

Česká zemědělská univerzita v Praze
Fakulta lesnická a dřevařská
Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

**Reologické modely a jejich využití
v modelování tečení dřeva**

Bakalářská práce

Autor práce: Albert Ebr
Vedoucí práce: Ing. Vlastimil Borůvka, PhD.

2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Albert Ebr

Dřevařství

Název práce

Reologické modely a jejich použití pro modelování tečení dřeva

Název anglicky

Rheological models and their use for modeling creep of wood

Cíle práce

Cílem práce je zpracovat literární rešerši o reologických modelech, posoudit jejich vhodnost při modelování tečení dřeva a praktické využití výsledků získaných modelováním.

Metodika

Zpracovat literární rešerši o zkoumané problematice, tj. reologii dřeva (respektive tečení dřeva při dlouhodobém zatížení), reologických parametrech získaných modelováním a o faktorech ovlivňujících jejich proměnlivost.

Porovnat citlivost jednotlivých modelů na dodaných datech, získaných v rámci dlouhodobých výzkumů probíhajících na pracovištích KZZD.

Posoudit využitelnost pro dřevařskou praxi, případně navrhnout další zaměření výzkumu v předmětné problematice.

Doporučený rozsah práce

40 – 50 stran

Klíčová slova

reologie, tečení dřeva, dlouhodobé zatížení, deformace, modelování

Doporučené zdroje informací

- Bodig, J., Jayne, B. A. (1982). Mechanics of wood and wood composites, Van Nostrand Reinhold Compony, New York. 712 s. ISBN 0-442-00822-8.
- Dinwoodie, J. M. (2000). Timber: Its nature and behavior, Taylor & Francis New York, USA, 258 s. ISBN 0-419-25550-8.
- Guedes, R. M. (2011). Creep and fatigue in polymer matrix composites, Woodhead Publishing Limited, Cambridge 2011, 584 s. ISBN: 978-1-84569-656-6.
- 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.

Předběžný termín obhajoby

2017/18 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 24. 1. 2017

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2018

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 27. 01. 2019

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Reologické modely a jejich použití pro modelování tečení dřeva vypracoval samostatně pod vedením Ing. Vlastimila Borůvky, PhD. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že zveřejněním bakalářské 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 9. 3. 2019

Podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Vlastimilu Borůvkovi, PhD. za odborné vedení při psaní této práce, za jeho vstřícný přístup a za čas, který ochotně věnoval konzultacím. Dále děkuji panu Ing. Tomáši Holečkovi a všem, kteří se podíleli na měření dat, ze kterých práce vychází.

Abstrakt

Dřevo je přírodní materiál s rozsáhlým uplatněním v různých odvětvích a s velkým potenciálem pro budoucí využití. Má výborné mechanické vlastnosti i při své relativně nízké hustotě. Všechny vlastnosti dřeva jsou ale do velké míry ovlivněny charakterem okolního prostředí, zejména pak vlhkostí. To je zapříčiněno hygroskopicitou dřeva, tedy jeho schopností přijímat a vylučovat vodu v závislosti na vlhkosti okolí.

Jako viskoelastický materiál dřevo při dlouhodobém zatížení teče. Tomuto jevu, nazývanému také „creep“, se blíže věnuje vědní disciplína známá jako reologie. Reologie zkoumá průběh deformací v materiálech v závislosti na čase. Tato práce přináší prvotní náhled do problematiky reologie a tečení dřeva, zabývá se tzv. reologickými modely a zkoumá jejich vhodnost pro modelování chování dřeva pod dlouhodobým zatížením. Některé modely jsou v práci podrobněji popsány a jejich citlivost vůči tečení dřeva je vyhodnocena pomocí závislosti deformace na čase (potažmo na změně vlhkosti), získaných výzkumem dlouhodobého zatížení dřeva v ohybu.

Bylo zjištěno, že pro modelování tečení dřeva ve stálých podmínkách je vhodný Burgerův model a že průběh deformací v čase při proměnlivé vlhkosti částečně řeší použití upraveného Burgerova modelu. Uvedeny jsou dále hodnoty některých reologických parametrů získané pomocí Burgerova modelu. Tato práce dává podnět k dalšímu výzkumu, uvádí některé alternativní možnosti modelování a ukazuje důležitost zkoumané problematiky. Znalost poznatků reologie a jejich další prohlubování má svoje opodstatnění zejména v oblasti technologického zpracování dřeva.

Klíčová slova: reologie, tečení dřeva, dlouhodobé zatížení, deformace, modelování.

Abstract

Wood is a natural material with an extensive application in various sectors and with a great potential for the future use. It has excellent mechanical properties even though its density is relatively low. However, all the properties of wood are strongly influenced by the nature of the environment, especially by humidity. This is caused by the hygroscopic character of wood which means by its ability to absorb and desorb water according to air humidity.

As a viscoelastic material, wood acts as a solid and a fluid at once when under a long-term load. This phenomenon is called „creep” and is closer explored by a discipline known as rheology. Rheology studies development of deformations in materials in time. This work gives a preview on the problematics of rheology and creep of wood, examines so called rheological models and inspects their suitability for modeling the behaviour of wood under long-term load. Some of the models are described later in this work and their suitability for modeling creep of wood is evaluated using values of dependence of deformation on time, acquired in experiments on long-term bending of wood.

It was discovered that Burger’s model is appropriate for modeling creep of wood in constant conditions and that the modified Burger’s model partially deals with modeling dependence of deformation on time in variable moisture conditions. Values of some of the rheological parameters obtained from the Burger’s model evaluation are stated. This work proposes a motion for consequential research, shows some alternatives for modelling and presents the importance of examined problematics. Knowledge in the field of rheology and further progress in this way is useful especially in the area of technology.

Keywords: rheology, creep of wood, long-term load, deformation, modeling.

OBSAH

OBSAH	5
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK.....	6
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	7
1. ÚVOD	12
2. CÍLE PRÁCE.....	13
3. ROZBOR PROBLEMATIKY	14
3.1. STAVBA DŘEVA	14
3.2. VLASTNOSTI DŘEVA.....	15
3.2.1. VODA VE DŘEVĚ	16
3.2.2. DŘEVO A TEPLA	17
3.2.3. PEVNOST A PRUŽNOST	18
3.2.3.1. NAPĚTÍ A DEFORMACE.....	19
3.3. REOLOGIE DŘEVA	21
3.3.1. CO JE REOLOGIE	21
3.3.2. TEČENÍ DŘEVA.....	22
3.3.3. REOLOGICKÉ MODELÝ	24
3.3.3.1. ZÁKLADNÍ REOLOGICKÉ LÁTKY.....	24
3.3.3.2. MAXWELLŮV MODEL	27
3.3.3.3. KELVINŮV MODEL.....	28
3.3.3.4. THOMPSONŮV-POYNTINGŮV MODEL	28
3.3.3.5. BURGERŮV MODEL	29
3.3.3.6. DALŠÍ REOLOGICKÉ MODELÝ	31
4. METODIKA	32
4.1. VOLBA VHODNÝCH MODELŮ	32
4.2. URČENÍ MODELOVÝCH FUNKCÍ.....	34
4.3. VÝPOČET REOLOGICKÝCH PARAMETRŮ	36
5. VÝSLEDKY	37
6. DISKUSE.....	41
7. ZÁVĚR	44
SEZNAM LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	46

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

- Obr. č. 1:** Ultrastruktura buněčné stěny anatomických elementů dřeva (Gandelová a Šlezingerová 2014, upraveno podle Požgaje a kol. 1993).
- Obr. č. 2:** Voda ve dřevě a její postupné vrstvení při adsorpci - A až D (Horáček 1998).
- Obr. č. 3:** Napětíovo-deformační diagram dřeva (Požgaj a kol. 1997).
- Obr. č. 4:** Průběh tečení dřeva při napětích pod a nad mezí úměrnosti (Požgaj a kol. 1997).
- Obr. č. 5:** Reologický model pružiny (Požgaj a kol. 1997).
- Obr. č. 6:** Reologický model pístu s kapalinou (Požgaj a kol. 1997).
- Obr. č. 7:** Reologický model Saint-Venantovy plastické látky (Sobotka 1981).
- Obr. č. 8:** Maxwellův model a průběh jeho dopružování (Požgaj a kol. 1997, podle Sobotky 1981).
- Obr. č. 9:** Kelvinův model a průběh deformace jeho elementů (Borůvka 2000).
- Obr. č. 10:** Thompsonův-Poyntingův model a průběh deformace jeho elementů (Sobotka 1981).
- Obr. č. 11:** Burgerův model a průběh deformace jeho elementů (Borůvka 2016).
- Obr. č. 12:** Binghamův a Saint-Venantův model (Kovalchenko 2013).
- Obr. č. 13:** Nelineární Burgerův model s vláčnými prvky (Sobotka 1981)
- Obr. č. 14:** Vyhodnocení závislosti deformace – čas Thompsonovým-Poyntingovým modelem (Praha – klimatizační místnost)
- Obr. č. 15:** Vyhodnocení závislosti deformace – čas Burgerovým modelem (Praha – klimatizační místnost)
- Obr. č. 16:** Vyhodnocení závislosti deformace – čas Burgerovým modelem (Zvolen – krytá venkovní expozice)
- Obr. č. 17:** Vyhodnocení závislosti deformace na čase a změně vlhkosti pomocí upraveného Burgerova modelu (Zvolen – krytá venkovní expozice)
- Obr. č. 18:** Schéma modelu pro dřevo (Hassani a kol. 2014).
-
- Tab. č. 1:** Získané reologické parametry pomocí Burgerova a upraveného Burgerova modelu pro měření v nestálých vlhkostních podmínkách (Zvolen)

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a, b, c, d, e	Neznámé parametry modelových funkcí
E	Youngův modul pružnosti [MPa]
ε	Poměrná deformace
ε_0	Počáteční poměrná deformace
E_{cel}	Celkový modul pružnosti [MPa]
E_{el}	Elastický modul pružnosti [MPa]
E_{vel}	Viskoelastický modul pružnosti [MPa]
ε_{el}	Elastická deformace
ε_p	Pružná deformace
$\varepsilon_{pč}$	Deformace pružná v čase
E_{pl}	Plastický modul pružnosti [MPa]
ε_{pl}	Plastická deformace
E_{el}	Viskoelastický modul pružnosti [MPa]
ε_{vel}	Vazkopružná deformace
F	Síla [N]
K(t)	Faktor tečení [-]
m_0	Hmotnost absolutně suchého dřeva [kg]
m_w	Hmotnost vody ve dřevě [kg]
η	Součinitel dynamické viskozity [N.s.m ⁻²]
η_{vel}	Součinitel dynamické viskozity pístu Kelvinova modelu [N.s.m ⁻²]
η_{pl}	Součinitel dynamické viskozity pístu plastické hmoty [N.s.m ⁻²]
S	Obsah plochy [m ²]
σ	Napětí, normálové napětí [MPa]
$\sigma_{\dot{u}}$	Mez úměrnosti [MPa]
t	Čas [s]
τ	Tangenciální napětí [MPa]
τ_{vel}	Relaxační čas viskoelastické deformace [h]
v1, v2, v3	Proměnné modelových funkcí
w_{abs}	Absolutní vlhkost dřeva [%]
w_{rel}	Relativní vlhkost dřeva [%]

1. ÚVOD

Dřevo je jedním z nejdéle využívaných materiálů, které má lidstvo k dispozici už od pravěku. Z počátku mělo dřevo význam jako palivo a člověk ho používal za primitivními účely, jako bylo třeba zastrašování nepřátel. Velmi brzy se ale jeho využití rozšířilo a předměty ze dřeva tak našly uplatnění mimo jiné jako části nástrojů, šperky nebo jiná umělecká díla. Neopomenutelné a dnes čím dál častější je použití dřevní suroviny jako konstrukčního materiálu ve stavebnictví, kde se také ve velké míře setkáváme s jeho mechanickým namáháním.

Velkými přednostmi dřeva jsou jeho lehkost, snadná spojovatelnost a relativně velká pevnost. Při stejné váze je dřevo pevnější než ocel. Máme-li těchto předností dřeva náležitě využít, musíme znát mechanické vlastnosti dřeva, tedy především jeho pružnost a pevnost (Jírů 1954).

Povědomí o vlastnostech dřeva je rozhodujícím předpokladem pro zpracování a obrábění dřeva, ale také pro jeho racionální použití na dřevěné prvky staveb, dřevostavby a výrobky nábytkářského průmyslu (Horáček 1998).

Pokud mluvíme o stavebnictví, je zkoumání vlastností dřeva přímo esenciální z hlediska bezpečnosti, ale také z pohledu ekonomického. S rozsáhlejšími znalostmi o pevnosti materiálu při zatížení můžeme přesněji dimenzovat rozměry nosných prvků tak, aby vyhovovaly pevnostním požadavkům, ale zároveň ušetřit materiál. Důvodů, proč prohlubovat poznatky o chování dřeva pod zatížením, je nespočet.

Dřevo je materiálem viskoelastickým, tedy při dlouhodobém zatížení teče. Tato jeho vlastnost má za následek, že deformace pružné, pružné v čase a plastické vznikají současně, a to nejen při napětích nad, ale i pod mezí úměrnosti (Požgaj a kol. 1997).

Tečením pevných látek, a tedy i dřeva, se zabývá vědní disciplína zvaná reologie. Reologie (z řeckého rheos = tok, proud) je podobor fyziky, který zkoumá viskoelastické chování materiálů. Tím rozumíme schopnost materiálů vykazovat za dlouhodobého působení mechanického zatížení zároveň vlastnosti pevných látek a kapalin (Lakes 2009). *„Reologie zavádí do mechaniky materiálů další rozměr – čas, který je jedním z rozhodujících faktorů ovlivňujících pevnost*

dřeva. Čas, deformace a napětí jsou neodmyslitelně spojené” (Gandelová a kol. 2009).

K co nejpřesnějšímu odhadu chování dřeva pod trvalým zatížením nám mohou sloužit rozličné reologické modely. Jsou to jednoduché fyzikální modely, které využívají základních viskoelastických látek a jejich kombinací k simulaci tečení složitějších látek.

2. CÍLE PRÁCE

Cílem této práce je zpracování literární rešerše na téma reologie dřeva, respektive tečení dřeva při dlouhodobém zatížení, a přiblížení problematiky reologických modelů a vhodnosti jejich využití pro modelování průběhu deformací ve dřevě v závislosti na napětí v dlouhodobějším časovém rozmezí.

Chování dřeva pod zatížením je ovlivněno mnoha faktory, z nichž některé vychází přímo ze stavby dřeva a jeho fyzikálních a mechanických vlastností, kdežto jiné jsou spojeny s charakterem prostředí, ve kterém se dřevo nachází. Tato práce se věnuje tématu tečení dřeva a jeho modelování za pomoci reologických modelů. Zaměřuje se částečně na reologické parametry získané modelováním, ale především na vhodnost různých reologických modelů pro modelování přirozeného chování dřeva při zatížení.

Existuje řada reologických modelů, které nacházejí různé uplatnění v rozličných oborech. Ovšem ne všechny modely jsou vhodné pro modelování tečení dřeva jakožto viskoelastického přírodního – a tedy výrazně nehomogenního - materiálu s velmi specifickými vlastnostmi. Tato práce si dává za cíl přiblížit některé reologické modely, popsat je a především porovnat jejich citlivost a použitelnost pro modelování chování dlouhodobě zatíženého dřeva. K tomu účelu poslouží dodaná data z dlouhodobých výzkumů, které probíhají na pracovištích Katedry základního zpracování dřeva (nyní Katedry zpracování dřeva a biomateriálů) Fakulty lesnické a dřevařské ČZU.

V neposlední řadě by měla tato práce poukázat na význam modelování tečení dřeva a vůbec důležitost výzkumu v oblasti reologie pro dřevařskou praxi. Cílem je dát poznatky získané výzkumem a modelováním do souvislostí s různými odvětvími

dřevařské praxe, ať už například ze stránky stavební nebo technologické, a rozvinout diskusi ohledně případného dalšího výzkumu v této oblasti.

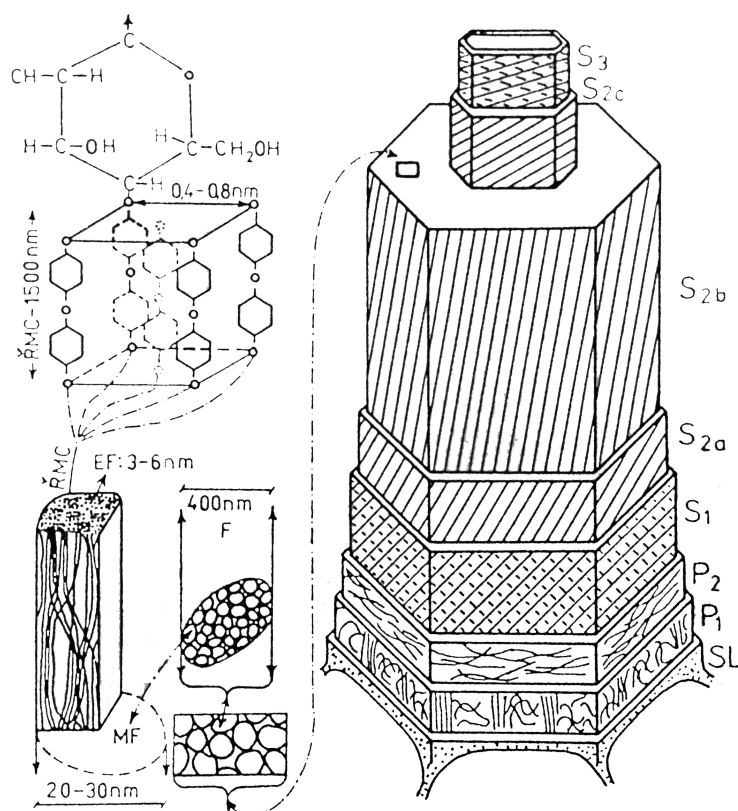
3. ROZBOR PROBLEMATIKY

3.1. STAVBA DŘEVA

Z pohledu botaniky je dřevo tvořeno cévními svazky. Vytváří se druhotným tloušťnutím buněk rostlin se zdřevnatělým stonkem. Dřevo je tvořeno soubory buněk s účelovou fyziologickou a morfologickou specifikací, které nazýváme pletivy. Jako význačně heterogenní materiál, vykazuje dřevo rozdílné technické vlastnosti v různých částech hmoty a také v různých anatomických směrech. (Balabán 1955). Dřevo představuje pružný, pevný a přitom lehký materiál, který má dobré tepelně-izolační vlastnosti, je schopný snášet velké zatížení a tlumit vibrace. Jednoduše se opracovává obráběcími nástroji, což vede k jeho rozsáhlému využití. (Požgaj a kol. 1997).

Veškeré vlastnosti dřeva jsou do velké míry ovlivňovány stavbou dřeva, a to na všech úrovních: makroskopické, mikroskopické, submikroskopické a chemické. Makroskopickou stavbu dřeva jsme schopni rozeznávat pouhým okem nebo lupou a pozorujeme na ní ukazatele, jako jsou anatomický směr, odklon vláken, šířka letokruhů nebo přítomnost jádra a běle. Na mikroskopické úrovni vidíme anatomické elementy za použití světelného mikroskopu. Submikroskopická úroveň, viditelná za použití elektronového mikroskopu, zahrnuje například strukturu fibril a mikrolamel (Horáček 1998).

Nahlédneme-li na dřevo z chemického hlediska, skládá se převážně z těchto prvků s následujícím přibližným zastoupením v závislosti na druhu dřeviny a části stromu, ze které dřevo pochází (kmen, větve, kořeny): uhlíku (50%), kyslíku (43%), vodíku (6,1%) a dusíku (0,3%). Doplnujícími prvky jsou draslík, sodík, vápník, fosfor a jiné. Základní látky, které jsou zastoupeny v dřevní hmotě asi 94% jsou celulóza, hemicelulózy a lignin. Zbýlých 6% připadá pryskyřičným látkám, tukům, voskům, látkám dusíkatým, tříslovinám, barvivům, alkaloidům a dalším doprovodným sloučeninám (Lysý 1954).



Obr. č. 1: Ultrastruktura buněčné stěny anatomických elementů dřeva (Gandelová a Šlezingerová 2014, upraveno podle Požgaje a kol. 1993).

3.2. VLASTNOSTI DŘEVA

Vlastnosti dřeva jsou obvykle členěny na fyzikální a mechanické. Na všechny tyto vlastnosti mají vliv určité faktory, které výrazně ovlivňují chování dřeva jako materiálu. Mezi ty nejdůležitější patří nepochybně chemické složení dřeva a jeho anatomická stavba, a to na všech výše zmíněných úrovních. Nemůžeme ale opomenout vlastnosti okolního prostředí, jako je mimo jiné relativní vzdušná vlhkost a teplota (Horáček 1998).

Mechanické vlastnosti dřeva popisují jeho schopnost odolávat působení vnějších sil. Patří mezi ně například tvrdost, pevnost, rázová houževnatost, odolnost proti tečení, nebo odolnost proti trvalému zatížení. Mechanické vlastnosti se liší v jednotlivých anatomických směrech, příčném, radiálním a tangenciálním. Obecně platí, že několikanásobně vyšší pevnost vykazuje dřevo při namáhání ve směru vláken, než ve směru kolmo na vlákna. (Gandelová a kol. 2009). Pokud ale chceme

pochopit, popsat a případně předvídat chování dřeva z pohledu mechaniky, musíme vzít nutně v úvahu také jeho fyzikální vlastnosti.

Mezi fyzikální vlastnosti dřeva zahrnujeme kromě hustoty, povrchových a vzhledových vlastností, elektrických vlastností a akustických vlastností především také vlastnosti tepelné a vlastnosti spojené s vlhkostí (Matovič 1993). Dřevo je hygroskopický materiál, který je schopen absorbovat vlhkost z okolí. V závislosti na parametrech prostředí dřevo výrazně mění svůj vlastní obsah vody, rozměry (sesychání a bobtnání) a geometrický tvar anatomických elementů (Juodeikiene a Minelga 2003).

Vlhkost a teplota patří mezi činitele, se kterými se běžně počítá při zhodnocování mechanických vlastností dřeva, ze všech takových činitelů mají tyto dva dokonce na vlastnosti dřeva nejzásadnější vliv. Také se o nich nejčastěji uvažuje jako o nejdůležitějších faktorech ovlivňujících průběh technologických procesů zpracování dřeva (Babiak, Dubovský 2001).

3.2.1. VODA VE DŘEVĚ

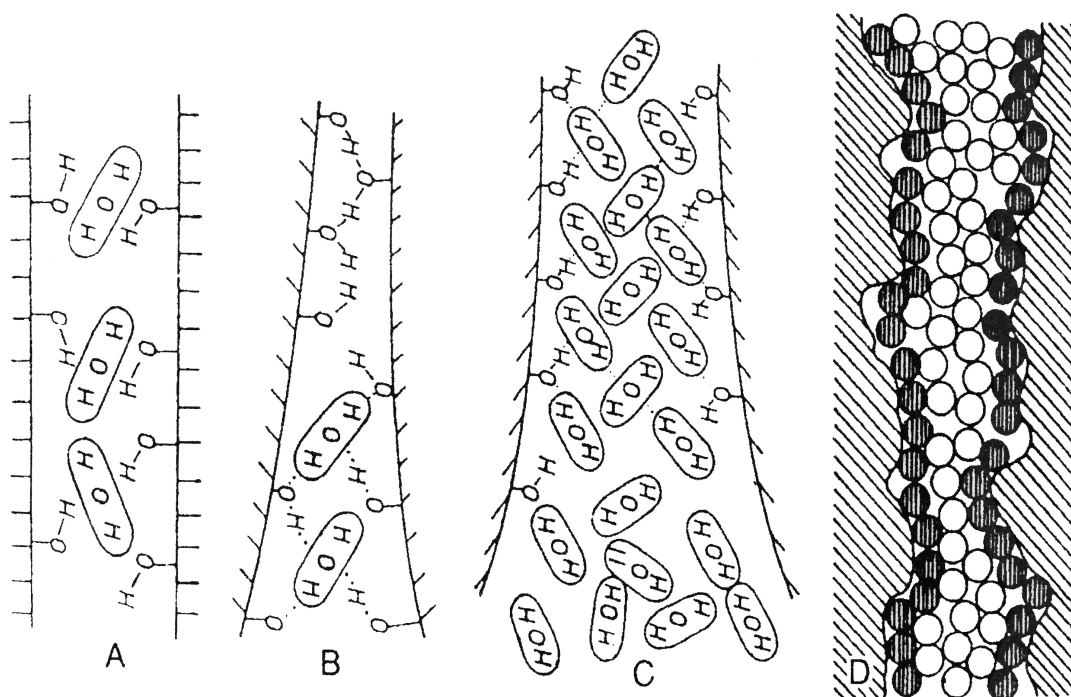
Vzhledem ke své hygroskopicitě je prakticky vyloučené, aby dřevo žádnou vodu neobsahovalo. Voda ve dřevě má vliv na všechny jeho vlastnosti, což je důvodem, proč se voda musí brát jako důležitý faktor při zkoumání chování dřeva (Borůvka 2016). Hmotnost vody obsažené ve dřevě vztažená k dané hmotnosti dřeva je obecně nazývána vlhkostí dřeva, která se nejčastěji vyjadřuje v %. Absolutní vlhkost dřeva je množství vody vztažené k hmotnosti absolutně suchého dřeva:

$$w_{\text{abs}} = \frac{m_w - m_0}{m_0} 100$$

Relativní vlhkost dřeva je množství vody vztažené k hmotnosti dřeva vlhkého:

$$w_{\text{rel}} = \frac{m_w - m_0}{m_w} 100$$

Molekuly vody mohou být ve dřevě uloženy jedním ze tří způsobů, na základě kterých rozeznáváme vodu chemicky vázanou, vázanou – hygroskopickou a volnou – kapilární. Chemicky vázaná voda je zastoupena ve dřevě jako součást chemických sloučenin a zůstává v materiálu až do jeho spálení, nelze tedy ze struktury odstranit sušením. Z hlediska změn fyzikálních a mechanických vlastností dřeva nemá chemicky vázaná voda žádný význam. Voda vázaná – hygroskopická je pomocí mezimolekulárních interakcí, tzv. vodíkových můstků, vázána na hydroxylové skupiny přítomné v amorfni části celulózy a v molekulách hemicelulóz. Co se týká vlivu na mechanické a fyzikální vlastnosti, má právě voda vázaná zcela zásadní význam. Ve dřevě se běžně vyskytuje při vlhkostech do 30%, při vyšší vlhkosti už mluvíme o vodě volné – kapilární. Voda volná ve dřevě vyplňuje mezibuněčné prostory a je ukládána v lumenech buněk. Na fyzikální a mechanické charakteristiky má výrazně menší vliv, než jaký má voda vázaná (Horáček 1998).



Obr. č. 2: Voda ve dřevě a její postupné vrstvení při adsorpci - A až D (Horáček 1998).

3.2.2. DŘEVO A TEPLŮ

Dřevo je známé jako dobrý izolační materiál, má schopnost pohlcovat teplo. Tepelné vlastnosti dřeva jsou popisovány fyzikálními veličinami, jako jsou

měrné teplo nebo tepelná či teplotní vodivost. Citlivosti dřeva na změnu teploty se využívá v mnoha technologických a výrobních procesech a poznatky o jeho tepelných vlastnostech jsou důležité při ohřevu, paření, sušení, nebo třeba při impregnaci dřeva. Nutno poznamenat, že při jakékoli změně teploty dochází k vlhkostním změnám ve dřevě a je tedy zřejmé, že vlhkost a teplota spolu velmi úzce souvisejí také jako faktory, které ovlivňují mechanické vlastnosti dřeva.

Při působení vyšších teplot dochází ke zhoršování mechanických vlastností s rostoucí teplotou, dobou působení vysoké teploty a samozřejmě s narůstající vlhkostí. Ovlivněna je tímto pevnost v tlaku, tahu a ohybu, rázová houževnatost a také modul pružnosti. Obecně se dřevo při vyšších teplotách stává křehčím (Matovič 1993).

Teplotní roztažnost u dřeva nabývá relativně nízkých hodnot a často se zanedbává. Zejména oproti vlhkostní roztažnosti (bobtnání a sesychání) je koeficient teplotní roztažnosti velmi malý. V určitých technologických procesech, například při lisování, může ale dojít k situaci, kdy je změna teploty výrazně vyšší než změna vlhkosti a tehdy má teplota nezanedbatelný vliv (Požgaj a kol. 1997).

3.2.3. PEVNOST A PRUŽNOST

Pevnost je schopnost materiálu odolávat porušení vlastní struktury, způsobenému mechanickým zatížením. Čím vyšší maximální hodnotě napětí dokáže materiál odolat bez destrukce, tím je pevnější. Tato hranice se nazývá mez pevnosti. Ta se stanovuje zvláště pro tlak, tah, smyk, ohyb a krut, v případě dřeva jako anizotropního materiálu má také smysl rozlišovat mezi napětím podél vláken, kolmo na vlákna v radiálním směru a kolmo na vlákna ve směru tangenciálním (Matovič 1993).

Pružnost materiálu je jeho schopnost měnit svoje rozměry a tvar při působení vnějších sil a poté, co síly přestanou působit, zpátky nabývat původních rozměrů a tvaru. Jak uvádí Borůvka a Babiak (2016): „*Pružnost je schopnost materiálu absorbovat energii v rámci pružných deformací, anebo schopnost dřeva získat původní tvar a rozměry po odtížení.*” Zatímco pružnost dřeva při krátkodobém zatížení můžeme charakterizovat pomocí modulu pružnosti a koeficientu příčné

deformace – Poissonova čísla, průběh deformací při dlouhodobých zatíženích popisujeme za pomoci reologických parametrů (Matovič 1993).

3.2.3.1. NAPĚTÍ A DEFORMACE

Během působení vnějších sil na dřevěné těleso vzniká ve dřevě napětí. To se projevuje vnitřními silami, které se v tělese objevují jako reakce na působení sil vnějších. Velikost napětí určujeme podle vztahu

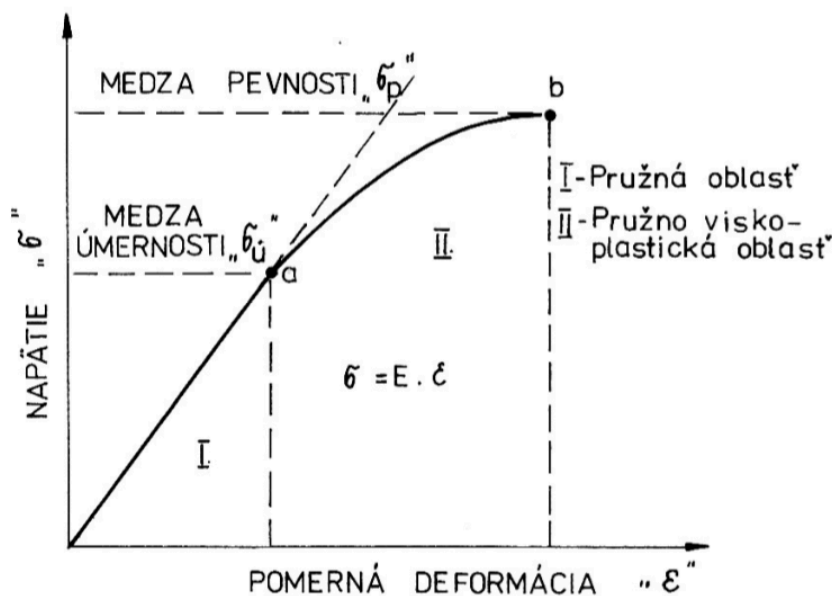
$$\sigma = \frac{F}{S}$$

z velikosti vnitřní síly vztažené na jednotku plochy tělesa. Pokud síly působí kolmo na průřezovou plochu, nazýváme vzniklé napětí normálovým a značíme ho σ . Při působení sil v rovině průřezu se jedná o tangenciální napětí τ (Gandelová 2009).

Působící síly vyvolávají v tělese změnu tvarů a rozměrů, kterou nazýváme deformací. Deformace je spojena s posunutím bodů v tělese. Pokud mluvíme o změně tvaru tělesa, může se kromě jednoduchého prodloužení (následek tahu) a zkrácení (následek tlaku) jednotkový objem dřeva změnit na kosodélníkový tvar. Po kvalitativní stránce se deformace rozdělují na pružné deformace ε_p , deformace pružné v čase $\varepsilon_{p\check{c}}$ a plastické deformace ε_{pl} . S ohledem na vlastnosti dřeva také nesmíme opomenout deformace mechanosorpční. Pružná deformace je vratná změna rozměrů a tvaru dřeva, která okamžitě odezní, když se ukončí působení vnějších sil na těleso. Deformace pružná v čase je vratná změna rozměrů a tvaru, která se vrací až po uplynutí určitého času. Tento druh deformace ve dřevě vzniká také až za nějakou dobu působení vnějších sil. Vratnost viskoelastické deformace je charakterizována veličinou nazvanou relaxační čas. Relaxační čas souvisí s rychlostí dosažení rovnovážné hodnoty deformace pružné v čase. Je třeba zmínit, že k úplnému odeznění viskoelastických deformací po odtížení je třeba čas odpovídající několikanásobku hodnoty relaxačního času τ_{vel} . Plastická deformace je trvalá, zcela nevratná změna rozměrů a tvaru tělesa, která po ukončení působení vnějších

mechanických sil a odeznění elastických deformací zůstává, přičemž těleso získává nový tvar (Gandelová 2009, Babiak a Dubovský 2001).

Vztah mezi napětím σ a poměrnou deformací ε popisuje napětovo-deformační diagram (obr. č. 3), který poskytuje komplexní informaci o chování dřeva při zatížení.



Obr. č. 3: Napětovo-deformační diagram dřeva (Požgaj a kol. 1997).

Mezi důležité body na napětovo-deformační křivce patří mez úměrnosti σ_a , kterou můžeme definovat jako rozhraní lineární a nelineární části křivky, dále mez pevnosti, která udává napětí v okamžiku, který předchází porušení materiálu. (Babiak 2001).

Teoreticky bychom mohli rozlišovat na lineárním úseku křivky ještě mez pružnosti, která je definována jako rozhraní pružných a trvalých deformací. Vzhledem k tomu, že ve dřevě se trvalé deformace mohou vyskytnout už při působení malých zatížení, mez pružnosti není možné přesně stanovit, lze jen odhadnout, při jakém přibližném napětí jí bude dosaženo. V praktickém použití mez úměrnosti ztotožňujeme s mezí pružnosti. To znamená, že pro část křivky platí Hookův zákon - napětí je přímo úměrné deformaci, tedy

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Modul pružnosti E je materiálová konstanta a teoreticky představuje napětí, působením kterého by se těleso prodloužilo o vlastní délku (Borůvka 2016). Pro statické zatížení v ohybu se určuje Youngův modul pružnosti ve směru kolmo na vlákna a zkouší se výhradně v tangenciálním směru, pro materiály na bázi dřeva kolmo na rovinu desky (Matovič 1993).

3.3. REOLOGIE DŘEVA

3.3.1. CO JE REOLOGIE

Název reologie vychází z řeckého rheos = tok, proud. Reologie je vědní disciplína, která se pokládá za odvětví fyziky, resp. mechaniky. Zabývá se obecnými zákonitostmi rozvoje deformace v materiálech a věnuje se tečení látek v závislosti na čase. Jak uvádí Sobotka (1981): „*Reologie zkoumá, jak se mění a přetvářejí a tečou i proudí kapaliny a plyny za působení mechanických vlivů.*” Protože dřevo je viskoelastický materiál, spadá také zkoumání jeho chování pod obor reologie. V souvislosti se dřevem je analýza vztahu mezi napětím, deformací a časem velmi zajímavá a oproti jiným materiálům relativně složitá. Reologie jako taková se podle průběhu reologických závislostí (tedy vývoje vztahů mezi napětím a deformacemi v čase) člení na reologii lineární, nelineární a transcendentní. Transcendentní reologie řeší takové deformační procesy, které jsou postupně ovlivňovány strukturálními změnami v materiálu, nebo dokonce za současného vlivu sorpčních procesů ve struktuře. Tyto strukturální a sorpční změny mají zejména v případě dřeva velkou důležitost (Požgaj a kol. 1997).

Zatím stále málo zkoumanou problematikou reologie dřeva zůstává právě jeho tečení v závislosti na vlhkosti. Tento jev byl popsán jako „mechanosorpční creep” a při jeho popisování je nutné brát v úvahu kromě napětí způsobených vnějšími silami také napětí vznikající uvnitř dřeva jako reakce na teplotní a vlhkostní podmínky. Dřevo je schopné měnit svou vlhkost podle okolí a s tím je také spojena změna rozměrů v rámci bobtnání a sesychání, která má samozřejmě svůj vliv na výsledné deformace (Obucina, Dzaferovic a Bajramovic 2009).

Poznatky o reologii dřeva jsou významné zejména ze dvou pohledů: kromě zákonitostí z hlediska použití dřeva za konstrukčními účely má velkou důležitost také výzkum a predikce chování dřeva z hlediska jeho technologického zpracování. Výsledky reologických výzkumů se uplatňují zejména v těch odvětvích zpracování dřeva, kdy dochází ke změnám rozměrů nebo tvaru a obzvlášť tehdy, pokud v procesu hraje roli změna teploty a vlhkosti dřeva. Mezi takové případy patří mimo jiné třeba ohýbání dřeva, tvarové lisování nebo výroba aglomerovaných materiálů na bázi dřeva. Je ale třeba zmínit, že přímé analytické vyjadřování reologických procesů ve dřevě je záležitostí velmi složitou (Požgaj a kol. 1997).

Chování těles (a stejně tak i chování reologických modelů) jsme schopni vyjádřit za využití vztahů mezi napětím a deformacemi a jejich průběhu v závislosti na čase. Tyto vztahy se nazývají reologické (modelové) rovnice. Číselné údaje neboli parametry, kterými je materiál charakterizován, označujeme jako „reologické parametry“. Napětí a deformace jsou pro účely popisování chování materiálů reologickými proměnnými (Matovič 1993).

3.3.2. TEČENÍ DŘEVA

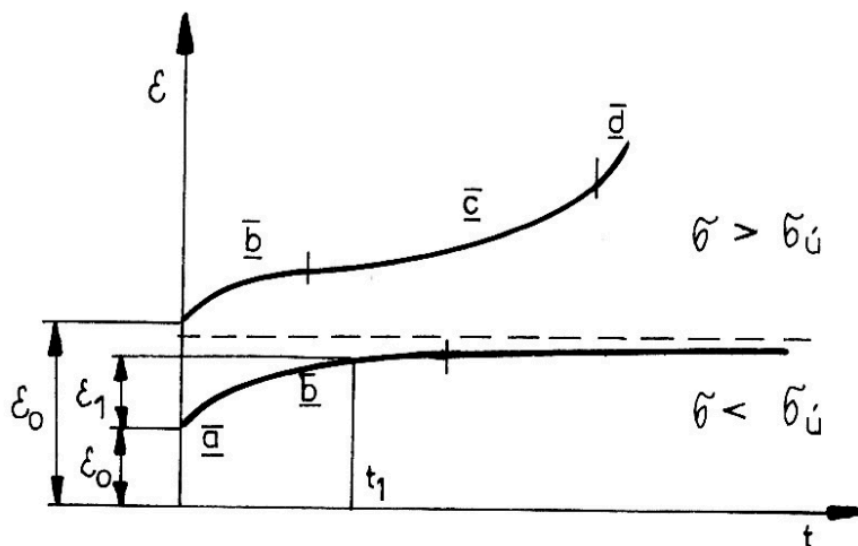
Ve skutečnosti je chování každého materiálu nějakým způsobem odlišné od teorie Hookova zákona. Některé pevné látky například vykazují zároveň elastické vlastnosti pevné látky a viskozitu kapaliny a tím přitom do určité míry podléhají vztahu $\sigma = \frac{\eta d\varepsilon}{dt}$, kde η je součinitel dynamické viskozity v kapalině. Viskoelastické materiály jsou ty materiály, pro které platí, že závislost mezi napětím a deformací závisí na čase (Lakes 2009).

Dřevo je materiálem viskoelastickým, tedy při dlouhodobém zatížení vykazuje zároveň vlastnosti pevných látek a kapalin. Tato jeho vlastnost, nazývaná tečení neboli creep, má za následek, že deformace pružné, pružné v čase a plastické vznikají současně, a to nejen při napětích nad, ale i pod mezí úměrnosti. Tečením dřeva se zabývá výše zmíněná vědní disciplína zvaná reologie (Požgaj a kol. 1997).

Při krátkodobém zatížení dřeva je vztah mezi napětím a deformací ve všech případech namáhání úměrný až po mez úměrnosti a vznikají zde pouze pružné deformace, tedy takové, které se po ukončení působení napětí neprojeví na tvaru

tělesa. V oblasti nad mezí úměrnosti po mez pevnosti pak vedle pružných deformací vznikají také deformace pružné v čase, tedy vratné po určité době, a deformace plastické neboli trvalé. Při dlouhodobém zatížení dřeva vznikají zároveň s deformacemi pružnými také deformace pružné v čase a deformace plastické, a to i tehdy, jsou-li vnější síly působící na těleso menší, než síly na mezí úměrnosti (Požgaj a kol. 1997)

Různý průběh tečení dřeva (křivky závislosti poměrné deformace ε na čase t) při zatížení pod mezí úměrnosti a nad ní znázorňuje diagram na obrázku č. 4:



Obr. č. 4: Průběh tečení dřeva při napětích pod a nad mezí úměrnosti (Požgaj a kol. 1997).

Ve chvíli uvolnění působících sil po určitém čase začne celková vzniklá deformace postupně klesat, ačkoli do původního tvaru už se těleso zpátky nevrátí. Pružné deformace zanikají okamžitě po odtížení. Deformace pružné v čase zanikají postupně, přičemž doba potřebná k jejich úplnému odeznění je určená veličinou, která se nazývá relaxační čas a značí se τ_{vel} . K úplnému odeznění deformací pružných v čase je potřeba až několikanásobek relaxačního času. Trvalá plastická deformace, která po odtížení setrvává, je tím větší, čím déle bylo dřevo pod zatížením (Gandelová a kol. 2009).

Celkový průběh tečení dřeva je možné rozdělit do čtyř fází. V první fázi se okamžitě s vyvinutím zatěžující síly rozvíjejí pružné deformace, jejich velikost závisí

přímo na velikosti působící síly. Ve druhé fázi dochází k takzvanému dopružování dřeva, kdy vznikají deformace pružné v čase a plastické deformace. Třetí fáze tečení nastává tehdy, pokud se hodnota napětí pohybuje v oblasti nad mezí úměrnosti. V takovém případě nastupuje velmi výrazný nárůst plastických deformací. Ve čtvrté fázi deformace tělesa vrcholí porušením materiálu s projevy lomu dřeva (Požgaj a kol. 1997).

3.3.3. REOLOGICKÉ MODELY

3.3.3.1. ZÁKLADNÍ REOLOGICKÉ LÁTKY

„Problematika tečení dřeva a materiálů na bázi dřeva je značně složitá a proto je snaha řešit tyto problémy pomocí definovaných podmínek a za pomoci modelů” (Matovič 1993). Tyto modely jsou vytvářeny na základě látek a materiálů, které podléhají deformacím pružným, pružným v čase a plastickým a jejichž chování pod zatížením je možné jednodušeji matematicky popsat. Charakteristiky chování reálných těles ze dřeva nebo materiálů na bázi dřeva pod zatížením se více či méně blíží matematickým charakteristikám, které popisují chování různých modelových těles při stejném zatížení. Takové srovnání nám pomáhá lépe popsat deformační účinky mechanických sil působících dlouhodobě na dřevo (Matovič 1993).

K popisování tečení různých polymerů, mezi nimi také dřeva, slouží mechanické (reologické) modely, které se sestávají ze souboru fyzikálních těles se známým chováním. Jedná se pro tyto účely především o pružinu a válec s pístem a kapalinou (Dinwoodie 2009).

Zcela základní chování materiálů popisujeme na bázi jednoduchých látek, které představují ideálně pružnou hmotu a ideálně plastickou hmotu. Těmito látkami jsou model pružného tělesa zastoupený ideální pružinou a model plastického tělesa charakterizovaný válcem s pístem a viskózní kapalinou. Deformace pružiny je dosaženo okamžitě a její velikost je dána Hookovým zákonem:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

Pohybovou rovnicí pro válec s pístem je rovnice

$$\eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} = \sigma,$$

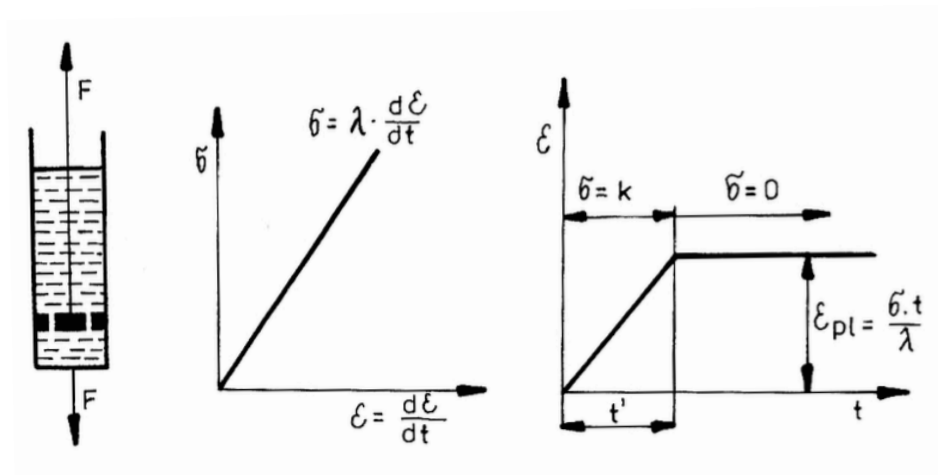
kde η je viskozita kapaliny ve válci s pístem. Při konstantním napětí a neměnné viskozitě platí:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\eta} \cdot t$$

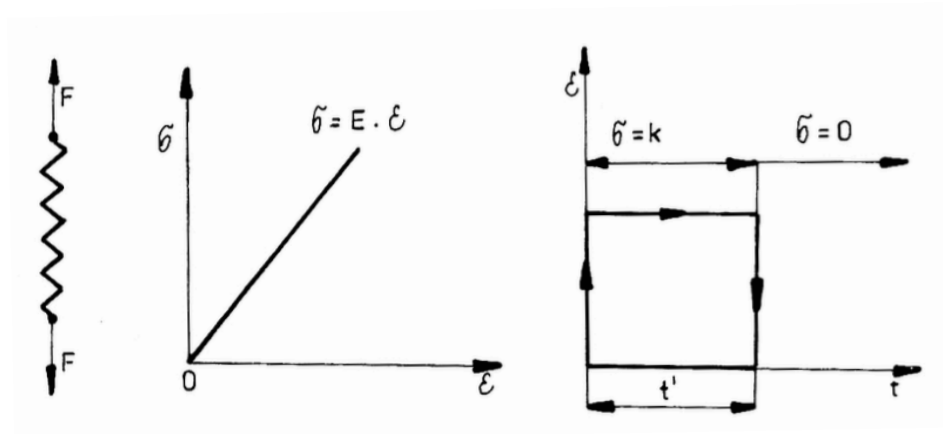
Pokud se napětí s časem mění, potom platí následující vztah (Babiak a Dubovský 2001, Borůvka 2016):

$$\varepsilon = \frac{1}{\eta} \cdot \int_0^t \sigma(\xi) d\xi$$

Pro modelování průběhu deformací různých materiálů, které se při konstantním zatížení chovají částečně pružně a částečně plasticky, obvykle používáme různé kombinace vzájemného zapojení pružiny a válce s pístem a viskózní kapalinou (Matovič 1993).

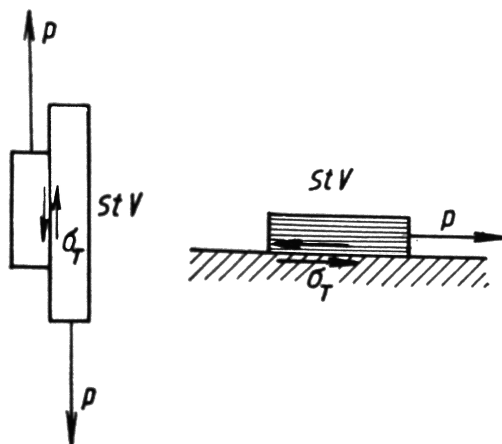


Obr. č. 5: Reologický model pružiny (Požgaj a kol. 1997).



Obr. č. 6: Reologický model pístu s kapalinou (Požgaj a kol. 1997).

Při simulaci tečení pevných látek se uvažuje také s takzvanou Saint Venantovou plastickou látkou. Ta je charakteristická tím, že se jako pevná látka chová pouze do meze plasticity, ale po jejím překročení vykazuje vlastnosti látky tekuté. St. Venantova plastická látka je v reologii zastoupena destičkou přitlačovanou na podložku, nebo dvěma destičkami přitlačovanými k sobě. Tímto vzniká podélné tření, které roste s napětím, dokud setrvávají destičky (nebo destička s podložkou) vůči sobě v klidu. Po uvedení do pohybu se tření zmenší oproti dosaženému maximu a zůstává už konstantním (Lakes 2009).



Obr. č. 7: Reologický model Saint-Venantovy plastické látky (Sobotka 1981).

St. Venantova plastická látka je využita například v modelu Binghamově (přítlačné destičky jsou zapojeny vedle válce s pístem, tedy paralelně k němu) nebo v Saint-Venantově modelu (zde je pár třených destiček zapojen do série

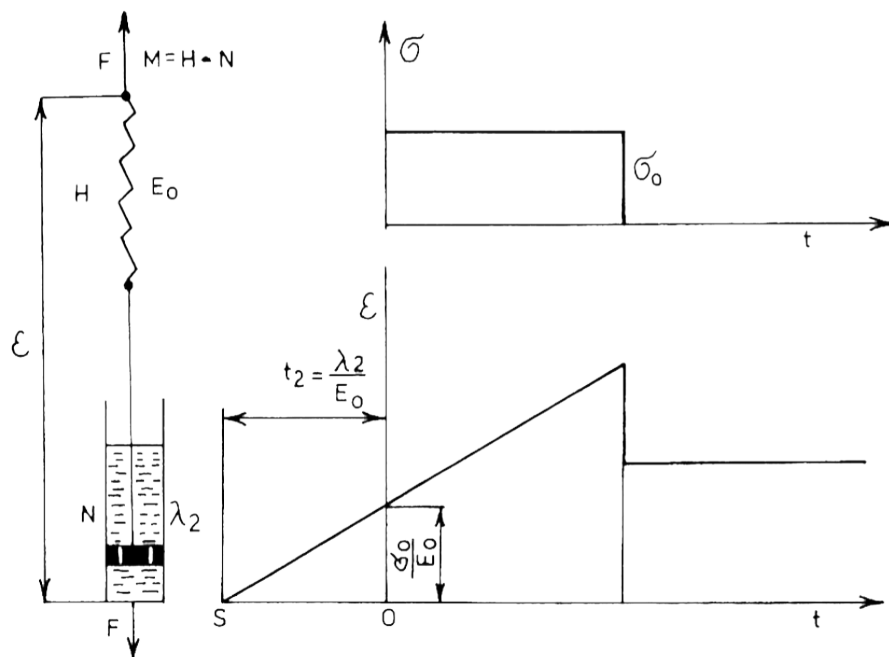
s Newtonovskou pružinou). V obou těchto případech může plastická látka modelovat tuhnutí, resp. tvrdnutí materiálu při zvýšeném napětí (Kovalchenko 2013).

3.3.3.2. MAXWELLŮV MODEL

Materiály, které při působení konstantního zatížení vykazují jak pružné, tak i plastické chování, simulujeme různými kombinacemi pružiny a válce s pístem a kapalinou, spojených do jednoho tělesa. Toto zapojení může být v nejjednodušším případě za sebou - sériově - nebo vedle sebe - paralelně. Zapojením pružiny a válce s pístem naplněným kapalinou za sebe do podélné osy (obrázek č. 8) dostaneme tzv. pružně-plastický model Maxwellův (Matovič 1993). Po vystavení napětí tento model znázorňuje okamžitou pružnou deformaci natahováním pružiny, zatímco pozvolné tečení pístu reprezentuje plastickou deformaci. Výslednou celkovou deformaci získáme součtem obou složek, tedy pružné deformace od pružiny a plastické deformace od pístu:

$$\varepsilon = \varepsilon_p + \varepsilon_{pl}$$

Celkové napětí a napětí v obou částech tělesa je pro tento model stejné (Požgaj a kol. 1997).



Obr. č. 8: Maxwellův model a průběh jeho dopružování (Požgaj a kol. 1997, podle Sobotky 1981).

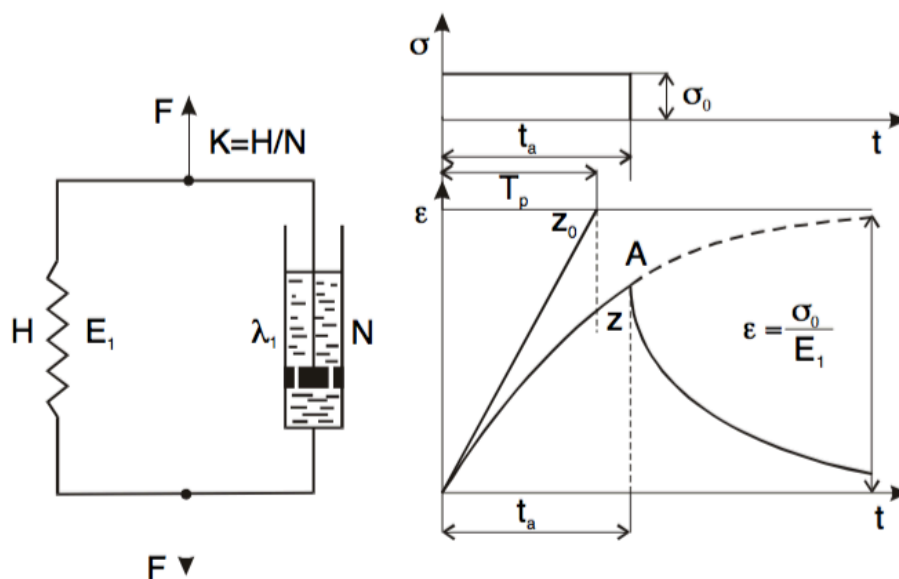
3.3.3.3. KELVINŮV MODEL

Vazkopružné deformace modelujeme nejčastěji za použití Kelvinova tělesa. To vzniká zapojením pružiny a válce s pístem vedle sebe (obrázek č. 9). Při tomto zapojení se po zatížení píst a pružina pohybují současně. Neřešíme zde podíly deformací jednotlivých elementů na celkové deformaci, protože deformace je v případě Kelvinova modelu pro oba prvky totožná. Platí tedy:

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

Naopak napětí na jednotlivých tělesech se liší, přičemž výsledné celkové působící napětí je rovno součtu napětí na pístu a napětí na pružině. Jeho hodnotu vyjadřuje rovnice (Požgaj a kol. 1997):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_0 + \eta_1 \frac{d\varepsilon_{pl}}{dt}$$



Obr. č. 9: Kelvinův model a průběh deformace jeho elementů (Borůvka 2000).

3.3.3.4. THOMPSONŮV-POYNTINGŮV MODEL

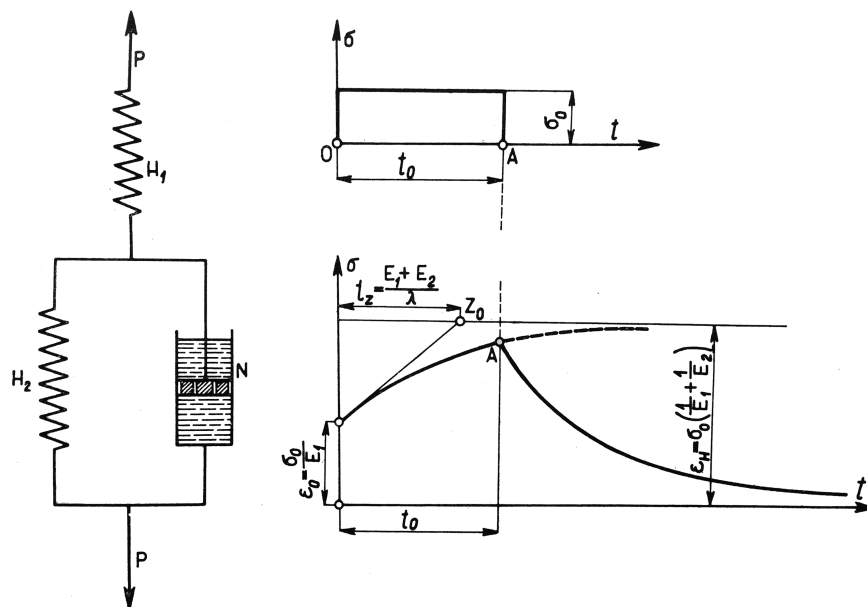
Mimo zmíněné modely Maxwellův a Kelvinův existují i jiné kombinace zapojení jednoduchých reologických látek, jejichž použití závisí na charakteru sledovaných vlastností daného materiálu. Mezi takové modely patří také model

Thompsonův-Poyntingův, který se skládá z Kelvinovy jednotky a na ni připojené pružiny. Tento model má využití zejména při napětích pod mezí úměrnosti, protože pomocí něho není možné vyjádřit plastické deformace (Matovič 1993).

Celková deformace Thompsonova-Poyntingova modelu se určí jako součet deformací na pružině (ε_0) a deformace na Kelvinově jednotce (ε_1):

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_1, \quad \text{kde } \varepsilon_0 = \frac{\sigma}{E_0} \text{ a kde } \varepsilon_{01} = \frac{\sigma}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t}\right)$$

Napětí je podle reologických pravidel stejné na obou z těchto skupin (Požgaj a kol. 1997).

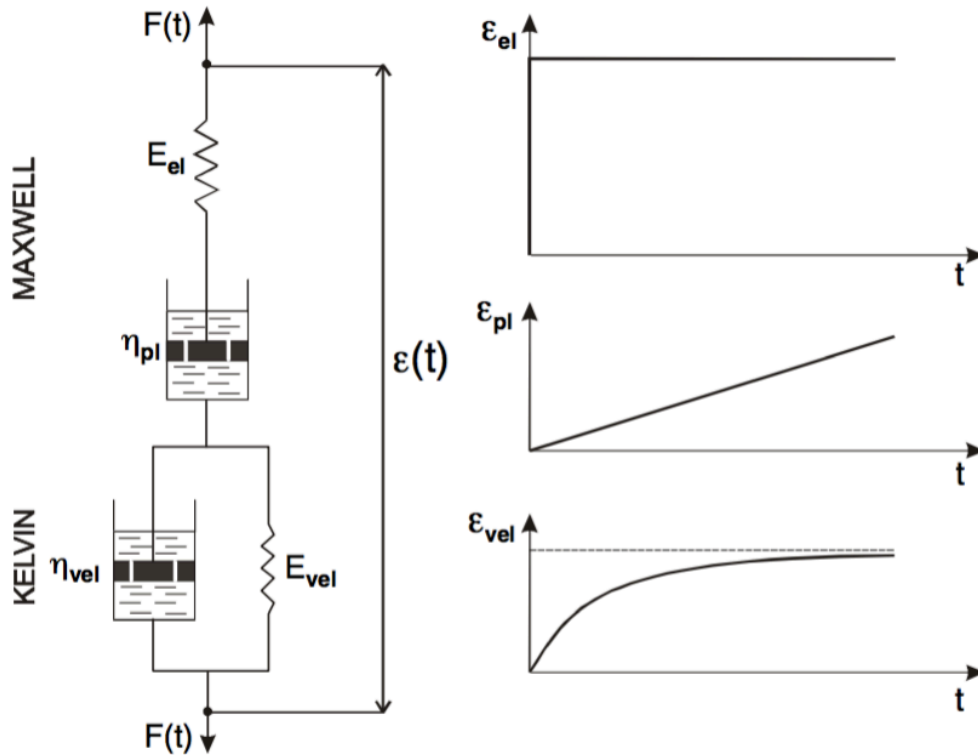


Obr. č. 10: Thompsonův-Poyntingův model a průběh deformace jeho elementů (Sobotka 1981).

3.3.3.5. BURGERŮV MODEL

Reologické vlastnosti dřeva se většinou popisují za použití Burgerova modelu. Ten kombinuje čtyři základní reologické jednotky (dvě pružiny a dva válce s pístem) a může nabývat dvou mechanicky ekvivalentních podob (Barnes et al. 1989). Při modelování tečení dřeva je ale pro přehlednost vhodné použít tu jeho formu, která se skládá z Maxwellovy jednotky a Kelvinovy jednotky za sebou, jak ukazuje obrázek č. 11. Jedná se tedy o sériové zapojení pružiny, která symbolizuje elastickou deformaci, pístu zastupujícího plastické deformace

a Kelvinova tělesa pro znázornění viskoelastických deformací (Borůvka 2016). Druhá varianta zapojení nerozkládá deformace na jednotlivé druhy a není tím pádem pro účely modelování dostatečně názorná.



Obr. č. 11: Burgerův model a průběh deformace jeho elementů (Borůvka 2016).

Zatížení Burgerova modelu je rozneseno do všech dílčích elementů, které na napětí reagují (deformují se) různě. Pro hodnotu celkového napětí platí následující vztah, kde σ_B , σ_M a σ_K zastupují napětí na Burgerově modelu jako celku, napětí na Maxwellově jednotce a napětí na Kelvinově jednotce (Borůvka 2000):

$$\sigma_B = \sigma_M = \sigma_K$$

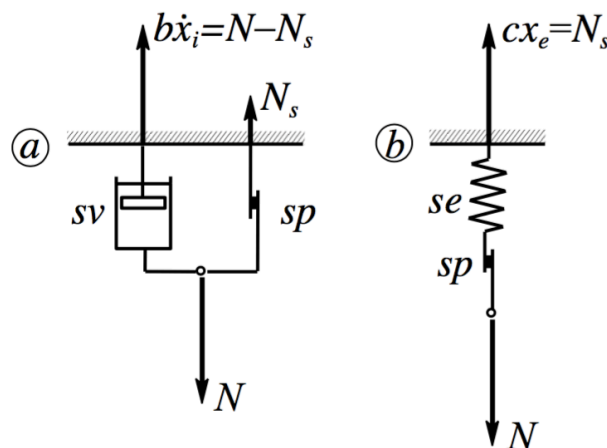
Celková deformace je součtem deformací na jednotlivých člancích:

$$\epsilon_{cel} = \epsilon_{el} + \epsilon_{pl} + \epsilon_{vel},$$

kde ε_{el} je deformace pružiny (pružná deformace), ε_{pl} je deformace na válci s pístem (plastická deformace) a ε_{vel} je vazkopružná deformace na Kelvinově jednotce (Betten 2002).

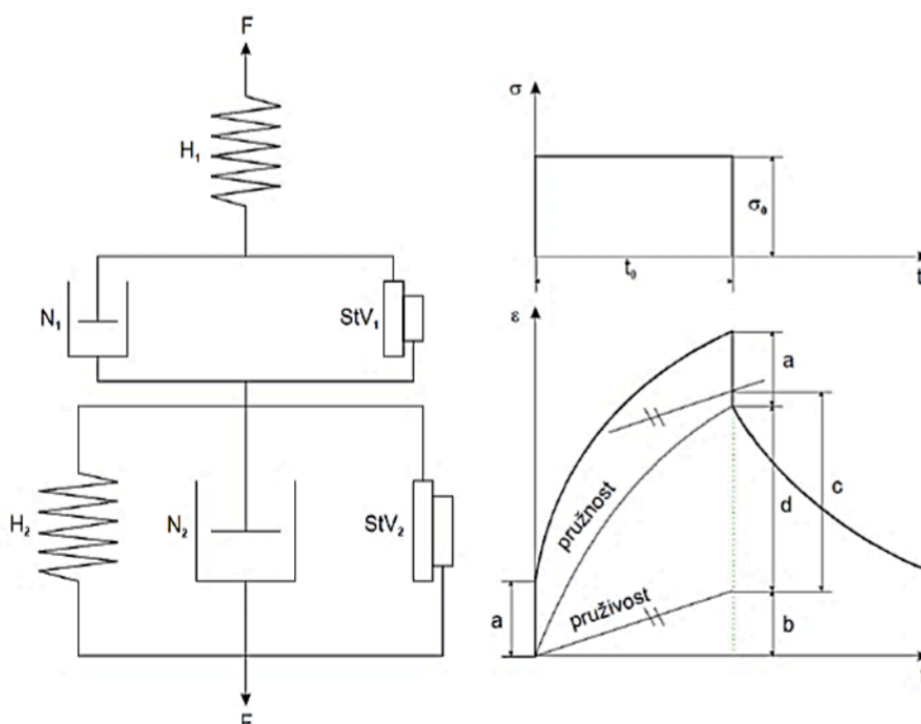
3.3.3.6. DALŠÍ REOLOGICKÉ MODELÝ

Kromě těchto základních reologických modelů se v praxi vyskytuje ještě mnoho dalších modelů, které mají různou podobu i využití. Namátkou je možné zmínit například model Zenerův nebo také v kapitole 3.3.3.1. uvedené modely Binghamův a Saint-Venantův (obr. č. 12), obsahující vláčný prvek v podobě přitlačných destiček. Binghamův model je ve své podstatě obdobou Maxwelllova modelu s tím rozdílem, že časové závislosti deformace se dosahuje až s překročením meze vláčnosti. Do té chvíle deformace s napětím narůstá lineárně (Sobotka 1981).



Obr. č. 12: Binghamův (a) a Saint-Venantův (b) model: *se* je elastický prvek, *sv* viskoelastický element a *sp* plastický vláčný prvek (Kovalchenko 2013).

Z Burgerova modelu vychází některé další reologické modely. Sobotka (1981) popsal nelineární Burgerův model, tzv. reologický model základní hmoty, který se skládá ze dvou pružných, dvou vazkých a dvou tvárných (vláčných) prvků. Sobotkův model slouží k vyjádření složitějších vratných i nevratných deformačních dějů v materiálech pro napětí překračující mez vláčnosti a má uplatnění především při modelování tečení betonu (Sobotka 1981).



Obr. č. 13: Nelineární Burgerův model s vláčnými prvky (Sobotka 1981)

Pětiprvkový upravený Burgerův model podle Fridleyho se taktéž využívá k predikci chování materiálu pod zatížením, přičemž ale bere v potaz i změnu okolního prostředí. Při vyjádření celkové deformace upraveného Burgerova modelu pak figuruje změna vlhkosti jako další proměnná, navíc přibývá také proměnná související s rychlostí ustálení vlhkostní rovnováhy v materiálu. Tento model je tedy částečně použitelný i pro modelování tečení dřeva v nestálých vlhkostních podmínkách a v kapitole 5. této práce je ukázána jeho aplikace při vyhodnocení závislosti průběhu deformací v čase při měnící se vlhkosti (Shen 1996).

4. METODIKA

4.1. VOLBA VHODNÝCH MODELŮ

Po nahlédnutí do problematiky tečení dřeva a po prostudování literatury související s tématem této práce je zřejmé, že pro smysluplné modelování tečení dřeva lze efektivně použít jen některé reologické modely. Dřevo se při trvalém

zatížení chová jako viskoelastický materiál s lineárním průběhem deformací, je ale navíc citlivé na změny charakteru prostředí, tedy změnu teploty a zejména pak změnu vlhkosti.

Ve dřevě vznikají odlišné druhy deformací. Některé jsou přímo vyvolané zatížením (deformace pružné, pružné v čase a plastické), jiné se objevují jako reakce na změnu vlhkosti anebo teploty (bobtnání a sesychání, teplotní roztažnost) a tím zároveň vyvolávají dodatečné napětí v tělese. Vhodný model pro dřevo by měl být v ideálním případě citlivý na všechny tyto aspekty, respektive by měl být schopný pracovat se všemi druhy mechanických deformací přítomných ve dřevě a navíc by měl zohledňovat také vlhkostní a teplotní změny, pokud je takovým změnám dřevo při zátěži vystaveno. Tato podmínka samozřejmě značně znesnadňuje výběr adekvátních reologických modelů.

Naměřená data, která byla poskytnuta pro účely této práce, pocházejí ze dvou různých pracovišť. V obou případech se jedná o zatížení v ohybu, byl snímán průhyb a z něj následně určena poměrná deformace zkušebních těles.

První měření probíhalo v laboratoři Katedry zpracování dřeva a biomateriálů Fakulty lesnické a dřevařské v Praze. Zde byly vzorky vystaveny zatížení o velikosti 40% z meze pevnosti, stanovené na základě statické zkoušky pevnosti v ohybu na paralelních vzorcích. Měření deformace v čase probíhalo ve stálém prostředí, tedy bez výrazné změny vlhkosti a teploty, na creepovém zkušebním zařízení pro dlouhodobé zatížení dřeva v ohybu (ČZU v Praze 2016, patent). Druhé měření bylo prováděno v kryté venkovní expozici na TU Zvolen a tedy se zde projevila i změna relativní vlhkosti vzduchu a také výkyvy teplot, přičemž vlhkost byla měřena současně s průhybem vzorků. V tomto případě se jednalo o napětí ve velikosti 25% z meze pevnosti (viz výše).

Vzhledem k vlastnostem dřeva a charakteru obou zmíněných měření se pro modelování tečení dřeva ukázaly jako vhodné Burgerův model a upravený Burgerův model. Oba tyto modely obsahují prvky reprezentující jak pružné deformace, tak i deformace pružné v čase a plastické. Jsme s jejich pomocí dokonce schopni vyčíslit podíly jednotlivých deformačních složek na celkové deformaci. Proto byly k vyhodnocení průběhu deformace zkušebních těles v čase využity právě tyto dva modely. Mimo nich byl také použit model Thompsonův-Poyntingův, který podle

všeho není zcela efektivní při napětích vyšších než je mez úměrnosti, kde není schopen simulovat plastické deformace. Pro názornost budou ale dále uvedeny i výsledky modelování pomocí tohoto modelu.

Reologické modely, ve kterých je začleněna Saint-Venantova vláčná látka (tedy například model Binghamův nebo nelineární Burgerův model), se mohou zdát jako vhodné pro modelování tečení dřeva. Lineární závislost deformace a napětí, která se vyskytuje u St. Venantovy látky před dosažením meze vláčnosti, by mohla odpovídat prudkému nástupu deformací v první fázi zatěžování dřeva. Je ale nutné poznamenat, že při napětích nižších než je mez vláčnosti se chová vláčný prvek jako pevná hmota, což zásadně neodpovídá chování dřeva. To charakteristicky vykazuje vlastnosti vazkopružné kapaliny i při nízkých napětích, což je také důvodem, proč zmíněné modely s vláčnými prvky zřejmě nejsou pro dřevo zcela vhodné.

4.2. URČENÍ MODELOVÝCH FUNKCÍ

Struktura a základní charakteristika Burgerova modelu je popsána v kapitole 3.3.3.5. této práce. Pro modelování tečení dřeva pomocí tohoto modelu budeme vycházet ze základních rovnic pro deformace jednotlivých jeho elementů. S využitím matematických operací stanovíme modelovou funkci a následně jí proložíme naměřené hodnoty závislosti deformace dřeva na čase (a změně teploty, pro případ měření z TU Zvolen). Obdobným způsobem se bude postupovat i u ostatních použitých modelů.

Burgerův model:

Jak již bylo zmíněno, vztah pro celkovou deformaci vypadá v případě Burgerova modelu následovně:

$$\varepsilon_{cel} = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} + \varepsilon_{vel}$$

Při konstantním napětí a s použitím vzorců pro základní reologické elementy můžeme vyjádřit vztah pro celkovou deformaci Burgerova modelu takto:

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

Za využití vztahu $\frac{\varepsilon_{cel}}{\sigma} = \frac{1}{E_{vel}}$ a po vydělení celého předchozího vztahu napětím σ dostáváme rovnici ve tvaru:

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

Po substituci získáme rovnici o dvou proměnných a se třemi parametry, kterou můžeme využít jako modelovou funkci Burgerova modelu:

$$v_2 = a \cdot (1 - e^{-b \cdot v_1}) + c \cdot v_1,$$

kde a , b a c jsou parametry modelové funkce a $v_1 = t$ a $v_2 = \frac{1}{E_{cel}} - \frac{1}{E_{el}}$ jsou proměnné (Sobotka 1981, Borůvka 2000).

Thompsonův-Poyntingův model:

V porovnání s Burgerovým modelem postrádá Thompsonův-Poyntingův model plastický element válce s pístem, v jeho modelové rovnici tedy nebude vystupovat člen $\frac{\sigma}{\eta_{pl}} \cdot t$. Ze vztahu pro celkovou deformaci ve tvaru $\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_1$ získáme obdobným způsobem jako u Burgerova modelu tentokrát dvouparametrovou modelovou funkci:

$$v_2 = a \cdot (1 - e^{-b \cdot v_1}).$$

Upravený Burgerův model

Celková deformace upraveného Burgerova modelu je odvozena od vyjádření deformací klasického Burgerova modelu:

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

kde μ_{ms} je parametr s rozměrem v jednotkách tlaku, $\Delta w = w_1 - w_0$ je rozdíl mezi aktuální a původní relativní vlhkostí prostředí a B_w je konstanta s jednotkou min^{-1} závislá na čase potřebném k nastolení rovnovážné vlhkosti (Shen 1996). Následně můžeme sestavit modelovou funkci upraveného Burgerova modelu:

$$v_3 = a \cdot (1 - e^{-b \cdot v_2}) + c \cdot v_2 + d \cdot v_1 \cdot (1 - e^{\pm e \cdot v_2})$$

se třemi proměnnými $v_1 = |\Delta w|$, $v_2 = t$ a $v_3 = \frac{1}{E_{cel}} - \frac{1}{E_{el}}$ a pěti parametry modelové funkce $a, b, c, d, a e$.

4.3. VÝPOČET REOLOGICKÝCH PARAMETRŮ

K vyhodnocení závislosti deformace na čase pomocí Thompsonova-Poyntingova, Burgerova a upraveného Burgerova modelu byl využit analytický software STATISTICA. Za pomoci nástroje nelineární regrese byly metodou nejmenších čtverců vypočteny hodnoty parametrů modelových funkcí. Následně, dosazením číselných hodnot parametrů do rovnic jednotlivých modelů, byly získány regresní křivky ke grafům závislosti deformace – čas. V případě upraveného Burgerova modelu se uvažuje také se změnou vlhkosti. Modelová funkce je tím pádem funkcí dvou proměnných a nejedná se tedy o křivku, ale o povrch. Na základě souladu regresních funkcí s naměřenými hodnotami lze vyhodnotit citlivost daného modelu pro modelování tečení dřeva. Ze získaných hodnot parametrů modelových funkcí je možné zpětně dopočítat reologické parametry, jako například velikost visko-elastické deformace nebo relaxační τ_{vel} . Tyto veličiny se určí výpočtem z následujících vztahů:

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

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

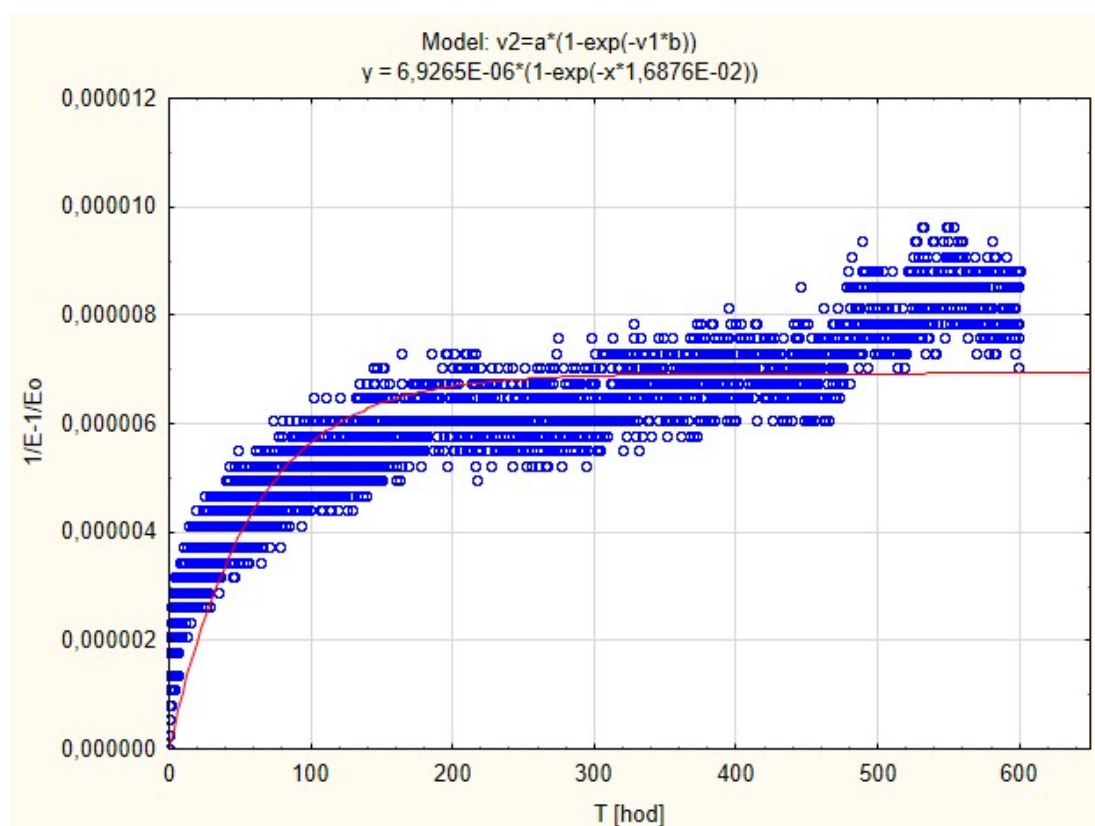
$$\eta_{vel} = \frac{1}{a \cdot b}$$

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

V rámci této práce byly v případě interiérových měření z Prahy použity modely Thompsonův-Poyntingův a Burgerův. K modelování za pomoci výsledků měření v kryté vnější expozici na pracovišti ve Zvoleně byly použity Burgerův model a upravený Burgerův model.

5. VÝSLEDKY

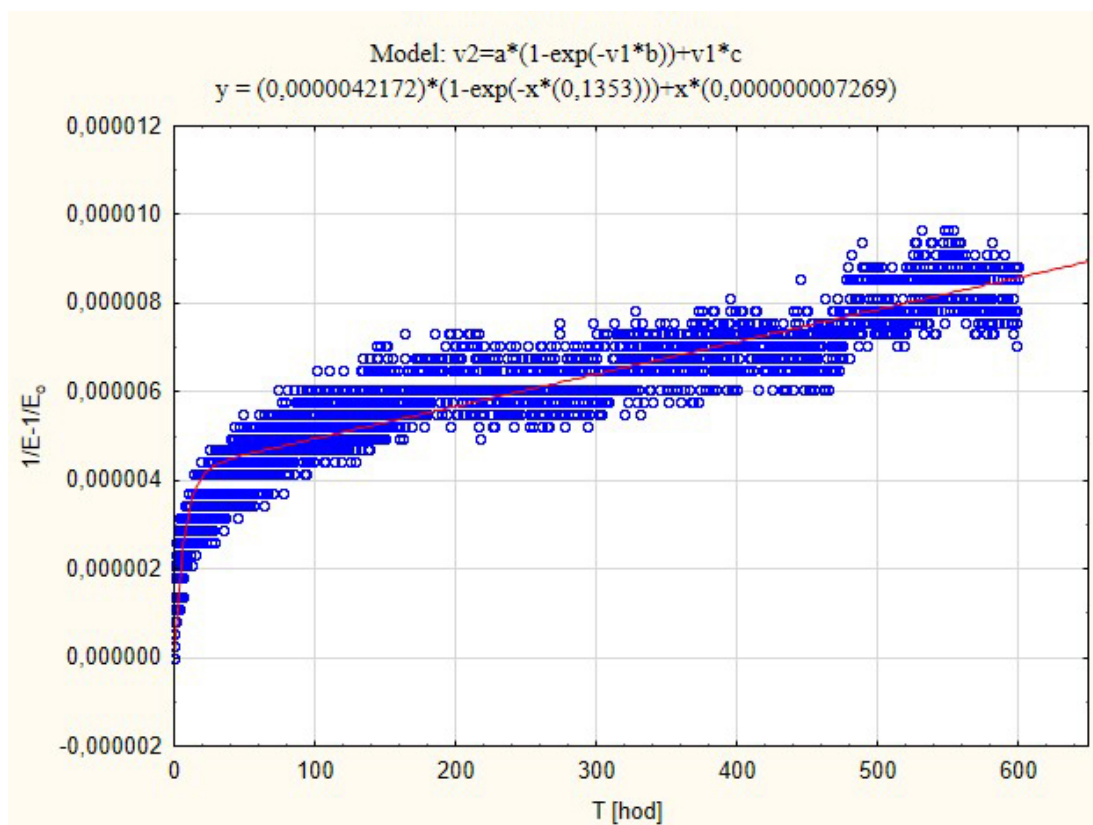
Vzhledem k tomu, že hodnoty deformace a modulu pružnosti v ohybu byly naměřeny předem a pro účely práce poskytnuty ve formě hotových dat, omezí se tato kapitola na vyhodnocení závislosti deformace na čase, případně na změně vlhkosti. Ty budou spolu s výsledky modelování prezentovány formou grafů. Dále zde budou uvedeny hodnoty zjišťovaných reologických parametrů.



Obr. č. 14: Vyhodnocení závislosti deformace – čas Thompsonovým-Poyntingovým modelem (Praha – klimatizační místnost)

Ozkoušením bylo potvrzeno, že modelování chování dřeva pod dlouhodobým zatížením pomocí Thompsonova-Poyntingova modelu není vhodné. K nejvýraznějšímu nesouladu s experimentálně získanými daty dochází v čase okolo 500 hodin po zatížení. Jak je vidět na obrázku č. 14, Thompsonův-Poyntingův model tuto oblast s výraznějším nárůstem deformací simulovat nedokáže, nárůst deformací se v jeho případě průběžně stále zpomaluje.

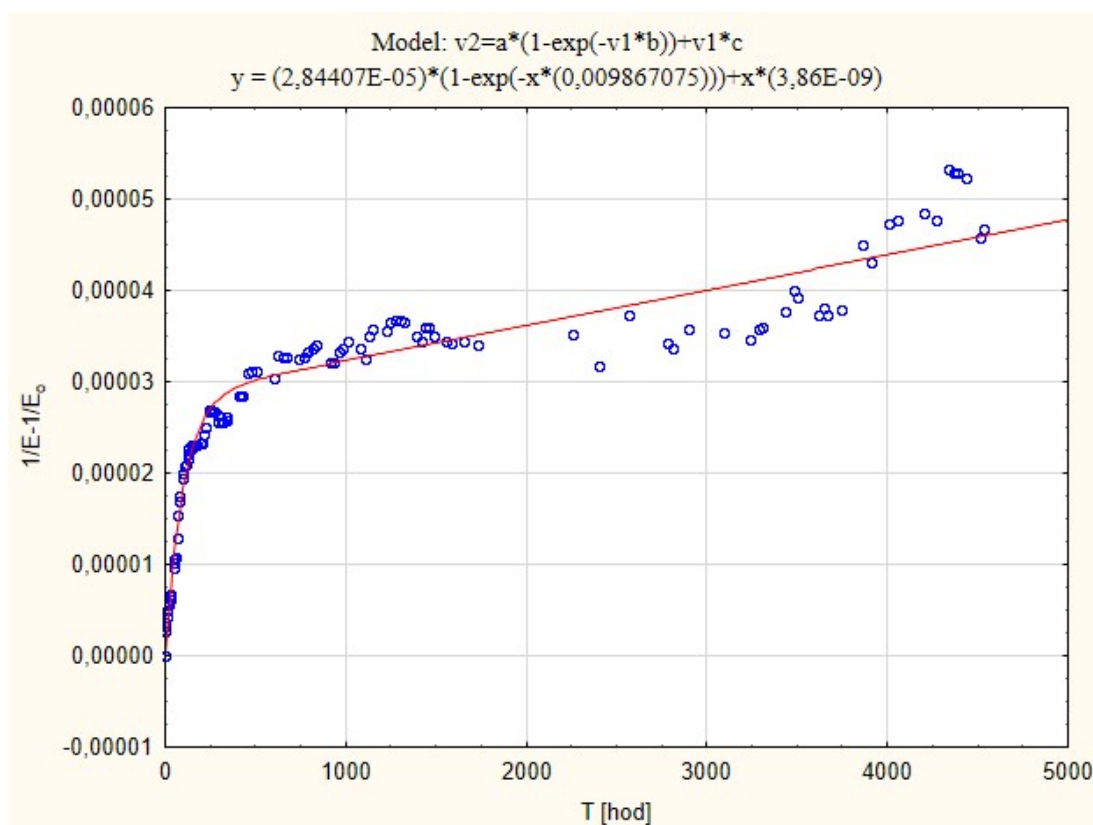
Burgerův model se ukázal jako vhodný pro modelování tečení dřeva v podmínkách s neměnnou vlhkostí a teplotou. Na obrázku č. 15 je znázorněna jeho citlivost vůči závislosti deformace na čase dřeva zkoušeného v interiérových prostorách v Praze. Regresní křivka zde efektivně kopíruje experimentálně získaná data.



Obr. č. 15: Vyhodnocení závislosti deformace – čas Burgerovým modelem (Praha – klimatizační místnost)

Z parametrů modelové funkce Burgerova modelu aplikovaného na data naměřená v Praze byly vypočteny následující reologické parametry, přičemž $K(t)$ je faktor tečení, určený poměrem mezi konečnou a počáteční celkovou deformací:

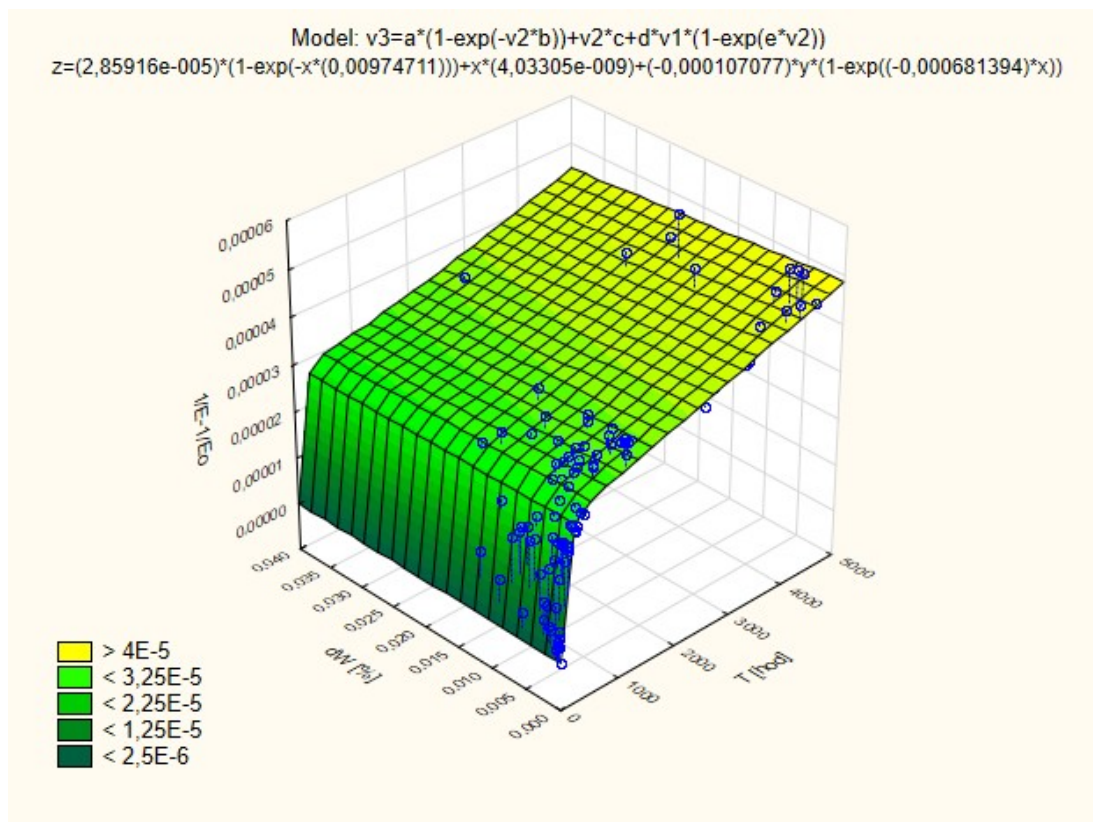
- E_{el} 1,28E+04 MPa
- E_{vel} 2,37E+05 MPa
- η_{pl} 1,38E+08 MPa.h
- η_{vel} 1,75E+06 MPa.h
- τ_{vel} 7,39E+00 h
- $K(t)$ 1,20



Obr. č. 16: Vyhodnocení závislosti deformace – čas Burgerovým modelem (Zvolen – krytá venkovní expozice)

Při použití k modelování tečení dřeva v proměnlivých klimatických podmínkách projevil Burgerův model nedostatky. Křivka určená jeho modelovou funkcí nekopíruje výkyvy v deformacích způsobené změnou vlhkosti, jak ukazuje obrázek č. 16.

Upravený Burgerův model se osvědčil v případě dlouhodobého zatížení dřeva v nestálých vlhkostních podmínkách. Proložení souboru experimentálně získaných hodnot ze zkoušky zatížení dřeva v ohybu jeho modelovou funkcí je zobrazeno na obrázku č. 17. Pomocí upraveného Burgerova modelu se podařilo oddělit od sebe nejen jednotlivé složky celkové deformace, ale především rozlišit viskoelastickou deformaci způsobenou mechanickým namáháním a tu, která je zapříčiněna změnou vlhkosti.



Obr. č. 17: Vyhodnocení závislosti deformace na čase a změně vlhkosti pomocí upraveného Burgerova modelu (Zvolen – krytá venkovní expozice)

Parametry použitých modelových funkcí Burgerova modelu a upraveného Burgerova modelu pro měření ze Zvolena a hodnoty reologických parametrů, získané modelováním s využitím těchto modelů, jsou uvedeny v tabulce č. 1.

Tab. č. 1: Získané reologické parametry pomocí Burgerova a upraveného Burgerova modelu pro měření v nestálých vlhkostních podmínkách (Zvolen)

	a	b	c	d	e
Burgerův model	2,84E-05	9,87E-03	3,86E-09	-	-
Upr. Burgerův model	2,86E-05	9,75E-03	4,03E-09	-1,07E-04	-6,81E-04
	E_{el}	E_{vel}	η_{pl}	η_{vel}	τ_{vel}
	[MPa]	[MPa]	[MPa.hod]	[MPa.hod]	[hod]
Burgerův model	1,75E+04	3,52E+04	2,59E+08	3,56E+06	1,01E+02
Upr. Burgerův model	1,75E+04	3,50E+04	2,48E+08	3,59E+06	1,03E+02

6. DISKUSE

V této práci byly k modelování tečení dřeva použity reologické modely, konkrétně Thompsonův-Poyntingův model, Burgerův model a upravený Burgerův model. Potvrdilo se, že první zmíněný model není pro modelování chování dřeva pod dlouhodobým zatížením vhodný (obr. č. 13). Jak se ukázalo, jeho citlivost vůči nárůstu deformací je zejména v pozdější fázi tečení dřeva nedostatečná. To je v modelové funkci Thompsonova-Poyntingova modelu zřejmě zapříčiněno chybějícím členem $\frac{\sigma}{\eta_{pl}} \cdot t$, který zastupuje plastické deformace. Ani v primární fázi tečení nebyl Thompsonův-Poyntingův model schopný věrně napodobit rychlý nárůst deformací. Burgerův model se projevil jako vhodný pro modelování tečení dřeva ve stálých klimatických podmínkách a upravený Burgerův model se ukázal jako použitelný i v případě kolísající vlhkosti.

Porovnání výsledků s literaturou je v případě reologie a modelování dost obtížné. Objektivní srovnání se nabízí pouze v případě, že byl použit stejný model, že byla měřena stejná dřevina, zkoušky probíhaly ve stejných klimatických podmínkách a pod obdobným zatížením a navíc i po stejně dlouhou dobu. To je vzhledem k časové náročnosti těchto měření a poměrně malému souboru literatury zabývající se vyloženě reologií dřeva v podstatě vyloučené. Odhad parametrů modelových funkcí je navíc zejména v případě upraveného Burgerova modelu výrazně ovlivněn zadáním výchozích hodnot před iterováním. V rámci stejného souboru dat je možné získat různé hodnoty parametrů modelové funkce lišící se i řádově.

V případě jednoduššího klasického Burgerova modelu s menším počtem proměnných i parametrů se tak výrazných výkyvů nedosahuje. Zde pro porovnání alespoň rámcově poslouží například hodnoty uvedené v literatuře Bodig - Jayne (1982): $E_{el} = 5825$ MPa, $E_{vel} = 37779$ MPa, $\eta_{vel} = 47500$ MPa . h, $\eta_{pl} = 5,26 \cdot 10^5$ MPa . h. Použit byl Burgerův model, nicméně zkoušeným materiálem byly dýchované dřevotřískové desky, nikoli masivní dřevo.

Ačkoli upravený Burgerův model projevil citlivost vůči naměřeným datům, jeho efektivita nebyla úplně ideální. To může být způsobeno tím, že během měření došlo jen k jednomu výraznému výkyvu (patrnému z obrázku č. 16) v průběhu deformace. Je možné, že pokud by se toto kolísání během dalšího zkoušení opakovalo, byl by upravený Burgerův model schopen s tímto průběhem počítat. Jeho přesnost by mohla být zvýšena také větším souborem naměřených dat. To platí i pro měření z Prahy, kde měření probíhalo pouze zhruba 600 hodin. Takové trvání zkoušky se běžně ještě neoznačuje jako dlouhodobé, ale pro potřeby zjištění vhodnosti Burgerova i Thompsonova-Poyntingova modelu bylo dostatečné. Dalším faktorem, který ovlivňuje schopnost modelů přizpůsobit se reálnému chování dřeva v ohybu je skutečnost, že se při modelování uvažuje s neměnným napětím na zkušebních vzorcích. To se ale v průběhu měření nepochybně do určité míry měnilo, zejména v případě experimentů v nestálém klimatu. Otázkou zůstává, jak výrazná změna byla tímto postupem zanedbána.

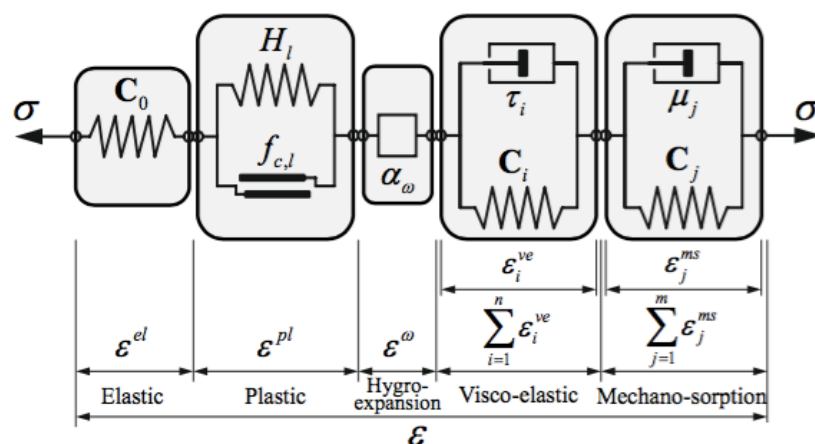
Tato práce se dotkla základní problematiky reologie dřeva a poukázala na některé vhodné reologické modely, které mají potenciál v dalším výzkumu chování dlouhodobě zatěžovaného dřeva. Zdá se, že z hlediska stavební fyziky a mechaniky nemá reologie dřeva zcela zásadní význam. Při dimenzování dřevěných konstrukcí se přidávají nadmíry, které v podstatě vylučují vznik napětí nad mezí úměrnosti. Tečení dřeva má v tu chvíli tak malý vliv na statiku konstrukcí, že se při výpočtech zanedbává. Důležitá by ale v tomto směru mohla být reologie s ohledem na změnu klimatických podmínek. Trendem posledních let jsou výraznější teplotní extrémy a s nimi spojené také vlhkostní výkyvy. To by mohlo znamenat i vzrůst důležitosti reologie dřeva pro stavebnictví. Mnohem zásadnější přínos může mít ale reologie v odvětví technologie, například při paření, ohýbání dřevěných dílců, nebo při výrobě aglomerovaných materiálů na bázi dřeva. Při lisování koberců z dřevní hmoty

dochází k výrazným teplotním a vlhkostním změnám, navíc během působení nezanedbatelných tlaků. V takových situacích je znalost reologických zákonitostí zcela nezbytná pro dosažení kvalitního výrobku. Tečení dřeva zde má vliv na vlastnosti výsledného materiálu a mezi zajímavé a užitečné parametry při výrobě patří mimo jiné relaxační čas. Jeho přesnější odhad by v tomto odvětví dřevařské praxe, kde záleží na nejmenších technologických detailech, mohl mít velkou důležitost.

Kromě reologických modelů popsaných v této práci existují různé další způsoby, jak přistupovat k modelování tečení dřeva. V kapitole 3.3.3.6 bylo již zmíněno použití vláčných prvků jako elementů reologických modelů, jeden takový model popisuje Sobotka (1981). Fakt, že se třené prvky dají do pohybu až po překonání meze kluzu, je pro vhodnou aplikaci na dřevo limitující, přesto v některých případech (výše zmíněné lisování) může vzniknout velké napětí, při kterém by modelování se začleněním Saint-Venantovy látky mohlo dávat smysl. Pokud bychom mluvili o Burgerově modelu, nabízí se také možnost řešit ho s použitím „nekonstantních“ parametrů. Výhodou tohoto postupu by mělo být flexibilnější přizpůsobení modelu prudkým změnám deformací, dokonce i pokud by byly způsobeny vlhkostí.

Nedostatkem popsaných modelů zůstává právě nedokonalá práce se změnami vlhkosti. Upravený Burgerův model, který se z vybraných ukázal jako zatím nejvhodnější, počítá s absolutní hodnotou změny vlhkosti. V takovém případě ale není jasné, jestli došlo k jejímu snížení, nebo zvýšení. Vzhledem k tomu, že vyšší vlhkost snižuje mechanické vlastnosti dřeva, mohlo by se jednat o důležitý detail. Podle všeho by tedy bylo výhodnější brát jako proměnnou vlhkost samotnou a ne její změnu.

Jedním z novějších reologických modelů citlivých na změnu vlhkosti je tzv. „3D konstitutivní model pro dřevo“, který popsal Hassani a kol. (2014). Jeho základní skladba je patrná ze schématu na obrázku č. 17. Kromě rozdělení deformací na elastické, plastické a viskoelastické se model také pokouší oddělit deformace mechanické od těch, které jsou spojeny se změnou rozměrů způsobenou vlhkostí (mechanosorpční deformace).



Obr. č. 18: Schéma modelu pro dřevo (Hassani a kol. 2014).

Začlenění mechanosorpčních a případně také mechanoteplotních deformací do reologických modelů se jeví jako progresivní a mohlo by vytyčit směr dalšímu výzkumu v oblasti reologie dřeva.

7. ZÁVĚR

Tato bakalářská práce si dala za cíl přiblížit problematiku reologických modelů, některé vybrané modely popsat a posoudit jejich vhodnost pro modelování tečení dřeva.

K vyhodnocení závislostí deformace – čas byl použit model Thompsonův-Poyntingův, který se projevil jako nedostatečně citlivý, a dále Burgerův model a upravený Burgerův model. Burgerův model se ukázal být vhodným pro modelování tečení dřeva ve stálých klimatických podmínkách. V prostředí s kolísající vlhkostí, kde klasický Burgerův model projevil nedostatky, se ukázalo použití upraveného Burgerova modelu jako opodstatněné.

Při vyhodnocení závislostí byly pro dané modely použity tyto modelové funkce:

- Pro Thompsonův-Poyntingův model: $v_2 = a \cdot (1 - e^{-b \cdot v_1})$
- Pro Burgerův model: $v_2 = a \cdot (1 - e^{-b \cdot v_1}) + c \cdot v_1$
- Pro upr. Burgerův model: $v_3 = a \cdot (1 - e^{-b \cdot v_2}) + c \cdot v_2 + d \cdot v_1 \cdot (1 - e^{\pm e \cdot v_2})$

S pomocí softwaru STATISTICA byly nelineární regresí získány parametry modelových funkcí (a, b, c, d, e). Pro Burgerův model byly z těchto parametrů zpětně vypočteny některé reologické parametry (E_{el} , E_{vel} , η_{pl} , η_{vel} , τ_{vel} , $K(t)$).

Vlhkost, která je se dřevem jakožto hygroskopickým materiálem neodlučitelně spojena, se projevuje jako faktor výrazně ovlivňující průběh deformací v čase. V tomto ohledu se osvědčil upravený Burgerův model, který ale není schopný dostatečně flexibilně reagovat na prudké výkyvy v deformacích, způsobené právě změnou vlhkosti. Pro další bádání v této oblasti by určitě bylo vhodné pracovat s obsáhlejšími daty, zejména co do délky trvání experimentů. Nabízí se také možnost řešit Burgerův model s „nekonstantními“ parametry, tedy je brát jako funkce změny vlhkosti. Možnou alternativou do budoucna je také začlenění vláčných prvků do reologických modelů. Ty mohou napomoci efektivnějšímu modelování tečení při vyšších napětích.

Poznatky o reologickém chování dřeva mohou být částečně využity ve stavebnictví – například při navrhování nosných konstrukcí. Mnohem výraznější uplatnění reologických charakteristik se předpokládá v oblasti technologie, kupříkladu při výrobě aglomerovaných materiálů nebo při sušení. Pro prohloubení znalostí v oboru reologie dřeva bude potřeba dalšího výzkumu, zejména v prostředí s měnící se vlhkostí a teplotou a při ještě dlouhodobějším zatížení.

SEZNAM LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ

- BABIAK, M., DUBOVSKÝ, J. *Problémy z mechanických vlastností dřeva příručka*. Technická univerzita vo Zvolene, 2001. 71 s. ISBN: 80-228-1076-2.
- BALABÁN, K. *Nauka o dřevě. 1.část, Anatomie dřeva*. SZN – Státní zemědělské nakladatelství, 1955. 216 s. 1. vyd.
- BARNES, H.A., HUTTON, J.F., WALTERS, K. *An Introduction to Rheology*. Elsevier Science B.V., Amsterdam, 1989, ISBN 0 444 87140 3
- BETTEN, J. *Creep Mechanics*. Springer, Berlin, 2002, 327 p. ISBN 3-540-42981-6
- BODIG, J., JAYNE, B. A. *Mechanics of wood and wood composites*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1982. 712 s. ISBN 0-442-00822-8
- BORŮVKA, V. *Chování dřeva při dlouhodobém zatížení v ohybu*. Disertační práce. TU Zvolen, 2000.
- BORŮVKA, V., BABIAK, M. *Vlastnosti dřeva v příkladech*. Česká zemědělská univerzita v Praze, 2016. 139 s. ISBN: 978-80-213-2618-7.
- Česká zemědělská univerzita v Praze. *Creepové zkušební zařízení pro dlouhodobé zatížení dřeva v ohybu*. Původce Vlastimil Borůvka; Tomáš Holeček; Miloslav Linda. CPC: G01N3/20, G01N33/46, G01N2203/0071. Česká republika. Přihláška vynálezu, CZ 2016-139. 2016-03-09.
- DINWOODIE, J. M. *Timber: Its nature and behavior*. Taylor & Francis New York, USA, 2000. 258 s. ISBN: 0-419-25550-8.
- GANDELOVÁ, L., ŠLEZINGEROVÁ, J. *Stavba dřeva*. Mendelova univerzita v Brně, 2014, 2. nezměněné vydání (první 2002), 300 s. ISBN 978-80-7375-966-7
- 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.
- HASSANI, M. M., WITTEL, F.K., HERING, S. *Rheological Model for Wood. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, October 2014*. Zurich, Switzerland, 2014

- JUODEIKIENE, I., MINELGA, D. The Influence of Heating on Wood Hygroscopicity and Dimensional Stability. *Materials Science (Medžiagotyra)*. Vol. 9, No. 2. ISSN 1392–1320. 2003. str. 209-212.
- HORÁČEK, P. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 1998, 128 s. ISBN 80-7157-347-7.
- KOVALCHENKO, M. S. Theory and technology of sintering, thermal and thermochemical treatment. Rheological models of pressure sintering of powders. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Vol. 52, Nos. 1-2, May, 2013. 2013 (Russian Original Vol. 52, Nos. 1-2, Jan.-Feb., 2013)
- 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.
- MATOVÍČ, A. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva*. Vysoká škola zemědělská v Brně, 1993. 212 s. ISBN: 80-7157-086-9.
- OBUCINA, M., DZAFEROVIC, E., BAJRAMOVIC, R. Mechanosorptive Creep of Wood Laminate Elements (2009). 0161-0163, *Annals of DAAAM for 2009 & Proceedings of the 20th International DAAAM Symposium*. ISBN 978-3-901509-70-4, ISSN 1726-9679, pp 081, Vienna, Austria 2009
- 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, 2. vydání. 485 s. ISBN: 80-07-00600-1.
- SHEN, Y., *Evaluation of Creep Behavior of Structural Lumber in a Natural Environment*, Master of Science Thesis, Oregon State University, 1996.
- SOBOTKA, Z. *Reologie hmot a konstrukcí*. Academia, Praha, 1981, 1. vydání, 499 s.