTEE et al. 2007)
- Obr. 15** Nelineární Burgerův model se dvěma St. Venantovými látkami a jeh tečení (SOBOTKA 1981)
- Obr. 16** Rovnice rozpadu hexózy a pentózy – základní složky hemicelulózy (NAVI et al. 2012)
- Obr. 17** Chemické změny ve dřevě během termické úpravy (NAVI et al. 2012)

Obr. 18 Schéma chemických změn ve dřevě vlivem teploty ve vlhkém prostředí bez faktoru času (NAVI et al. 2012)

Obr. 19 Porovnání anatomické struktury neupravené (vlevo) a termicky modifikované borovice (vpravo). (Finnish ThermoWood Association 2013)

Obr. 20 Graf rovnovážné vlhkosti smrku bez tepelné úpravy a se třemi odlišnými teplotními stupni nebo délkou fáze tepelné úpravy (Finnish ThermoWood Association 2013)

Obr. 21 Změna barvy termodřeva v závislosti na stupni tepelné úpravy (Finnish ThermoWood Association 2013)

Obr. 221 Diagram termické úpravy podle ThermoWoodu (Finnish ThermoWood Association 2013)

Obr. 23 Nářezový diagram pro přípravu vzorků (autor Ing. Tomáš Holeček 2015)

Obr. 24 Příprava vzorků v termokomoře – vlevo detail před úpravou, vpravo pohled na komoru po úpravě (autor Ing. Tomáš Holeček 2015)

Obr. 25 a 26 Měřicí a zkoušecí přístroje Fakopp Ultrasonic Timer a trhací stroj TIRA 50 kN

Obr. 27 Tvar a uložení zkušebního tělesa při tříbodovém ohybu (POŽGAJ 1987)

Obr. 28 Charpyho kladivo, rázová houževnatost dřeva měřena bez vrubu na vzorku (http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/obr/01-06a-charpyho_kivadlove_kladivo.jpg)

Obr. 29 Creepová jednotka pro dlouhodobé testování zatížení v ohybu (autor Ing. Tomáš Holeček 2015)

Obr. 30 Burgerův model (MOUTEE et al. 2005)

Obr. 31 Graf vlivu stupně úpravy na faktor tečení

Obr. 32 Graf vlivu podélně paralelních sérií na faktor tečení

Obr. 33 Graf vyhodnocení naměřených výsledků pomocí Burgerova modelu – neupravený vzorek, série C

Obr. 34 Graf vyhodnocení naměřených výsledků pomocí Burgerova modelu – 210°C, série C

Tab. 1 Základní popisná statistická analýza hustoty neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

Tab. 2 Základní popisná statistická analýza houževnatosti neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

Tab. 3 Základní popisná statistická analýza dynamického modulu pružnosti neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

Tab. 4 Základní popisná statistická analýza statického modulu pružnosti v ohybu neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

Tab. 5 Základní popisná statistická analýza pevnosti v ohybu neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

Tab. 6 Základní popisná statistická analýza elastického modulu pružnosti neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

Tab. 7 Základní popisná statistická analýza viskoelastického modulu pružnosti neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

Tab. 8 Základní popisná statistická analýza viskoelastického koeficientu viskozity neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

Tab. 9 Základní popisná statistická analýza plastického koeficientu viskozity neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

Tab. 10 Základní popisná statistická analýza relaxačního času neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

Tab. 11 Základní popisná statistická analýza faktoru tečení neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

Tab. 12 Základní popisná statistická analýza celkové poměrné deformace neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

Tab. 13 Základní popisná statistická analýza elastické poměrné deformace v % neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

Tab. 14 Základní popisná statistická analýza viskoelastické poměrné deformace v % neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

Tab. 15 Základní popisná statistická analýza plastické poměrné deformace v % neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	Parametr modelové funkce tečení
A	Rázová houževnatost [$\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$]
b	Šířka zkušebního vzorku [mm]
b	Parametr modelové funkce tečení
c	Parametr modelové funkce tečení
Δw	Vlhkostní změna
ε	Poměrná deformace
ε_0	Počáteční poměrná deformace
ε_{cel}	Celková poměrná deformace
ε_{el}	Pružná poměrná deformace
ε_{vel}	Viskoelastická poměrná deformace (pružná v čase)
ε_{pl}	Plastická poměrná deformace
E	Youngův modul pružnosti [MPa]
E_{cel}	Celkový modul pružnosti [MPa]
E_{el}	Elastický modul pružnosti [MPa]
E_{vel}	Viskoelastický modul pružnosti [MPa]
E_{pl}	Plastický modul pružnosti [MPa]
E_{dyn}	Dynamický modul pružnosti [MPa]
E_{stat}	Statický modul pružnosti [MPa]
F_{max}	Maximální zatěžovací síla, vyvolává napětí na mezi pevnosti [N]
h	Výška zkušebního vzorku [mm]
η	Součinitel dynamické viskozity (vnitřního tření) [Nsm^{-2}] [MPa·h]
η_{vel}	Součinitel dynamické viskozity pístu Kelvinova modelu [Nsm^{-2}] [MPa·h]
η_{pl}	Součinitel dynamické viskozity (vnitřního tření) pístu [Nsm^{-2}] [MPa·h]
I	Moment setrvačnosti [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]

J	Převrácená hodnota modulu pružnosti [$\text{m}^2 \text{N}^{-1}$]
K (t)	Faktor tečení
K_w	Vlhkostní reologická konstanta [h^{-1}]
l_0	Vzdálenost podpor [mm]
M	Ohybový moment [Nm]
μ_{ms}	Mechano-sorpční reologická konstanta [MPa]
Q	Přerážecí práce [J]
ρ	Hustota [kg m^{-3}]
σ	Napětí [MPa]
σ_0	Počáteční napětí [MPa]
t	Čas [s]
τ_{vel}	Viskoelastický relaxační čas [h]
τ_w	Vlhkostní relaxační čas [h]
v	Rychlost [m s^{-1}]
w	Absolutní vlhkost dřeva [%]
y	Průhyb neutrální osy [mm]

1. ÚVOD

Termická úprava dřeva v primitivní podobě se na světě objevuje již v pravěku. Začátek jejího komerčního využití se vztahuje k roku 1946, kdy americký chemik Alfred J. Stamm vynalezl postup stabilizace dřeva teplem (tzv. Staybwood) a nastartoval tak rozvoj termické úpravy dřeva na celém světě. (HILL 2006) V dnešní době patří mezi neprogresivnější metody modifikace teplem Thermowood vyrobený podle roku 1998 patentovaného způsobu Finem Perttim Viitanieimim.

Modifikace za působení tepla propůjčuje dřevu vyšší trvanlivost i ve složitých podmínkách venkovního prostředí. Důležitým akcentem je, že takto upravené dřevo je zdravotně nezávadné a při výrobě není třeba použít chemické látky se sporným vlivem na lidský organismus a okolní prostředí. Dřevo si také zachovává své nesporné estetické vlastnosti a získává vůni podobnou karamelu. Vzhledem a trvanlivostí se přibližuje tropickým dřevinám, ale jeho využití není z pohledu ekologie zdaleka tak sporné jako u exotů.

Protiváhou těmto výhodám jsou snížené mechanické vlastnosti. Avšak i ty lze eliminovat snížením potřebné teploty. Zásadní je proto vždy posouzení, jaké vlastnosti jsou nejdůležitější pro plánované použití. Dřevo má velmi široké využití a mechanické vlastnosti nejsou vždy tím hlavním. Termodřevo má např. překvapivě velmi dobré rezonanční vlastnosti a hodí se tedy pro výrobu hudebních nástrojů.

Reologie je oborem mechaniky a zkoumá viskoelastické chování materiálů – tedy schopnost pod mechanickým zatížením vykazovat vlastnosti pružných pevných látek a viskózních kapalin současně. Kromě dřeva je toto chování typické např. pro polymery, kovy, minerály a vlastně všechny tkáně lidského těla. (LAKES 2009).

Využití znalostí o reologii se však neomezuje pouze na poznání jevů v dlouhodobě zatížených konstrukcích. Přináší poznatky i pro pochopení napětí vznikajících při sušení dřeva, dále jeho lisování a ohýbání, termické úpravě, vaření a paření. Při výrobě aglomerovaných materiálů na bázi dřeva se reologie uplatňuje při lisování koberce, ale i při síťování molekul lepidla a dřeva. (MA et al. 2008)

Termodřevo se svými vlastnostmi závislými na stupni termické úpravy a obecně na okolnostech této modifikace představuje z hlediska reologie neprobádanou oblast.

Vzhledem k souvislosti tečení dřeva a stupni zatížení, době vystavení dřeva zatížení, vlastnostem okolního prostředí a vůbec proměnlivosti dřeva ze své podstaty (heterogenita, anizotropie) je nutný rozsáhlý výzkum k pochopení daného jevu. Tato práce by měla otevřít toto téma a naznačit směr výzkumu v této oblasti. Zejména z hlediska dlouhotrvajícího mechanického zatížení.

Pro experimenty byla zvolena jedna z nejčastějších situací, ve kterých se dřevo nachází. Jde o prostý ohyb. Pro poznání základních zákonitostí bylo cílem stanovit co nejjednodušší vnější podmínky – ať už šlo o konstantní klima nebo o konstantní velikost zatížení. V těchto podmínkách lze pro simulaci chování dřeva použít relativně jednoduché matematické modely vhodné pro dřevo. Např. zde použitý Burgerův model, který rozkládá komplexní chování dřeva na jednotlivé prvky. Odděluje pružnou deformaci, která se po odtížení okamžitě vymizí, deformaci pružnou v čase, která na návrat do původního tvaru potřebuje čas a deformaci plastickou, která je trvalá. Jednotlivé deformace model nahrazuje soustavou pružin a hydraulických pístů, které se jako celek chovají podobně jako dřevo při daných podmínkách. Tyto mechanické prvky jsou popsány tzv. reologickými parametry (moduly pružnosti, koeficienty viskozity a relaxačním časem). Z nich lze zjistit poměry jednotlivých deformací v rámci celku.

Právě na toto modelování, které se již s úspěchem používá při zkoumání neupraveného dřeva, bude cílen tento výzkum.

2. CÍLE PRÁCE

Cílem této práce je porovnat reologické chování neupraveného dřeva a dřeva modifikovaného různými stupni termické úpravy. Toto chování je charakterizováno reologickými parametry (moduly pružnosti, relaxačními časy, koeficienty viskozity). Jedná se o prvotní náhled do problematiky reologického chování termodřeva a vzhledem k časové náročnosti reologických experimentů budou výsledkem podíly jednotlivých typů deformací.

První částí jsou experimenty krátkodobého zatížení (statický a dynamický modul pružnosti, statická mez pevnosti v ohybu) provedené standardizovanými normovanými postupy. Výsledky jednotlivých stupňů termické úpravy a neupravených vzorků budou orientačně porovnány.

Dlouhodobá měření reologického chování jsou provedena za konstantních okolních podmínek (v klimatizační místnosti) na creepovém zkušebním zařízení pro dlouhodobé zatěžování dřeva v ohybu a jsou zaměřena na tečení šesti různých stupňů termoúpravy a neupravených vzorků. Dlouhodobě aplikované zatížení odpovídalo 40% krátkodobé statické pevnosti. Výsledky měření jsou vyhodnoceny pomocí Burgerova modelu a vhodného statistického postupu a následně porovnány s výsledky z literatury.

Krátkodobá a dlouhodobá měření byla provedena na podélně paralelních zkušebních vzorcích ze smrku ztepilého.

Závěrečným úkolem je návrh možných zlepšení metodiky pro další výzkum v této oblasti.

3. ROZBOR PROBLEMATIKY

Dřevo, materiál provázející lidstvo od samého začátku jeho existence, může být zkoumáno z mnoha úhlů pohledu. Každý z těchto směrů je neméně důležitý a pro pochopení dřeva klíčový, avšak bez propojení s ostatními jen nedostatečný. Dřevo představuje nejprve živou (běl) a následně odumřelou (jádro, vyztřelé dřevo) hmotu nacházející se v kmenech a větvích dřevin. (LYSÝ, 1954)

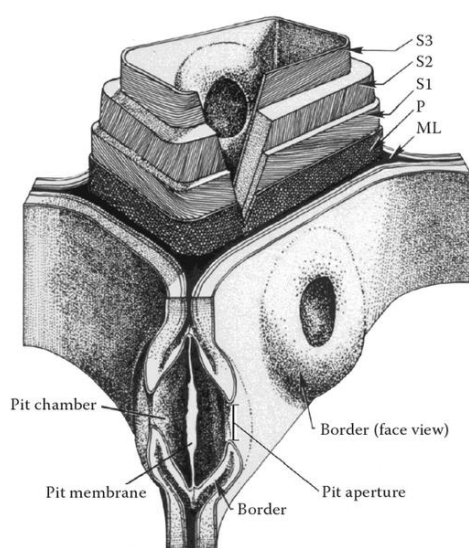
Roční spotřeba dřeva jako stavebního materiálu v posledních letech stoupá a lze předpokládat, že tento trend bude pokračovat vzhledem ke stoupajícím cenám ropy (tedy i plastů) a snižování zásob vyčerpatečných materiálů. Rostoucí důraz na ochranu životního prostředí a udržitelný rozvoj vyzdvihuje dřevo jako jediný obnovitelný stavební materiál. (DINWOODIE 2000)

Z pohledu chemického se jedná o organický materiál složený z uhlíku (49,5%), kyslíku (44,2%), vodíku (6,3%) a dalších prvků. Hlavními složkami dřeva jsou polymery sacharidů (celulóza a hemicelulózy) a aromatické polymery ligninu. Společně svým unikátním uspořádáním tvoří tyto látky buněčné stěny dřevních buněk (submikroskopická stavba). Extraktivní složky jsou tvořeny organickými a anorganickými sloučeninami. (POŽGAJ a kol. 1993).

Biologicky jde o buňky cévních svazků vytvořených činností druhotného dělivého pletiva (kambia) rozrůzněných do rostlinných tkání více druhů a určení, tak aby zabezpečily všechny funkce živého organismu – rozvod vody a živin,

mechanická opora, ukládání zásobních látek a syntéza biochemických látek. Od této úrovně zkoumáme mikroskopickou a následně makroskopickou stavbu dřeva. (ROWELL 2013).

Dřevo je charakteristické právě svou heterogenitou. Jedná se o materiál složený z rozdílných prvků (na všech úrovních zkoumání), které mají vliv na výsledné vlastnosti celku. Jejich uspořádání a četnost se liší se zvoleným směrem. Dřevo je tedy materiál anizotropní. Vysvětlení účinku např. termické úpravy dřeva na chemickou a submikroskopickou stavbu je složitým a komplexním problémem vyžadujícím hlubší výzkum. (COUCEIRO MOURIÑO 2011).



Obr. 1 Submikroskopická a mikroskopická stavba dřeva (ROWELL 2013)

Pórovitost materiálu a jeho chemická struktura zapříčiňuje značnou navlhavost (hygroskopicitu) dřeva – ochotu měnit svoji vlhkost v závislosti na vlhkosti okolního vzduchu. (POŽGAJ a kol. 1993). Dřevo se plní vodou volnou poutanou kapilárními silami v mezibuněčných prostorech a lumenech buněk. (LYSÝ, 1954) Vzdušná vlhkost je pohlcována buněčnými stěnami dřevních buněk, kde je prostřednictvím vodíkových můstků vázána na -OH skupiny rozvětvených makromolekul hemicelulóz. (COUCEIRO MOURIÑO 2011). Vlhkost ve dřevě společně s tepelnými podmínkami okolního prostředí vyvozuje vnitřní napětí, jehož velikost se mění v závislosti na okolním prostředí.

3.1. MECHANICKÉ VLASTNOSTI DŘEVA

Pro praktické využití dřeva jako konstrukčního materiálu jsou zásadní jeho mechanické vlastnosti, které umožňují dřevu vzdorovat spolupůsobení vnějších vlivů

– nejčastěji sorpčnímu, tepelnému a mechanickému namáhání. Relativně dobrá pevnost - schopnost dřeva vzdorovat vnějším a vnitřním silám je u dřeva doplněna poměrně nízkou hmotností. Tato kombinace z něj vytváří neopomenutelný materiál. (POŽGAJ a kol. 1993)

Základní mechanické vlastnosti reprezentuje pružnost, pevnost, plasticita a houževnatost. Druhotně rozlišujeme tyto mechanické vlastnosti: tvrdost, odolnost vůči tečení, trvalému zatížení a únavovému lomu. (POŽGAJ a kol. 1993). Působení vnějších sil vyvolává účinek na základě jejich velikosti a také na základě působení faktoru času (zejména na pevnost v ohybu). (BORŮVKA 2000).

Mechanické namáhání (působení sil na dřevo) v daného druhu (tah, tlak, smyk, ohyb a kroucení) vyvolává ve dřevě napětí – reakci vnitřních sil. Společně s ním přichází i změna tvaru a rozměrů tělesa – tedy vzniká deformace. Každá deformace se skládá až ze tří složek: pružné deformace, deformace pružné v čase a plastické deformace. Liší se od sebe (ne)návratností změny a doby potřebné k projevení tvarové změny a návratu do původního tvaru (tečení, relaxační čas). (POŽGAJ a kol. 1993).

3.1.1. REOLOGIE DŘEVA

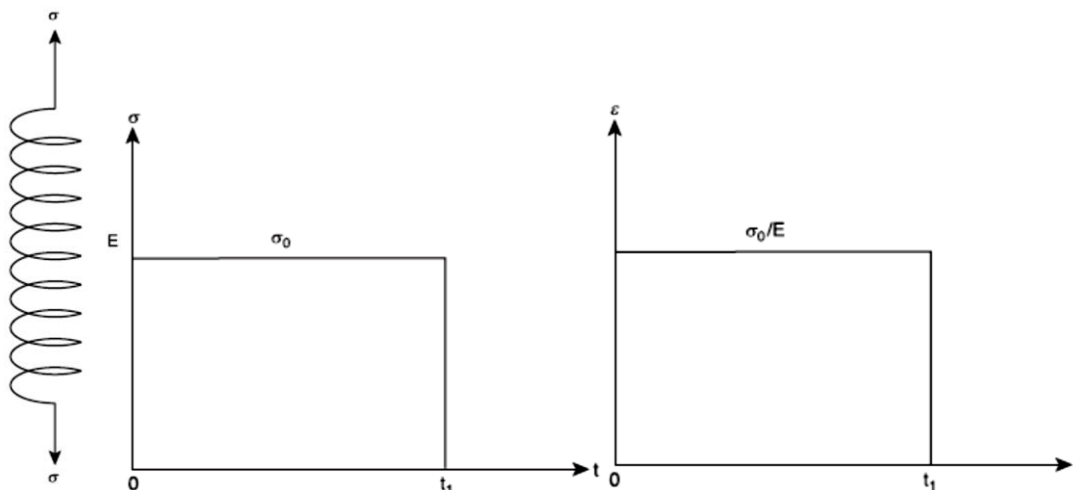
Reologie je vědní podobor mechaniky zkoumající závislost mezi časem, deformací a napětím (tzv. tečení) u tuhých látek. Jak ukazuje POŽGAJ a kol. (1993): „*Výzkumy dřeva v tomto směru potvrdily, že s rostoucím časem zatížení se deformace zvětšují, dřevo teče a jeho pevnost klesá.*“ Tento jev je nejlépe pozorovatelný při porovnání krátkodobého působení zatížení a působení dlouhodobého (odpovídá použití dřeva jako konstrukčního materiálu, při ohýbání, lisování). (POŽGAJ a kol. 1993).

3.1.2. VISKOELASTICKÉ MODELY

Pro zjednodušení a predikci reologického chování viskoelastických materiálů se při dlouhodobém namáhání používají reologické modely, které umožňují tento jev matematicky popsat. Pomáhají určit velikost deformace při určitém namáhání v konkrétním čase a materiálu za určitých okolních podmínek. (POŽGAJ a kol. 1993). Reologické modely jsou složeny z tzv. základních reologických prvků. Patří mezi ně tuhá látka (Euklidova hmota), tekutá kapalina (Pascalova tekutina), pružná látka (Hookova hmota), viskózní kapalina (Newtonova kapalina), tvárná látka (St.

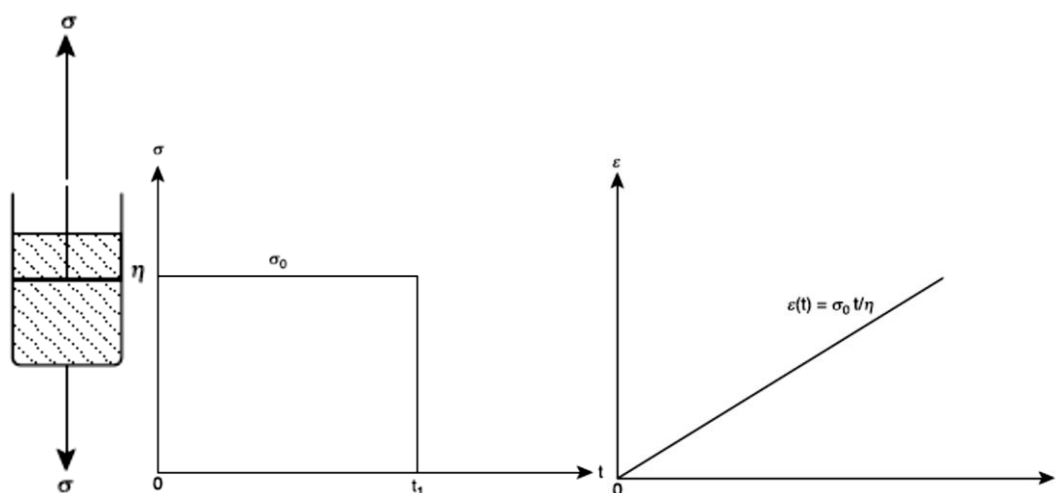
Venantova hmota) a vláčná látka. Jejich chování popisují viskoelastické modely. (Fsv ČVUT 2010). Část z nich bude dále podrobněji popsána.

Krátkodobé působení napětí menších velikostí na běžné konstrukční materiály (lineární model pružného tělesa) je popsáno Hookovým zákonem $\sigma = E \cdot \varepsilon$. Kde je napětí σ úměrné namáhání ε . Hookův zákon pro pružné materiály lze zapsat i jako $\varepsilon = J \cdot \sigma$, kde $J = 1/E$. (LAKES 2009). Po odtížení se pružná látka vrací do původního tvaru. V reologických modelech je reprezentována pružinou. (Fsv ČVUT 2010)



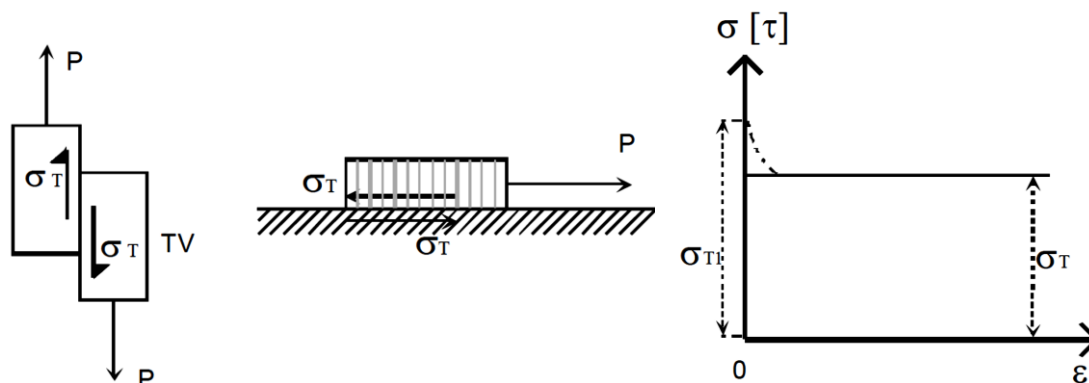
Obr. 2 Lineárně pružné chování při konstantním napětí (GUEDES 2011)

Naproti tomu působení smykového namáhání na viskózní tekutiny (Newtonovu hmotu) je definováno $\sigma = \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}$ (LAKES 2009). Rychlost deformace je tedy přímo úměrně závislá na velikosti napětí. Po odtížení nedojde k žádnému návratu do původního tvaru. Tyto látky jsou v reologii nahrazeny hydraulickým válcem naplněným kapalinou se stálou viskozitou. (Fsv ČVUT 2010)



Obr. 3 Lineárně plastické chování při konstantním napětí (GUEDES 2011)

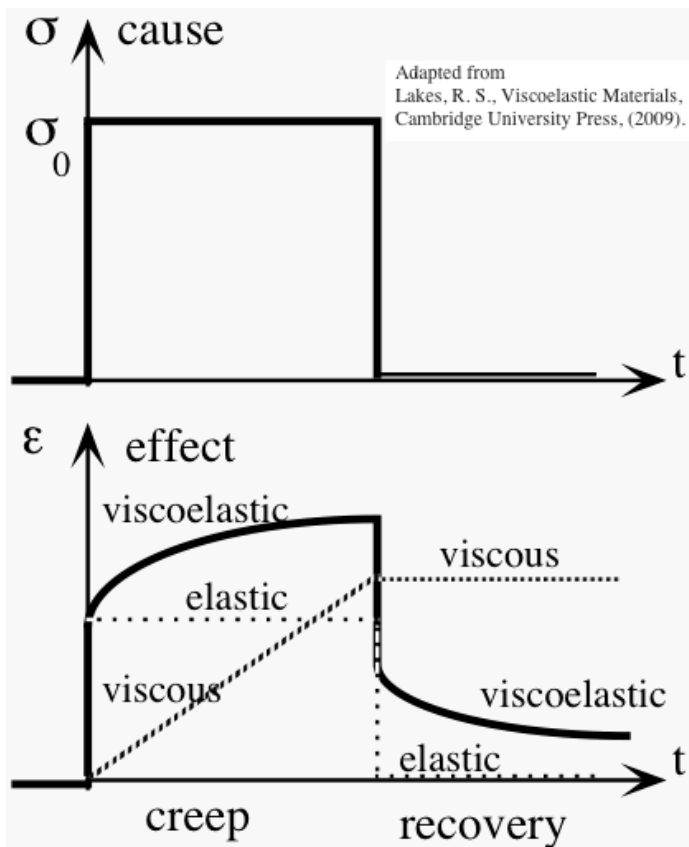
Pro simulaci pevných plastických látek se zavádí konstrukt St. Venantovy plastické látky. Ta je charakteristická tím, že do meze plasticity se chová jako pevná látka a po jejím dosažení jako látka tekutá. Toto chování je vysvětleno tím, že v klidu je tření větší než při pohybu. Nejprve je tedy napětí vyšší a po uvedení do pohybu se stává konstantním. Pro simulaci tohoto jevu se do reologických modelů zavádí buď dvě na sebe přitlačené destičky s podélným třením, nebo destička přitlačená na třecí podložku.



Obr. 4 Model St. Venantovy plastické látky – zleva: dvě přitlačené destičky; destička přitlačená na podložku; pracovní diagram plastické látky (Fsv ČVUT 2010). Dostupné na: <http://departments.fsv.cvut.cz/k135/data/wp-upload/2010/05/mechanika-hornin-6.pdf>

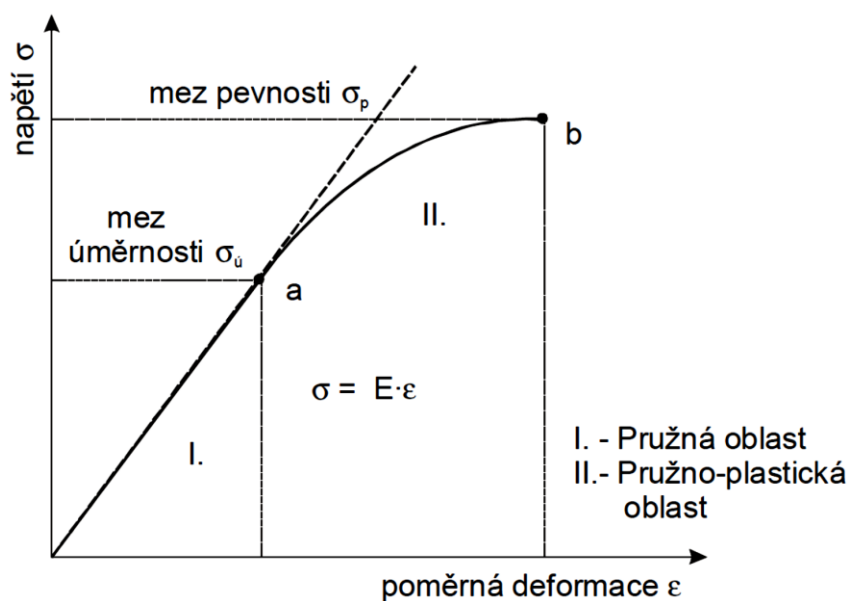
Každá reálná látka (tedy i dřevo) se však od Hookova zákona a výše uvedených modelů nějak odlišuje – např. tím, že naráz vykazuje pružné i viskózní chování. Viskoelastické materiály vykazují právě vztah deformace a napětí závislý na čase (viz Obr. 1). Dřevo je tedy příkladem viskoelastického materiálu. Vlastnosti viskoelastických materiálů:

- **tečení** - pokud je napětí konstantní, pak deformace s časem narůstá. S časem blížícím se nekonečnu, se deformace blíží konečné nenulové limitě. Matematicky ho lze popsat rovnicí tečení: $J(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0}$
- **relaxace** - pokud je deformace konstantní, pak napětí s časem klesá. Matematicky bývá vyjádřena relaxačním modulem: $E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0}$ (LAKES 2009).



Obr. 5 Tečení a relaxace – závislost napětí a deformace na čase (LAKES 2009)

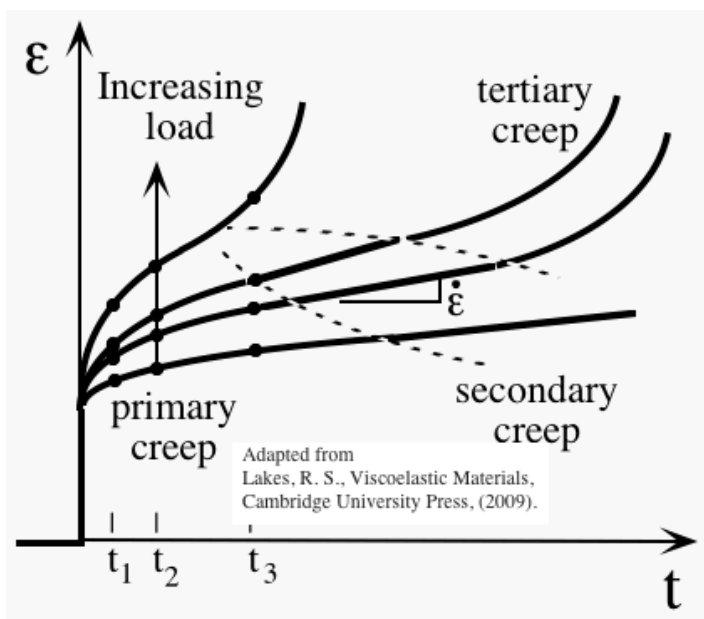
Dřevo při krátkodobém zatížení vykazuje lineární vztah mezi napětím a deformací do meze úměrnosti (viz Obr. 2) a vzniklé deformace jsou pružné. Při překročení meze úměrnosti vznikají kromě pružných deformací i trvalé a pružné v čase (relaxační čas). (POŽGAJ a kol. 1993).



Obr. 6 Diagram napětí – deformace dřeva (POŽGAJ a kol. 1993, překreslil BORŮVKA)

Při dlouhodobém zatížení pod mezí úměrnosti vznikají ve dřevě nejen pružné deformace ale i ty pružné v čase a trvalé (plastické). Velikost deformace v bodě tělesa v určitém čase udává vztah: $\frac{d\sigma}{dt} = 0$. Z obrázku č. 3 vidíme, jak značný je vliv velikosti počátečního napětí a doba zatížení. Nejspodnější křivka ukazuje zatížení pod mezí úměrnosti, ostatní tři se nacházejí nad ní. V čase blízkém 0 dochází k pružné deformaci $\varepsilon_0 = \varepsilon_{el}$, pak se deformace zvětšuje. Konkávní křivka primárního tečení ε_1 (primary creep) zobrazuje tzv. dopružení dřeva složené z deformace plastické (trvalé) a pružné v čase. Po odtížení jsme schopni změřit plastickou část deformace ε_{pl} . Sekundární tečení (secondary creep, oblast ohraničená přerušovanými čarami) signalizuje překročení meze úměrnosti a je charakteristické rozvojem plastických deformací. Tečení je v této fázi úměrné času. Terciární tečení (tertiary creep) předchází zlomu dřeva a zvětšování deformace se tedy výrazně zrychluje. Celková deformace je součtem všech tří složek deformace $\varepsilon_{cel} = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{vel} + \varepsilon_{pl}$. Jejich oddělením a zjištěním jejich velikostí se také zabývají reologické modely.

(POŽGAJ a kol. 1993; LAKES 2009).



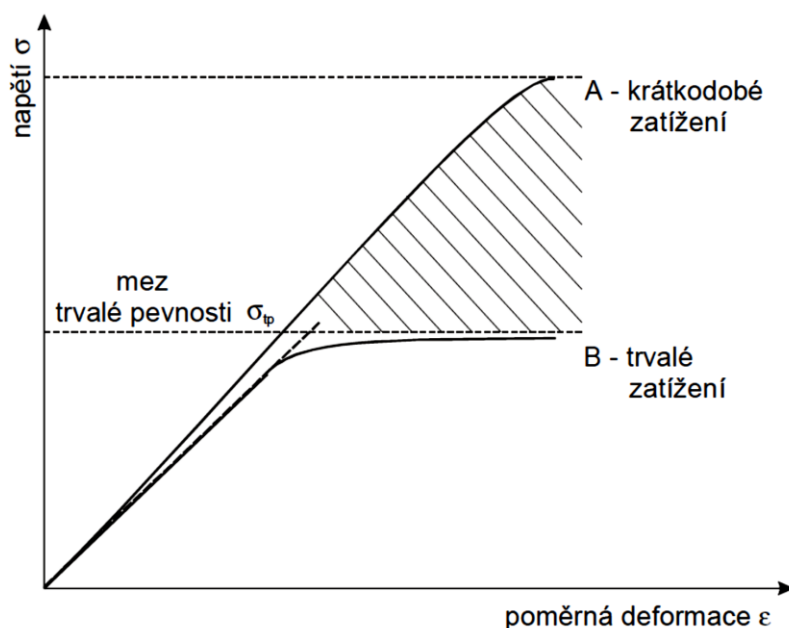
Obr. 7 Tečení – závislost deformace na čase při různé velikosti konstantního zatížení (LAKES 2009)

Z analýzy dopružování a empirickým pozorováním bylo zjištěno, že proces tečení probíhá nejprudčeji během prvních hodin po zatížení. Následně čím dál více zvolňuje. Obdobně se děje i při odtížení – doznívání zatížení je nejsilnější ze začátku.

Poměry jednotlivých deformací po dopružení (při přechodu mezi primárním a sekundárním tečením) jsou přibližně následující: pružná deformace 71%, deformace pružná v čase 12% a deformace plastická 17%. (POŽGAJ a kol. 1993)

V chemické struktuře dřeva se různé druhy deformace projevují odlišně. Pružnou deformaci zapříčiňují pohyby částic v kovalentních vazbách a vodíkových můstcích. Deformace pružná v čase se projevuje pohybem řetězců makromolekul celulózy, jejich chvilkovým spojováním a rozpojováním v místech vodíkových můstků. K trvalým deformacím dochází úplným rozrušením vodíkových můstků, popř. dokonce kovalentních vazeb mezi řetězci a uvnitř. (POŽGAJ a kol. 1993)

Krátkodobým měřením meze pevnosti v ohybu, získáváme i hodnotu meze úměrnosti. Při dlouhodobém zatěžování pod mezí úměrnosti si můžeme být jisti tím, že nedojde k destrukci. Mez úměrnosti bývá tedy nazývána trvalou pevností dřeva. Při dlouhodobém zatěžování nad mezí úměrnosti dochází k ohybu závislému na čase (nelineárním) a postupem času k destrukci. (POŽGAJ a kol. 1993).



Obr. 8 Vztah mezi napětím a deformací při krátkodobém a trvalém zatížení (POŽGAJ a kol. 1993, překreslil BORŮVKA)

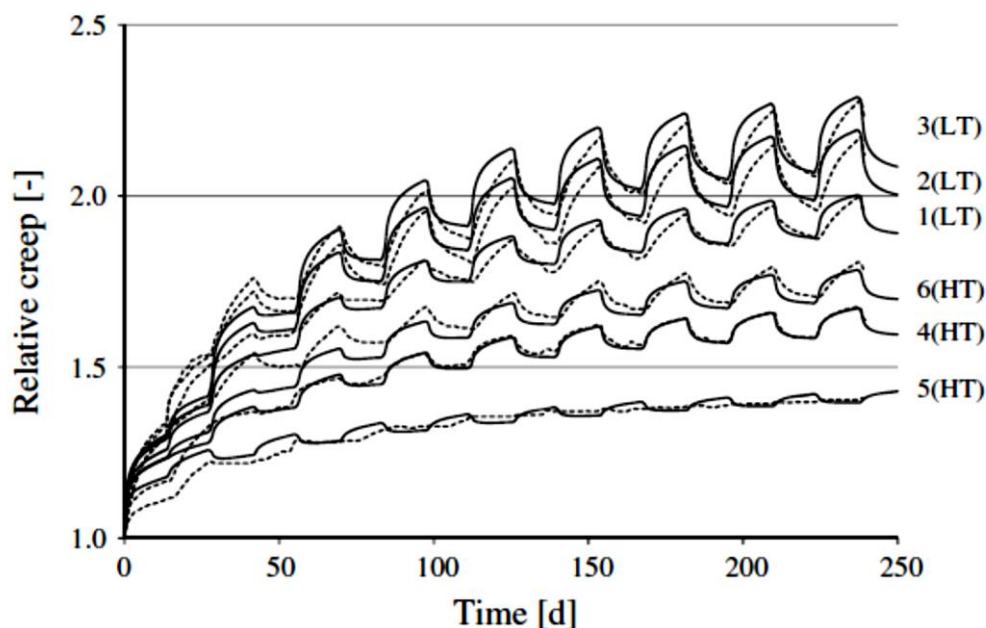
Na pevnost dřeva má velký vliv rychlost zatěžování. Při zkouškách kdy je těleso zatěžováno postupně s konstantní rychlostí po dobu 2-4 minut do destrukce, je změřená pevnost statická. Z toho vyplývá, že při krátkodobém zatěžování je klíčový podíl modulu pružnosti a velikosti napětí. Pro dlouhodobé zatížení musíme ale počítat s trvalou pevností dřeva, která je rovna 50% až 60% meze pevnosti

krátkodobé statické. Jde o napětí, které při nekonečně dlouhém působení na dřevo nevyvolá destrukci. Dále rozlišujeme ještě pevnost dřeva při kmitavém zatížení, kdy namáhání osciluje mezi minimem a maximem (železniční podvaly, konstrukce pod některými stroji). (POŽGAJ a kol. 1993).

3.1.3. VLIV OKOLNÍCH PODMÍNEK NA REOLOGII DŘEVA

Popsané zákonitosti platí při izotermickém prostředí. Změna chemických vazeb při viskoelastickém chování je vyvolána jednak zatížením a také zatížením a difúzním pohybem jednotlivých molekul. Vliv změn teploty na tečení a relaxaci dřeva je tedy způsoben změnou rychlosti a energie při přibližování a oddalování molekul od sebe. Tečení a relaxace jsou tedy funkce závislé na čase a teplotě. Amorfni celulóza vykazuje jednoduché termoreologické chování (graf jejího tečení je posunut doprava), kdežto krystalické celulóze je nutné nejprve dodat aktivační energii, aby se vliv teploty začal projevovat. Z důvodu nerovnoměrného prohřívání dřeva, působí aktivační energie pouze v části průřezu a graf tedy nelze jednoduše popsat. Vliv teploty na reologii dřeva je tedy termoreologicky komplexní. (LAKES 2009)

U dřeva díky jeho sorpčním vlastnostem nelze zanedbat vliv vlhkosti okolního prostředí a zejména její změnu a historii těchto změn. Množství vlhkosti ve dřevě má vliv na mechanické vlastnosti – zejména pevnost a modul pružnosti. Do bodu nasycení vláken tyto mechanické vlastnosti klesající se vzrůstající vlhkostí dřeva. Snížení modulu pružnosti má za následek zvětšení deformací při konstantním zatížení a tedy i větší tečení dřeva. K tečení vyvolanému zatížením se připojuje i tzv. mechano-sorpční – jedná se o vnitřní napětí vyvolané změnami obsahu vlhkosti dřeva pod zatížením. (HONFI et al. 2014)



Obr. 9 Poměrná deformace (relative creep) v čase při cyklických změnách vlhkosti – změřené (čárkovaně), simulované (plná čára), HT – vzorky sušené při 115°C (30h), LT – sušeno při 70°C (168h) (HONFI et al. 2014)

Vzhledem k heterogenitě a anizotropii dřeva hraje důležitou roli nejen velikost zatížení, ale i jeho orientace s ohledem na směr vláken. Vliv času se projevuje nejen v délce trvání zatížení, ale i v zatěžovací (a odtěžovací) historii. (HONFI et al. 2014) Dále záleží i na tom, která část vzorku prochází intenzivnějšími vlhkovými změnami – kontaktní vlhčení tlačené zóny při zkoušce ohybem vede k většímu tečení než při vlhčení zóny tažené. Kontaktní vlhčení vyvolává větší tečení materiálu než při expozici dřeva v rovnoměrně vlhkém prostředí. (ROSZYK 2005)

3.1.4. REOLOGICKÉ MODELY

Makroreologický pohled zkoumá přetváření materiálu jako celku a nevěnuje příliš ohled na jeho skladbu. I přes tento zjednodušující předpoklad se jeví tento přístup vhodným pro analýzu dřeva.

Reologické modely složené z různých kombinací základních viskoelastických modelů (viz 3.1.2). Jsou voleny pro simulaci deformací vznikajících při dlouhodobém zatížení zkoumaných materiálů podle dalších charakteristik těchto látek a podmínek okolního prostředí. Lineární reologické modely se skládají z Hookovy pružné látky a Newtonovy viskózní kapaliny. Jednotlivé prvky v modelech jsou popsány tzv. reologickými parametry. Patří mezi ně moduly pružnosti ($E_1, E_2 \dots$) a součinitele viskozity ($\eta_1, \eta_2 \dots$). (GUEDES 2011)

Zapojením pružiny a pístu za sebe (sériově) vznikne **Maxwellův model**. Velikost sil a vzniklá napětí působící na každé těleso jsou shodná. Sečtením deformací jednotlivých prvků získáváme celkovou deformaci. (ĎOUBAL et. al. 2014).

$$\varepsilon_{cel} = \varepsilon_{pl} + \varepsilon_0 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$$

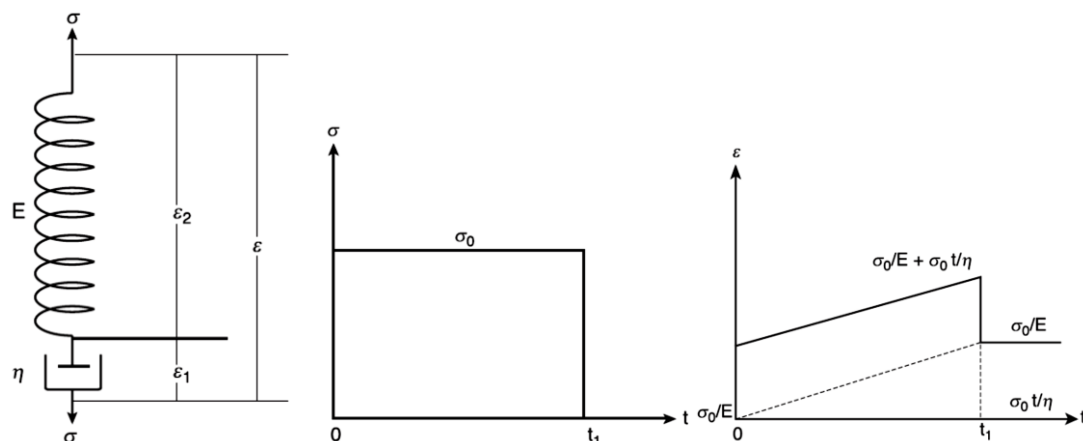
$$\sigma = E \cdot \varepsilon_2$$

$$\sigma = \eta \cdot \frac{d\varepsilon_2}{dt}$$

Po vyjádření ε_1 a ε_2 z rovnic napětí a dosazení do rovnice celkové deformace, po úpravě získáme:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma}{\eta} + \frac{1}{E} \cdot \frac{\sigma}{dt}$$

Po odtížení v čase t_1 dojde k okamžitému návratu pružiny do původní polohy - pružná deformace zmizí, ale plastická reprezentovaná pístem zůstává (viz Obr. 8). Tento model se používá především k modelování relaxace. Mezi nevýhody tohoto modelu patří to, že neukazuje deformace pružné v čase po odtížení a nevhodně zobrazuje primární tečení – jeho rychlost pod konstantním zatížením se s časem nesnižuje. (GUEDES 2011)



Obr. 10 Maxwellův model (GUEDES 2011)

Paralelní zapojení pružiny a pístu nazýváme **Kelvinovým (Voigtovým) modelem**. Současně tak dochází k pohybu pružiny i pístu, způsob jejich deformace je stejný:

$$\varepsilon_{cel} = \varepsilon_{pl} = \varepsilon_0$$

Deformující síla se rozkládá mezi obě tělesa a její velikost je tedy součtem sil působících na jednotlivé prvky. (ĎOUBAL et. al. 2014). Pro napětí platí celku a jednotlivých částí platí:

$$\sigma_1 = E \cdot \varepsilon$$

$$\sigma_2 = \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}$$

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$$

Po dosazení σ_1 a σ_2 do rovnice celkového napětí, po úpravě dostáváme:

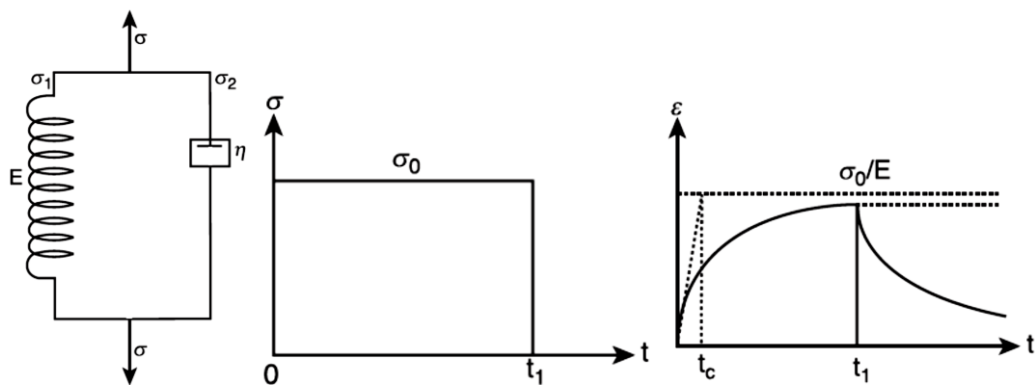
$$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E\varepsilon}{\eta} = \frac{\sigma}{\eta}$$

Pro v čase $t=0$ aplikované trvale působící konstantní zatížení $\sigma = \sigma_0$, celková deformace bude rovna:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \cdot \left(1 - e^{-\frac{Et}{\eta}}\right)$$

Podle výše uvedeného vztahu se deformace se vzrůstajícím časem blíží k asymptotě σ_0/E (viz obr. 9) a zpočátku je veškeré napětí neseno viskózním prvkem (pístem), který se jeho vlivem protahuje a přenáší tak čím dál větší část zatížení na pružinu. Na konci je tedy veškeré zatížení neseno elastickou látkou. Tento jev se nazývá Zpožděná elastická deformace (Delayed elasticity). Po odtížení v čase t_1 dochází k návratu deformace. Tento model se používá především k modelování tečení. Nevýhodou tohoto modelu je, že nezobrazuje časovou závislost deformace na zatěžování nebo odtěžování. Neukazuje také přítomnost trvalé (plastické) deformace po odtížení. (GUEDES 2011).

Nevýhody Maxwellova a Kelvinova modelu ukazují nutnost komplexnějšího řešení problému, které vyústilo k zavedení dalších komplikovanějších modelů vznikajících přiřazením dalších pružin a pístů. (GUEDES 2011). Tyto modely se všechny vyznačují soustředěností jednotlivých parametrů – avšak ve dřevě a dalších viskoelastických látkách jsou jednotlivé parametry rozloženy rovnoměrně. V reálné praxi se také vyskytují setrvačné síly, které klasické modely zanedbávají. (ĎOUBAL et. al. 2014)



Obr. 11 Kelvinův (Voigtův) model (GUEDES 2011)

Sériovým přiřazením pružiny před Kelvinův model získáváme **tříprvkový Poynting-Thomsonův model**. Ustavující rovnici získáme z již známých hodnot Kelvinova a Maxwellova modelu:

$$\sigma = \sigma_1 = \sigma_2 \quad (\text{pro tříprvkový model jako celek})$$

$$\varepsilon_{cel} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (\text{pro tříprvkový model jako celek})$$

$$\dot{\varepsilon}_{cel} = \dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2 \quad (\text{pro Kelvinův model uvnitř tříprvkového modelu, tečka značí derivaci podle času (dt)})$$

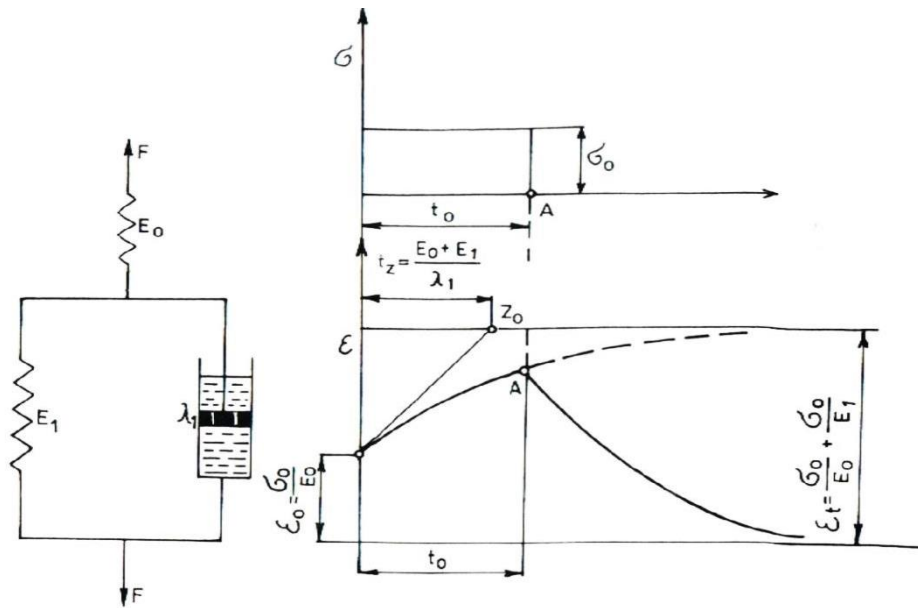
$$\sigma_1 = E \cdot \varepsilon_1 \quad (\text{pro samostatnou pružinu})$$

$$\sigma_2 = E_2 \cdot \varepsilon_2 + \eta_2 \cdot \dot{\varepsilon}_2 \quad (\text{pro Kelvinův model uvnitř tříprvkového modelu})$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E_2} \cdot (\sigma_2 - \eta_2 \cdot \dot{\varepsilon}_2) \quad (\text{deformace Kelvinova modelu})$$

Po dosazení za ε_1 a ε_2 do rovnice celkové deformace můžeme vypočítat:

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



Obr. 12 Tříprvkový Thomson-Poyntingův model (SOBOTKA 1981)

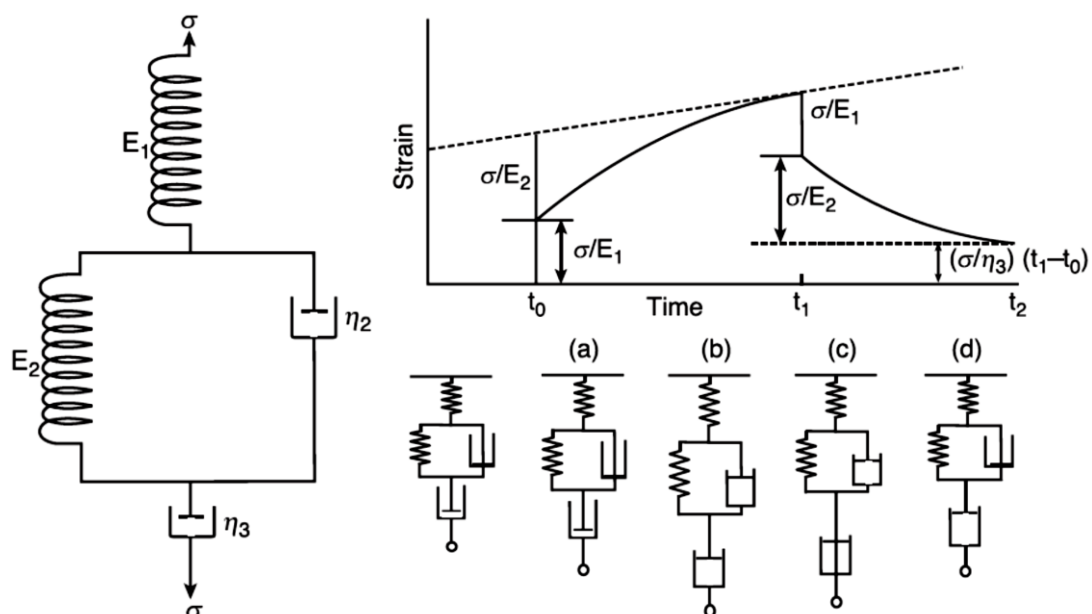
Posledním základním reologickým modelem je **čtyřprvkový Burgerův (Tuckettův) model** pro vyhodnocení tečení při konstantním zatížení. Jde o sériové zapojení Maxwellova a Kelvinova modelu (na pořadí v sériovém zapojení nezáleží). Jeho použití pro dřevo je vhodné při použití za konstantních podmínek okolního prostředí, protože zobrazuje všechny tři druhy deformace (elastická, viskoelastická, plastická). Ideální je pro zkoumání tečení a relaxace lineárních amorfních polymerů (např. termoplasty). V čase t_0 je model vystaven konstantnímu napětí σ . V čase t_0 dochází k okamžité elastické deformaci Maxwellovy pružiny (viz a) na obr. 11). V intervalu $(t_1 - t_0)$ následuje protažení Kelvinovy hmoty a nakonec i plastická deformace Maxwellova pístu (b). Po odtížení v čase t_1 se okamžitě zkrátí pružina z Maxwellova modelu (c) a v intervalu $(t_2 - t_1)$ dochází k relaxaci – navrácení Kelvinovy hmoty do původního stavu. Trvalá deformace reprezentovaná samostatným pístem zůstává (d). Celková deformace Tuckettova modelu je součtem deformací na jednotlivých prvcích (GUEDES 2011):

$$\varepsilon_{cel} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$$

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

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

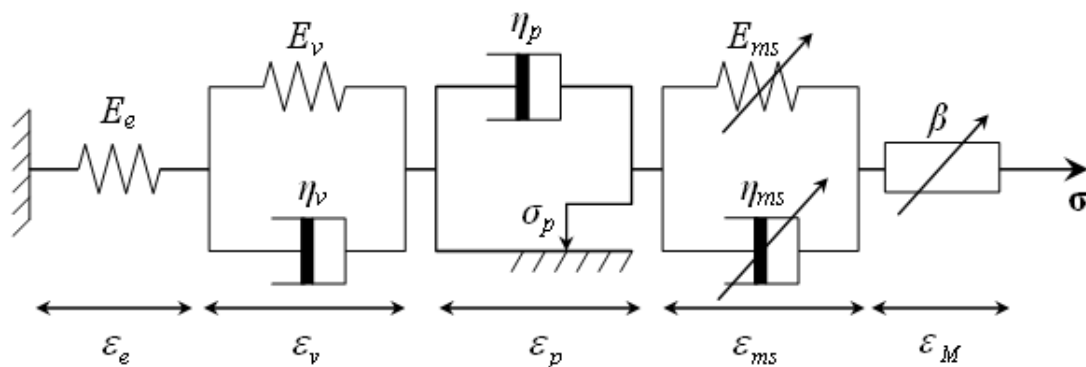
Tento model a jeho praktické využití bude podrobněji rozebrán v kapitole 4.3.2.2.



Obr. 13 Čtyřprvkový Burgerův (Tuckettův model (GUEDES 2011))

Možnosti použití a řazení Maxwellových a Kelvinových jednotek jsou velmi široké. Lze je řadit sériově nebo paralelně v libovolném množství a kombinacích. Princip určení celkové deformace je stále stejný. (GUEDES 2011).

V případě dřeva je klíčové jeho chování při měnící se vlhkosti okolního prostředí, která má nezanedbatelný vliv na velikost deformace. Pro modelování této situace se používají upravené Burgerovy modely doplněné o další prvky citlivé na změnu vlhkosti a simulují tak volné bobtnání, sesychání (bez zatížení) a mechano-sorpční deformace (pod zatížením, tzv. zdržené (frozen) sesychání, (UGOLEV et. al. 2010)). Dřevo pod zatížením reaguje na sesychání a bobtnání více než dřevo nezatížené. (MONTERO et al. 2012). V tomto modelu můžeme vidět i použití St. Venantovy vláčné látky (MOUTEE et al. 2007):



Obr. 14 Příklad upraveného Burgerova modelu rozšířeného o mechano-sorpční deformaci a volné sesychání/bobtnání (MOUTEE et al. 2007)

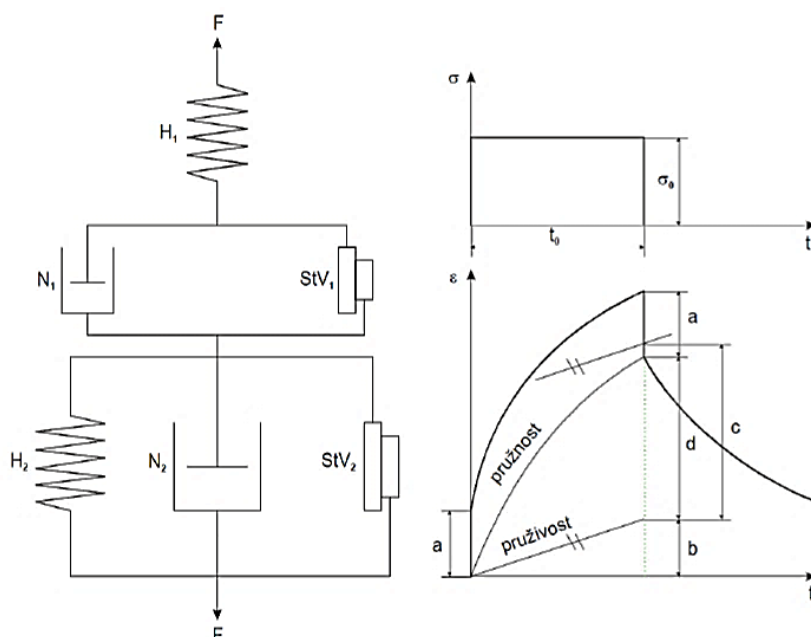
Způsob řešení podobného případu je vidět na jiném upraveném Burgerově modelu pracujícího s předpokladem, že změnu vlhkosti a reakci dřeva na ní, lze považovat za viskoelastickou – konkrétně pružnou v čase popsanou reologickou konstantou $K_w = \frac{1}{\tau_w}$ (převrácená hodnota vlhkostního relaxačního času, doby během které dojde k vytvoření rovnovážného stavu) a mechano-sorpční reologické konstanty μ_{ms} . Celkovou deformaci pak vypočteme z:

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

Vlhkostní změna $\Delta w = w_i - w_{i-1}$

(BORŮVKA 2000)

Uvedené modely jsou platné za předpokladu platnosti Hookova zákona a konstantnosti reologických parametrů. Dále neuvažují historii zatěžování. Pokud jeden z těchto dvou předpokladů neplatí, nejsou tyto modely vhodné. Tyto případy jsou popsány diferenciálními a nejčastěji integrálními tvary rovnic. Příkladem může být Greenův, Rivlinův a Spencerův, Pipkin & Rogersův, Leadermanův, Rabotnovův, Bruellerův, Shaperyův model nebo nelineární Burgerův model se dvěma St. Venantovými látkami (viz Obr. 15). (GUEDES 2011). Avšak existuje i zjednodušený pohled na nekonstantní parametry vycházející pouze z Maxwellova modelu. (SHAO 2004)



Obr. 15 Nelineární Burgerův model se dvěma St. Venantovými látkami a jeh tečení (SOBOTKA 1981)

3.2. TERMICKY MODIFIKOVANÉ DŘEVO

Dřevo má jako každý materiál i méně výhodné vlastnosti pro praktické využití. Jde např. nasákavost, navlhavost a sesychání spojené s rozměrovou nestabilitou a náchylností vůči biokorozi a abiotickým degradačním činitelům. Zvyšování odolnosti vůči působení okolního prostředí je společným cílem lidí po tisíciletí. (REINPRECHT 2008). Již od té doby je známa skutečnost, že opálením povrchu dřeva lze zvýšit jeho trvanlivost a odolnost proti působení povětrnosti a při kontaktu se zemí (Finnish ThermoWood Association 2013).

Vysoké nároky na funkčnost, trvanlivost a stabilitu splňují exotické dřeviny, z našich patří mezi nejodolnější dub a akát. Modifikace otevírají dveře i méně odolným druhům (buk, habr, smrk, jedle, borovice a další). Termická úprava vytváří alternativu ochraně dřeva pomocí chemických látek, nátěrů a ve spojení s konstrukční ochranou představuje nezanedbatelnou možnost užití dřeva.

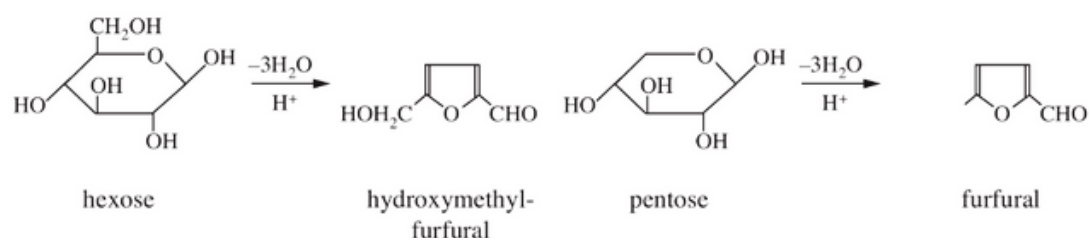
Termická modifikace dřeva je založena na expozici vysokými teplotami od 140°C do 260°C a ochraně parou vedoucí k rozkladu některých makromolekul celulózy a vytvoření nových molekul, které jsou odpuzující nebo jedovaté pro biologické korozivní činitele. Dojde k omezení sorpčních vlastností dřeva a větší rozměrové stabilitě. Tato skutečnost je vyvážena snížením pevnosti a dalších mechanických vlastností dřeva. (REINPRECHT 2008) Doprovodným efektem je snížení hmotnosti nejprve odpařením vody volné a následně odparem těkavých látek vzniklých při tepelné degradaci dřeva. (Forest Service USDA 1999).

Termín Thermowood je pro komerční sféru registrovanou ochrannou známkou Finnish ThermoWood Association. Výzkum této modifikace dřeva začal ve 30. letech 20. století. Dalšími komerčními produkty založené na termické modifikaci dřeva jsou např. Staypack, Staybwood, Lignostone, Lignofol, Jicwood, Jablo, Plato, Le Bois Perdure a Retification. Liší se od sebe konkrétními podmínkami při výrobě, přítomností ochranného plynu (dusík, pára), vlhkostí nebo suchostí procesu, užitím olejů atd. (ESTEVEES et. al. 2009)

Současné trendy v dalším vývoji termodřeva představují snahy zlepšit jeho vlastnosti při kontaktu se zemí a také snaha omezit rozklad makromolekul celulózy a snížit tak pokles mechanických vlastností dřeva. (REINPRECHT 2008)

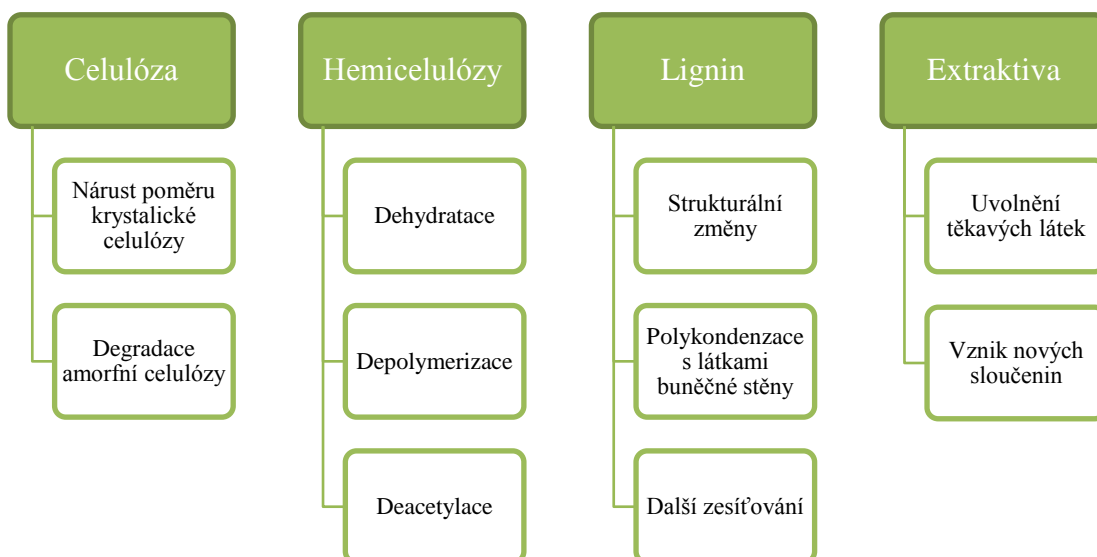
3.2.1. VLIV TERMICKÉ ÚPRAVY NA STRUKTURU DŘEVA

První změny v chemické struktuře dřeva vznikají již při teplotách nad 100°C. K výraznějším změnám dochází v teplotním intervalu 150-170°C, kdy se ve dřevě odehrávají termolytické a termooxidační reakce. V intervalu 150-260°C dochází k částečnému rozkladu hemicelulóz, ligninu a amorfni celulózy (viz Obr. 16). Z hlediska typů chemických reakcí dochází při termoúpravě k štěpení polysacharidů a ligninu, vazeb C-C, C-O-C₄, eliminaci vody, kyseliny octové ze sloučenin, tvorbě volných radikálů a iontů, plynů (CO a CO₂) a reaktivního uhlíku. Extraktivní látky (vosky, tuky, živice, terpeny) mění své skupenství na kapalné a plynné a shromažďují se u povrchu dřeva, popř. se uvolňují ven. (REINPRECHT 2008)



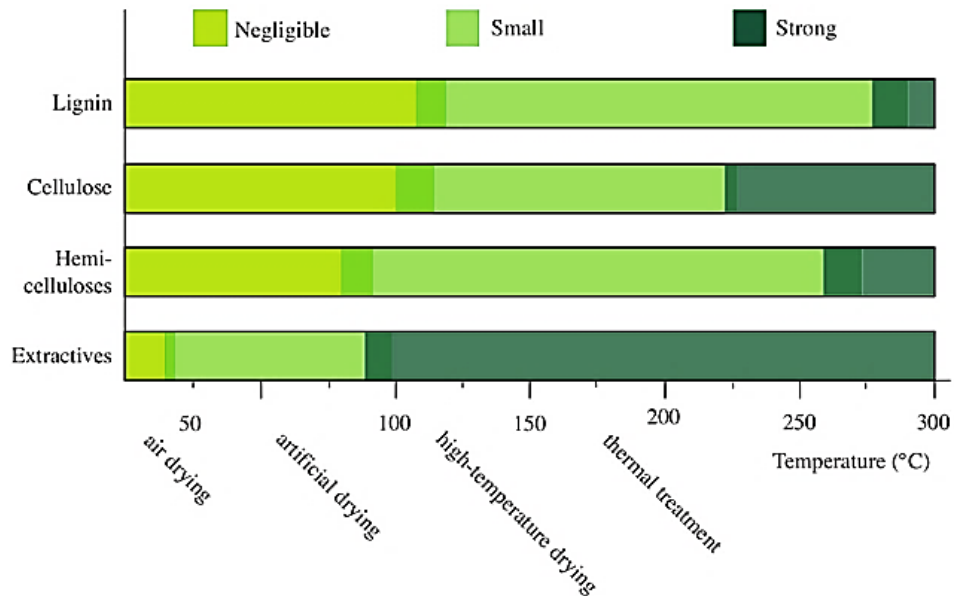
Obr. 16 Rovnice rozpadu hexózy a pentózy – základní složky hemicelulózy (NAVI et al. 2012)

Vlivem vysoké teploty se elektrony z kovalentních vazeb dostávají do vyšších orbitalů. Kovalentní vazby se přerušují a vzniknou volné radikály (homolýza) nebo ionty (heterolýza, při teplotách nad 200°C), které napadají další sloučeniny a následně se slučují v nové molekuly. Produktem těchto reakcí je např. voda, oxid uhličitý CO₂, kyselina mravenčí HCOOH, kyselina octová CH₃COOH, furfural (C₄H₃)CH=O (REINPRECHT 2008), estery karboxylových kyselin a nárůst podílu krystalické celulózy. U ligninu dochází k polykondenzaci s ostatními látkami z buněčné stěny, změně struktury a zesíťování. (NAVI et al. 2012)



Obr. 17 Chemické změny ve dřevě během termické úpravy (NAVI et al. 2012)

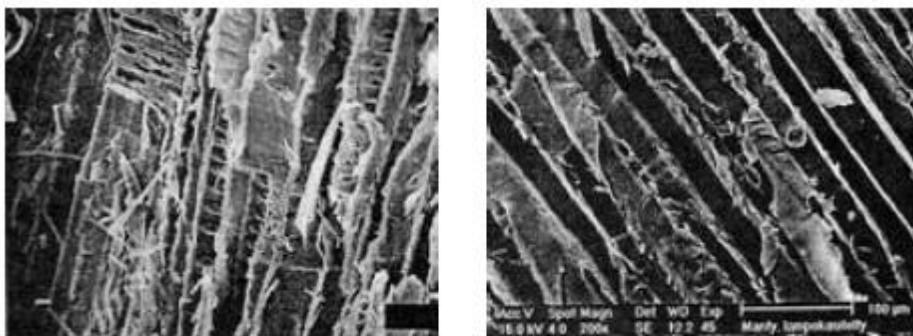
Rozkladem hemicelulóz, které obsahují relativně velké množství karboxylových skupin $-\text{COOH}$, vznikají jednodušší karboxylové kyseliny. Dřevo se tak stává přirozeně kyselým katalytickým materiálem. Dalším katalyzátorem reakcí jsou volné ionty H^+ , OH^- , H_3O^+ vzniklé disociací vody ve dřevě. Voda také umožňuje průběh hydrolytických reakcí. Pokud je vody ve dřevě málo, pak se podílí pouze na hydrolýze a na disociaci reakčních produktů již nezbývá. Efekt vysoké teploty je tedy značně podpořen přítomností vody ve dřevě – je tedy rozdíl, zda termicky upravujeme suché nebo mokré dřevo. (NAVI et al. 2012) Voda ve dřevě působí také jako ochrana před termooxidačními reakcemi. (REINPRECHT 2008) Z pohledu mechanických vlastností, ale vychází termická úprava při 50% relativní vlhkosti okolního prostředí nejlépe. Důvodem této skutečnosti budou nevratné vodíkové můstky (BORREGA et al. 2008)



Obr. 18 Schéma chemických změn ve dřevě vlivem teploty ve vlhkém prostředí bez faktoru času (NAVI et al. 2012)

Tyto termolytické reakce jsou ovlivňovány faktory okolního prostředí – teplotou, tlakem, přístupem O₂, druhem, vlhkostí dřeva, rozměry, tvarem vzorků a délkou expozice. Dřevo listnatých stromů obsahující méně ligninu a více pentóz v hemicelulózách a tedy se modifikují už při nižších teplotách. Míra přítomnosti kyslíku při termoúpravě ovlivňuje rychlost a rozsah termooxidačních reakcí a tím i degradaci všech dřevních složek. (REINPRECHT 2008)

Změna v chemické struktuře je viditelná i na anatomii termicky upraveného dřeva. Projevuje se trhlinami v buněčných stěnách, dvojtečkách a ztenčeninách. Celkově jsou buněčné stěny tenčí, propustnější a křehčí z důvodu slabšího tmelícího efektu hemicelulóz a vazeb mezi ligninem a polysacharidy (hl. střední lamela). Lom je méně vláknitý a více opisuje letokruhy.

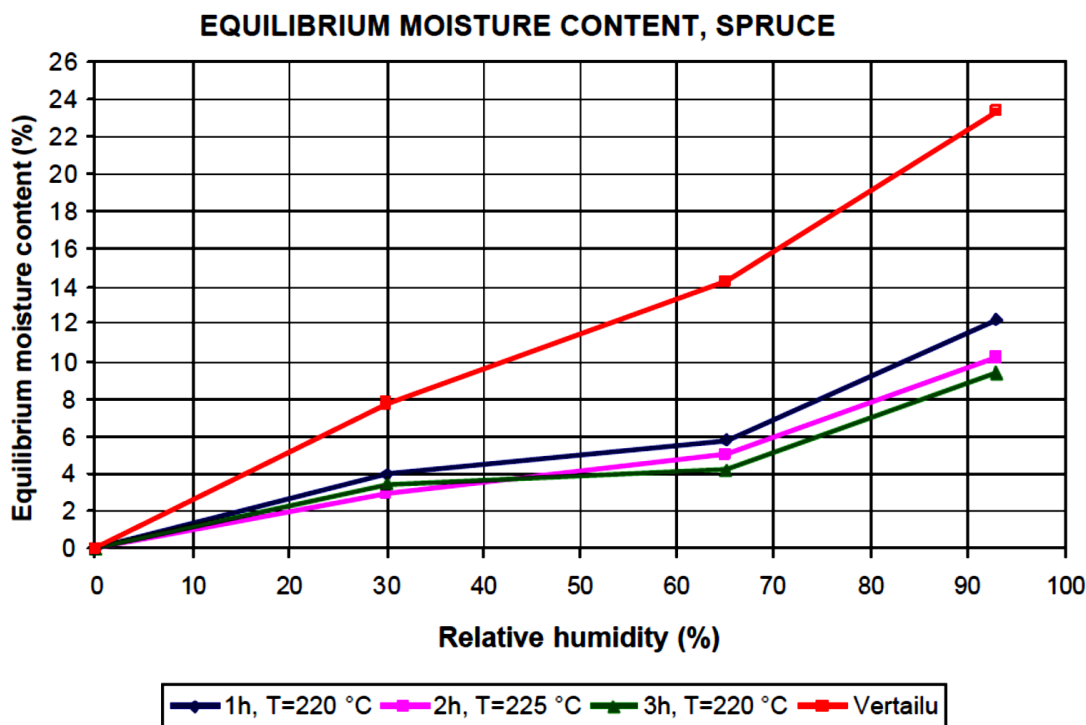


Obr. 19 Porovnání anatomické struktury neupravené (vlevo) a termicky modifikované borovice (vpravo). (Finnish ThermoWood Association 2013)

3.2.2. VLIV TERMICKÉ ÚPRAVY NA VLASTNOSTI DŘEVA

Úbytek hmotnosti vzniklý odparem extraktivních látek a reakčních produktů vzniklých z hemicelulóz se výrazněji projevuje u listnáčů a při výrobě v mokřém prostředí za přístupu vzduchu. Obvykle se jedná o úbytek přibližně 5% (při teplotě do 200°C) a kolem 10% při teplotě nad 200°C. (REINPRECHT 2008) S tím souvisí i snížení hustoty, protože objem se zmenšuje mnohem méně než hmotnost. Rozměry se v některých případech mohou i zvětšit v podélném směru. Tuto změnu způsobuje vnitřní napětí mezi radiálním a tangenciálním směrem. (HILL 2006) Vliv ztráty hmotnosti na mechanické vlastnosti se začíná projevovat ve větší míře při překročení 3% ztráty hmotnosti. (BORREGA et al. 2008)

Na mechanické vlastnosti má vliv výrazná redukce hygroskopicity (až na 50%) a z toho vyplývající vysoká stabilita struktury i rozměrů. Při nejvyšších stupních úpravy dochází až k 20% poklesu pevnosti v ohybu u jehličnanů (až 40% u listnáčů) pro průmyslově vyrobený Thermowood. Podobné snížení vykazuje i pevnost v tahu. U smykové pevnosti a houževnatosti je tento trend ještě výraznější. Statický modul pružnosti v ohybu se snižuje o 5%, dynamický modul pružnosti v ohybu se dokonce zvyšuje a to až o 30-40% při úpravě nižším teplotním stupněm. Podobně se zlepšuje i tvrdost a pevnost v tlaku. Částečný nárůst většiny mechanických vlastností u termické úpravy při nízkých stupních (160-170°C) je způsoben nižším narušením struktury, který vede pouze ke snížení hygroskopicity dřeva. Toto zlepšení je proto signifikantní pouze při porovnávání s neupraveným dřevem za stejných okolních podmínek. (BORŮVKA et al. 2015, REINPRECHT 2008)

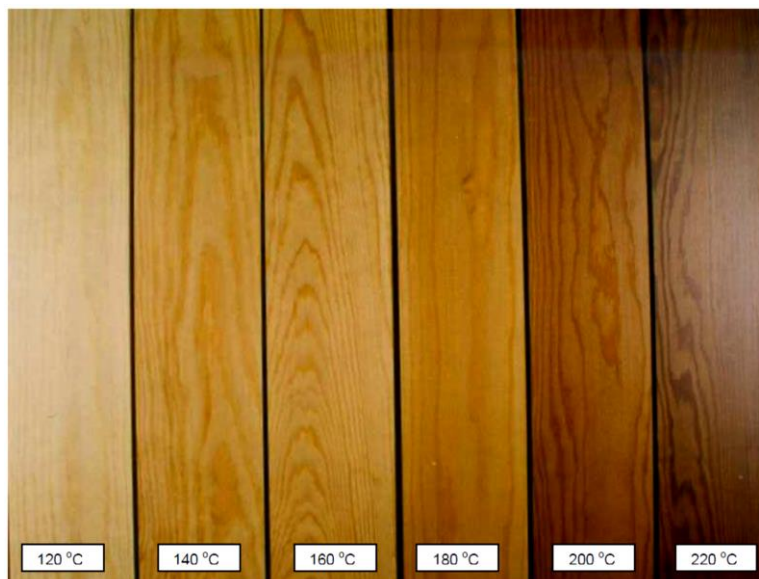


Obr. 20 Graf rovnovážné vlhkosti smrku bez tepelné úpravy a se třemi odlišnými teplotními stupni nebo délkou fáze tepelné úpravy (Finnish ThermoWood Association 2013)

Termicky modifikované dřevo vykazuje lepší tepelně izolační vlastnosti (o 10% až 30%) a vyšší odolnost vůči dřevokazným a dřevozbarvujícím houbám (zejména ligninovým a celulozovým), plísním, hmyzu a mořským živočichům. Je tomu tak díky polykondenzaci a zesíťování ligninu a změna struktury hemicelulóz a přídatných látek, které biologické činitele buď přímo odrazují a zabíjí, nebo jsou pro ně hůře přístupné (např. snížením hygroskopicity). Trvanlivost dřeva se posunuje o jednu až dvě třídy na „trvanlivé“ až „velmi trvanlivé“. Termodřevo je vhodné až do 3. třídy ohrožení. Protipožární odolnost se nemění. (REINPRECHT 2008) Ph termodřeva klesá, je kyselější vlivem vyššího podílu karboxylových kyselin. (Finnish ThermoWood Association 2013).

Z estetického hlediska je patrná výrazná změna v barvě, textuře, lesku a přirozené vůni po karamelu. Zabarvení do tmavožluté až tmavě hnědé souvisí s dobou expozice vysokým teplotám a atmosféře při modifikaci. Tato barevná změna souvisí se vznikem difenylmethanové DPM struktury vzniklé při štěpení ligninu. Druhotně má pak termodřevo lepší vzhled z důvodu absence trhlin vzniklých vysoušením a rozměrovými změnami dřeva. Stejně jako u neupraveného dřeva, ale při působení

povětrnosti bledne a šediví, přesto méně než nemodifikované dřevo. (REINPRECHT 2008)



Obr. 21 Změna barvy termodřeva v závislosti na stupni tepelné úpravy (Finnish ThermoWood Association 2013)

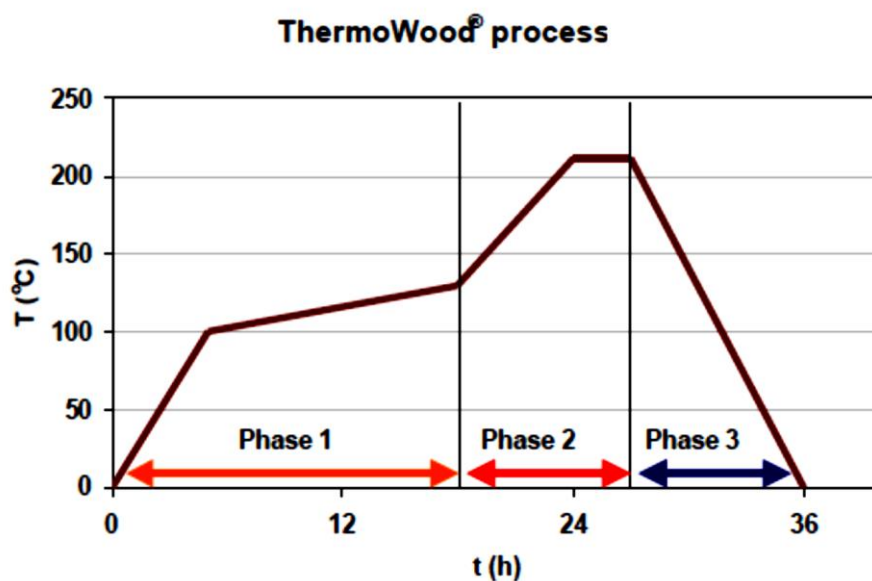
3.2.3. TECHNOLOGIE VÝROBY

Pro účely této práce bude popsán pouze patentovaný způsob ThermoWood (VIITANIEMI et a. 1998), který byl použit pro výrobu těles pro experimenty. Jedná se o úpravu ve vzduchové atmosféře. Proces obsahuje tři hlavní výrobní fáze:

První fáze zahrnuje relativně rychlý vzestup teploty na 100°C a sušení při vysokých teplotách za přítomnosti vodní páry. Pak následuje postupný nárůst teploty na 130°C, přívod páry je zastaven a dřevo je vysokoteplotně vysušeno na téměř 0% vlhkost.

Druhá fáze představuje samotnou termickou úpravu. Teplota v termokomoře dosahuje konečné teploty (pro průmyslovou výrobu obvykle 185°C nebo 215°C) a zůstává na této úrovni 2 až 3 hodiny podle zamýšleného využití termodřeva.

Cílem **třetí fáze** je chlazení a klimatizace (ustálení vlhkosti). Teplota je postupně snižována a při teplotě 80-90°C je v komoře rozprašována voda tvoří mlhu, která má za úkol rovnoměrně vytvořit ve dřevě vlhkost 4-7%. Rovnovážnou vlhkost, kterou dřevo zaujme po vyjmutí z komory. (Finnish ThermoWood Association 2013).



Obr. 22 Diagram termické úpravy podle ThermoWoodu (Finnish ThermoWood Association 2013)

Přesné trvání fází a dynamika teplotních změn je přizpůsobena jednotlivým druhům dřeva a rozměrům upravovaných těles. Termicky lze upravit, jak syrové dřevo, tak dřevo sušené. Při výrobě nejsou použity žádné chemické látky. 80% energie při výrobě je využita na vysokoteplotní sušení a celkově je její spotřeba o 25% vyšší než při běžném sušení dřeva. (Finnish ThermoWood Association 2013)

4. METODIKA

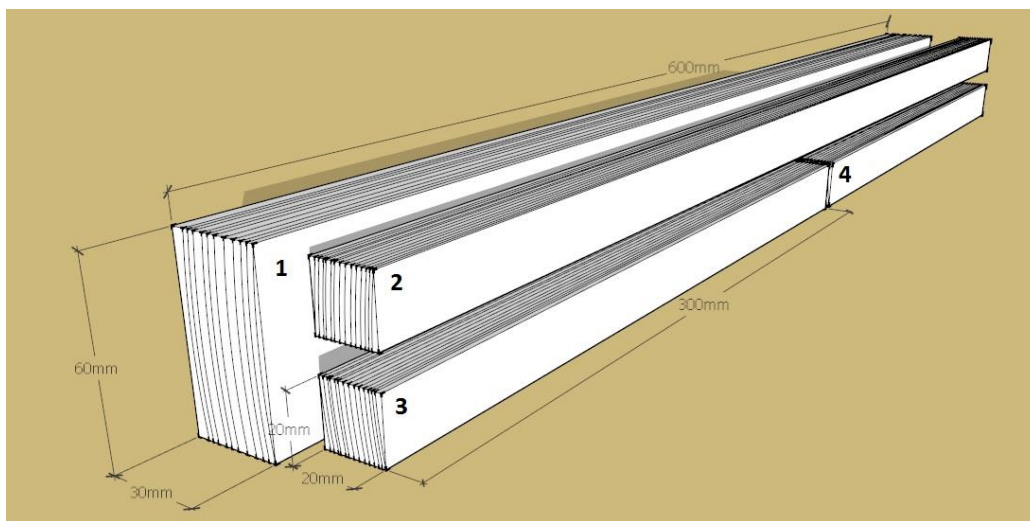
4.1. TESTOVANÝ MATERIÁL

Pro praktická měření byly použity vzorky ze smrku ztepilého (*picea abies*). Jedná se o jednu z nejběžnějších dřevin rostoucích na našem území (až 50% plošného zastoupení všech dřevin). Při zapojení v lesním porostu dorůstá ve 100 letech věku výšky 25-35 m, ale můžeme nalézt velikány až 50 metrové. Při vhodných podmínkách se může dožít až 1000 let. Původně se smrk vyskytoval pouze ve vyšších polohách – nejprve společně s bukem a jedlí, výše už pouze samostatně a na horní hranici lesa bývá nahrazen kosodřevinami. Vlivem lesního hospodaření ho však najdeme i níže většinou v monokulturách. Pěstování smrku je ekonomicky výhodné – dřevo přirůstá relativně rychle a při správné výchově v porostu je bez suků a kvalitní. Smrkové dřevo má široké využití ve stavebnictví, nábytkářství, chemickém a papírenském průmyslu. Je také zdrojem rezonančního dřeva. (POŽGAJ a kol. 1993)

Z hlediska přirozené trvanlivosti je řazen mezi málo trvanlivé dřeviny (třída 4), termická úprava se tedy jeví jako vhodný způsob zvýšení odolnosti smrkového dřeva. Dřevo smrku je typické svou špatnou impregnovatelností způsobenou uzavřením dvojteček v tracheidách při sušení dřeva a přítomností pryskyřice. (GANDELOVÁ a kol. 2009) Termouprava patří mezi nejekologičtější metody ochrany dřeva.

4.2. ZKUŠEBNÍ TĚLESA

Pro výrobu zkušebních těles byl použit smrk ztepilý ze Školního lesního podniku v Kostelci nad Černými lesy při ČZU v Praze. Z kmene byly vymanipulovány podélné výřezy o délce 6 m. Následně byl proveden výběr nejkvalitnějšího kusu z hlediska vad (trhliny, reakční dřevo, suky), odklonu vláken a radiálnosti. Tento výřez byl nakrácen 600 mm dlouhé hranoly, z nichž bylo následně vymanipulováno 5 sekcí o rozměrech 30x60x600 mm. Z každého přířezu byla vyříznuta sada pro jednu tepelnou úpravu, která se skládala vždy ze dvou vzorků pro krátkodobé testování o rozměrech 20x20x300 mm a jednoho vzorku pro dlouhodobou zkoušku 20x20x600 mm. Sady pro různé stupně tepelné úpravy na sebe tedy paralelně navazovaly (viz Obr. 19). Pořadí od kořenů ke koruně: krátký vzorek na zkoušku houževnatosti, krátký vzorek pro testování modulů pružnosti a meze pevnosti a souběžně vzorek delší pro dlouhodobé měření. Před dalším zpracováním byla tělesa klimatizována při standardizovaných podmínkách - v 65% ($\pm 5\%$) relativní vzdušné vlhkosti a teplotě 20°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) v klimatizační komoře Climacell 707 (BMT Medical Technology s.r.o.).



Obr. 23 Nářezový diagram pro přípravu vzorků (autor Ing. Tomáš Holeček 2015)

Jednotlivé třívzorkové sady byly rozříděny do 8 souborů po pěti kusech pro rozdílnou termickou úpravu. Tři sady (dvě rezervní) zůstaly bez tepelného ošetření – referenční vzorky pro testování. Zbylé vzorky byly postupně po jednotlivých souborech tepelně upraveny ve vzdušné atmosféře v laboratorní vysokoteplotní komoře typu KHT (Katres spol. s r.o.) při teplotě 140°C, 160°C, 180°C, 190°C, 200°C a 210°C. Výrobní postup byl proveden podle patentovaného finského způsobu. (VIITANIEMI et a. 1998)



Obr. 24 Příprava vzorků v termokomoře – vlevo detail před úpravou, vpravo pohled na komoru po úpravě (autor Ing. Tomáš Holeček 2015)

4.3. METODICKÝ POSTUP

Před prováděním veškerého měření byly vzorky klimatizovány při standardizovaných podmínkách - v 65% (\pm 5%) relativní vzdušné vlhkosti a teplotě 20°C (\pm 2°C) v klimatizační komoře Climacell 707. Rovnovážná vlhkost neupravených vzorků byla 12%, u vzorků termicky upravených byla vlhkost nižší podle stupně úpravy. Vzorky na krátkodobé i dlouhodobé testování byly nejprve změřeny, zváženy a vypočítána hustota. Dlouhodobé testování probíhalo přímo v klimatizační komoře, aby byly zachovány konstantní okolní podmínky pro všechny vzorky a pro všechny zkoušky. Tento postup byl zvolen proto, aby se simulovala výhodnost použití termowoodu oproti nemodifikovanému dřevu při stejných vnějších podmínkách. Z tohoto důvodu nebyly naměřené hodnoty u termowoodu přepočítávány na jednotnou vlhkost 12%. Veškerá měření probíhala na přístrojích ve vlastnictví Fakulty lesnické a dřevařské ČZU na Katedře základního zpracování dřeva.

4.3.1. KRÁTKODOBÉ TESTOVÁNÍ

Dynamický modul pružnosti byl měřen přístrojem Fakopp Ultrasonic Timer, který měří čas průchodu ultrazvukové vlny dřevem. Signál generovaný elektrickým impulzem je snímán senzorem a na displeji je odečten čas průchodu vlny mezi snímači. Měření bylo provedeno ve vzdálenosti 6; 10; 14; 18 a 22 cm mezi piezoelektrickými snímači. V grafu naměřených hodnot byla provedena lineární spojnice trendu a její směrnice je tzv. korekce – opravný čas odečtený ze všech naměřených hodnot. Tato korekce je nutná z toho důvodu, že nelze zjistit čas průchodu ultrazvukové vlny v nulové vzdálenosti senzorů. (FAKOPP 2009). Ze vzdálenosti mezi senzory a korigovaného času vypočítáme rychlost ultrazvukové vlny. Dynamický modul pružnosti pak vypočteme ze vzorce:

$$E_{dyn} = \rho \cdot v^2$$

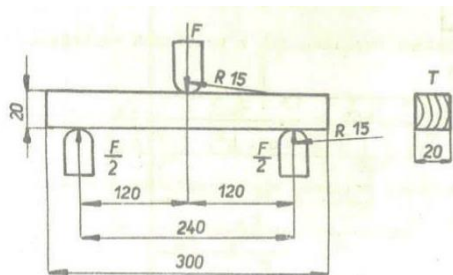
Kde je E_{dyn} [MPa] – dynamický modul pružnosti; ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] – hustota dřeva; v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] – rychlost šíření ultrazvukové vlny. Veškeré veličiny byly měřeny při vlhkosti dřeva 12% - přepočet tedy nebyl nutný.



Obr. 25 a 26 Měřicí a zkoušecí přístroje Fakopp Ultrasonic Timer a trhací stroj TIRA 50 kN

Pevnost v ohybu byla testována na trhacím stroji TIRA 50 kN s rovnoměrně rostoucí zatěžovací silou, působením jediného břemene ve středu podpor. Počítačem zobrazeným výstupem je graf napětí a deformace a hodnoty modulu pružnosti i meze

pevnosti a úměrnosti. Jednalo se tedy o zkoušku tříbodovým ohybem. Schéma zařízení včetně rozměrů viz obrázek:



Obr. 27 Tvar a uložení zkušebního tělesa při tříbodovém ohybu (POŽGAJ 1987)

Jednalo se o ohyb kolmo na vlákna v tangenciálním směru. Rostoucí působící síla vyvozuje v tělese napětí, které při překročení meze pevnosti vede k destrukci vzorku. Velikost napětí lze vypočítat podle vztahu podle normy ČSN 49 0115:

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

Kde je σ [MPa] – napětí v ohybu, mez pevnosti; F_{max} [N] - maximální zatěžovací síla, l_0 [mm] – vzdálenost podpor; b [mm] – šířka zkušebního vzorku; h [mm] – výška zkušebního vzorku. (POŽGAJ 1987)

Modul pružnosti v ohybu vychází z velikosti průhybu (deformace) při působení výše uvedeného napětí. Linii ohybu popisuje diferenciální rovnice:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{E_{stat} \cdot I}$$

Kde je M [N·m] – ohybový moment působící síly; E_{stat} [Pa] – statický modul pružnosti v ohybu; I [kg·m²] – moment setrvačnosti vycházející z tvaru a rozměrů průřezu.

Pro tento způsob uložení na dvě podpory a zatížení ve středu lze statický modul pružnosti v ohybu vypočítat podle vzorce podle ČSN 49 0116:

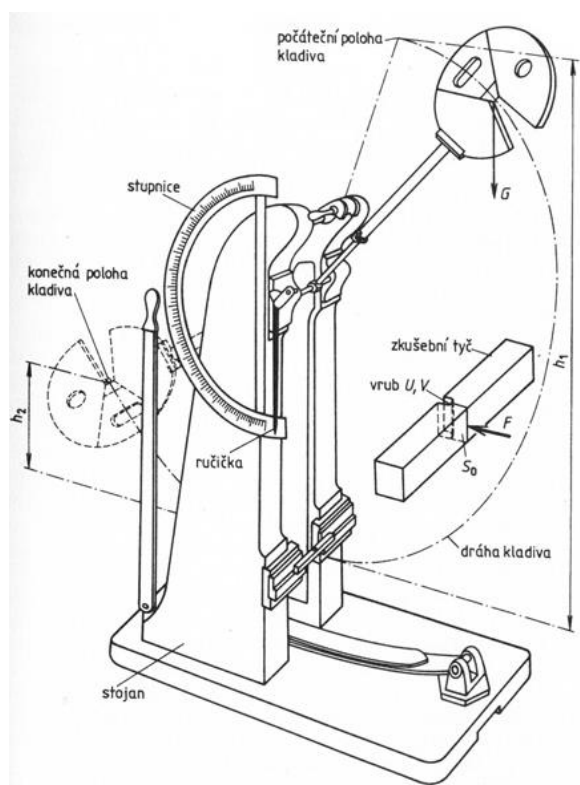
$$E_{stat} = \frac{F_{max} \cdot l_0^3}{48 \cdot I \cdot y} \quad \text{po úpravě} \quad E_{stat} = \frac{1}{4} \cdot \frac{F_{max} \cdot l_0^3}{b \cdot h^3 \cdot y}$$

Kde je E_{stat} [Pa] – statický modul pružnosti v ohybu; F_{max} [N] - maximální zatěžovací síla; l_0 [mm] – vzdálenost podpor; I [kg·m²] – moment setrvačnosti vycházející z tvaru a rozměrů průřezu; y [mm] - průhyb neutrální osy; b [mm] – šířka zkušebního vzorku; h [mm] – výška zkušebního vzorku (POŽGAJ 1987)

Rázová houževnatost v ohybu (přerážecí práce, přerážecí pevnost) je schopnost dřeva odolávat náhlému (rázovému) zatížení. Zkouší se tzv. Charpyho kladivem. Kyvadlo puštěné z určité výšky h_1 naráží na střed radiální plochy vzorku a po jeho přelomení pokračuje ve své trajektorii do výšky h_2 . Její velikost souvisí s energií potřebnou na porušení vzorku. Úhel překyvu lze zjistit na stupnici, která je součástí kladiva a ukazuje velikost vynaložené práce s přesností 1J. Houževnatost pak vypočteme podle:

$$A = \frac{Q}{b \cdot h}$$

Kde je A [$\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$] – rázová houževnatost; Q [J] – přerážecí práce; b [mm] – šířka zkušební tyče; h [mm] – výška zkušební tyče. (POŽGAJ 1987) Zkouška byla provedena podle normy ČSN 49 0117.



Obr. 28 Charpyho kladivo, rázová houževnatost dřeva měřena bez vrubu na vzorku
(http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/obr/01-06a-charpyho_kivadlove_kladivo.jpg)

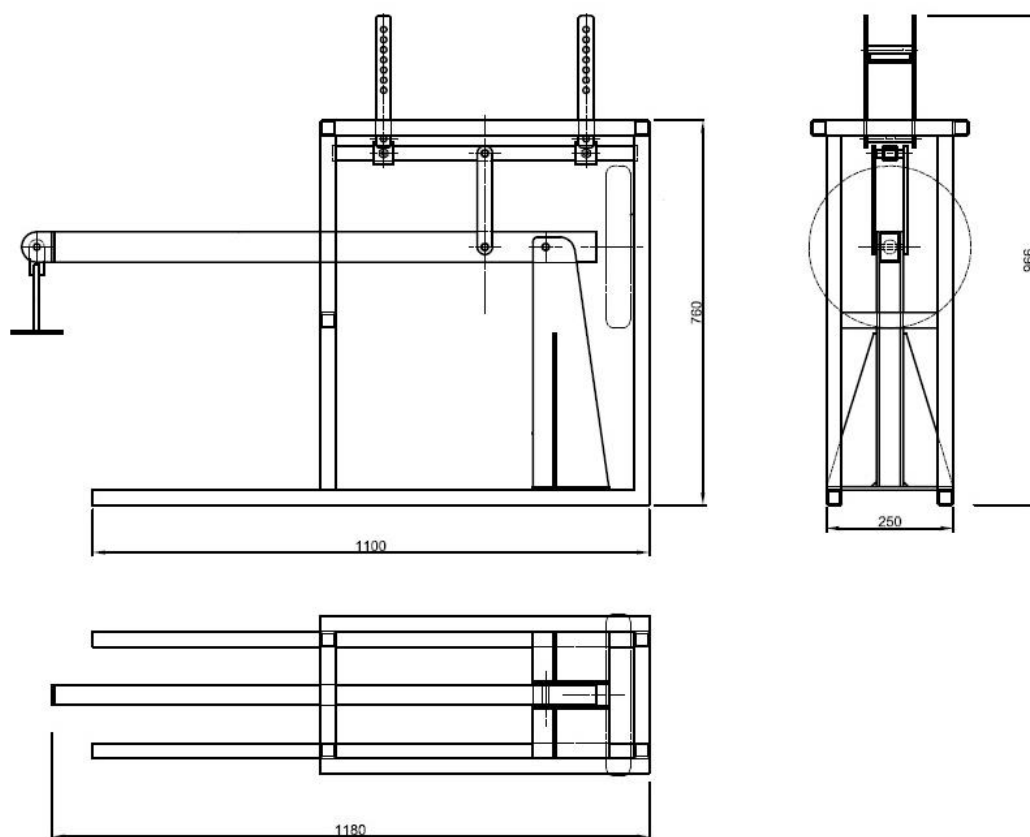
4.3.2. DLOUHODOBÉ TESTOVÁNÍ

Při dlouhodobém testování byly vzorky o rozměrech 20x20x600 mm podrobeny zkoušce čtyřbodovým ohybem kolmo na vlákna v tangenciálním směru po dobu 600 h. Připojený snímač měří velikost deformace (průhyb). K vyhodnocení výsledků

(naměřené deformace a konstantního zatížení) byl použit Burgerův model s konstantními podmínkami a určeny jednotlivé reologické parametry. Měření probíhalo současně na pěti creepových jednotkách v klimatizační komoře.

4.3.2.1. ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ

Podstatou zkušebního zařízení, které bylo vyvinuto na půdě Katedry základního zpracování dřeva FLD ČZU, je jednopákový mechanismus na upínacím rámu, závaží a lineární výsuvný potenciometr snímající průhyb. Snímač deformace, teploty a vlhkosti v komoře jsou napojeny na počítač, který zaznamenává naměřené hodnoty a čas.



Obr. 29 Creepová jednotka pro dlouhodobé testování zatížení v ohybu (autor Ing. Tomáš Holeček 2015.)

Závaží působí na páku, která je napojena na dělicí rameno, které rozkládá sílu na dvě působící síly stejné velikosti. Ty jsou přenášeny přes ploché posuvné třmeny přímo na testovaný vzorek. Vzdálenost oblých posuvných podpor je 250 mm od středu, tedy $l_0 = 500$ mm. Působíště zatěžujících sil na vzorek je ve čtvrtinách vzdáleností od podpor, tedy 125 mm od středu, takže $l_a = \frac{1}{2} l_0 = 250$ mm. Protizávaží vyrovnává vlastní tíhu celé páky. Snímač průhybu je umístěn shora přesně nad

středem vzorku. Výsuvná část potenciometru je v kontaktu se vzorkem a protahuje se společně se zvětšujícím se průhybem. Půdorys a nárys zařízení viz Obr. 20 výše.

Velikost konstantního aplikovaného zatížení byla stanovena na 40% meze pevnosti v ohybu změřené při krátkodobé zkoušce (viz výše) individuálně pro každý vzorek zvlášť. Velikost potřebné působící síly byla vypočtena ze vztahu napětí v ohybu s působišti sil ve čtvrtinách vzdálenosti od podpor:

$$\sigma = \frac{3 \cdot F \cdot l_0}{4 \cdot b \cdot h^2} \quad \text{po vyjádření} \quad F = \frac{4 \cdot \sigma \cdot b \cdot h^2}{3 \cdot l_0}$$

Kde je σ [MPa] – napětí v ohybu, mez pevnosti; F [N] - zatěžovací síla, l_0 [mm] – vzdálenost podpor; b [mm] – šířka zkušební vzorku; h [mm] – výška zkušební vzorku. (POŽGAJ 1987)

Celková hmotnost závaží se pohybovala mezi 5 a 10 kg s přesností 1 g. Výpočet hmotnosti závaží se liší u každé creepové jednotky v závislosti na vyrovnávacím závaží a jeho poloze. Použita byla kilová ocelová závaží a závaží naplněná vodou pro dosažení přesné hmotnosti.

Postup měření:

- Výpočet 40% zatížení z výsledků krátkodobého měření – meze pevnosti pro konkrétní paralelní vzorky
- Výpočet hmotnosti závaží podle konkrétní creepové jednotky a vzorku
- Příprava závaží (přesnost 1g)
- Upnutí 5 vzorků do 5 creepových jednotek a nastavení výsuvné hlavy potenciometru do základní polohy
- Spuštění snímání dat ze senzorů a spuštění počítačového programu Creeples
- Založení závaží na páky creepových jednotek
- Počítačový program zaznamenává hodnoty vlhkosti, teploty, času a velikosti průhybu [mm] v intervalu 1 min během prvního dne měření, následně v intervalu 5 min příštích 6 dní a pak v intervalu 15 min po dobu 26 dní, kdy bylo dosaženo 600h měření.

Vyhodnocení výsledků zahrnuje výpočet modulů pružnosti v ohybu pro každý změřený časový okamžik a odpovídající velikost průhybu:

$$E = \frac{11 \cdot F \cdot l_0^3}{64 \cdot b \cdot h^3 \cdot y_t}$$

Kde je E [MPa] – modul pružnosti v ohybu; F [N] - zatěžovací síla, l_0 [mm] – vzdálenost podpor; b [mm] – šířka zkušební vzorku; h [mm] – výška zkušební vzorku; y_t [mm] – průhyb v konkrétním čase. (POŽGAJ 1987)

Výpočet poměrné deformace v čase vychází z Hookova zákona $\sigma = E \cdot \varepsilon$; po dosazení výše odvozených vztahů, lze poměrnou deformaci vyjádřit takto:

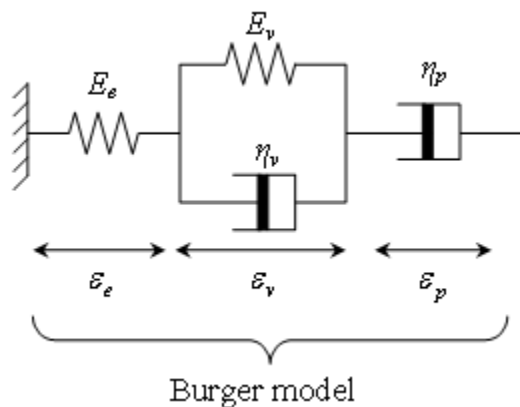
$$\varepsilon = \frac{48 \cdot h \cdot y_t}{11 \cdot l_0^2}$$

Kde je ε – poměrná deformace, l_0 [mm] – vzdálenost podpor; h [mm] – výška zkušební vzorku; y_t [mm] – průhyb v konkrétním čase. (POŽGAJ 1987)

4.3.2.2. BURGERŮV MODEL

Pro vyhodnocení dosažených výsledků a pro modelaci závislosti deformace na čase byl použit klasický Burgerův model. Tento model nám umožňuje body grafu popsat funkcí a určit zastoupení jednotlivých druhů deformací (elastická, elastická v čase, plastická) v celkové deformaci. Burgerův model je tedy vhodný pro popis viskoelastického chování dřeva při dlouhodobém zatížení a je popsán v kapitole Reologické modely 3.1.4 této práce.

Elastickou deformaci ε_{el} v modelu reprezentuje pružina s modulem pružnosti E_{el} , viskoelastickou deformaci ε_{vel} (tedy deformaci pružnou v čase) Kelvinova jednotka s E_{vel} a plastickou deformaci ε_{pl} píst s viskózní kapalinou s E_{pl} . Dalšími reologickými parametry kromě modulů pružnosti jsou součinitele viskozity η_{vel} a η_{pl} . Všechny tyto reologické parametry reaguje na stupeň zatížení, dobu expozice, fyzikální vlastnosti vnějšího prostředí a strukturu dřeva.



Obr. 30 Burgerův model (MOUTEE et al. 2005)

Celkovou deformaci Burgerova modelu lze popsat následující rovnicí odvozenou v kapitole 3.1.4:

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

Vzhledem k tomu, že velikost napětí se nemění, vydělíme rovnicí σ a upravíme ji na základě Hookova zákona podle $\frac{\varepsilon_{cel}}{\sigma} = \frac{1}{E_{cel}}$ na:

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

Vzhledem k tomu, že výstupem měření a následných výpočtů je celková deformace ε_{cel} a tedy i celkový modul pružnosti E_{cel} v každém zaznamenaném momentu a za předpokladu, že první měření okamžitě po založení vykazuje přítomnost pouze elastické deformace ε_{el} , která zůstává po celou dobu stejná (modelem je natažená Maxwellova pružina), můžeme říci, že levou stranu výše uvedené rovnice a dobu zatížení t známe. Můžeme tedy provést substituci dvou proměnných v_1 a v_2 podle:

$$v_1 = t$$

$$v_2 = \frac{1}{E_{cel}} - \frac{1}{E_{el}}$$

Ostatní reologické parametry můžeme nahradit podle následujícího klíče za:

$$E_{vel} = \frac{1}{a}$$

$$\eta_{vel} = \frac{1}{a \cdot b}$$

$$\eta_{pl} = \frac{1}{c}$$

$$\tau_{vel} = \frac{\eta_{vel}}{E_{vel}} = \frac{1}{b}$$

Kde τ_{vel} značí relaxační čas [h], za který dojde k vymizení viskoelastické deformace po odciążení. Po substituci získáme rovnici funkce o dvou neznámých (v_1 a v_2) a třech parametrech (a, b, c):

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

Tuto rovnici řešíme pomocí programu STATISTICA nelineární regresí, která proloží body $[v_1; v_2]$ matematicky popsanou křivku. Z takto zjištěných parametrů funkce zpětně vypočítáme hodnoty jednotlivých reologických parametrů. Následně dopočítáme tzv. faktor tečení. Jedná se o poměr okamžité elastické deformace a konečné celkové v okamžiku ukončení celé dlouhodobé zkoušky:

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

Konečným krokem je výpočet procentuálního zastoupení jednotlivých druhů deformací v celkové. Tyto poměrné deformace v % slouží k hlavnímu porovnávání upravených stupňů termické modifikace a neupravených vzorků. (BORŮVKA 2000)

Pro porovnání výsledků mezi sériemi i mezi jednotlivými stupni úpravy byla využita metoda jednofaktorová ANOVA s hladinou významnosti $p=0,01$. Dále byla využita základní popisná statistika: průměr, medián, minimum, maximum, směrodatná odchylka a variační koeficient.

5. VÝSLEDKY

Výsledky krátkodobých testů budou v této kapitole představeny formou statistických dat. Tabulky č. 1 až 5 popisují naměřené hodnoty fyzikálních a mechanických veličin. Z důvodu nízkého počtu vzorků jsou výsledky spíše orientační pro další rozsáhlejší výzkum. Z důvodu podélné paralelnosti jednotlivých sérií vzorků a nemožnosti se zcela vyhnout odklonu vláken jsou některé série poznamenané destrukcí vzorků při dlouhodobém měření. K tomu došlo buď již při zakládání, nebo po určitém čase tečení. Hodnoty z krátkodobých měření u takto prasklých vzorků byly vyřazeny. Je patrné, že touto skutečností byly zasaženy zvláště některé série – jedná se o ty upravené na 180 a 200°C, které se nacházely v horní části kmene. Překvapivě však poslední sérii upravenou na 190°C to tolik neovlivnilo. Počet vzorků, které vydržely dlouhodobé zatížení, je uveden v tabulce v kolonce „počet měření“.

Tabulky č. 6 až 15 nás seznámí s výsledky dlouhodobé zkoušky ve čtyřbodovém ohybu z pohledu popisné statistiky. Přehled hodnot reologických parametrů obsahují tabulky č. 6 až 10. Podrobnější přehled výsledků je uveden v příloze. Závislosti mezi sériemi a určitými stupni tepelné úpravy byly podrobeny jednofaktorové analýze

rozptylu, které jsou rozebrány v diskuzi. Duncanův test nebyl proveden z důvodu malého množství testovaných vzorků.

Tab. 1 Základní popisná statistická analýza hustoty neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

ρ [g·cm ⁻³]	Hustota						
stupeň úpravy [°C]	0	140	160	180	190	200	210
počet měření	5	5	4	2	4	2	4
průměr	0,425	0,428	0,438	0,464	0,455	0,427	0,418
medián	0,429	0,438	0,412	0,464	0,452	0,427	0,404
minimum	0,402	0,397	0,401	0,399	0,417	0,390	0,396
maximum	0,450	0,462	0,527	0,530	0,497	0,464	0,468
směrodatná odchylka	0,016	0,024	0,052	0,066	0,030	0,037	0,029
variační koeficient v %	3,7	5,6	11,8	14,1	6,5	8,7	7,0

Tab. 2 Základní popisná statistická analýza houževnatosti neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

A [J·cm ⁻²]	Houževnatost – přerážecí práce						
stupeň úpravy [°C]	0	140	160	180	190	200	210
počet měření	5	5	4	2	4	2	4
průměr	5,6	5,3	6,2	7,4	5,0	6,1	4,6
medián	5,8	5,5	5,3	7,4	5,1	6,1	4,6
minimum	4,3	4,2	4,0	6,4	4,2	5,7	3,9
maximum	6,0	6,2	10,3	8,4	5,4	6,6	5,2
směrodatná odchylka	0,6	0,7	2,4	1,0	0,5	0,4	0,6
variační koeficient v %	11,3	13,0	39,4	13,7	9,2	7,2	12,2

Z literatury (REINPRECHT et al. 2008) vyplývá, že houževnatost by měla být termickou úpravou (zvláště při vyšších stupních) poznamenána nejvíce. Z důvodu malého množství vzorků tato skutečnost není patrná.

Tab. 3 Základní popisná statistická analýza dynamického modulu pružnosti neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

E_{dyn} [MPa]	Dynamický modul pružnosti						
stupeň úpravy [°C]	0	140	160	180	190	200	210
počet měření	5	5	4	2	4	2	4
průměr	1,45E+04	1,91E+04	1,92E+04	2,07E+04	1,75E+04	2,06E+04	1,70E+04
medián	1,45E+04	1,82E+04	1,89E+04	2,07E+04	1,69E+04	2,06E+04	1,69E+04
minimum	1,42E+04	1,52E+04	1,74E+04	1,44E+04	1,54E+04	1,91E+04	1,60E+04
maximum	1,47E+04	2,22E+04	2,16E+04	2,70E+04	2,08E+04	2,21E+04	1,82E+04
směrodatná odchylka	1,86E+02	2,72E+03	1,67E+03	6,31E+03	2,28E+03	1,53E+03	7,93E+02
variační koeficient v %	1,3	14,3	8,7	30,5	13,0	7,4	4,7

Tab. 4 Základní popisná statistická analýza statického modulu pružnosti v ohybu neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

E_{stat} [MPa]	Statický modul pružnosti v ohybu						
stupeň úpravy [°C]	0	140	160	180	190	200	210
počet měření	5	5	4	2	4	2	4
průměr	9,14E+03	9,06E+03	8,23E+03	1,26E+04	9,46E+03	1,01E+04	6,42E+03
medián	9,16E+03	8,51E+03	8,27E+03	1,26E+04	8,93E+03	1,01E+04	5,61E+03
minimum	8,49E+03	8,17E+03	6,16E+03	1,03E+04	8,83E+03	8,48E+03	5,41E+03
maximum	9,63E+03	1,01E+04	1,02E+04	1,50E+04	1,12E+04	1,18E+04	9,04E+03
směrodatná odchylka	4,50E+02	8,21E+02	1,46E+03	2,38E+03	9,79E+02	1,64E+03	1,52E+03
variační koeficient v %	4,9	9,1	17,7	18,8	10,3	16,2	23,6

Porovnáním tabulek č. 3; 4 a 6 zjistíme, že dynamický modul pružnosti dosahuje nejvyšších hodnot a termickou úpravou se ještě zvyšuje. U termické úpravy je patrné, že nejvyšších hodnot dosahuje při úpravě při 180°C a pak následuje klesání. Za dynamickým modulem následuje elastický modul získaný z Burgerova modelu. Zde ale termická úprava představuje mírné zhoršení oproti neupraveným vzorkům. Nejnižších hodnot dosahuje statický modul pružnosti změřený podle normy. Tady se ukazuje pro změnu mírné zlepšení na straně termické úpravy. K podobným závěrům dochází s douglaskou (BORŮVKA et al. 2015). Přesnější porovnání není možné

z důvodu příliš malého počtu vzorků. I tyto závěry by bylo lepší podpořit analýzou rozptylu.

Tab. 5 Základní popisná statistická analýza pevnosti v ohybu neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

σ [MPa]	Pevnost v ohybu						
stupeň úpravy [°C]	0	140	160	180	190	200	210
počet měření	5	5	4	2	4	2	4
průměr	75,6	82,0	78,9	91,5	76,3	86,8	57,6
medián	75,0	77,1	80,5	91,5	73,4	86,8	52,3
minimum	71,7	74,9	66,1	70,2	71,5	70,8	49,2
maximum	80,1	92,8	88,6	112,8	86,8	102,7	76,5
směrodatná odchylka	2,7	7,2	8,9	21,3	6,1	16,0	11,0
variační koeficient v %	3,6	8,8	11,3	23,3	8,1	18,4	19,2

Zde rovněž jako u hustoty a houževnatosti není viditelná žádná velká změna mezi termicky upravenými a neupravenými vzorky. Výraznější propad je viditelný až při úpravě při 210°C. Skutečnost, že u 180 a 200°C je vidět dokonce značný nárůst pevnosti, může být důvodem, proč u těchto sérií selhalo větší množství dlouhodobých zkoušek a došlo k destrukci. Na delších vzorcích se odklon vláken a lokální variabilita projevuje více na celku.

Tabulky 6 až 10 ilustrují statistický rozsah reologických parametrů při **dlouhodobé zkoušce** ohybem. Další tabulky se věnují výsledkům faktoru tečení, celkové deformaci a jednotlivým typům deformací v %, tabulky s jejich numerickými hodnotami jsou v příloze této práce. Zde pak následují grafy analýzy rozptylu zkoumající, zda se statisticky významně mění faktor tečení mezi jednotlivými paralelními sériemi A, B, C, D a E a dále mezi jednotlivými stupni úpravy. Jednofaktorová ANOVA ostatních reologických parametrů je k dispozici v příloze. Výsledkovou část uzavírá graf funkce Burgerova modelu. Tabulka k jeho vyhodnocení je v příloze. Stejně jako ostatní grafy série podélně paralelních vzorků C, u které jediné nedošlo k destrukci žádného vzorku a jsou tak vidět rozdíly mezi úpravami.

Tab. 6 Základní popisná statistická analýza elastického modulu pružnosti neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

E_{el} [MPa]	Elastický modul pružnosti						
stupeň úpravy [°C]	0	140	160	180	190	200	210
počet měření	5	5	4	2	4	2	4
průměr	1,29E+04	1,18E+04	9,94E+03	1,32E+04	1,17E+04	1,32E+04	1,14E+04
medián	1,27E+04	1,20E+04	9,91E+03	1,32E+04	1,14E+04	1,32E+04	1,12E+04
minimum	1,21E+04	1,07E+04	8,29E+03	1,21E+04	1,07E+04	1,26E+04	1,04E+04
maximum	1,45E+04	1,26E+04	1,17E+04	1,43E+04	1,35E+04	1,37E+04	1,28E+04
směrodatná odchylka	7,99E+02	6,71E+02	1,31E+03	1,13E+03	1,06E+03	5,73E+02	1,03E+03
variační koeficient v %	6,2	5,7	13,1	8,6	9,0	4,4	9,0

Následující přehled reologických parametrů v tabulkách 6 až 10 vykazuje především na malý počet změřených vzorků. Z vysokého variačního koeficientu zejména u viskoelastického modulu pružnosti a koeficientu viskozity je vidět velký vliv proměnlivosti.

Tab. 7 Základní popisná statistická analýza viskoelastického modulu pružnosti neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

E_{vel} [MPa]	Viskoelastický modul pružnosti						
stupeň úpravy [°C]	0	140	160	180	190	200	210
počet měření	5	5	4	2	4	2	4
průměr	2,72E+05	6,76E+04	3,44E+04	1,74E+05	7,74E+04	1,18E+05	8,59E+04
medián	2,75E+05	8,00E+04	3,64E+04	1,74E+05	7,90E+04	1,18E+05	8,58E+04
minimum	1,76E+05	4,22E+04	2,28E+04	1,58E+05	6,33E+04	8,40E+04	7,30E+04
maximum	3,89E+05	8,40E+04	4,18E+04	1,91E+05	8,85E+04	1,53E+05	9,90E+04
směrodatná odchylka	6,96E+04	1,79E+04	7,56E+03	1,67E+04	1,01E+04	3,43E+04	9,20E+03
variační koeficient v %	25,6	26,4	22,0	9,6	13,1	29,0	10,7

Tab. 8 Základní popisná statistická analýza viskoelastického koeficientu viskozity neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

η_{vel} [MPa·h]	Viskoelastický koeficient viskozity						
stupeň úpravy [°C]	0	140	160	180	190	200	210
počet měření	5	5	4	2	4	2	4
průměr	1,36E+06	1,16E+06	9,91E+05	3,39E+06	3,44E+06	4,89E+06	1,46E+06
medián	1,32E+06	8,42E+05	9,55E+05	3,39E+06	3,15E+06	4,89E+06	1,65E+06
minimum	5,33E+05	6,32E+05	5,25E+05	1,57E+06	2,50E+06	2,99E+06	7,23E+05
maximum	2,25E+06	2,39E+06	1,53E+06	5,22E+06	4,97E+06	6,80E+06	1,82E+06
směrodatná odchylka	5,99E+05	6,37E+05	3,68E+05	1,83E+06	9,31E+05	1,90E+06	4,47E+05
variační koeficient v %	43,9	54,7	37,2	53,8	27,0	38,9	30,6

Tab. 9 Základní popisná statistická analýza plastického koeficientu viskozity neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

η_{pl} [MPa·h]	plastický koeficient viskozity						
stupeň úpravy [°C]	0	140	160	180	190	200	210
počet měření	5	5	4	2	4	2	4
průměr	1,47E+08	4,62E+07	3,44E+07	7,01E+07	5,15E+07	4,20E+07	7,93E+07
medián	1,48E+08	5,59E+07	3,98E+07	7,01E+07	4,84E+07	4,20E+07	8,50E+07
minimum	1,17E+08	2,62E+07	1,71E+07	6,33E+07	4,42E+07	3,11E+07	5,35E+07
maximum	1,74E+08	5,88E+07	4,10E+07	7,69E+07	6,49E+07	5,29E+07	9,35E+07
směrodatná odchylka	1,94E+07	1,42E+07	1,00E+07	6,82E+06	7,96E+06	1,09E+07	1,57E+07
variační koeficient v %	13,2	30,8	29,2	9,7	15,4	26,0	19,8

Tab. 10 Základní popisná statistická analýza relaxačního času neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

τ [h]	relaxační čas						
stupeň úpravy [°C]	0	140	160	180	190	200	210
počet měření	5	5	4	2	4	2	4
průměr	4,9	16,5	29,1	18,6	44,1	50,2	16,8
medián	4,8	15,0	25,0	18,6	42,6	50,2	18,0
minimum	3,0	9,8	19,7	9,9	34,9	19,6	9,9
maximum	7,4	28,5	46,9	27,3	56,2	80,9	21,3
směrodatná odchylka	1,6	6,3	10,6	8,7	8,0	30,6	4,7
variační koeficient v %	32,8	38,1	36,3	46,6	18,1	61,0	28,1

Z hodnot relaxačního času jasně vyplývá rozdíl mezi neupraveným a tepelně modifikovaným dřevem. Další závěry je nutné nechat na dalších měřeních.

Tab. 11 Základní popisná statistická analýza faktoru tečení neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

K (t)	Faktor tečení						
stupeň úpravy [°C]	0	140	160	180	190	200	210
počet měření	5	5	4	2	4	2	4
průměr	1,10	1,26	1,47	1,17	1,28	1,30	1,22
medián	1,09	1,26	1,41	1,17	1,27	1,30	1,21
minimum	1,08	1,12	1,36	1,17	1,26	1,27	1,19
maximum	1,13	1,41	1,68	1,17	1,31	1,34	1,25
směrodatná odchylka	0,02	0,09	0,13	0,00	0,02	0,03	0,03
variační koeficient v %	1,6	7,2	8,5	0,2	1,5	2,7	2,1

Obecně lze říci, že největší tečení je patrné v 160°C úpravy. Tento fakt se projevuje jak ve faktoru tečení (tab. 11), tak i ve velikosti celkové poměrné deformace (tab. 12). Pak tato schopnost klesá společně s vyšší degradací struktury dřeva při vyšších teplotách termoupravy. Tečení neupravených vzorků se pohybuje mezi těmito dvěma hodnotami.

Tab. 12 Základní popisná statistická analýza celkové poměrné deformace neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

ϵ_{cel} [-]	Celková poměrná deformace						
stupeň úpravy [°C]	0	140	160	180	190	200	210
počet měření	5	5	4	2	4	2	4
průměr	2,59E-03	3,84E-03	4,82E-03	3,23E-03	3,38E-03	3,48E-03	2,47E-03
medián	2,67E-03	3,29E-03	4,41E-03	3,23E-03	3,36E-03	3,48E-03	2,46E-03
minimum	2,29E-03	3,12E-03	4,01E-03	2,73E-03	2,71E-03	2,91E-03	1,90E-03
maximum	2,80E-03	4,97E-03	6,46E-03	3,74E-03	4,07E-03	4,06E-03	3,05E-03
směrodatná odchylka	1,98E-04	8,20E-04	9,61E-04	5,05E-04	5,00E-04	5,75E-04	4,07E-04
variační koeficient v %	7,6	21,3	19,9	15,6	14,8	16,5	16,5

Tab. 13 Základní popisná statistická analýza elastické poměrné deformace v % neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

ϵ_{el} [%]	Elastická poměrná deformace						
stupeň úpravy [°C]	0	140	160	180	190	200	210
počet měření	5	5	4	2	4	2	4
průměr	90,6	74,2	67,4	84,8	78,0	75,6	81,8
medián	90,4	77,9	69,5	84,8	78,2	75,6	82,2
minimum	88,4	66,8	58,0	84,3	75,0	73,8	79,4
maximum	92,9	78,8	72,7	85,3	80,6	77,4	83,4
směrodatná odchylka	1,5	5,1	5,6	0,5	2,0	1,8	1,7
variační koeficient v %	1,6	6,9	8,3	0,6	2,6	2,4	2,1

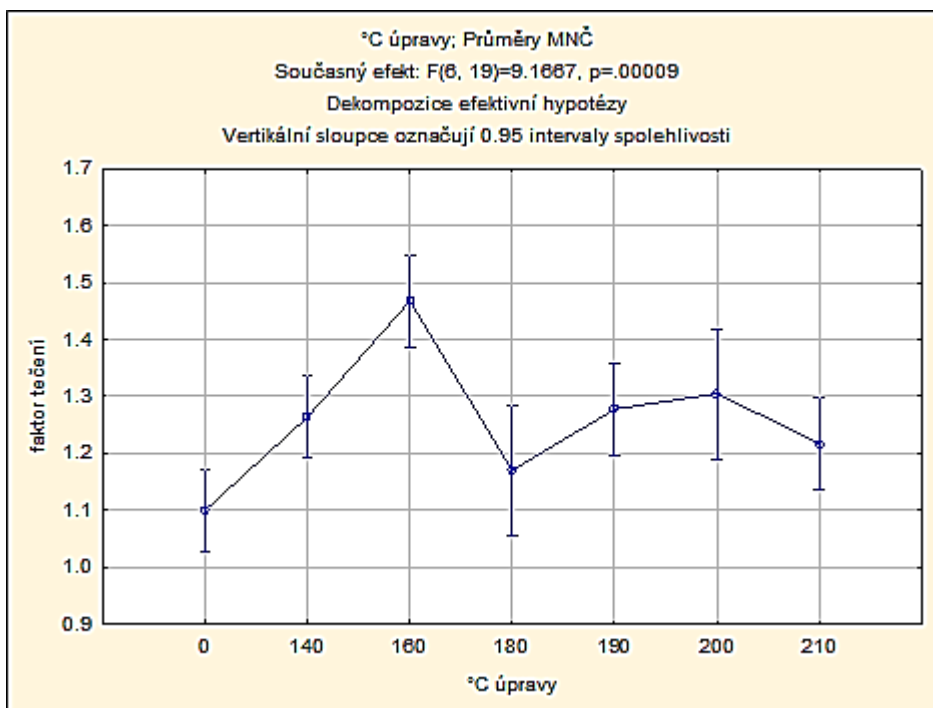
Tab. 14 Základní popisná statistická analýza viskoelastické poměrné deformace v % neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

ϵ_{vel} [%]	Viskoelastická poměrná deformace						
stupeň úpravy [°C]	0	140	160	180	190	200	210
počet měření	5	5	4	2	4	2	4
průměr	4,6	13,6	19,9	6,4	11,3	9,1	10,9
medián	4,7	12,0	18,9	6,4	11,7	9,1	10,7
minimum	3,0	11,4	18,5	6,3	8,2	6,6	10,1
maximum	6,1	16,9	23,3	6,5	13,5	11,6	12,1
směrodatná odchylka	1,0	2,3	2,0	0,1	1,9	2,5	0,9
variační koeficient v %	21,8	17,1	10,1	1,7	17,2	27,1	7,8

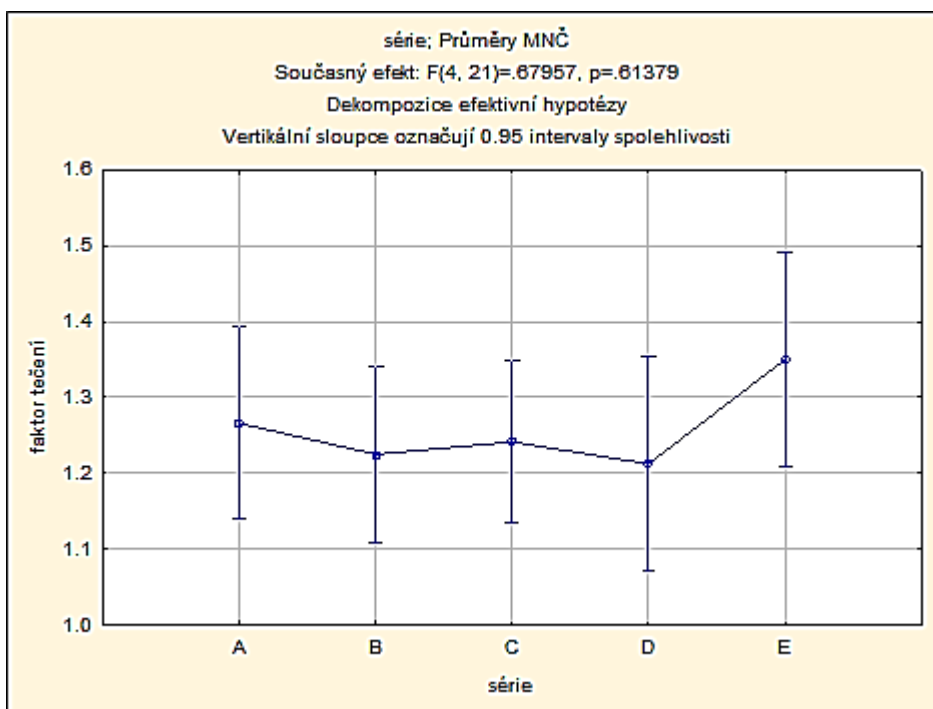
Tab. 15 Základní popisná statistická analýza plastické poměrné deformace v % neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

ε_{pl} [%]	Plastická poměrná deformace						
stupeň úpravy [°C]	0	140	160	180	190	200	210
počet měření	5	5	4	2	4	2	4
průměr	4,8	12,2	12,7	8,8	10,8	15,3	7,3
medián	4,9	10,1	11,7	8,8	10,8	15,3	6,7
minimum	4,1	9,8	8,8	8,1	9,8	11,0	6,4
maximum	5,5	16,3	18,7	9,4	11,6	19,6	9,3
směrodatná odchylka	0,5	2,8	3,7	0,6	0,7	4,3	1,2
variační koeficient v %	9,9	22,8	28,7	7,3	6,4	27,9	16,0

Z procentuálního zastoupení jednotlivých deformací (tab. 13-15) lze těžko stanovit jednoznačný trend z důvodu malého počtu vzorků. Z grafů 31 a 32 lze ale říci, že mezi sériemi A, B, C, D, E nejsou statisticky významné rozdíly. Mezi jednotlivými stupni úpravy ale bezpochyby jsou statisticky významné rozdíly ($p < 0,01$) – a to, i když z nich nelze určit jasný trend. Lze ale předpokládat, že s rostoucím časem bude růst podíl viskoelastické deformaci na úkor elastické i plastické. Z analýz rozptylu a předpokladů závislosti jednotlivých druhů deformací na stupni úpravy (viz příloha) lze usoudit, že podíl viskoelastické deformace z počátku (od neupravených vzorků) roste, dosahuje nevyšší hodnoty kolem 160°C až 170°C a klesá. Přičemž minimum se nachází u tepelné úpravy při 210°C. Oproti tomu podíl elastické deformace se stoupajícím stupněm úpravy klesá, minima dosahuje ve 160-170°C a pak opět roste, ale maxima hodnot neupravených vzorků již nedosáhne. Podíl plastické deformace nejprve roste (opět maximum při 160-170°C), ale pak klesá a uvolňuje tak místo viskoelastické deformaci.



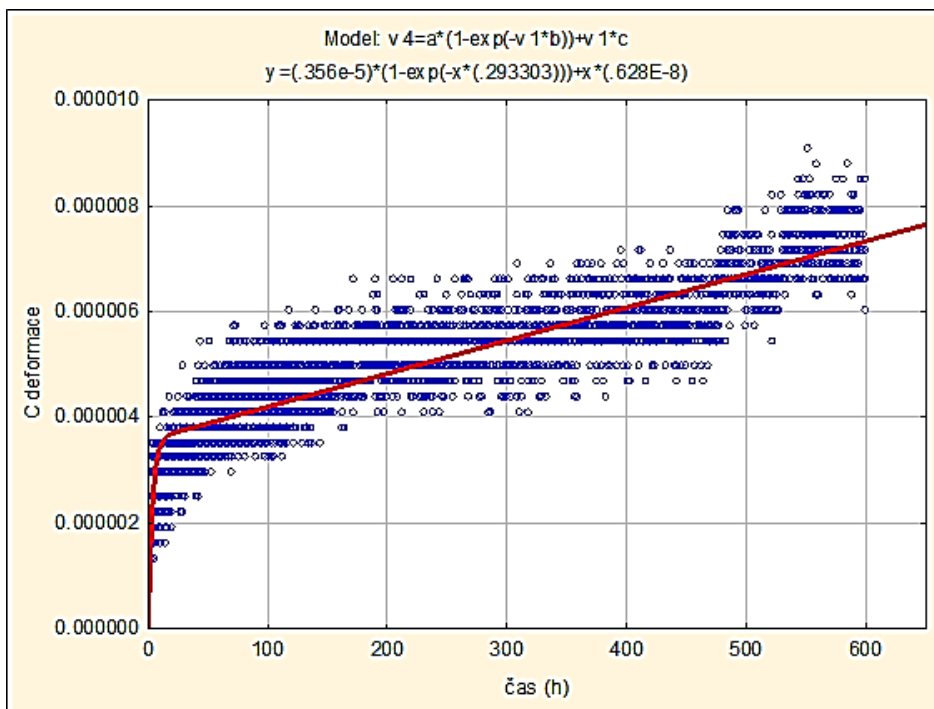
Obr. 31 Graf vlivu stupně úpravy na faktor tečení



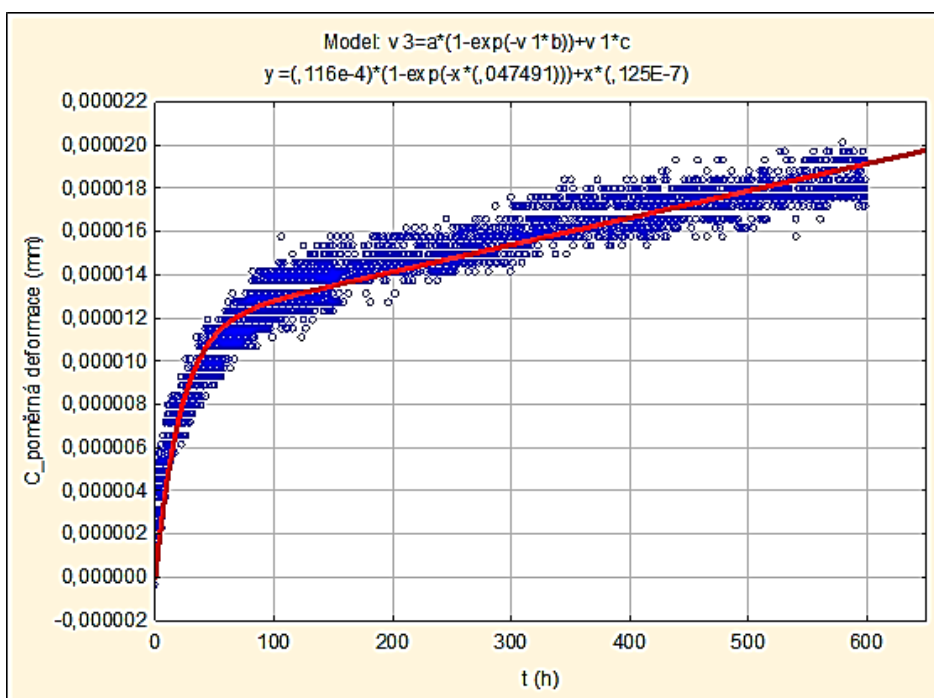
Obr. 32 Graf vlivu podélně paralelních sérií na faktor tečení

Graf č. 33 a 34 představují vyhodnocení naměřených dat pomocí Burgerova modelu. Oba tyto grafy se vztahují k paralelní sérii C rozdílné tepelné úpravy – neupravený referenční vzorek a vzorek upravený při 210°C. Lze je tedy mezi sebou porovnat. Vzorek termicky modifikovaný vykazuje větší tečení – tedy výraznější

viskoelastické chování. Z rovnice funkce popisující proloženou křivku lze odečíst parametry a, b, c, z nichž se vypočítaly hodnoty reologických parametrů.



Obr. 33 Graf vyhodnocení naměřených výsledků pomocí Burgerova modelu – neupravený vzorek, série C



Obr. 34 Graf vyhodnocení naměřených výsledků pomocí Burgerova modelu – 210°C, série C

6. DISKUZE

V této kapitole bude vysvětlen přínos této práce pro budoucí výzkum a celkově význam studia reologie dřeva potažmo termodřeva. Důvodem zařazení i krátkodobých zkoušek bylo hlavně přiřazení zatížení 40% meze pevnosti konkrétní hodnotě odvozené ze změřené statické pevnosti v ohybu. Druhým důvodem bylo získání kontextu použitých vzorků a dřeva, a tak poskytnout opodstatněný výklad výsledků. Dlouhodobé měření bylo vyhodnoceno Burgerovým modelem, který se jeví jako vhodný (pro konstantní okolní podmínky). Jím určená křivka odpovídá naměřeným hodnotám (viz např. Obr. 34 výše).

Porovnání hodnot s literaturou je víceméně vyloučené – termowoodu z pohledu reologie se nevyskytuje. Pro neupravené vzorky bylo možné použít hodnoty reologických parametrů z literatury (např. Kollmann et al. 1968), ale pro čas 600 h se naměřené hodnoty liší (důvod viz níže) a nutné je také použití stejného modelu. Při odlišné míře zatížení také můžeme porovnávat pouze poměry jednotlivých zatížení nikoli přesné hodnoty jednotlivých reologických parametrů. (SHAO 2004). Pro odhad trendů je ale vhodné seznámit se i s podobnými tématy. Existují výzkumy podobné problematice např. tečení smrkového dřeva při vysokých teplotách okolního prostředí (120°C, 150°C a 180°C) při testu trvajícím 3 dny vyhodnoceném rovněž Burgerovým modelem (LAGAŇA et al. 2008), kde se tečení vzorků vystavených vysoké teplotě zvyšuje s teplotou, ale vývoj při delším čase a ještě vyšších teplotách není zahrnut.

Tato práce představuje prvotní náhled do problematiky reologie termodřeva. Přesto je poznání veškerých vlastností užívaného materiálu důležité. Cílem těchto měření bylo otevřít diskuzi na toto téma a připravit půdu pro další výzkumy z hlediska volby vhodné metody a přístupu k problematice.

Výpočtová pevnost konstrukčního dřeva (termicky upraveného i neupraveného) dnes nezohledňuje reologii. Tečení dřeva společně s heterogenitou, anizotropií a hygroskopicitou spadá při navrhování do tzv. bezpečnostní rezervy, která zvětšuje dimenze použitých prvků, aby nedošlo k ohrožení stability a funkčnosti konstrukce. Reologie zařazená do navrhování by mohla umožnit optimálnější a stejně bezpečné využití dřeva.

Z hlediska konstrukčního využití není termodřevo nejvhodnější, ale pro menší zatížení v horších okolních podmínkách (např. na povětrnosti) by mohlo být dřevo ošetřené nižšími stupni termoúpravy (kolem 160°C) vhodnou a ekologickou variantou.

Dalším polem, kde je využití reologie na místě, je technické zpracování dřeva. Lze ji uplatnit při sušení dřeva (MOUTEE et al. 2005 a 2007). Dále při výrobě aglomerovaných materiálů – při návrhu vhodných lisovacích parametrů třískových a vláknitých desek. A také při lisování a ohýbání dřeva, tvarování překližek. Veškerá výroba tohoto typu se s reologií potýká – částečný návrat do původního tvaru po odtížení je projevem elastické deformace. Poznání a stanovení míry tohoto jevu pro konkrétní využití je prostorem např. pro úspory v množství užitého lepidla apod.

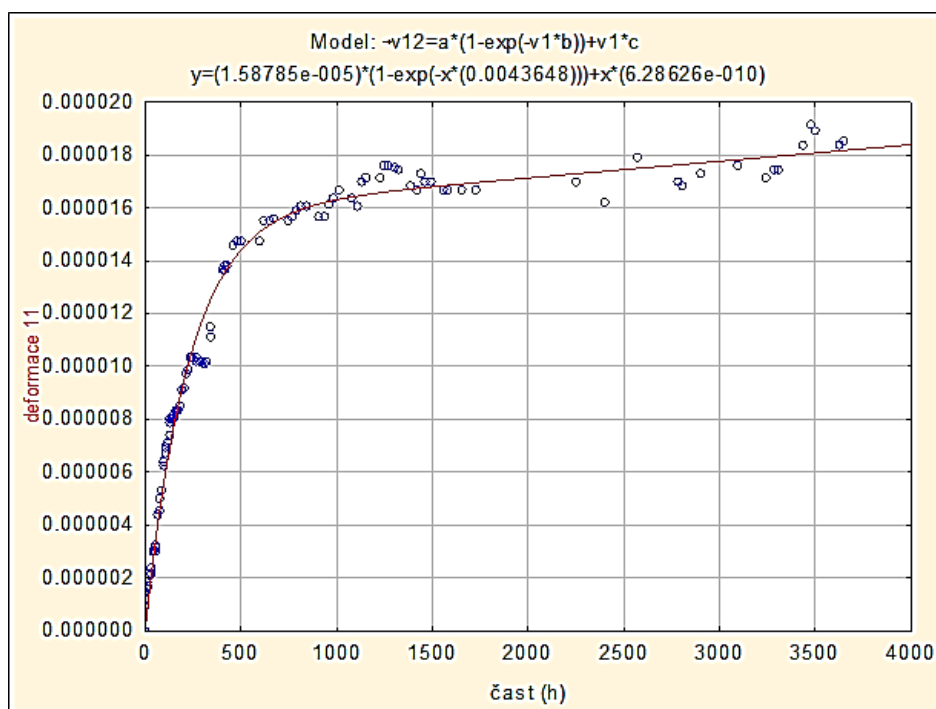
Z pohledu metodiky použité pro získání výsledků v této práci je možné navrhnout dílčí změny pro budoucí výzkum:

- 1) Zvolená podélná paralelnost sérií A, B, C, D, E napříč jednotlivými stupni úpravy se ukázala jako nepřilíš šťastná. Při délce vzorků nutné pro provedení dlouhodobých testů není možné se na délce celkem 6 metrů vyhnout přítomnosti vad a odklonu vláken. Tato paralelnost navzdory očekávání vedla k odlišným vlastnostem vzorků, které se projevily již při krátkodobých testech a způsobila tak větší rozdíly než samotná termická úprava odlišného stupně. Pro další experimenty by bylo vhodnější zvolit paralelnost hranolovou.
- 2) Navržené zatížení pro dlouhodobé experimenty ve výši 40% statické meze pevnosti použité z důvodu minimální délky trvání zatížení (600h – 25 dní) pro pozorovatelné tečení bylo nejspíš příliš vysoké. Společně s malou kvalitou použitých vzorků bylo důvodem praskání vzorků při zakládání nebo v průběhu experimentu. Z těchto destrukcí vyplývá, že se zvolené zatížení v některých případech nacházelo nad mezí úměrnosti. Otvírá to také otázku, zda je u termowoodu mez úměrnosti (nebo také mez trvalé pevnosti, viz Obr. 8 v kapitole 3.2.1) rovna přibližně 50% meze pevnosti (60% u neupraveného dřeva), jak bylo předpokládáno nebo, zda se nachází níže. Prokázání tohoto tvrzení vyžaduje samostatný výzkum.
- 3) Další návrh na změnu metodiky míří na porovnávání vlastností termodřeva a neupraveného dřeva při konstantních okolních podmínkách. Výhodnost

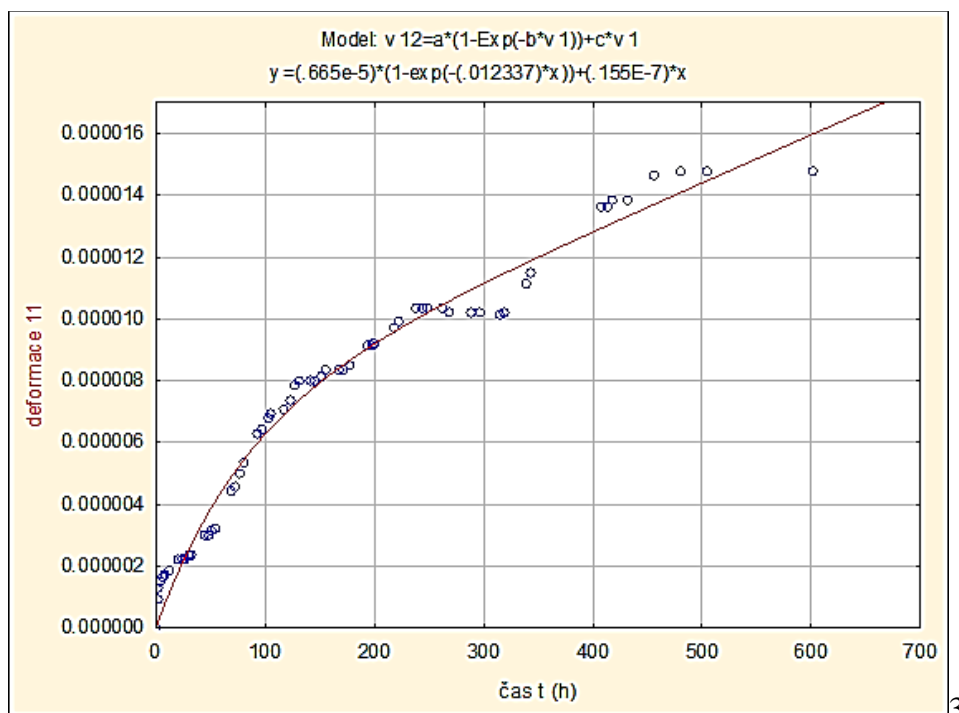
termicky modifikovaného dřeva se v těchto podmínkách projeví pouze částečně – pouze nižší rovnovážnou vlhkostí. Bez vlivu klimatických změn se neprojeví větší stabilita termodřeva a tedy i menší vliv historie zatěžování. Cyklické změny vlhkosti pod zatížením působí ve dřevě vnitřní napětí, které je u termowoodu v porovnání s referenčními vzorky menší. (HONFI et al. 2014). Nemluvě o tom, že dřevo se v praxi změnám vlhkosti nevyhne a tato skutečnost může znásobit účinky dlouhodobého zatížení, a tedy urychlit snižování pevnosti dřeva při dlouhodobém zatížení. (HANHIJÄRVI 2000)

- 4) Trvání zkoušky tečení (600 h - 25 dní) bylo skutečně minimální, aby se dalo vůbec označit za dlouhodobé (ačkoliv HOLZER et al. 1989 takto označuje trvání od 800 h a dále). Pro průkaznější a porovnatelnější výsledky by bylo do budoucna vhodné zvolit delší čas.

Pro toto podpoření tvrzení v bodě 2; 3 a 4 můžeme vyjít z výsledků ještě nepublikovaných měření doktoranda FLD ČZU Ing. Tomáše Holečka, který zkoumá tečení termowoodu v podmínkách kryté vnější expozice umístěné při TU Zvolen. Zkoumá tečení neupravených referenčních vzorků a vzorků upravených na 165°C a na 210°C. Jde rovněž o zkoušku v čtyřbodovém ohybu. Na ukázkou grafy na obr. č. 35 a 36 (níže) zobrazují rozdíl mezi tečením v čase 602 h (srovnatelným s měřeními v této práci) a časem 3645 h. Z grafů je patrné, že v čase kolem 600 h ještě nelze hovořit o tom, že by křivka tečení zpomalovala svůj postup.



Obr. 35 Graf vyhodnocení naměřených výsledků pomocí Burgerova modelu – 210°C v čase 3645 h (na základě dat Ing. Tomáše Holečka)



Obr. 36 Graf vyhodnocení naměřených výsledků pomocí Burgerova modelu – 210°C v čase 602 h (na základě dat Ing. Tomáše Holečka)

Dále výsledky Ing. Holečka podporují teorii naznačenou v této práci. A to, že pokud porovnáme celkovou deformaci a faktor tečení neupraveného dřeva, 165°C a 210°C dřeva, zjistíme, že skutečně nejvíce teče dřevo termicky upravené při nižších teplotách (165°C), následuje neupravené dřevo a nejnižších hodnot dosahuje dřevo vysokoteplotně modifikované (210°C). Tento jev lze vysvětlit změnou struktury dřeva během termické modifikace, související změnou hygroskopicity a mechanických vlastností. Pro konstrukční využití se tedy nejlépe hodí termodřevo upravené při 160-170°C, které vykazuje nižší rovnovážnou vlhkost, velkou viskoelasticitu a tedy i deformovatelnost. Přitom není termickou úpravou degradováno jako dřevo upravené vyššími teplotami a zachovává si tak do určité míry své mechanické vlastnosti.

Pokud jde o vývoj poměru jednotlivých deformací v jednotlivých stupních termoúpravy a časech (600 h versus 3645 h) lze potvrdit hypotézu vyslovenou při interpretaci výsledků, a to, že s časem roste podíl viskoelastické deformace, která tak ukrajuje z elastické a částečně i plastické deformace. Tyto obě se tedy snižují,

elastická výrazněji. Konkrétní hodnoty ovšem zatím uvést nelze z důvodu malého počtu vzorků.

7. ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce bylo stanovit a porovnat reologické parametry neupraveného a termicky upraveného dřeva. Vstupními hodnotami pro jejich výpočet bylo provedení krátkodobých zkoušek – změření dynamického modulu pružnosti pomocí šíření ultrazvuku, statického modulu pružnosti a meze pevnosti v tříbodovém ohybu dle normy, doplněné zkouškou přerážecí práce (houževnatost). Všechny zkoušky probíhaly na vzorcích klimatizovaných při 65% relativní vlhkosti vzduchu a 12°C a výsledky nebyly dále přepočítávány.

Dlouhodobá zkouška v čtyřbodovém ohybu pod zatížením ve výši 40% meze pevnosti trvala 600 h při konstantních okolních podmínkách v klimatizační komoře. Výsuvný potenciometr snímal v pravidelných intervalech průhyb testovaných vzorků. Tyto naměřené a dále vypočtené hodnoty byly následně vyhodnoceny za použití Burgerova modelu, který nahrazuje skutečné tečení materiálu soustavou pružin a hydraulických pístů s viskózní kapalinou. Vlastnosti těchto prvků popisují tzv. reologické parametry – elastický a viskoelastický modul pružnosti, viskoelastický a plastický koeficient viskozity a relaxační čas. Matematicky lze Burgerův model popsat jako funkci o této rovnici:

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

Naměřeným bodům diagramu závislosti poměrné deformace na napětí byla přiřazena křivka výše uvedené funkce s již konkrétními parametry.

Experimenty probíhaly na celkem 7 vzájemně podélně paralelních sériích, které byly rozděleny na 5 skupin, které na sebe v rámci podélně navazovaly. Každá pětičlenná skupina byla termicky upravena při jiné teplotě (140°C, 160°C, 180°C, 190°C, 200°C a 210°C) a jedna byla ponechána neupravená jako referenční pro porovnání mezi sebou.

Výsledkem je především porovnání tečení zastoupené faktorem tečení a podíly jednotlivých deformací mezi jednotlivými stupni termické úpravy a referencemi. Rozdíly mezi jednotlivými úpravami jsou statisticky významné a naznačují

hypotézu, že nejvíce tečou vzorky upravené na nižší stupně např. na 160°C, pak ty neupravené a ty upravené na vyšší stupeň úpravy.

Přesné závěry musí být ověřeny dalším výzkumem na větším počtu vzorků a nejlépe při delším časovém rozsahu zkoušek. Dále je třeba dbát na vysokou kvalitu vzorků bez vad a odklonu vláken. Jejich vliv se ukázal být klíčovým. Vhodnější bude i užití hranolové paralelnosti vzorků. Výhodnost termodřeva se lépe zobrazí při zařazení klimatických změn (nejlépe zatížení cykly).

Tento výzkum najde uplatnění při dalším studiu vlastnosti termodřeva, technickém zpracování dřeva – zejména sušení, lisování, ohýbání. Potažmo i v navrhování konstrukcí pod malým zatížením vystavených vnější povětrnosti.

8. SEZNAM LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ

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

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.

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.

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

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

ČSN 49 0117. *Drevo. Rázova húževnatosť v ohybe*. Praha: Vydavatelství úřadu pro normalizaci a měření, 1980.

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

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

ESTEVEZ, 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>

Finnish ThermoWood Association. *Thermowood Handbook*. Finnish ThermoWood Association, Helsinki, 2003. 66 s.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

MOLLIKOVÁ, E. *Konstrukční plasty v letectví* [online]. Vystaveno 20.10.2014 [cit. 2016-03-28]. Dostupné na:

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.

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

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

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

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. (2008). *Termodrevo – Príprava, vlastnosti a aplikácie*. TU Zvolen 2008, ISBN: 978-80-228-1920-6.

ROSZYK, E. Effect of Bending Stresses on the Wood Creep In Conditions of Assymmetric Changes of Moisture Content. *Folia Forestalia Polonica*. AR Poznań, 2005, série B, sešit 36, str. 15-26.

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

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.

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

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

Ugolev, B., Galkin, V., Gorbacheva, 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. 2016-04-10]. Dostupné na: 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.

9. SEZNAM PŘÍLOH

Obr. P1 Graf vlivu podélně paralelních sérií na elastickou deformaci

Obr. P2 Graf vlivu podélně paralelních sérií na viskoelastickou deformaci

Obr. P3 Graf vlivu podélně paralelních sérií na plastickou deformaci

Obr. P4 Graf vlivu podélně paralelních sérií na relaxační čas

Obr. P5 Graf vlivu stupně úpravy na relaxační čas

Obr. P6 Graf vlivu stupně úpravy na elastickou deformaci

Obr. P7 Graf vlivu stupně úpravy na viskoelastickou deformaci

Obr. P8 Graf vlivu stupně úpravy na plastickou deformaci

Obr. P9 Graf vyhodnocení naměřených výsledků pomocí Burgerova modelu – 140°C, série C

Obr. P10 Graf vyhodnocení naměřených výsledků pomocí Burgerova modelu – 160°C, série C

Obr. P11 Graf vyhodnocení naměřených výsledků pomocí Burgerova modelu – 180°C, série C

Obr. P12 Graf vyhodnocení naměřených výsledků pomocí Burgerova modelu – 190°C, série C

Obr. P13 Graf vyhodnocení naměřených výsledků pomocí Burgerova modelu – 200°C, série C

Tab. P1 Základní popisná statistická analýza elastické poměrné deformace neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

Tab. P2 Základní popisná statistická analýza viskoelastické poměrné deformace neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

Tab. P3 Základní popisná statistická analýza plastické poměrné deformace neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

Tab. P4 Vyhodnocení výsledků pomocí Burgerova modelu – neupravené referenční vzorky

Tab. P5 Vyhodnocení výsledků pomocí Burgerova modelu – termická úprava při 140°C

Tab. P6 Vyhodnocení výsledků pomocí Burgerova modelu – termická úprava při 160°C

Tab. P7 Vyhodnocení výsledků pomocí Burgerova modelu – termická úprava při 180°C

Tab. P8 Vyhodnocení výsledků pomocí Burgerova modelu – termická úprava při 190°C

Tab. P9 Vyhodnocení výsledků pomocí Burgerova modelu – termická úprava při 200°C

Tab. P10 Vyhodnocení výsledků pomocí Burgerova modelu – termická úprava při 210°C

10. PŘÍLOHY

Tab. P1 Základní popisná statistická analýza elastické poměrné deformace neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

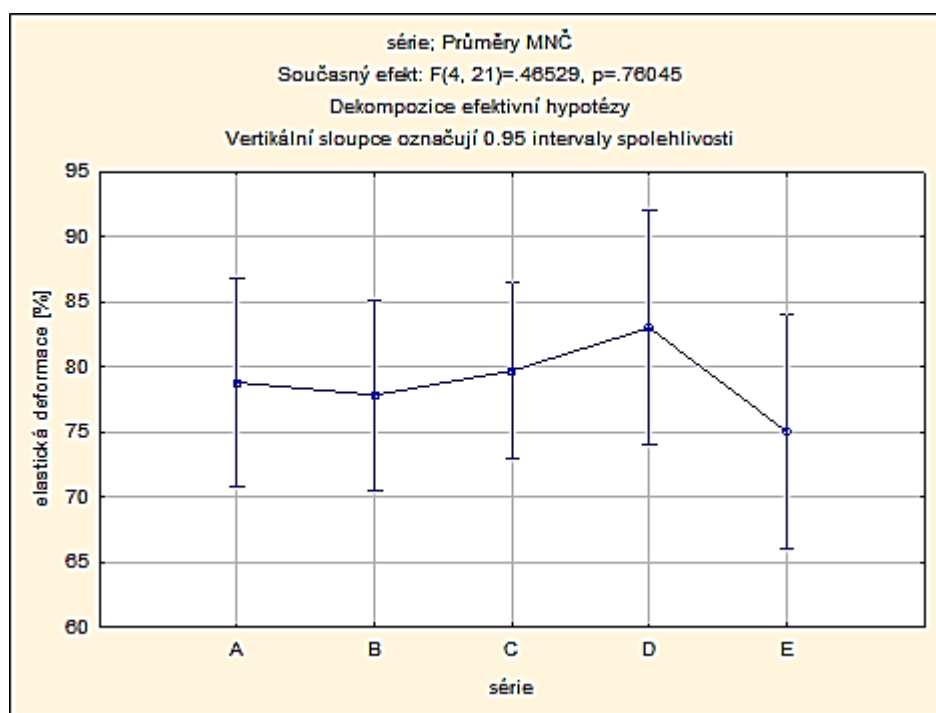
ϵ_{el} [-]	Elastická poměrná deformace						
stupeň úpravy [°C]	0	140	160	180	190	200	210
počet měření	5	5	4	2	4	2	4
průměr	2,35E-03	2,81E-03	3,20E-03	2,74E-03	2,63E-03	2,62E-03	2,02E-03
medián	2,43E-03	2,57E-03	3,11E-03	2,74E-03	2,67E-03	2,62E-03	2,00E-03
minimum	2,07E-03	2,44E-03	2,82E-03	2,33E-03	2,12E-03	2,25E-03	1,54E-03
maximum	2,50E-03	3,32E-03	3,75E-03	3,15E-03	3,05E-03	2,99E-03	2,54E-03
směrodatná odchylka	1,61E-04	3,96E-04	3,44E-04	4,11E-04	3,40E-04	3,72E-04	3,57E-04
variační koeficient v %	6,9	14,1	10,7	15,0	12,9	14,2	17,6

Tab. P2 Základní popisná statistická analýza viskoelastické poměrné deformace neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

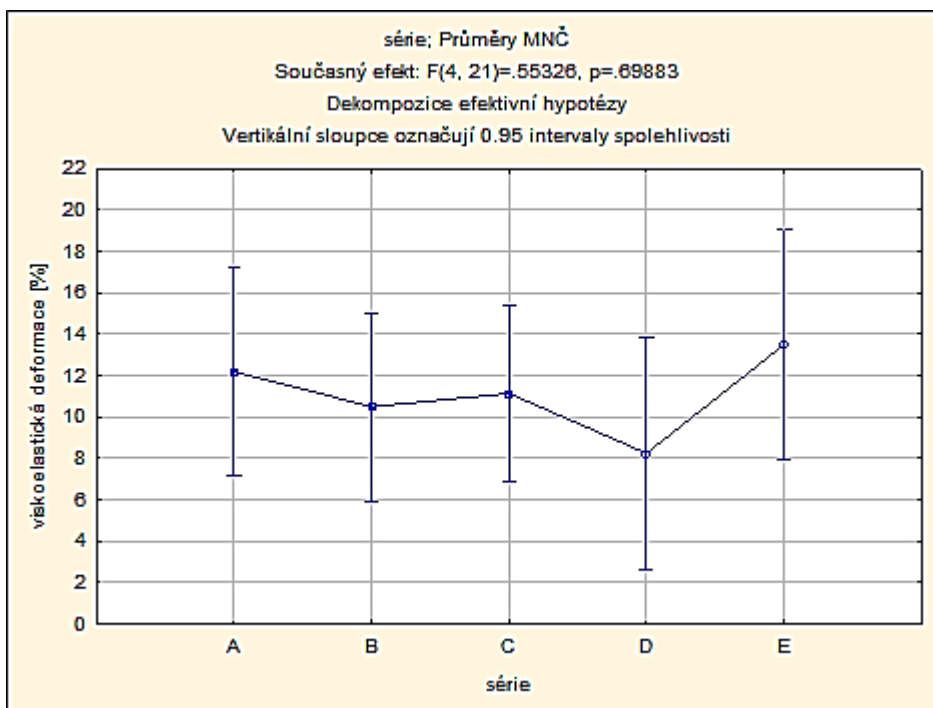
ϵ_{vel} [-]	Viskoelastická poměrná deformace						
stupeň úpravy [°C]	0	140	160	180	190	200	210
počet měření	5	5	4	2	4	2	4
průměr	1,19E-04	5,40E-04	9,78E-04	2,07E-04	3,85E-04	3,03E-04	2,67E-04
medián	1,11E-04	3,85E-04	8,30E-04	2,07E-04	3,65E-04	3,03E-04	2,64E-04
minimum	7,37E-05	3,57E-04	7,45E-04	1,78E-04	2,60E-04	2,69E-04	2,30E-04
maximum	1,70E-04	8,39E-04	1,51E-03	2,36E-04	5,49E-04	3,37E-04	3,09E-04
směrodatná odchylka	3,21E-05	2,08E-04	3,08E-04	2,90E-05	1,08E-04	3,37E-05	3,07E-05
variační koeficient v %	26,9	38,6	31,5	14,0	28,1	11,1	11,5

Tab. P3 Základní popisná statistická analýza plastické poměrné deformace neupraveného dřeva a různých stupňů termické úpravy

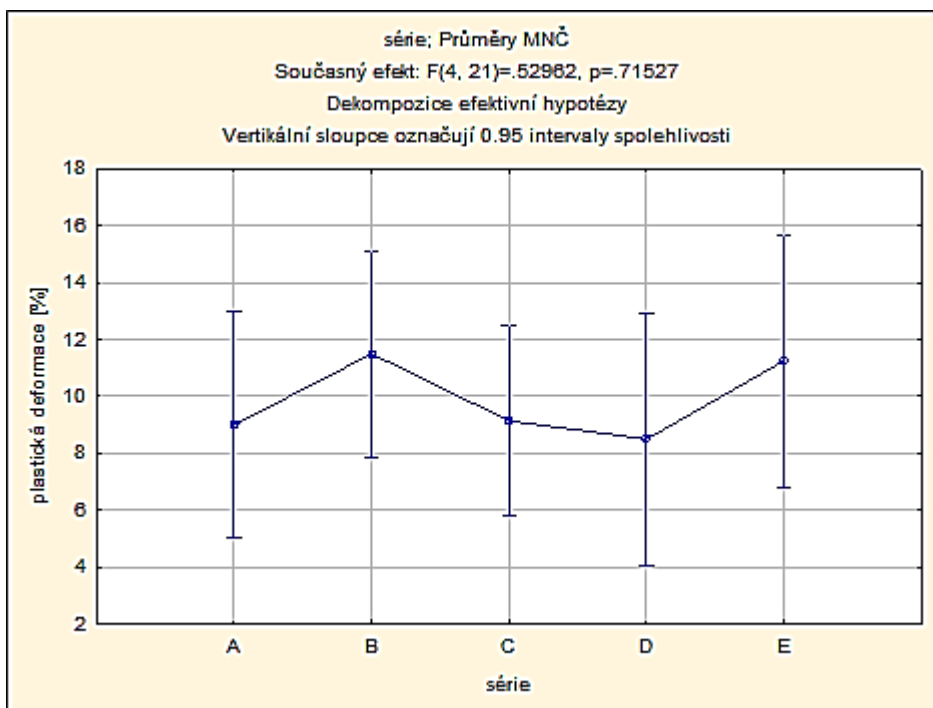
ϵ_{pl} [-]	Plastická poměrná deformace						
stupeň úpravy [°C]	0	140	160	180	190	200	210
počet měření	5	5	4	2	4	2	4
průměr	1,26E-04	4,93E-04	6,45E-04	2,87E-04	3,66E-04	5,58E-04	1,79E-04
medián	1,24E-04	3,31E-04	4,93E-04	2,87E-04	3,64E-04	5,58E-04	1,78E-04
minimum	9,90E-05	3,06E-04	3,87E-04	2,22E-04	2,64E-04	3,21E-04	1,31E-04
maximum	1,54E-04	8,10E-04	1,21E-03	3,52E-04	4,71E-04	7,94E-04	2,31E-04
směrodatná odchylka	1,94E-05	2,18E-04	3,29E-04	6,50E-05	7,33E-05	2,37E-04	3,76E-05
variační koeficient v %	15,4	44,2	51,0	22,7	20,0	42,4	21,0



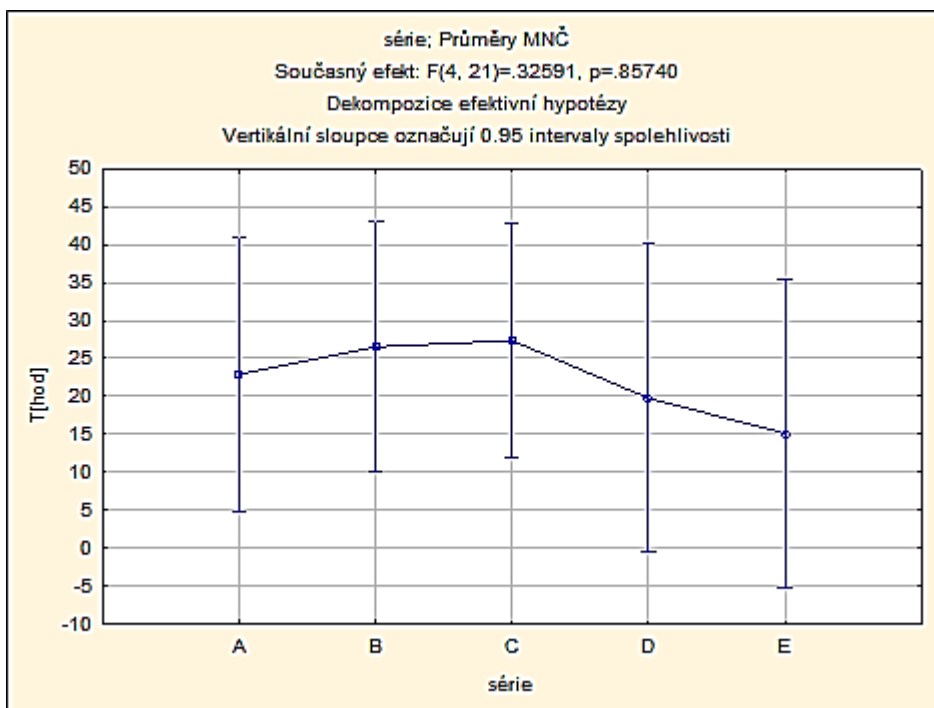
Obr. P1 Graf vlivu podélně paralelních sérií na elastickou deformaci



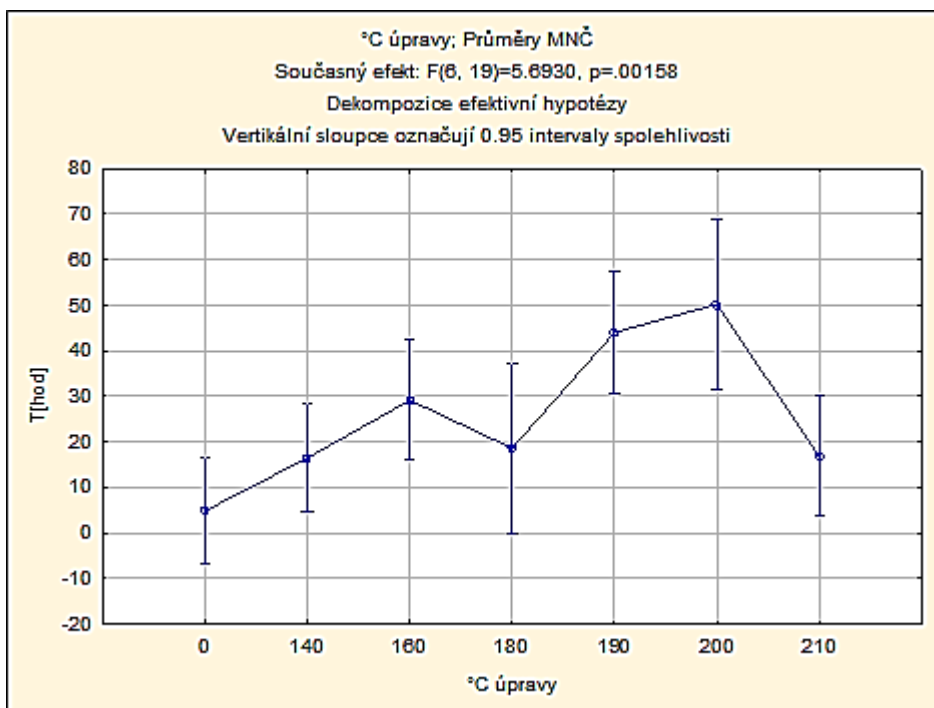
Obr. P2 Graf vlivu podélně paralelních sérií na viskoelastickou deformaci



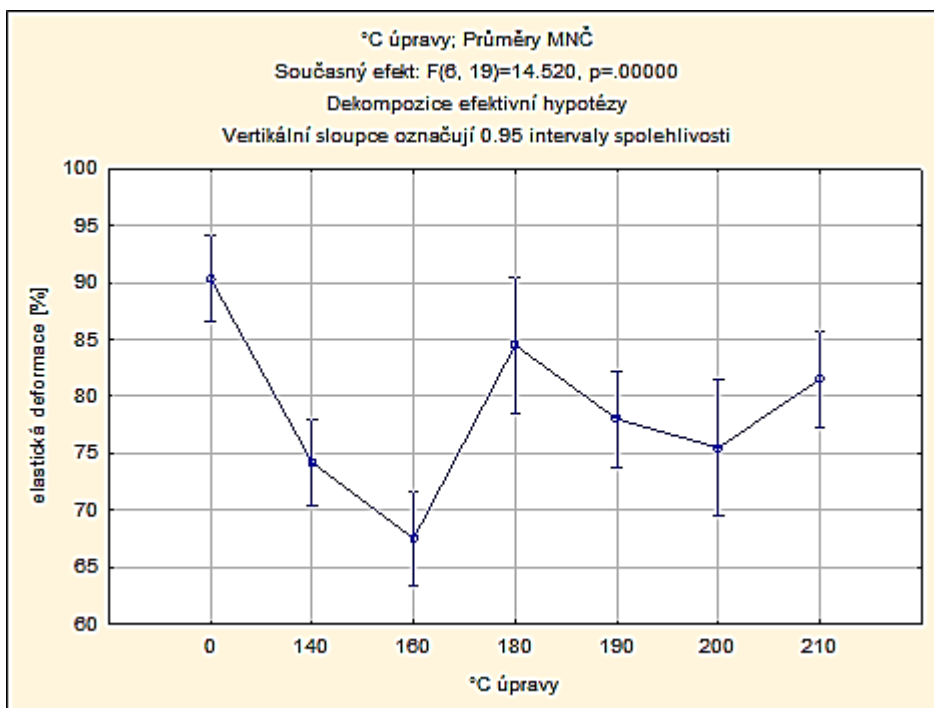
Obr. P3 Graf vlivu podélně paralelních sérií na plastickou deformaci



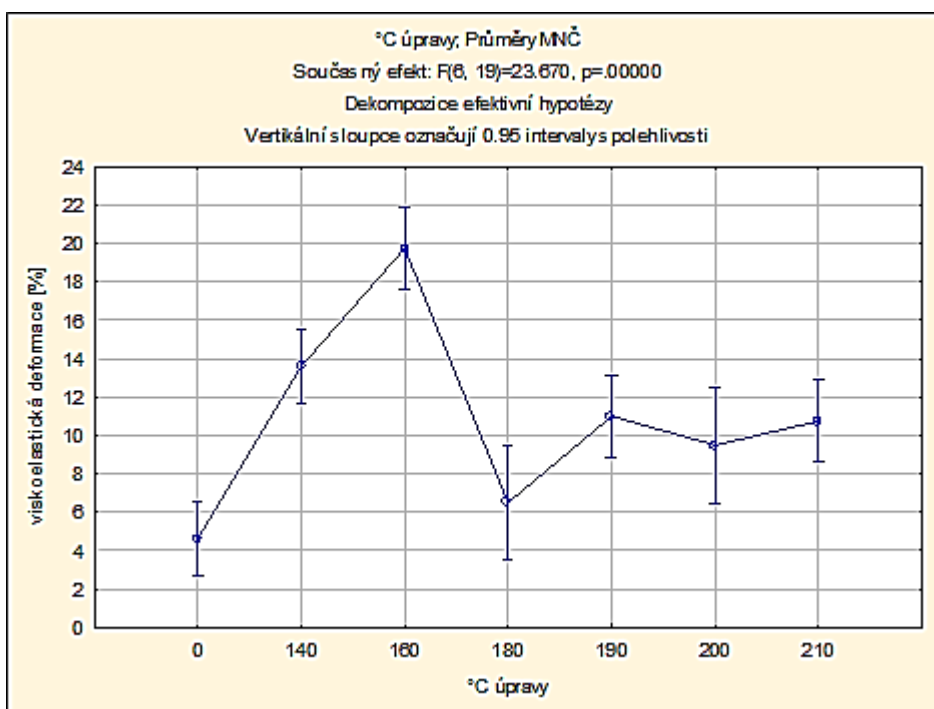
Obr. P4 Graf vlivu podélně paralelních sérií na relaxační čas



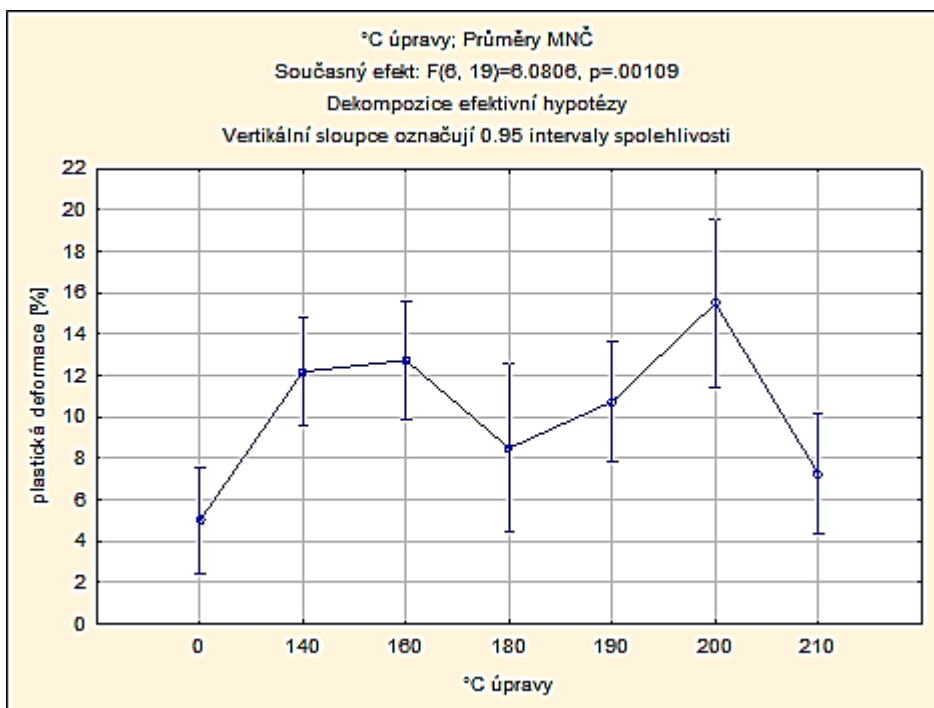
Obr. P5 Graf vlivu stupně úpravy na relaxační čas



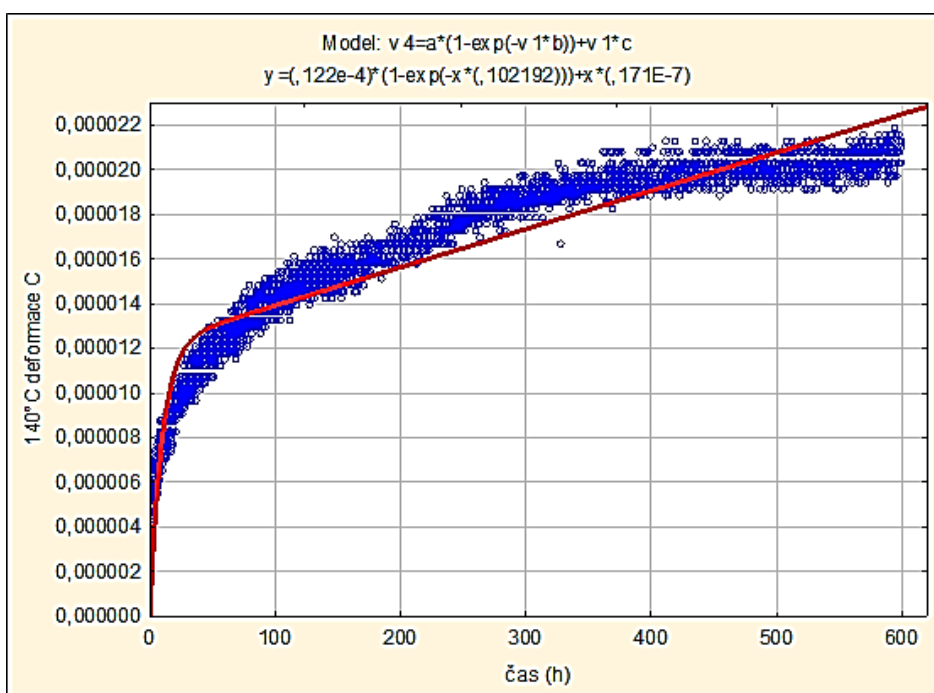
Obr. P6 Graf vlivu stupně úpravy na elastickou deformaci



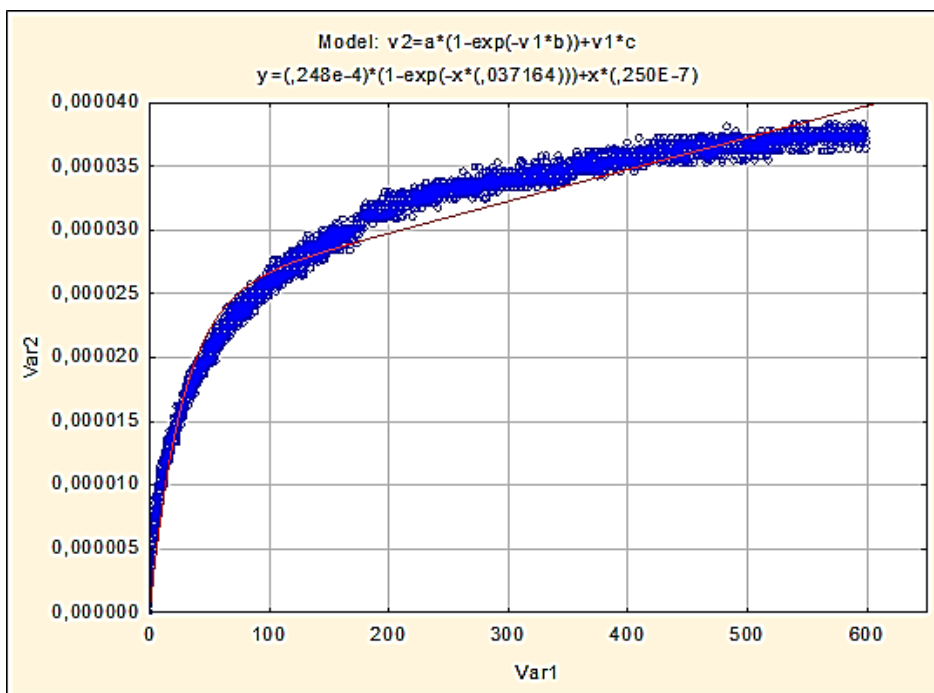
Obr. P7 Graf vlivu stupně úpravy na viskoelastickou deformaci



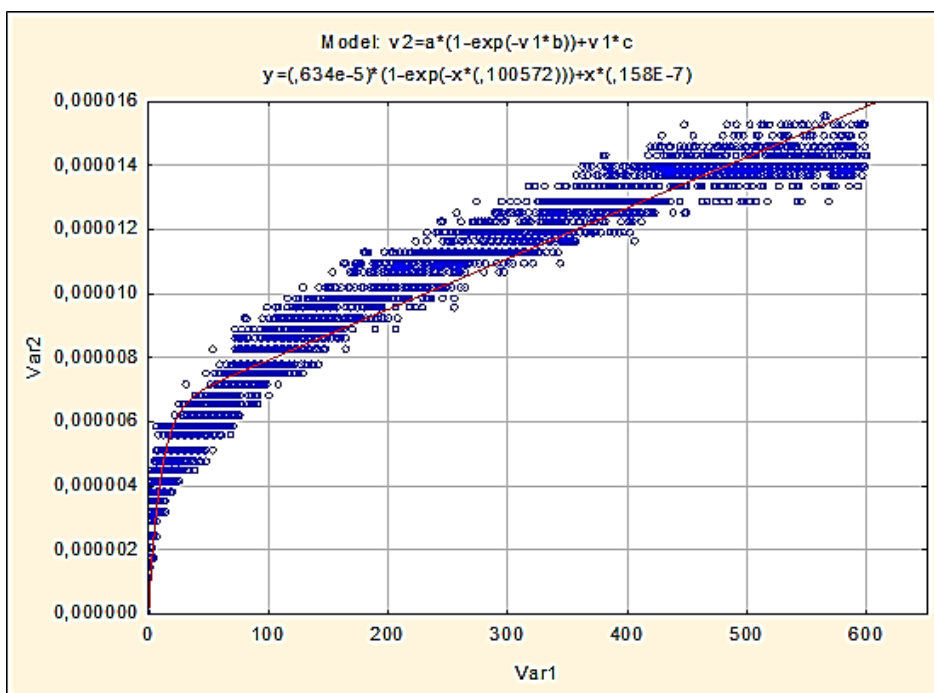
Obr. P8 Graf vlivu stupně úpravy na plastickou deformaci



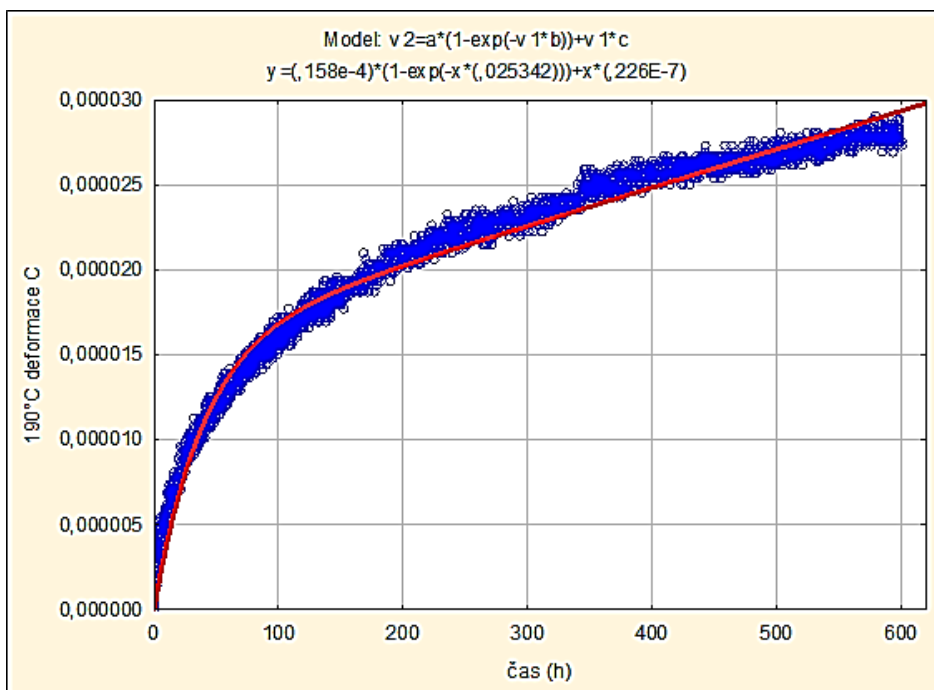
Obr. P9 Graf vyhodnocení naměřených výsledků pomocí Burgerova modelu – 140°C, série C



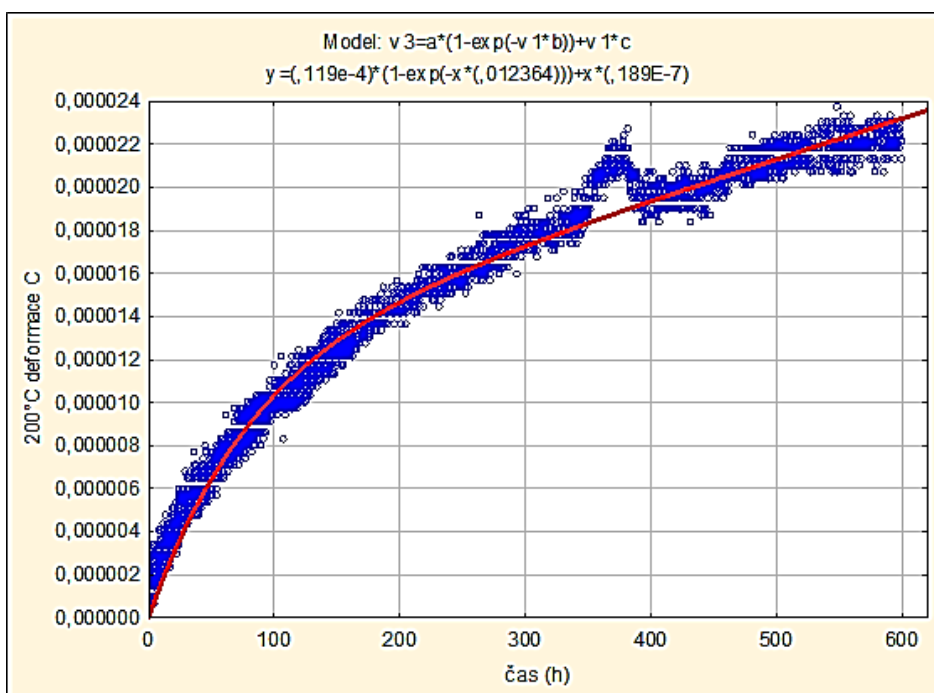
Obr. P10 Graf vyhodnocení naměřených výsledků pomocí Burgerova modelu – 160°C, série C



Obr. P11 Graf vyhodnocení naměřených výsledků pomocí Burgerova modelu – 180°C, série C



Obr. P12 Graf vyhodnocení naměřených výsledků pomocí Burgerova modelu – 190°C, série C



Obr. P13 Graf vyhodnocení naměřených výsledků pomocí Burgerova modelu – 200°C, série C

Tab. P4 Vyhodnocení výsledků pomocí Burgerova modelu – neupravené referenční vzorky

úprava	neupravené referenční				
destrukce [h]					
vzorek	A	B	C	D	E
b[mm]	20,16	20,02	20,16	20,15	20,14
h[mm]	20,06	20,46	20,06	20,17	20,20
l ₀ [mm]	500	500	500	500	500
F[N]	649	683	649	627	702
100% σ [MPa]	74,98	76,44	74,98	71,72	80,12
40% σ [MPa]	29,992	30,576	29,992	28,688	32,048
a	0,00000568	0,00000363	0,00000356	0,00000257	0,00000422
b	0,330084	0,209309	0,293303	0,173183	0,134752
c	8,58E-09	6,76E-09	6,28E-09	5,75E-09	7,24E-09
E _{el} [MPa]	12 128,13	12 568,25	14 461,45	12 684,56	12 801,62
E _{vel} [MPa]	176 056,34	275 482,09	280 898,88	389 105,06	236 966,82
η_{vel} [Mpa.h]	533 368,29	1 316 150,25	957 708,84	2 246 785,53	1 758 540,32
η_{pl} [Mpa.h]	116 550 116,55	147 928 994,08	159 235 668,79	173 913 043,48	138 121 546,96
T[h]	3,03	4,78	3,41	5,77	7,42
K (t)	1,13	1,09	1,09	1,08	1,11
ϵ_{cel} [-]	0,002797716	0,002667833	0,002293734	0,00243437	0,002777923
ϵ_{el} [-]	0,002472928	0,002432798	0,002073928	0,002261646	0,002503433
ϵ_{vel} [-]	0,000170355	0,000110991	0,000106772	7,37282E-05	0,000135243
ϵ_{pl} [-]	0,000154433	0,000124044	0,000113035	9,89956E-05	0,000139247
ϵ_{el} [%]	88%	91%	90%	93%	90%
ϵ_{vel} [%]	6%	4%	5%	3%	5%
ϵ_{pl} [%]	6%	5%	5%	4%	5%

Tab. P5 Vyhodnocení výsledků pomocí Burgerova modelu – termická úprava při 140°C

úprava	140°C				
destrukce [h]					
vzorek	A	B	C	D	E
b[mm]	20,43	20,24	20,20	20,20	20,20
h[mm]	20,29	20,34	20,33	20,26	20,26
l ₀ [mm]	500	500	500	500	500
F[N]	691	791	683	663	822
100% σ [MPa]	77,06	88,54	76,69	74,93	92,8
40% σ [MPa]	30,824	35,416	30,676	29,972	37,12
a	0,0000125	0,0000237	0,0000122	0,0000119	0,0000201
b	0,069825	0,066772	0,102192	0,03513	0,059052
c	1,79E-08	3,81E-08	1,71E-08	0,000000017	3,15E-08
E _{el} [MPa]	11 983,33	10678	12 597,35	12 173,06	11 363,84
E _{vel} [MPa]	80 000,00	42194,093	81 967,21	84 033,61	49 751,24
η_{vel} [Mpa.h]	1 145 721,45	631912,97	802 090,31	2 392 075,53	842 498,88
η_{pl} [Mpa.h]	55 865 921,79	26246719	58 479 532,16	58 823 529,41	31 746 031,75
T[h]	14,32	14,976337	9,79	28,47	14,95
K (t)	1,26	1,12	1,27	1,26	1,41
ϵ_{cel} [-]	0,003288642	0,0049657	0,003124147	0,003124586	0,004714291
ϵ_{el} [-]	0,002572241	0,0033166	0,002435115	0,002462158	0,003266503
ϵ_{vel} [-]	0,0003853	0,0008394	0,000374247	0,000356667	0,000746112
ϵ_{pl} [-]	0,000331101	0,0008098	0,000314784	0,000305762	0,000701676
ϵ_{el} [%]	78%	67%	78%	79%	69%
ϵ_{vel} [%]	12%	17%	12%	11%	16%
ϵ_{pl} [%]	10%	16%	10%	10%	15%

Tab. P6 Vyhodnocení výsledků pomocí Burgerova modelu – termická úprava při 160°C

úprava	160°C				
destrukce [h]				179,73	
vzorek	A	B	C	D	E
b[mm]	20	20,41	20,27	20,21	20,21
h[mm]	20	20,45	20,24	20,15	20,27
l ₀ [mm]	500	500	500	500	500
F[N]	756	602	665	773	760
100% σ [MPa]	88,6	66,13	75,13	88,3	85,86
40% σ [MPa]	35,44	26,452	30,052	35,32	34,344
a	0,0000239	0,0000307	0,0000248	0,0000324	0,0000439
b	0,050772	0,021309	0,037164	0,141313	0,043353
c	2,52E-08	2,44E-08	0,000000025	0,000000306	5,86E-08
E _{el} [MPa]	11 664,80	8 288,30	10 664,04	8 831,98	9 162,74
E _{vel} [MPa]	41 841,00	32 573,29	40 322,58	30 864,20	22 779,04
η_{vel} [Mpa.h]	824 096,04	1 528 616,54	1 084 990,33	218 410,18	525 431,76
η_{pl} [Mpa.h]	39 682 539,68	40 983 606,56	40 000 000,00	3 267 973,86	17 064 846,42
T[h]	19,70	46,93	26,91	7,08	23,07
K (t)	1,44	1,36	1,39	1,70	1,68
ϵ_{cel} [-]	0,004421186	0,004390904	0,004014237	0,007085942	0,006463726
ϵ_{el} [-]	0,0030382	0,003191487	0,002818069	0,003999102	0,003748226
ϵ_{vel} [-]	0,000847016	0,000812074	0,00074529	0,001144368	0,001507702
ϵ_{pl} [-]	0,00053597	0,000387342	0,000450879	0,001942472	0,001207799
ϵ_{el} [%]	69%	73%	70%	56%	58%
ϵ_{vel} [%]	19%	18%	19%	16%	23%
ϵ_{pl} [%]	12%	9%	11%	27%	19%

Tab. P7 Vyhodnocení výsledků pomocí Burgerova modelu – termická úprava při 180°C

úprava	180°C			
destrukce [h]			408,62	71,84
vzorek	B	C	D	E
b[mm]	20,22	20,25	20,22	20,27
h[mm]	20,34	20,38	20,25	20,45
l₀[mm]	500	500	500	500
F[N]	1006	630	956	850
100% σ[MPa]	112,79	70,19	108,12	93,95
40% σ[MPa]	45,116	28,076	43,248	37,58
a	0,00000523	0,00000634	0,0000114	0,0000311
b	0,036627	0,100572	0,143067	0,42989
c	0,000000013	1,58E-08	7,01E-08	0,000000717
E_{el}[MPa]	14 333,25	12 074,22	12 673,16	9 030,51
E_{vel}[MPa]	191 204,59	157 728,71	87 719,30	32 154,34
η_{vel}[Mpa.h]	5 220 318,04	1 568 316,30	613 134,39	74 796,67
η_{pl}[Mpa.h]	76 923 076,92	63 291 139,24	14 265 335,24	1 394 700,14
T[h]	27,30	9,94	6,99	2,33
K (t)	1,17	1,17	1,50	1,90
ϵ_{cel} [-]	0,003735626	0,002725271	0,005144401	0,007265999
ϵ_{el} [-]	0,003147646	0,002325286	0,003412566	0,004161449
ϵ_{vel} [-]	0,000235957	0,000178002	0,000493027	0,001168738
ϵ_{pl} [-]	0,000352024	0,000221983	0,001238808	0,001935812
ϵ_{el} [%]	84%	85%	66%	57%
ϵ_{vel} [%]	6%	7%	10%	16%
ϵ_{pl} [%]	9%	8%	24%	27%

Tab. P8 Vyhodnocení výsledků pomocí Burgerova modelu – termická úprava při 190°C

úprava	190°C				
destrukce [h]					15,48
vzorek	A	B	C	D	E
b[mm]	20,43	20,13	20,27	20,25	20,35
h[mm]	20,33	20,31	20,30	20,30	20,30
l ₀ [mm]	500	500	500	500	500
F[N]	644	653	774	650	750
100% σ [MPa]	71,51	73,73	86,84	73,05	83,87
40% σ [MPa]	28,604	29,492	34,736	29,22	33,548
a	0,0000113	0,0000138	0,0000158	0,0000117	0,000016
b	0,017793	0,021908	0,025342	0,028632	0,100744
c	1,54E-08	0,000000021	2,26E-08	2,03E-08	0,000000119
E _{el} [MPa]	13 494,89	10 663,62	11 378,73	11 393,44	9 718,28
E _{vel} [MPa]	88 495,58	72 463,77	63 291,14	85 470,09	62 500,00
η_{vel} [Mpa.h]	4 973 617,45	3 307 639,59	2 497 480,04	2 985 124,53	620 384,34
η_{pl} [Mpa.h]	64 935 064,94	47 619 047,62	44 247 787,61	49 261 083,74	8 403 361,34
T[h]	56,20	45,65	39,46	34,93	14,95
K (t)	1,27	1,27	1,31	1,26	1,59
ϵ_{cel} [-]	0,002707186	0,003544324	0,004072653	0,003180347	0,005357157
ϵ_{el} [-]	0,002119617	0,002765665	0,003052714	0,002564635	0,003452051
ϵ_{vel} [-]	0,000323218	0,000406989	0,000548829	0,000259745	0,000536768
ϵ_{pl} [-]	0,000264352	0,00037167	0,000471111	0,000355968	0,001368338
ϵ_{el} [%]	78%	78%	75%	81%	64%
ϵ_{vel} [%]	12%	11%	13%	8%	10%
ϵ_{pl} [%]	10%	10%	12%	11%	26%

Tab. P9 Vyhodnocení výsledků pomocí Burgerova modelu – termická úprava při 200°C

úprava	200°C	
destrukce [h]		
vzorek	B	C
b[mm]	20,26	20,30
h[mm]	20,28	20,29
l ₀ [mm]	500	500
F[N]	913	631
100% σ [MPa]	102,74	70,76
40% σ [MPa]	41,096	28,304
a	0,00000655	0,0000119
b	0,051028	0,012364
c	3,22E-08	1,89E-08
E _{el} [MPa]	13 734,92	12 587,98
E _{vel} [MPa]	152 671,76	84 033,61
η_{vel} [Mpa.h]	2 991 921,21	6 796 636,48
η_{pl} [Mpa.h]	31 055 900,62	52 910 052,91
T[h]	19,60	80,88
K (t)	1,34	1,27
ϵ_{cel} [-]	0,004055409	0,002906147
ϵ_{el} [-]	0,002992081	0,002248493
ϵ_{vel} [-]	0,000269179	0,000336616
ϵ_{pl} [-]	0,000794149	0,000321038
ϵ_{el} [%]	74%	77%
ϵ_{vel} [%]	7%	12%
ϵ_{pl} [%]	20%	11%

Tab. P10 Vyhodnocení výsledků pomocí Burgerova modelu – termická úprava při 210°C

úprava	210°C				
destrukce [h]		10,06			
vzorek	A	B	C	D	E
b[mm]	19,62	19,41	19,97	19,94	19,98
h[mm]	20,03	19,87	19,87	19,61	19,58
l ₀ [mm]	500	500	500	500	500
F[N]	413	538	446	421	625
100% σ [MPa]	49,24	65,77	53,08	51,42	76,53
40% σ [MPa]	19,696	26,308	21,232	20,568	30,612
a	0,0000117	0,00000631	0,0000116	0,0000137	0,0000101
b	0,046949	12,0604	0,047491	0,10098	0,066882
c	1,11E-08	0,000000985	1,25E-08	1,87E-08	1,07E-08
E _{el} [MPa]	12 817,06	9 464,73	10 445,89	10 431,70	12 041,79
E _{vel} [MPa]	85 470,09	158 478,61	86 206,90	72 992,70	99 009,90
η_{vel} [Mpa.h]	1 820 487,88	13 140,41	1 815 225,97	722 843,14	1 480 366,93
η_{pl} [Mpa.h]	90 090 090,09	1 015 228,43	80 000 000,00	53 475 935,83	93 457 943,93
T[h]	21,30	0,08	21,06	9,90	14,95
K (t)	1,23	1,31	1,19	1,25	1,20
ϵ_{cel} [-]	0,001898353	0,00320621	0,00243814	0,002484295	0,003047907
ϵ_{el} [-]	0,001536702	0,002779583	0,002032569	0,001971683	0,002542148
ϵ_{vel} [-]	0,000230443	0,000166003	0,000246291	0,000281782	0,000309181
ϵ_{pl} [-]	0,000131208	0,000260624	0,00015928	0,00023083	0,000196578
ϵ_{el} [%]	81%	87%	83%	79%	83%
ϵ_{vel} [%]	12%	5%	10%	11%	10%
ϵ_{pl} [%]	7%	8%	7%	9%	6%