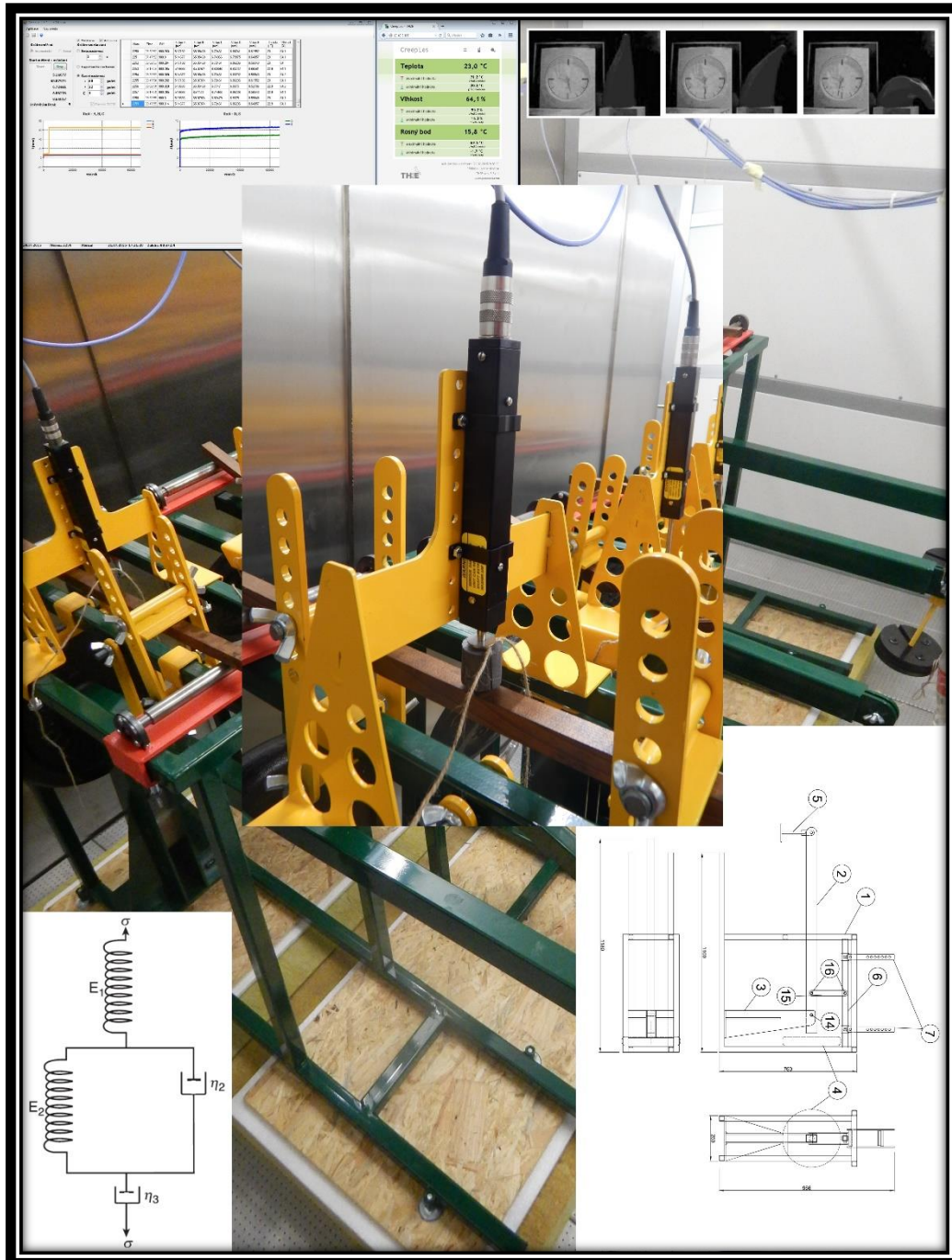


# Viskoelastické chování dřeva a materiálů na jeho bázi: reologie a její význam při tečení dřeva – review a experimenty



Vlastimil Borůvka



Česká zemědělská univerzita v Praze

**Fakulta lesnická  
a dřevařská**

**Viskoelastické chování dřeva a materiálů  
na jeho bázi: reologie a její význam při  
tečení dřeva – review a experimenty**

**Vlastimil Borůvka**

© Ing. Vlastimil Borůvka, PhD.  
Česká zemědělská univerzita v Praze,  
Fakulta lesnická a dřevařská,  
Katedra zpracování dřeva a biomateriálů,  
Kamýcká 129, 165 00, Praha 6 – Suchbátov

Lektoroval: doc. Ing. Rastislav Lagaňa, PhD., KND DF TU vo Zvolene  
Ing. Jan Tippner, Ph.D., ÚND LDF Mendelova univerzita v Brně

Publikace neprošla jazykovou korekturou.

ISBN 978-80-213-3021-4

## **Obsah**

<b>PŘEDMLUVA</b> .....	<b>5</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>6</b>
<b>REVIEW</b> .....	<b>9</b>
<b>EXPERIMENTY</b> .....	<b>18</b>
<b>SHRnutí POZNATKŮ A NÁVAZNOSTI</b> .....	<b>26</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>29</b>
<b>PŘÍLOHA</b> .....	<b>31</b>

# PŘEDMLUVA

Vážení čtenáři,

dostávají se vám do „rukou“ elektronické skripta autora, který se profesně dlouhodobě věnuje problematice reologie dřeva. Cílem bylo vytvořit takový studijní materiál, který by sloužil jako jeden z efektivních podkladů pro pochopení tečení dřeva, zejména v předmětech zabývajících se vlastnostmi dřeva a následných technologických, které se zabývají procesy zpracování dřeva. Práce se skripty vyžaduje základní znalost stavby dřeva a jeho vlastností, které si studenti osvojí v základních předmětech z nauky o dřevě. Svým způsobem mají význam i znalosti o jiných materiálech, což si vyžaduje alespoň minimální povědomí z nauky o materiálech (materiálovém inženýrství).

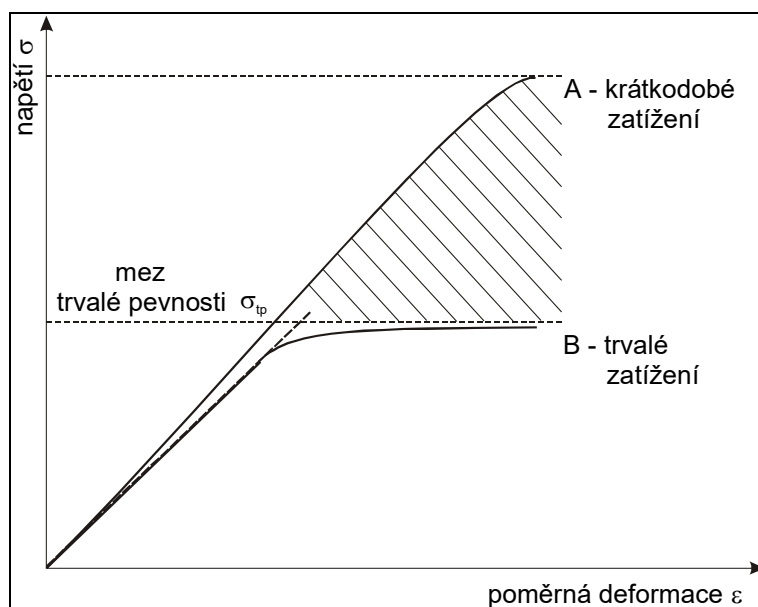
Cílem skript není ani tak využití „vyšší“ matematiky k popisu, a tedy relevantního a zaužívaného matematického aparátu, jako spíš pochopení reologických procesů, tj. tečení dřeva a materiálů na jeho bázi v čase, a to nejen z pohledu dlouhodobého mechanického namáhání, ale i například při sušení, lisování, ap. Použití „složitější“ matematiky je redukováno na nezbytné minimum (a svým způsobem se jí ani není věnováno) a jde tedy hlavně o to pochopit tento svým způsobem složitý proces, jeho význam a uplatnění v procesech jak zpracování dřeva, tak i při jeho finálním používání. Důvodem tohoto jistého zjednodušení je existence vcelku dostatečného množství odborné literatury o reologii (viz použitá literatura), i když je pravdou, že s konkrétním zaměřením na reologii dřeva jich už tolik není. A dalším důvodem je to, že použitý matematický aparát na toto téma v dostupné literatuře je opravdu až dosti složitý, a tato skripta by měla být po stránce pochopení problematiky přístupná „takřka“ všem studentům dřevařských oborů na naší fakultě. Na druhou stranu je vynechána i část základů, která jsou náplní dostupných publikací, či už skript „Vlastnosti dřeva v příkladech“ (Borůvka and Babiak 2016) nebo knižní publikace „Štruktúra a vlastnosti dreva“ (Požgaj et al. 1993). Jistou formou pomoci jsou i elektronicky dostupné příručky (např. „handbooky“ Barnes 2000, Kutz 2002, atd., viz použitá literatura). Ale tak jak kdysi dávno vyřkl známý řecký filosof Herakleit výrok „ΠΑΗΤΑ ΡΕΙ“ (PANTA REI), což lze volně přeložit jako „Všechno plyne, všechno se mění“, i tato skripta se možná ve své budoucí revidované verzi dočkají jistých úprav či doplnění... a to dost možná i na základě připomínek samotných studentů... čas tedy ukáže.

Praha, květen 2020

Autor

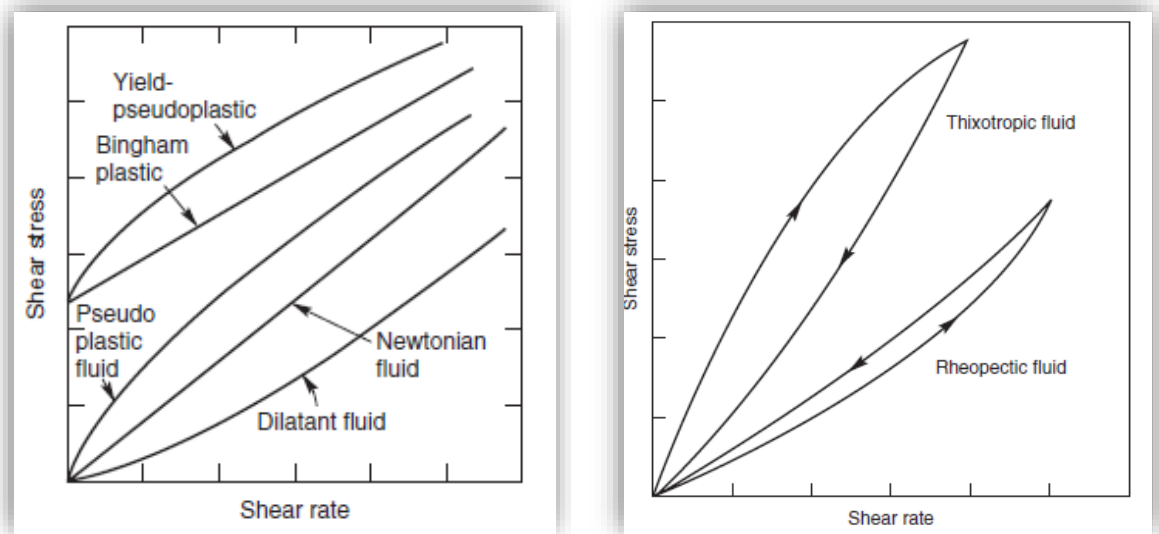
## ÚVOD

Nejprve k meritu věci. Vzájemnou souvislost mezi klasickými krátkodobými zatíženími a dlouhodobými (statickými nebo střídavými) zatíženími objasňuje až zavedení času jako činitele do mechaniky materiálů (viz obr. 1). Čas, deformace a napětí jsou totiž vzájemně neoddělitelně spojené, respektive údaje o deformaci a pevnosti jsou neúplné, pokud se neudá čas zatížení. Čas je tedy jedním z rozhodujících činitelů. Výzkumy dřeva zabývající se touto problematikou potvrdily, že s rostoucím časem zatížení se deformace zvětšují, dřevo teče a jeho pevnost klesá. Nejvýznamnější změna se projevuje v extrémních časech, a to při velmi krátkých časových úsecích zatížení nebo naopak při dlouhodobých zatíženích.



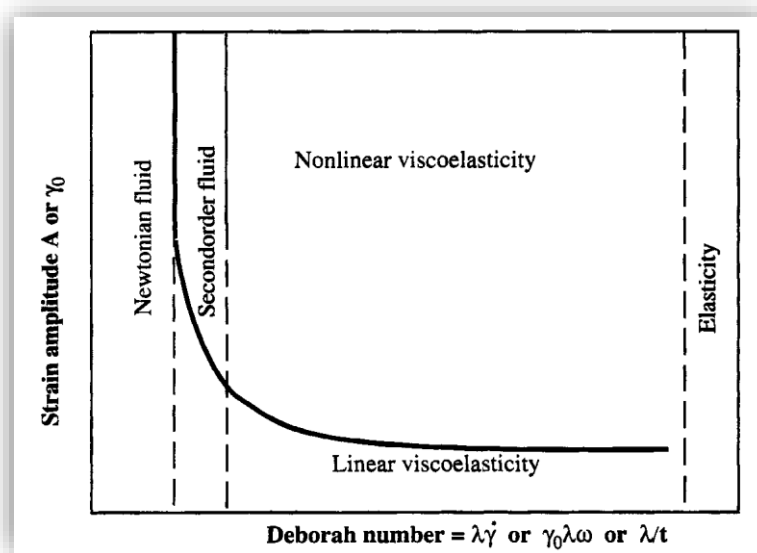
Obr. 1 Vztah mezi napětím a deformací při krátkodobém a trvalém zatížení smrkového dřeva (podle Požgaj et al. 1993).

Z řeckého slova RHEOS, které v překladu znamená tok nebo proud a LOGOS tedy věda, je odvozen název oboru REOLOGIE, zabývající se deformací a tokem materiálů všeobecně. Reologie je materiálová věda zkoumající, jak se mění a přetvářejí pevné látky a tečou i proudí kapaliny za působení mechanických vlivů. Někdy se jí také říká „fyzika deformací“. Ve své podstatě každý materiál při působení síly podléhá deformaci. Pokud se deformace zvětšuje s dobou působení síly, tak materiál teče. Úměru mezi působící silou, tj. tečným napětím a rychlostí změny deformace, tj. smykovou rychlostí, udává materiálová vlastnost, a to viskozita. Ta nám říká, jak velké má kapalina vnitřní tření. Tedy materiály s nízkou viskozitou tečou snadno, s vysokou naopak hůře (viz obr. 2). Reologie zkoumá chování nejen kapalin, a plynů, ale i tuhých těles, které za daných podmínek mohou také téct. Materiály nejenže tečou, ale mohou také pružit a mohou do určité síly odolávat (tzv. mez toku) a pak teprve začít téct, mohou i klouzat, např. podél stěny potrubí, atd. Abychom tyto jevy rozlišili a mohli relevantně popsat reologické chování daného materiálu, což je pro předpověď chování jak samozřejmě v běžném životě, tak i v technologických procesech zásadní, je nezbytné provádět reologická měření přesně geometricky vymezenými senzory, s precizním stanovením působící síly a vyvolané deformace, a i precizním stanovením okolních podmínek či vlivů.



Obr. 2 Schématické znázornění časově nezávislého (vlevo) a závislého (vpravo) chování toku kapalin (převzato z Chhabra and Richardson 2008).

Už jen z výše uvedeného je patrné, že se jedná o obor neobyčejně rozsáhlý, který zasahuje do řady jiných vědních disciplín a částečně se s nimi překrývá. Reologie výrazně ovlivňuje průmyslovou technologii a umožňuje zdokonalování výrobních postupů a výrobků. Velký význam má reologie pro objasnění vztahů mezi strukturou, chemickým složením a mechanickými změnami látek. (Sobotka 1981).



Obr. 3 Schématické znázornění chování viskoelastických tekutin (převzato z Macosko 1994).

Z širokého obsahu reologie bylo pro tyto skripta vybráno odvětví, které se týká především reologie konstrukcí, se specifickým zaměřením na dřevo či materiály na jeho bázi. Nešlo se do složitých dvoj- či dokonce troj-rozměrných reologických modelů, a i nelinearita (Findley et al. 1989) je vysvětlena jistou zjednodušenou formou. To znamená, že je použit

klasický fenomenologický přístup (Kafka 1984). Tento přístup neanalyzuje skladbu materiálu, pouze se snaží různými způsoby vystihnout její působení. Jedná se tedy o spekulativně formulované matematické modely, mechanické modely založené na analogii, atd. V podstatě se jedná o “makroreologický” přístup, který řeší přetváření materiálu jako celku. Tato teorie do jisté míry vychází z představy homogenního kontinua, ale i tak jí lze rozanalyzovat třeba i takový materiál, jakým je dřevo, což je vlastně kompozitní materiál složený z celulózy, hemicelulózy a ligninu, popř. i dalších látek, např. extraktivních. A je v něm i kapalina – voda. Na rozlišení se používá Reinerem zavedené bezrozměrné tzv. “Debořino číslo” (viz obr. 3), které je podílem relaxační doby a provozní, tedy užívací, doby (Sobotka 1981). Čím je toto číslo větší, tím je látka pevnější a čím je toto číslo menší, tím se nám jeví látka tekutější. Platí i to, je-li pozorovací doba velká anebo relaxační doba velmi malá, jeví se látka jako kapalina. Je-li relaxační doba látky větší než doba pozorovací, jeví se tato látka jako pevná hmota.

A proč vlastně nejít jinou cestou? Jako nejvhodnější způsob na modelování vztahu deformace – čas se opravdu jeví použití reologického modelu. Časové řady nejsou vhodné z těchto důvodů: někdy nedostatečná délka časové řady, např. Boxova – Jenkinsonova metodologie vyžaduje minimálně 50 měření (Cipra 1986), nestejná vzdálenost časových intervalů pozorování, složitá dekompozice (oddělování) jednotlivých složek, malá flexibilita (z pohledu adaptace na změněný charakter časové řady), nedostatečná interpretace výsledků, mnohdy zkreslené předvídání budoucího chování časové řady, atd. Vyrovnávací funkce také nejsou nejvhodnější, neboť modelují na základě hledání ideální funkce. Obyčejně se jedná o lineární regresní analýzu. Výsledky jsou sice pěkné, ale těžko interpretovatelné, protože poměrná deformace je brána jako celek, není rozanalyzována. Z těchto důvodů se relevantně ukazuje jako nejvhodnější využití již výše zmíněného fenomenologického přístupu.

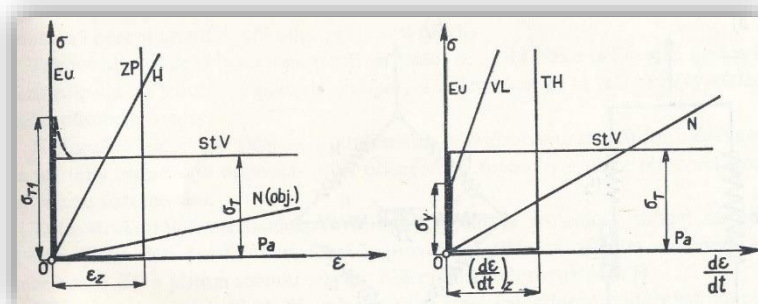


## REVIEW

V reologických vztazích jsou nezávislými proměnnými prostorové souřadnice a čas. Závislé proměnné veličiny se dělí na dvě skupiny, a to:

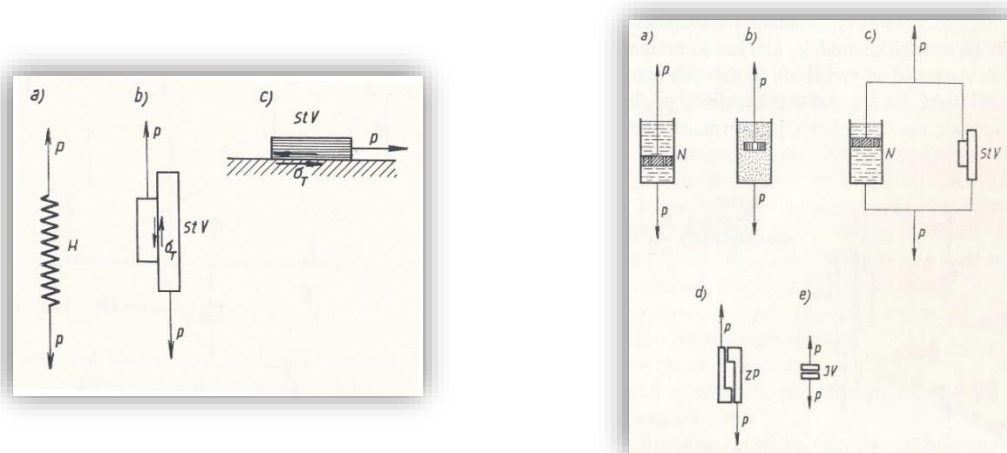
- intenzivní veličiny, které představují příčinu reologického jevu a patří k nim především síla, moment, napětí, teplota a afinita chemické reakce, přičemž v termodynamických vztazích nezávisí jejich hodnota na hmotě soustavy,
- extenzivní veličiny, které vyjadřují účinek a patří k nim posunutí, pootočení, přetvoření, entropie a stupeň chemické reakce, přičemž v termodynamických vztazích závisí jejich hodnota na hmotě soustavy.

Takováto klasifikace reologických veličin umožňuje zobecnit reologické vztahy mezi napětím a přetvořením na reologické vztahy mezi intenzivními a extenzivními veličinami. (Sobotka 1981).



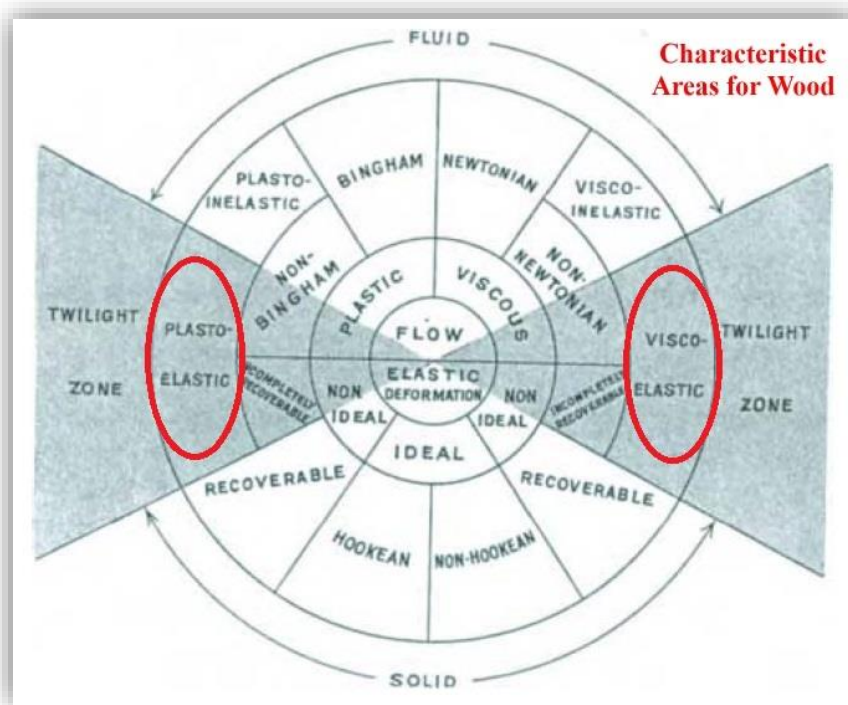
Obr. 4 Vztahy mezi napětím a přetvořením, resp. rychlostí přetváření základních reologických látek (převzato z Sobotka 1981).

Základní reologické pochody se dají obvykle vyjádřit čtyřmi základními druhy reologických diagramů, které vyjadřují závislost vždy mezi dvěma veličinami, tj. napětí – přetvoření, napětí – rychlost přetváření, napětí – čas, přetvoření – čas (viz obr. 4). Často se využívá i tříčlenných vztahů v prostorových diagramech, například napětí – přetvoření – čas.

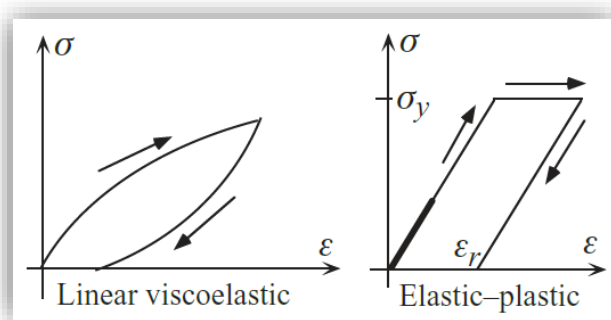


Obr. 5 Reologické modely pružné hmoty a plastické látky – vlevo a reologické modely vazké kapaliny, vláčné hmoty, zpevněné látky a jednostranná vazba – vpravo (převzato z Sobotka 1981).

Jednotlivé přetvárné vlastnosti jsou vyjádřeny reologickými modely základních látek, ke kterým patří tuhá hmota, tekutá kapalina, pružná hmota, tvárná látka, vazká kapalina, zpevněná látka, jednostranná vazba a tuhneoucí kapalina (viz obr. 5). Některé základní látky se ve skutečnosti vyskytují zřídka a jsou spíše abstrakcemi vyjadřujícími jednotlivé podstatné reologické vlastnosti. Skládáním reologických modelů základních látek dostáváme složitější reologické modely, kterými se můžeme libovolně přiblížit k vyjádření reologických vlastností nejrůznějších skutečných hmot.



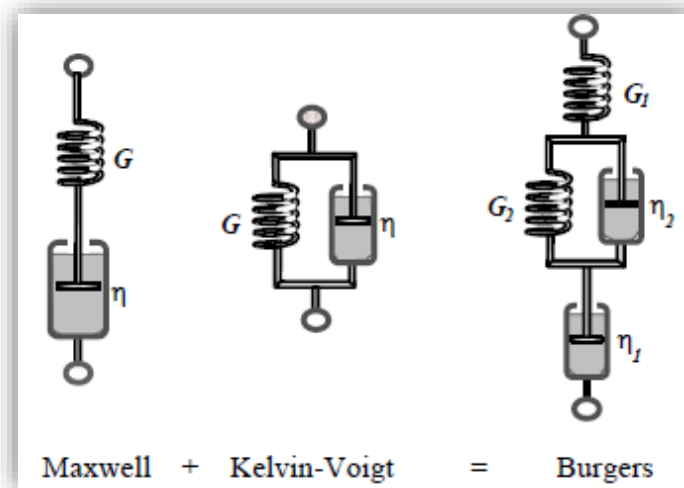
Obr. 6 Reologické schéma podle Bilmese (převzato z Tanner and Walters 1998), s úpravou, tj. vyznačením oblastí charakteristických pro dřevo.



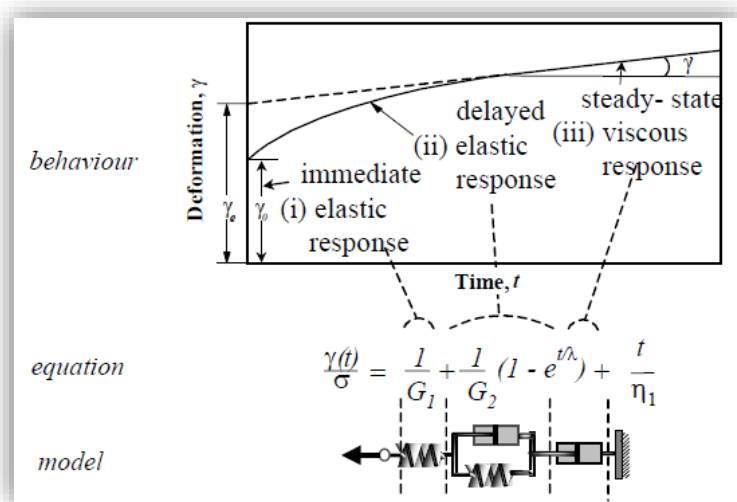
Obr. 7 Napětí-ově-deformační diagramy při konstantní rychlosti deformace pod zatížením. Graf na levé straně zobrazuje chování lineárně viskoelastického (resp. spíše visko-elasto-plastického) materiálu a vpravo je chování ideálního elasto-plastu (převzato z Lakes 2009).

Pro dřevo, které lze podle chování při dlouhodobém (trvalém) namáhání charakterizovat jako viskózně-pružný (viz obr. 6), povětšinou lineárně se chovající materiál (pro pochopení viz obr. 7, a vliv velikosti zatížení na chování v Požgaj et al. 1993), se jako nejvhodnější ukazuje

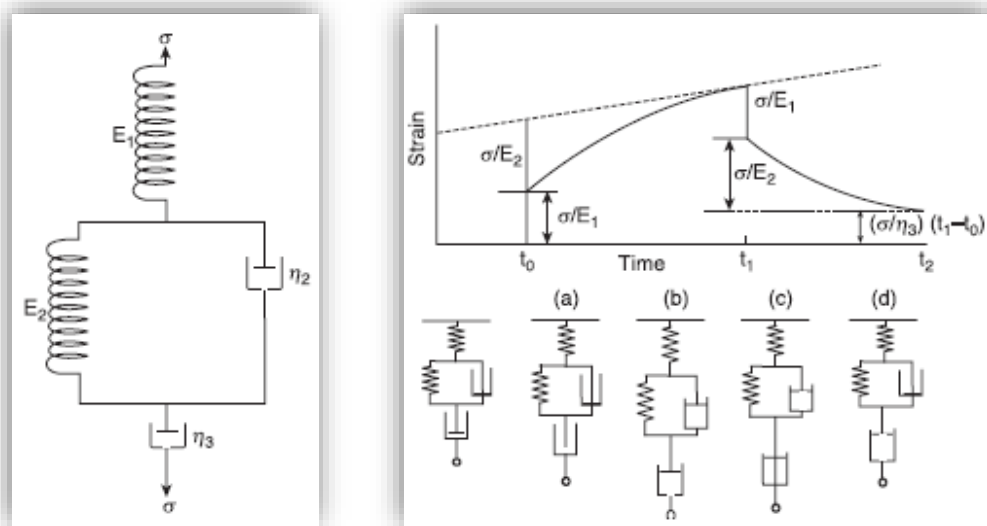
tzv. Burgerův model, tj. 4-prvkový model, viz obrázky 8 až 10. V tomto modelu pružina reprezentuje okamžitou pružnou (elastickou) deformaci a válec s pístem trvalou (plastickou) deformaci. Jejich sériové spojení se nazývá Maxwellův model (viz obr. 8). Paralelně spojená pružina a válec s pístem (Kelvinův model) reprezentuje velikost deformace pružné v čase (viskoelastické), viz obr. 8. Vyskytují se v něm tedy celkově čtyři reologické parametry (2 moduly pružnosti  $E_{el}$ ,  $E_{vel}$  a 2 koeficienty viskozity  $\eta_{vel}$ ,  $\eta_{pl}$ ), resp. pět (pátým parametrem je svým způsobem tzv. relaxační čas, což je poměr  $E_{vel}/\eta_{vel}$ ). Jejich velikost závisí od vnitřní struktury dřeva, velikosti zatížení, charakteru klimatických podmínek (konstantní nebo proměnlivé), atd. Tento model však není schopen relevantně reprezentovat chování dřeva za proměnlivých klimatických podmínek a neřeší ani změnu parametrů v čase. Tento problém částečně řeší upravený Burgerův model, tj. přidání další viskoelastické jednotky reprezentující deformaci způsobenou změnou obsahu vlhkosti ve dřevě. Je však otázkou, zdali navržená podmínka, že vlhkostrní změna je viskoelastická, je opravdu opodstatněná. Je patrně vhodnější řešit rovnici platnou pro Burgerovo těleso tak, že se parametry mění v čase a lze je tedy považovat i za funkce vlhkosti dřeva (viz ukázka v kapitole Experimenty).



Obr. 8 Maxwellův, Kelvinův a Burgerův model (převzato z Barnes 2000).

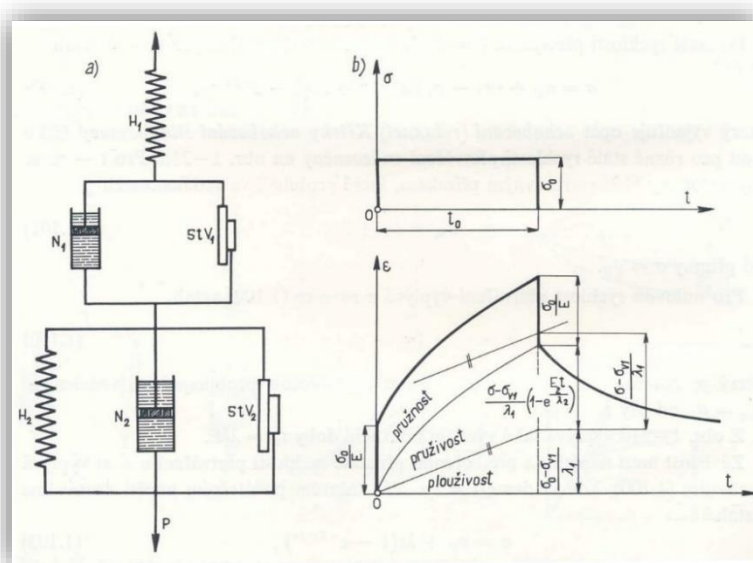


Obr. 9 Burgerův model detailně – chování, rovnice, model (převzato z Barnes 2000).

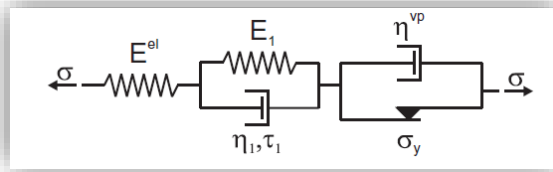


Obr. 10 Chování při tečení 4-prvkového modelu (převzato z Guedes 2011).

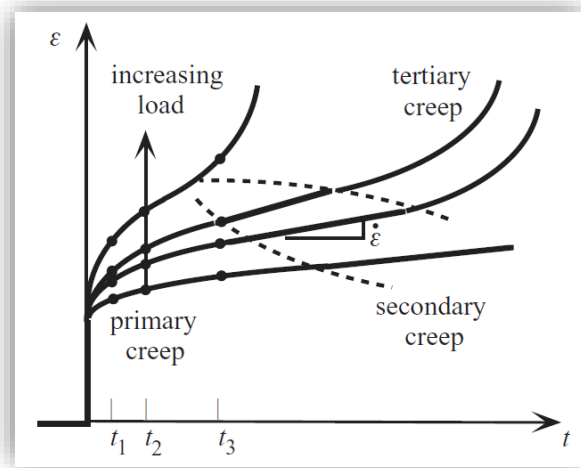
Další možnou úpravou základního Burgerova modelu je zapojení vláčných prvků do jeho struktury, respektive k jednotlivým prvkům. V literatuře je pro něj zaužívaný název Autorova pružnovláčná hmota (viz obr. 11). Tento už nelineární model je však spíše vhodný pro vyšší zatížení blízké se napětí na mezi úměrnosti, neboť vláčné prvky se do meze vláčnosti chovají jako dokonale tuhý materiál, ale po překročení této meze se přetvářejí úplně neomezeně. Vhodnější by tedy pro tuto situaci u dřeva byl zřejmě model na obr. 12. Z hlediska fyzikálního je vláčnost materiálů na bázi dřeva základním prvkem skutečného chování dřeva. Takto vysoká hodnota zatížení, někde kolem meze úměrnosti, je ale v podmínkách praxe dosti nereálná (a zároveň i nebezpečná, viz obr. 13 a 14), neboť dřevěné konstrukce se dimenzují tak, že výpočtová pevnost je cca 15 až 20% ze skutečné průměrné pevnosti dřeva (podrobněji viz výpočtová pevnost dřeva v Požgaj et al. 1993), a může, respektive by se mohla vyskytovat pouze za jistých opravdu neočekávaných (nahodilých) okolností.



Obr. 11 Reologický model a změna přetvoření s časem při stálém napětí Autorovy pružnovláčné hmoty (převzato z Sobotka 1981).

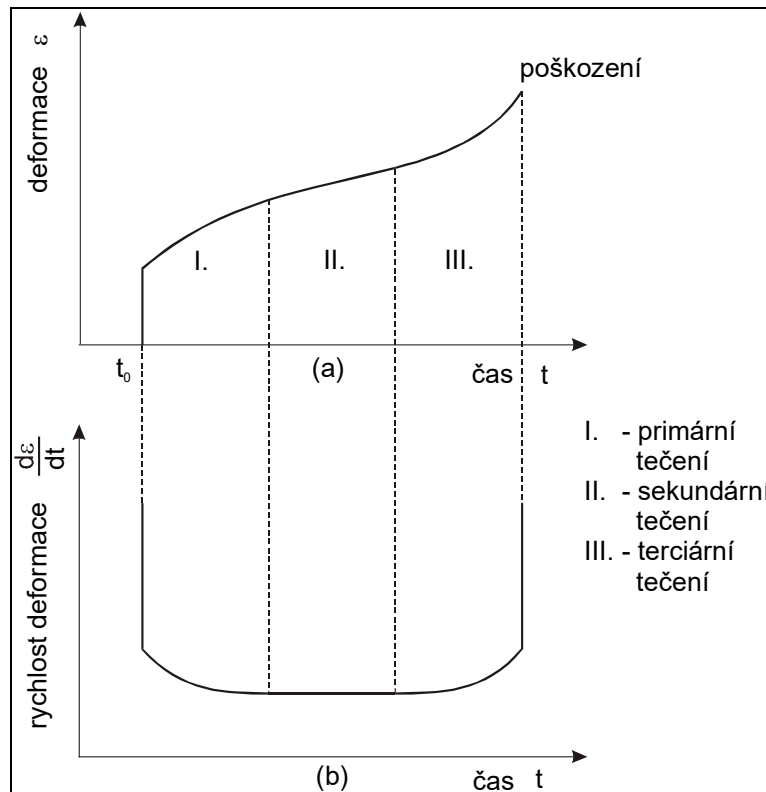


Obr. 12 Rozšířený Burgerův model, v literatuře označovaný i jako tzv. “D–W“ model (převzato z Reichel and Kaliske 2015).



Obr. 13 Deformace versus čas pro různé úrovně zatížení (převzato z Lakes 2009).

Jak se chová dřevo při tečení, pokud jsou vnější síly nad mezí úměrnosti, je znázorněno na obr. 14.



Obr. 14 Chování dřeva při tečení (a) etapy tečení, (b) rychlost tečení (podle Bodig and Jayne 1982).

Pro modelování reologického chování dřeva tedy reálně vystačíme s třemi základními prvky, a to pružinou, válcem s pístem a teoreticky i dvěma destičkami, mezi nimiž působí tření, a jejich vzájemnou relevantní kombinací a zapojením.

Pro ortotropní dřevo jako viskoelastický materiál a zatížení pod cca 50% z jeho „charakteristické“ pevnosti platí při troj-osovém konstantním zatížení následující konstitutivní vztahy:

$$\varepsilon_{ij} = S(t) \cdot \sigma_{ij}$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{LR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_L(t) & -\mu_{RL}/E_R(t) & -\mu_{TL}/E_T(t) & 0 & 0 & 0 \\ -\mu_{LR}/E_L(t) & 1/E_R(t) & -\mu_{TR}/E_T(t) & 0 & 0 & 0 \\ -\mu_{LT}/E_L(t) & -\mu_{RT}/E_R(t) & 1/E_T(t) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{RT}(t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{LT}(t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{LR}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{RT} \\ \tau_{LT} \\ \tau_{LR} \end{bmatrix}$$

Zřejmě by však bylo žádoucí se zabývat závislostí deformace – čas i z pohledu změny napětí:

$$\varepsilon(t) = \int_0^t J(t - \tau) \cdot d\sigma = \int_0^t J(t - \tau) \cdot \frac{d\sigma}{d\tau} \cdot d\tau ,$$

kde  $J(t)$  je viskoelastické tečení (vyjádřené vhodnou funkcí podle zvoleného modelu).

V případě použití Burgerova modelu pro takovouto deformaci platí:

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

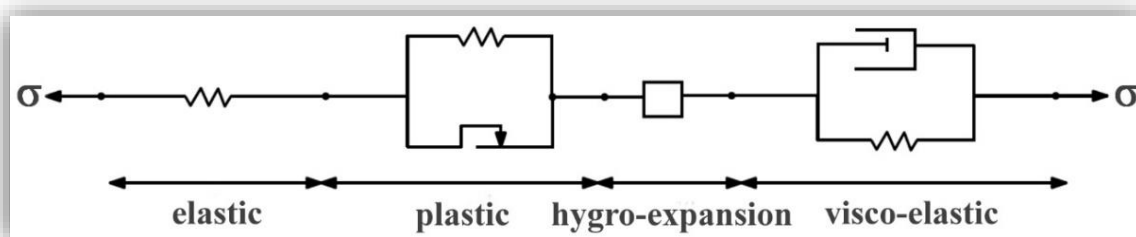
Pokud uvažujeme se změnou napětí i viskozity, potom pro plastickou deformaci platí:

$$\varepsilon_{pl} = \int_0^t \frac{\sigma(\xi)}{\eta(\xi)} \cdot d\xi .$$

V každém případě, jak vyplývá z kontextu výše uvedeného, jsou celkové deformace ve dřevě funkcí napětí, času, vlhkosti a teploty (a jejich změn), tedy:

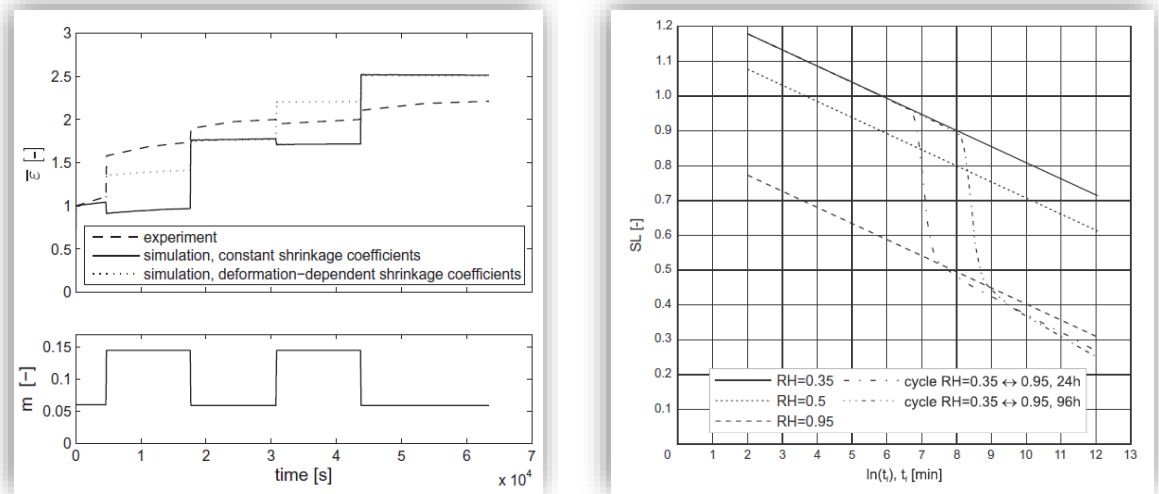
$$\varepsilon_{cel} = f(\sigma, t, w, T, \Delta w, \Delta T) ,$$

a jedná se o součet deformací; elastická + viskoelastická + viskoplastická + plastická + mechano-sorpční + mechano-teplotní + sesychání/bobtnání + teplotní roztažnost. Uvedené velice dobře zachycuje např. konstitutivní model na obr. 15, přičemž teplotní roztažnost je opravdu možné s ohledem na velikost deformací způsobených vlhkostí zanedbat.



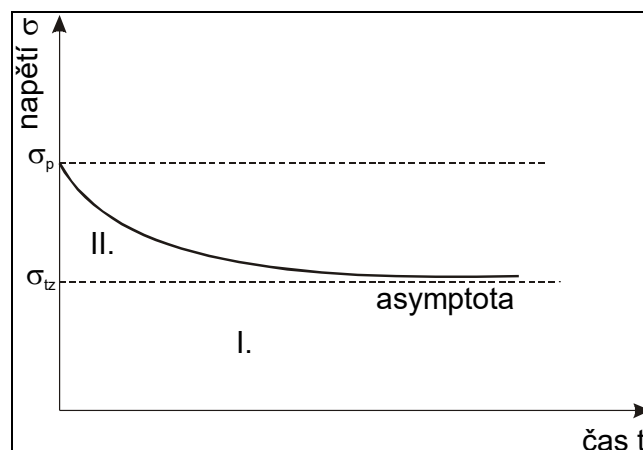
Obr. 15 Konstitutivní model pro mechano-sorpční modelování tečení.

Z uvedeného vyplývají i velmi zajímavé experimenty (a simulace) mechano-sorpčního efektu, viz ukázky na obr. 16.



Obr. 16 Mechano-sorpční tečení (převzato z Reichel and Kaliske 2015, rekalkulace experimentálních výsledků vlevo podle Navi et al. 2002, vpravo podle Fridley et al. 1991 a Fridley and Soltis 1992); RH = relativní vlhkost vzduchu, SL = úroveň napětí.

Na závěr této kapitoly uvádím poznatky už spíše praktického charakteru, a to nejprve o trvalé pevnosti dřeva. Rozlišujeme trvalou – “statickou” a trvalou – dynamickou pevnost. Trvalou statickou pevnost definujeme jako mechanické napětí, při kterém vnější síly, které nekonečně dlouho působí na dřevo, nevyvolají žádný zlom. Zevšeobecněný vztah mezi časem a pevností je na obr. 17. Se zřetelem na tuto křivku a asymptotu vyčleňujeme: I. – oblast trvalé pevnosti dřeva, II. – oblast ohraničené trvalé pevnosti dřeva. Ve všeobecnosti se uvažuje s hodnotou trvalé pevnosti dřeva, která je cca 50 až 60% z hodnoty meze pevnosti při krátkodobém zatížení.

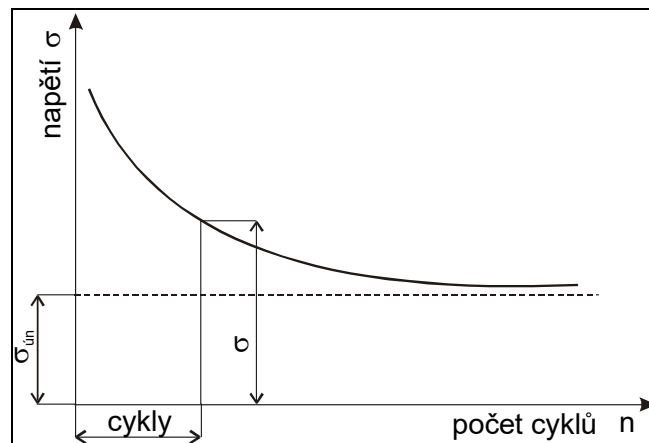


Obr. 17 Křivka trvalého zatížení (podle Požgaj et al. 1993).

Trvalá dynamická pevnost vzniká při kmitavém zatěžování, a to opakovaném nebo střídavém, a například v ohybu dosahuje cca 22 až 38% z krátkodobé pevnosti. Průběh její závislosti na čase je na obr. 18. Asymptota k této křivce je tzv. mez únavy, což je takové napětí,

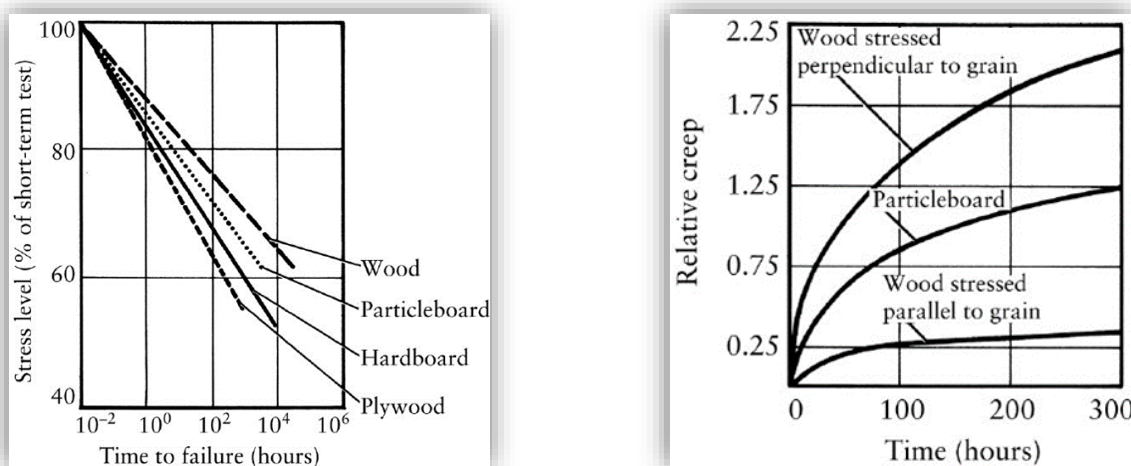


při kterém dřevo teoreticky vydrží nekonečný počet cyklů změn zatížení.



Obr. 18 Wöhlerova křivka (podle Požgaj et al. 1993).

Na obrázku 19 vlevo je praktické relevantní porovnání masivního dřeva a materiálů na jeho bázi (konkrétně se jedná o dřevotřískové desky, dřevovláknité desky a překližku) z pohledu času poškození při daném stupni zatížení v % z krátkodobého statického testu. A na obrázku 19 vpravo je porovnání vývoje faktoru tečení, tj. poměru celkové deformace k počáteční (pružné) deformaci, v čase při konstantní relativní vlhkosti vzduchu 80%, a to při ohybu ve směru vláken a kolmo na vlákna u masivního dřeva a v ohybu dřevotřískové desky.



Obr. 19 Závislost stupně zatížení na čase poškození (vlevo) a závislost faktoru tečení na čase (vpravo) dřeva a dřevních materiálů (převzato z Shmulsky and Jones 2011).

A nyní už následuje zřejmě zajímavější část skript, a to praktické ukázky, nejprve obrázky s uplatněním reologie (nejen u dřeva), viz obr. 20 a 21, a poté kapitola s ukázkami vlastních relevantních experimentů a praktického návodu k řešení dané problematiky. V příloze na str. 32 až 34 je ukázka zadávání modelové funkce Burgerova modelu v programu Statistica a primární výstupy nelineární regrese.





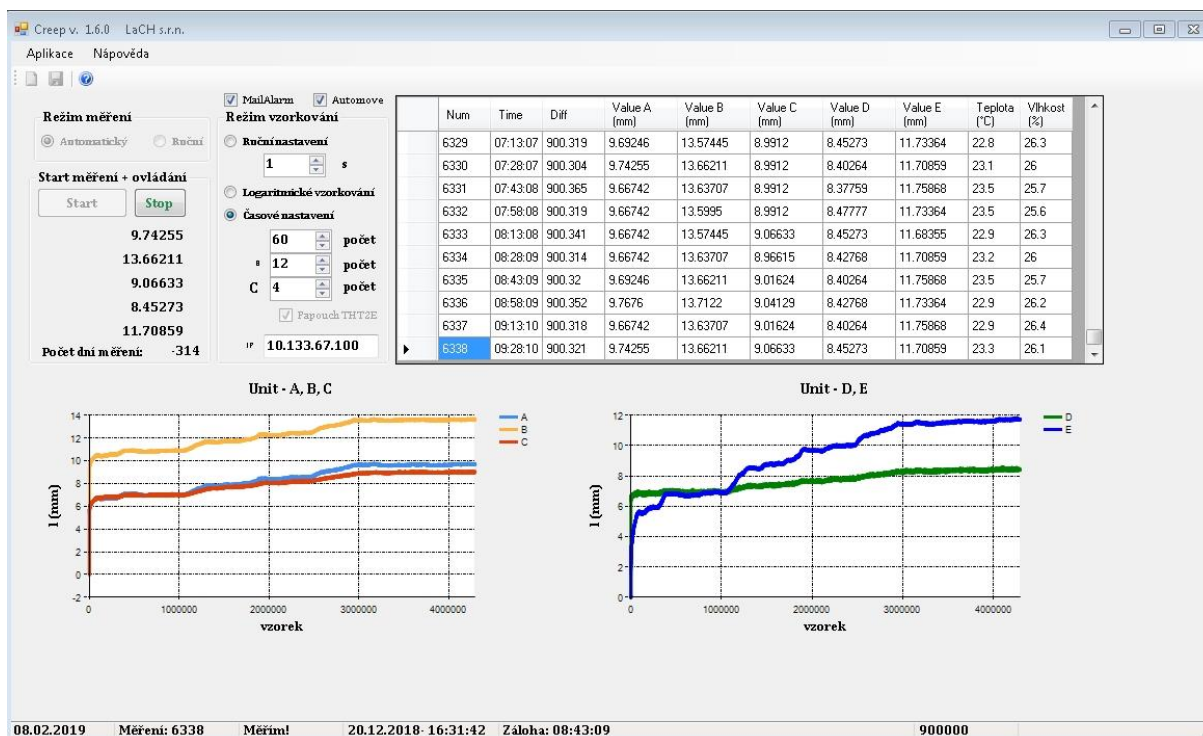
Obr. 20 Průhyb způsobený dlouhodobým působením gravitace. Vlevo: dřevěná konstrukce, vpravo: svazek olověných trubek (převzato z Lakes 2009).



Obr. 21 Ukázky uplatnění tečení. Vlevo: vyježděné koleje v asfaltové vozovce vlivem postupující deformace provozem, vpravo: zotavení v lidských tkáních - dítě před a po léčbě přilbou (převzato z Lakes 2009).

## EXPERIMENTY

Ukázka č. 1: Tečení dřeva a materiálů na jeho bázi za proměnlivých klimatických podmínek v kryté interní expozici.



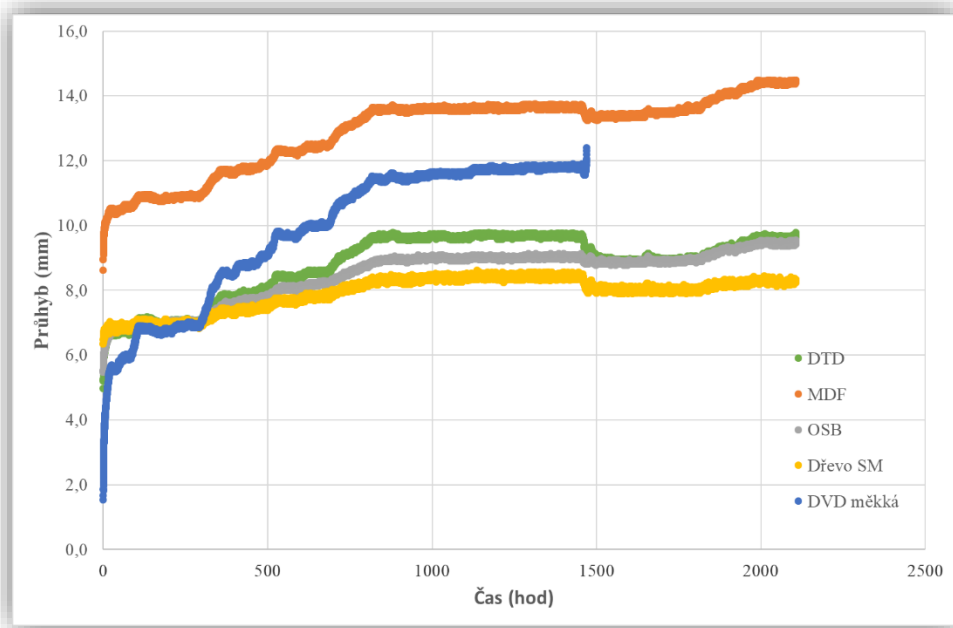
Obr. 22 Ukázka průběhu tečení dřeva a materiálů na jeho bázi za proměnlivých klimatických podmínek, tj. relativní vlhkosti vzduchu v rozpětí 19 – 38 % a teplotě 19 – 25 °C, a při stejném 40% stupni zatížení vypočítaném z krátkodobé statické pevnosti paralelních vzorků ve čtyřbodovém ohybu. Barevné označení: DTD = světle modrá, MDF = žlutá, OSB = červená, Dřevo SM = zelená, DVD měkká = tmavě modrá.

Tab. 1 Vstupní parametry vzorků dřeva a materiálů na jeho bázi, a výsledný faktor tečení (podíl konečné a počáteční deformace po zatížení) po ukončení experimentu.

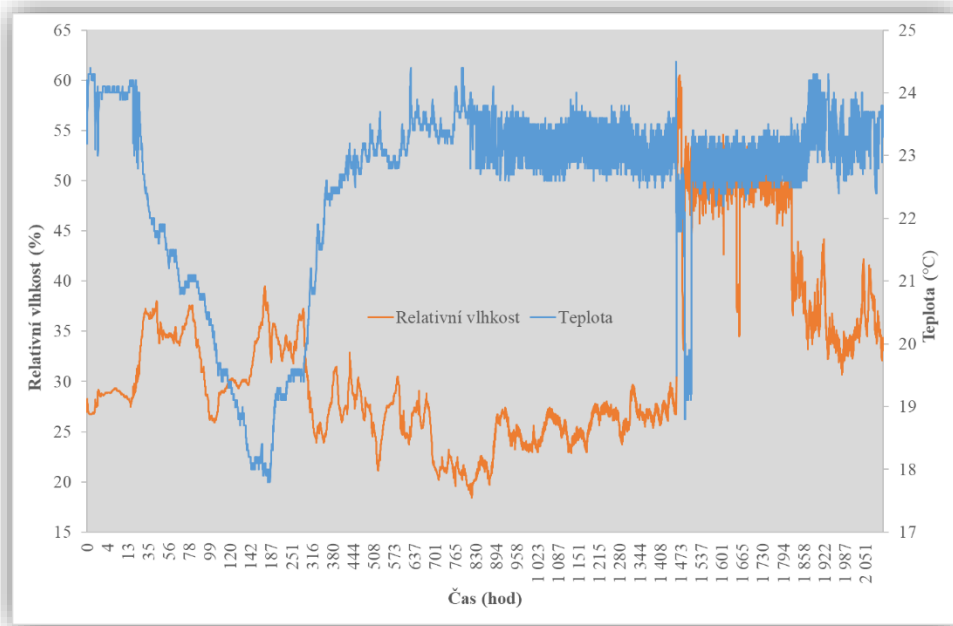
Materiál	Rozměry h × š × l (mm)	Hustota (kg/m <sup>3</sup> )	Pevnost v ohybu (MPa)	Faktor tečení <sup>(1)</sup> (-)
<b>DTD</b>	18 × 50 × 600	691	12,9	<b>1,95</b>
<b>MDF</b>	18 × 50 × 600	786	31,2	<b>1,68</b>
<b>OSB</b>	17 × 50 × 600	599	18,8	<b>1,74</b>
<b>Dřevo SM</b>	20 × 50 × 600	419	51,7	<b>1,31</b>
<b>DVD měkká<sup>(2)</sup></b>	33 × 50 × 600	260	1,7	<b>8,05</b>

<sup>(1)</sup> Po 2107 hodinách.

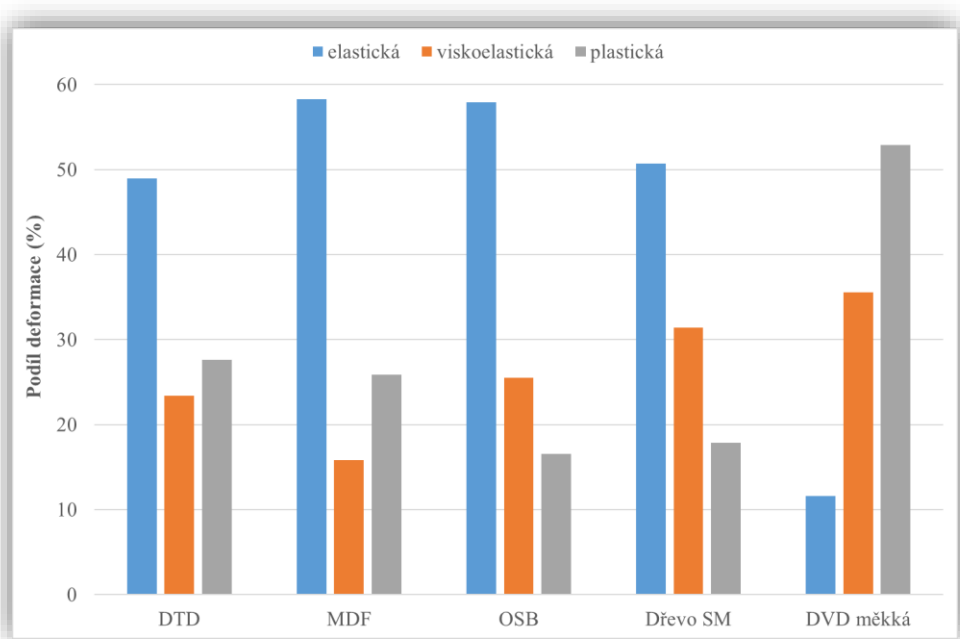
<sup>(2)</sup> V čase 1471 hodin došlo k prasknutí vzorku.



Obr. 23 Tečení dřeva a materiálů na jeho bázi za proměnlivých klimatických podmínek.



Obr. 24 Průběh relativní vlhkosti a teploty při tečení dřeva a materiálů na jeho bázi.



Obr. 25 Podíly jednotlivých typů deformací z celkové deformace při tečení dřeva a materiálů na jeho bázi (stanoveno UBM).

Ukázka č. 2: Tečení tepelně upraveného smrkového dřeva při ohybové zátěži 25% z krátkodobé pevnosti.

Tab. 2 Parametry tečení termodřeva za konstantních klimatických podmínek po 760 hodinách (vyhodnoceno BM).

	REF	150 °C	160 °C	170 °C	180 °C	190 °C
podíl $\varepsilon_{el}$ (%)	86,8	86,3	82,8	88,3	88,8	88,3
podíl $\varepsilon_{vel}$ (%)	5,3	6,0	8,1	4,9	3,7	3,7
podíl $\varepsilon_{pl}$ (%)	7,9	7,7	9,1	6,8	7,4	8,0
faktor tečení (-)	1,17	1,16	1,21	1,13	1,12	1,12
relaxační čas (hod)	9,3	17,4	10,6	19,5	5,2	8,6

Tab. 3 Parametry tečení termodřeva za proměnlivých klimatických podmínek v kryté vnější expozici po cca 32 tis. hodinách (vyhodnoceno UBM).

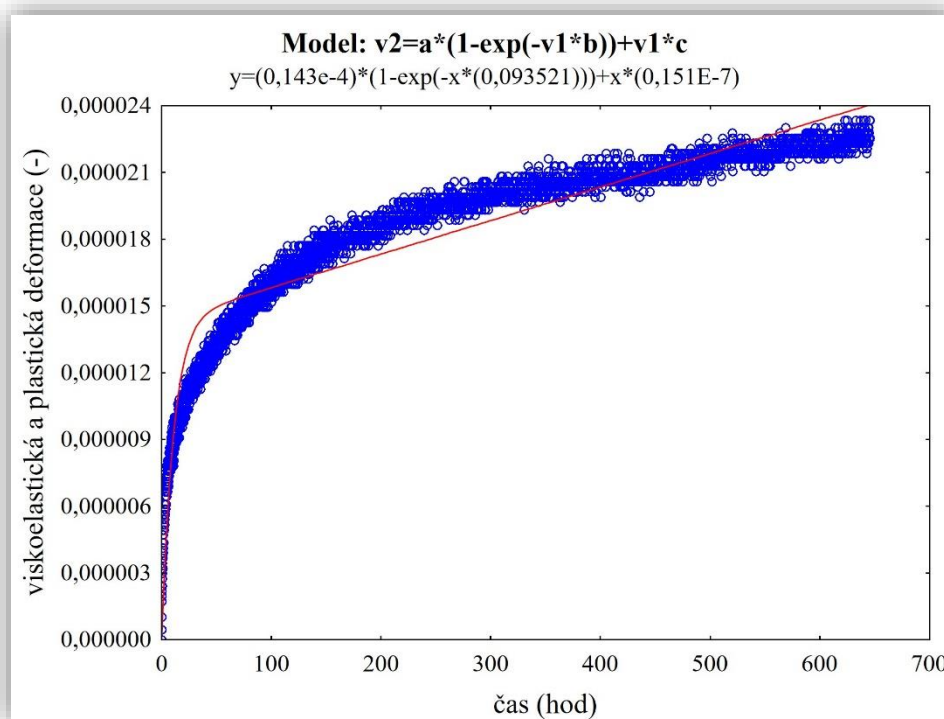
	REF	160 °C	180 °C	190 °C	200 °C
podíl $\varepsilon_{el}$ (%)	52,8	51,9	54,6	57,8	61,1
podíl $\varepsilon_{vel}$ (%)	24,5	25,6	26,7	27,8	23,6
podíl $\varepsilon_{pl}$ (%)	22,7	22,6	18,8	14,4	15,3
faktor tečení (-)	1,74	1,84	1,65	1,68	1,59
relaxační čas mech. def. (hod)	742	294	290	455	1165
relaxační čas vlhk. def. (hod)	1504	2445	2521	1470	1311

Ukázka č. 3: Vliv rozměrů a geometrie těles na reologické charakteristiky při tečení dřeva douglasky v tangenciálním ohybu za konstantních klimatických podmínek.

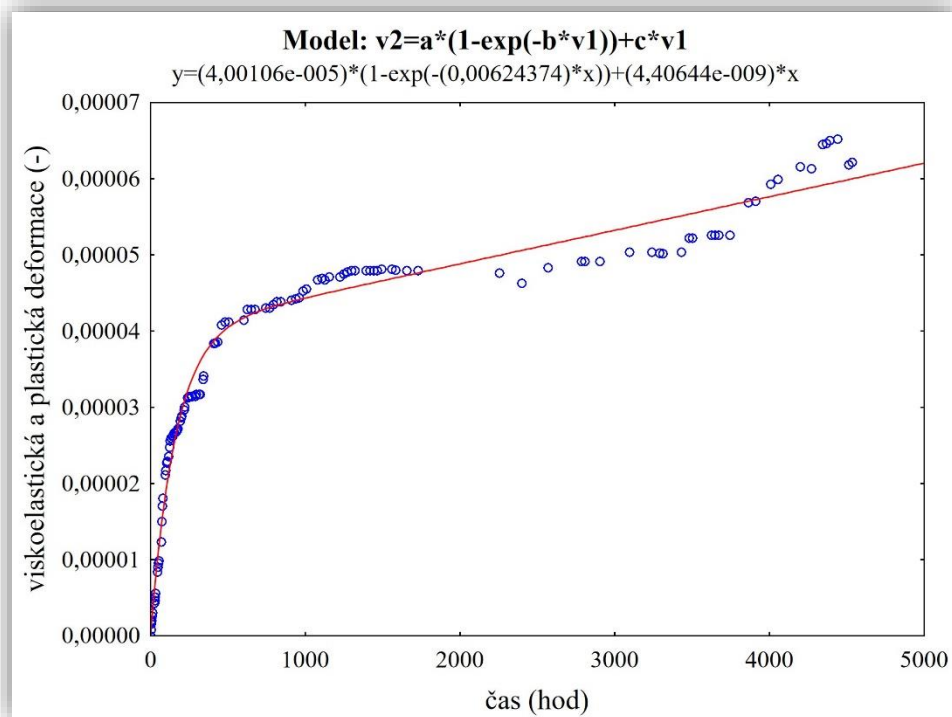
Tab. 4 Procentuální porovnání parametrů tečení při různých příčných profilech, vztáhnuto k referenčnímu.

šířka × výška / 20×20 [mm]	podíl z celkové deformace (%)			faktor tečení	relaxační čas
	elastická	viskoelastická	plastická		
10×20	1,6	-7,1	-4,6	-0,3	7,8
15×20	1,8	-6,0	-8,0	-1,2	-5,5
25×20	-4,7	22,4	12,5	6,2	-22,6
30×20	-6,9	60,8	-14,6	9,2	-34,6
20×10	1,8	-7,3	-18,2	-3,4	-11,5
20×15	1,1	3,7	-19,4	-2,4	-26,6
20×25	-7,1	73,3	22,6	7,0	-38,9
20×30	-19,8	202,0	64,2	21,2	479,4
10×10	0,8	-36,2	32,8	4,2	-68,5
15×15	-1,3	-15,0	15,7	3,9	-20,9
25×25	3,6	-40,4	5,4	2,0	12,1
30×30	-4,7	-13,6	55,1	5,2	-27,0

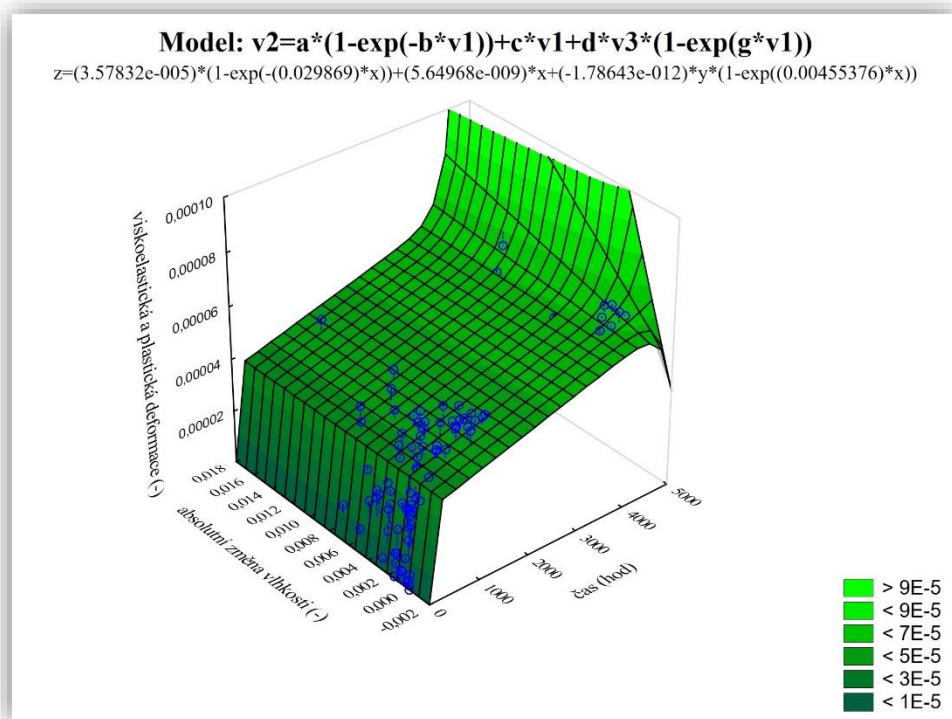
Ukázka č. 4: Modelování tečení dřeva za daných podmínek.



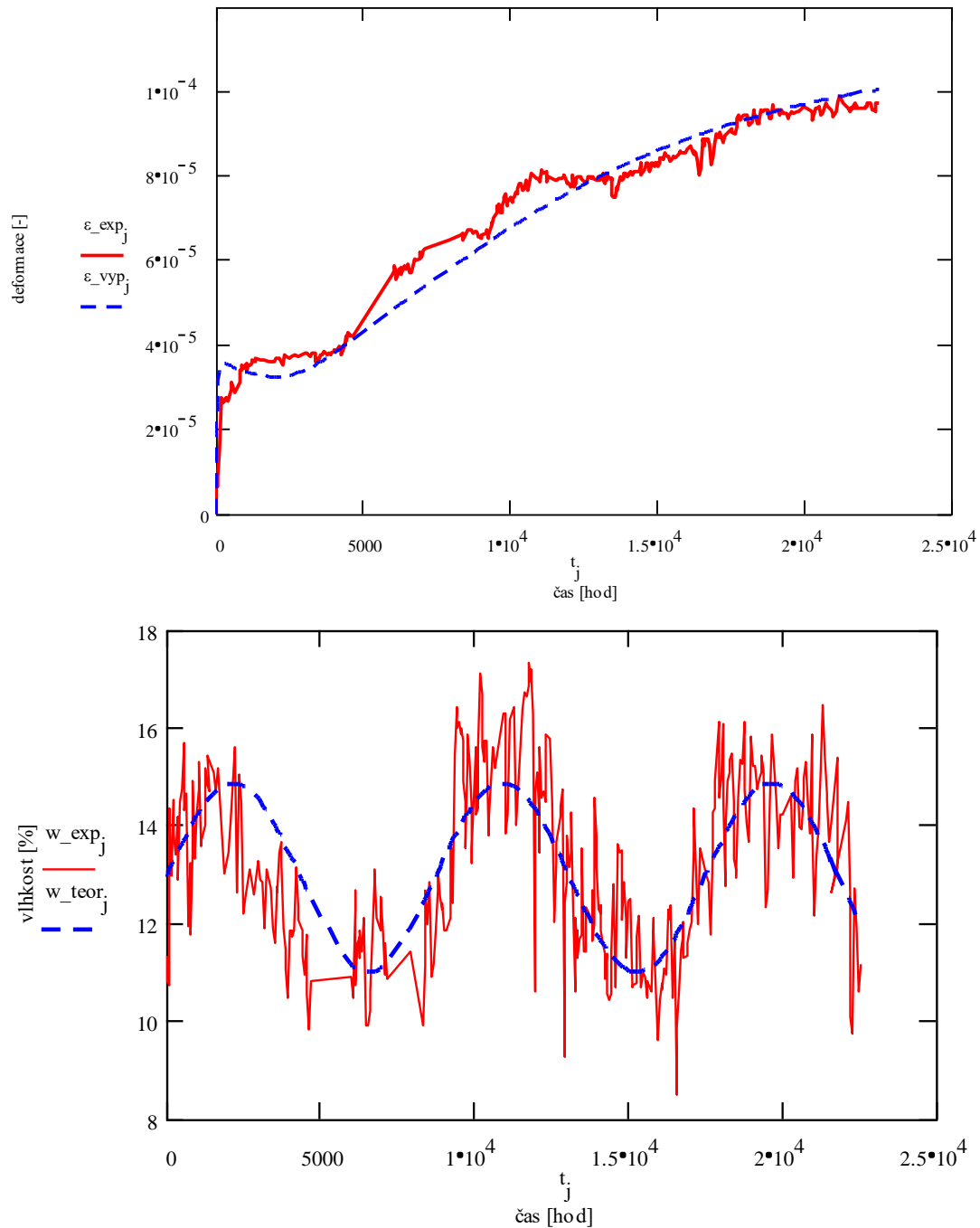
Obr. 26 Ukázka vyhodnocení závislosti deformace na čase použitím Burgerova modelu (klimatizovaná expozice pro smrkové dřevo při zátěži 25% z krátkodobé pevnosti).



Obr. 27 Ukázka vyhodnocení závislosti deformace na čase použitím Burgerova modelu (krytá vnější expozice pro smrkové dřevo při zátěži 25% z krátkodobé pevnosti).



Obr. 28 Ukázka vyhodnocení závislosti deformace na čase použitím upraveného Burgerova modelu se zohledněním vlivu vlhkosti (krytá vnější expozice pro smrkové dřevo při zátěži 25% z krátkodobé pevnosti).



Obr. 29 Ukázka vyhodnocení závislosti deformace na čase Burgerovým modelem s nekonstantními parametry (nahore) a průběh vlhkosti v čase (dole) v programu Mathcad (bližší informace viz návod na následující straně), pro smrkové zkušební těleso z kryté vnější expozice, přičemž čas zatížení je 22550 hod a velikost ohybového zatížení je pod mezí úměrnosti ( $\sigma = 28,2$  MPa).

Pro zajímavost jsou v tabulce 5 uvedeny hodnoty parametrů zkušebního tělesa z obrázku 29, které byly získány vyhodnocením závislosti deformace na čase Burgerovým modelem s “nekonstantními” parametry (v jakémkoliv časovém okamžiku) a zároveň i klasickým Burgerovým modelem s “konstantními” parametry (v max. čase na konci experimentu). Markantní rozdíl je hlavně u koeficientu viskozity  $\eta_{pl}$  (rozdíl 2 řády), což souvisí s tím, že teoretická křivka při použití modelu s konstantními parametry nepříliš vhodně aproximuje experimentální hodnoty (např. viz ukázka na obr. 27).

Tab. 5 Porovnání parametrů získaných vyhodnocením závislosti deformace na čase Burgerovým modelem s “nekonstantními” i “konstantními” parametry.

	Burgerův model s parametry	
	konstantními	nekonstantními
modul pružnosti $E_{el}$ (MPa)	$1,27 \cdot 10^4$	$1,27 \cdot 10^4$
modul pružnosti $E_{vel}$ (MPa)	$2,87 \cdot 10^4$	$(2,74 \div 5,78) \cdot 10^4$
koeficient viskozity $\eta_{vel}$ (MPa·hod)	$6,51 \cdot 10^6$	$(1,01 \div 2,14) \cdot 10^6$
koeficient viskozity $\eta_{pl}$ (MPa·hod)	$3,14 \cdot 10^8$	$(6,51 \div 7,60) \cdot 10^{10}$
relaxační čas $\tau$ (hod)	227	$34 \div 40$

Návod na řešení Burgerova modelu s “nekonstantními” parametry pro softwarový balík Mathcad podle následujícího algoritmu:

- načítání hodnot vstupních údajů (čas, deformace, vlhkost)  $\Rightarrow$  “READPRN”
- zvolení vhodné funkce aproximující naměřené hodnoty vlhkosti (sinusoida – vztah 1, polynom 3. stupně – vztah 2) a její stanovení na základě regrese  $\Rightarrow$  “regress”

$$w(t) = c_1 + c_2 \cdot \sin(c_3 \cdot t) \quad (1)$$

nebo

$$w(t) = c_1 + c_2 \cdot t + c_3 \cdot t^2 + c_4 \cdot t^3 \quad (2)$$

- stanovení vhodných závislostí parametrů na čase (lineární – vztah 3, exponenciální funkce – vztah 4), resp. na vlhkosti

$$parametr(w(t)) = a + b \cdot (w(t)) \quad (3)$$

nebo

$$parametr(w(t)) = a \cdot e^{-b \cdot (w(t))} \quad (4)$$

- upravení základní diferenciální rovnice Burgerova tělesa pro nekonstantní parametry (využití pravidla o konvoluci – vztah 5)

$$e^{-f(x)} \cdot \int_0^x g(\xi) \cdot e^{f(\xi)} \equiv \int_0^x g(\xi) \cdot e^{-[f(x)-f(\xi)]} d\xi \quad (5)$$

- zvolení startovacích hodnot parametrů
- vypočítání teoretické deformace z odhadnutých hodnot parametrů
- znovuzvolení startovacích hodnot parametrů a hledání optimálních hodnot parametrů pomocí aproximace založené na Levenberg – Marquardt metodě (vztah 6)  $\Rightarrow$  “minerr” (podmínka minima – vztah 7)

$$F(parametry) = \sum_{k=1}^n [\varepsilon_{kexp} - \varepsilon_{kteor}]^2 \quad (6)$$

$$\frac{\partial F}{\partial (parametry)} = 0 \quad (7)$$

Pro plastickou část Burgerova tělesa platí diferenciální rovnice (vztah 8). Řešení této rovnice je ve tvaru (vztah 9).

$$\eta_{pl}(t) \cdot \frac{d\varepsilon_{pl}}{dt} = \sigma \quad (8)$$

$$\varepsilon_{pl}(t) = \sigma \cdot \int_0^{t_{max}} \frac{dt}{\eta_{pl}(t)} \quad (9)$$

Pro viskoelastickou část Burgerova tělesa platí diferenciální rovnice (vztah 10). Řešení této rovnice je ve tvaru (vztah 11) a po použití pravidla o konvoluci (vztah 5) dostaneme tvar (vztah 13).



$$\eta_{vel}(t) \cdot \frac{d\varepsilon_{vel}}{dt} + E_{vel}(t) \cdot \varepsilon_{vel} = \sigma \quad (10)$$

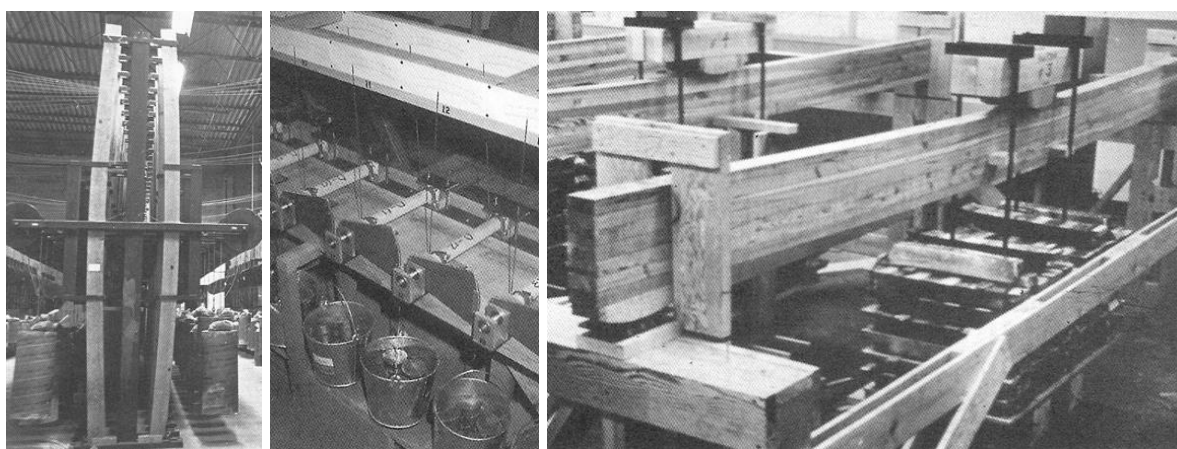
$$\varepsilon_{vel}(t) = e^{-\int_0^{t_{max}} \frac{E_{vel}(t)}{\eta_{vel}(t)} dt} \cdot \sigma \cdot \int_0^{t_{max}} \frac{1}{\eta_{vel}(t)} \cdot e^{\int_0^{t_{max}} \frac{E_{vel}(t)}{\eta_{vel}(t)} dt} dt = \quad (11)$$

$$= e^{-\int_0^{t_{max}} \frac{E_{vel}(t)}{\eta_{vel}(t)} dt} \cdot \sigma \cdot \int_0^{t_{max}} \frac{1}{\eta_{vel}(\xi)} \cdot e^{\int_0^{\xi} \frac{E_{vel}(\xi)}{\eta_{vel}(\xi)} dt} d\xi \equiv \quad (12)$$

$$\equiv \sigma \cdot \int_0^{t_{max}} \frac{1}{\eta_{vel}(\xi)} \cdot e^{-\left[\int_0^{t_{max}} \frac{E_{vel}(t)}{\eta_{vel}(t)} dt - \int_0^{\xi} \frac{E_{vel}(\xi)}{\eta_{vel}(\xi)} d\xi\right]} d\xi \quad (13)$$

## SHRnutí POZNATKŮ A NÁVAZNOSTI

Z průběhů tečení a získaných hodnot reologických parametrů dřeva a materiálů na jeho bázi, resp. hlavně podílů jednotlivých typů deformací je vidět, že na jejich velikost má značný vliv zejména charakter klimatických podmínek (konstantní nebo proměnlivé). Jako další faktory se ukazují: velikost zatížení, směr zatížení (vzhledem k průběhu ročních kruhů), struktura dřeva (běl – jádro, jarní dřevo – letní dřevo, šířka ročních kruhů, ...), úprava dřeva, typ kompozitu, ale i rozměry a geometrie zkušebních vzorků, atd. Tečení malých ideálních vzorků, viz ukázky v kap. Experimenty (měření např. na zkušebním zařízení vyvinutém na ČZU v Praze – patent v kap. Příloha na str. 31) a vzorků konstrukčních rozměrů, viz ukázky na obr. 30, není opravdu jedno a totéž, už jen například z pohledu normality získaných dat (Gaussovo vs. Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti → rozdílný 5% kvantil, ...).



Obr. 30 Ukázky dlouhodobého zatěžování prvků konstrukčních rozměrů (převzato z Madsen and Nielsen 1995).

Přístupy k řešení problematiky tečení dřeva a materiálů na jeho bázi jsou různé. Někteří používají k řešení různé typy funkcí (časové řady, vyrovnávací funkce), další reologické modely. Většinou je však cílem všech stanovení parametrů tečení (reologických parametrů, relaxačního času, koeficientu tečení, kritického koeficientu zatížení, matic napětí v zatíženém tělese atd.), popř. zjištění deformační křivky (křivky tečení).

Co to je vlastně už několikrát výše vzpomínaný relaxační čas „ $\tau$ “? Je to vhodná veličina na porovnávání rychlosti různých procesů ve dřevě. Podobný průběh má hraniční podmínka I. druhu při vedení tepla a difúzi, tak jako i řešení rovnice chemické reakce I. řádu. Je potřebné mít v povědomí existenci 1. postulátu termodynamiky, který nám říká, že každý systém se při konstantních vnějších podmínkách dostane do stavu termodynamické rovnováhy. A právě mírou rychlosti dosažení stavu termodynamické rovnováhy je relaxační čas. Platí tedy:

$$\varepsilon = \varepsilon_{rovň.} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right).$$

Prakticky to například v mechanice znamená, že cca 5-ti násobek relaxačního času značí na cca 99,3% ustálenou viskoelastickou deformaci (pro info  $1\tau$  cca 63,2%).

Všeobecně poznatky o tečení dřeva (reologických parametrech) můžou mít svoje uplatnění například při navrhování dřevěných prvků a staveb, ale ukazuje se, že jeho

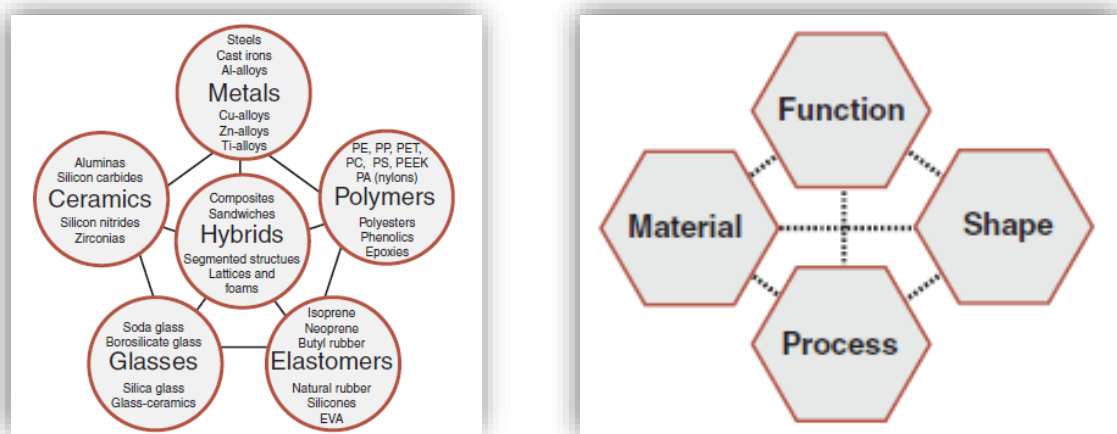
momentálně reálnější praktické využití je spíš při technologickém zpracování dřeva a materiálů na jeho bázi, a to například sušení, odvodňování – viz obr. 31, lisování, ohýbání, atd.). Čas reologie v konstrukcích těchto materiálů však dříve či později prostě přijde...



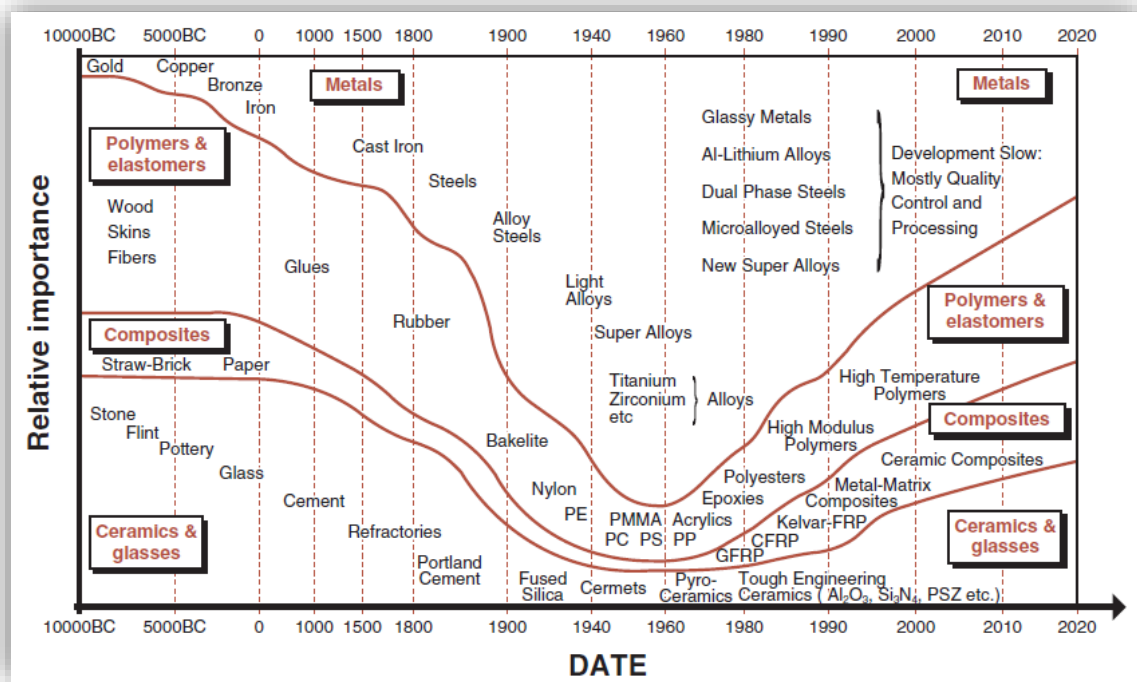
Obr. 31 Ukázky odvodnění mokrého dřevovláknitého „koberce“ mezi válci (foto autor).

Co si je nakonec potřebné uvědomit: Známy fakt, že se dřeviny dělí na jehličnaté a listnaté, není třeba připomínat. Ovšem to, že se dřeviny listnaté dále dělí na dřeviny s kruhovitě pórovitou stavbou a na dřeviny s roztroušeně pórovitou stavbou, stojí za pochopení. Co to znamená v praxi? Například ve své podstatě to, že příroda vymyslela kompozitní materiál již dávno před člověkem. Vrstva letního dřeva se chová z hlediska pevnosti, propustnosti i dalších vlastností odlišně od zóny velkých pórů (jarního dřeva). V kmeni se tak pravidelně střídají vrstvy s odlišnými charakteristikami. A proč je to tu na závěr? To přece není o reologii. Je to tu tady jen pro zdůraznění toho, že dřevo není homogenní, ale jedná se o materiál heterogenní, navíc anizotropní, hygroskopický, pórovitý a navíc „silně“ proměnlivý (variabilní), což je na něm sice svým způsobem to pěkné (z pohledu estetiky a jedinečnosti), ale na druhou stranu to složité, stejně jako je reologie a její pochopení.

A nakonec v širších souvislostech a návaznostech si je potřebné uvědomit význam jednotlivých materiálů (obr. 32), a tedy i dřeva a dřevních materiálů, jejich využitelnost, potřebu v minulosti a nyní (obr. 33), a co to obnáší z pohledu komplexnosti (Callister and Rethwisch 2009); viz poslední strana přílohy (převzato z Ashby 1992).



Obr. 32 Technické materiály a kritéria výběru (převzato z Ashby 1992).



Obr. 33 Evoluce technických materiálů v čase (převzato z Ashby 1992).

## POUŽITÁ LITERATURA

- Ashby, M.F. (1992). *Materials Selection in Mechanical Design*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 660 s. ISBN: 9780081005996
- Barnes, H. A. (2000). *A handbook of Elementary Rheology*, Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, University of Wales, 210 s. ISBN: 0-9538032-0-1.
- Barnes, H. A., Hutton J. F., Walters, K. (1989). *An Introduction to Rheology*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 200 s. ISBN: 0-444-87140-3.
- Bodig, J., Jayne, B. A. (1982). *Mechanics of wood and wood composites*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 712 s. ISBN: 9780442008222.
- Borůvka, V., Babiak, M. (2016). *Vlastnosti dřeva v příkladech*. 1. vyd. Praha ČZU, 139 s. ISBN: 978-80-213-2618-7.
- Callister, W.D., Rethwisch, D.G. (2009). *Materials Science and Engineering: An Introduction*, John Wiley and Sons, New Jersey, 992 s. ISBN: 9780470941669.
- Cipra, T. (1986). *Analýza časových řad s aplikacemi v ekonomii*, SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1. vyd. Praha, 246 s.
- Cristescu, C. (2007). *Materials with Rheological Properties. Calculation of Structures*, ISTE Ltd. and John Wiley & Sons Inc., London and New Jersey, 296 s. ISBN: 978-1-84821-012-7.
- Dinwoodie, J. M. (2000). *Timber Its nature and behaviour*, Taylor & Francis New York. 258 s. ISBN: 0-419-25550-8.
- Findley, W. N., Lai, J. S., Onaran, K. (1989). *Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials*, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 371 s. ISBN: 0-486-66016-8.
- Guedes, R. M. (2011). *Creep and Fatigue in Polymer Matrix Composites*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 584 s. ISBN: 978-1-84569-656-6.
- Chhabra, R. P., Richardson, J. F. (2008). *Non-Newtonian Flow and Applied Rheology*, 2nd Ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 536 s. ISBN: 9780750685320.
- Kafka, V. (1984). *Základy teoretické mikroreologie heterogenních látek*, Academia, Praha, 129 s.
- Kolmann, F. P., Côté, W. A. (1968). *Principles of Wood Science and Technology I. Solid Wood*, Springer -Verlag New York Inc., 592 s.
- Kutz, M. (Editor). (2002). *Handbook of Materials Selection*, John Wiley and Sons, New York, 1520 s. ISBN: 9780471359241.
- Lakes, R. (2009). *Viscoelastic Materials*, Cambridge University Press, New York, 461 s. ISBN: 978-0-521-88568-3.
- Macosko, Ch. W. (1994). *RHEOLOGY Principles, Measurements and Applications*, Wiley-VCH, New York, 568 s. ISBN: 1-56081-579-5.
- Madsen, B., Nielsen, L. F. (1995). *Structural behaviour of timber*, American Society of Civil Engineers, 405 s. ISBN: 978-0969616207.
- Malkin Y. A. (1994). *Rheology Fundamentals*, ChemTec Publishing, Toronto, 324 s. ISBN: 1-895198-09-7.
- Požgaj, A., Chovanec, D., Kurjatko, S., Babiak, M. (1993). *Štruktúra a vlastnosti dreva*, Příroda a.s., 1. vyd. Bratislava, 485 s. ISBN 80-07-00600-1.

- Reichel, S., Kaliske, M. (2015). Hygro-mechanically coupled modelling of creep in wooden structures, Part I: Mechanics. *International Journal of Solids and Structures*, 77, 28-44.
- Reichel, S., Kaliske, M. (2015). Hygro-mechanically coupled modelling of creep in wooden structures, Part II: Influence of moisture content. *International Journal of Solids and Structures*, 77, 45-64.
- Shmulsky, R., Jones, P.D. (2011). *Forest Products and Wood Science*, Wiley-Blackwell: New Jersey, USA, 496 s. ISBN: 978-0813820743.
- Sobotka, Z. (1981). *Reologie hmot a konstrukcí*, Academia, Praha, 499 s.
- Tanner, R. I., Waiters, K. (1998). *Rheology: An historical perspective*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 255 s. ISBN: 0 444 82945 8.

# PATENTOVÝ SPIS

(11) Číslo dokumentu:

## 306 990

(13) Druh dokumentu: **B6**

(51) Int. Cl.:

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

(19)  
ČESKÁ  
REPUBLIKA



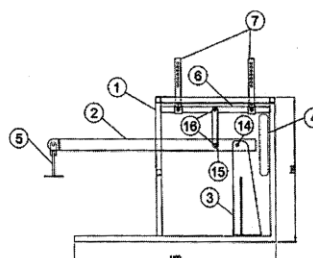
ÚŘAD  
PRŮMYSLVÉHO  
VLASTNICTVÍ

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

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

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

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



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

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

**CZ 306990 B6**

The screenshot shows the Minitab interface with a data spreadsheet and two dialog boxes. The spreadsheet contains the following data:

1	2	3	4	5
T [hoo]	y [mm]	Var3	E [MPa]	1/E-1/Eo [-]
0.02	7.100	0.00250343316	12802	0
0.03	7.100	0.00250343316	12757	0.00000275592066
0.05	7.100	0.00250343316	12802	0
0.07	7.150	0.00252109398	12712	0.00000551074116
0.08	7.100	0.00250343316	12802	0
0.10	7.150	0.00252109398	12712	0.00000551074116
0.12	7.100	0.00250343316	12802	0
0.13	7.175	0.00252992616	12668	0.00000826666183
0.15	7.150	0.00252109398	12712	0.00000551074116
0.17	7.200	0.0025387548	12624	0.0000110214823
0.18	7.226	0.00254758898	12580	0.000013777403
0.20	7.125	0.00251226533	12757	0.00000275592066
0.22	7.175	0.00252992616	12668	0.00000826666183
0.23	7.150	0.00252109398	12712	0.00000551074116
0.25	7.263	0.00256082995	12515	0.0000179096337
0.27	7.263	0.00256082995	12515	0.0000179096337
0.28	7.175	0.00252992616	12668	0.00000826666183
0.30	7.226	0.00254758898	12580	0.000013777403
0.32	7.200	0.0025387548	12624	0.0000110214823
0.34	7.226	0.00254758898	12580	0.000013777403
0.35	7.175	0.00252992616	12668	0.00000826666183
0.37	7.226	0.00254758898	12580	0.000013777403
0.39	7.288	0.0025696213	12472	0.000020655544
0.40	7.226	0.00254758898	12580	0.000013777403
0.42	7.175	0.00252992616	12668	0.00000826666183
0.44	7.200	0.0025387548	12624	0.0000110214823
0.45	7.263	0.00256082995	12515	0.0000179096337
0.47	7.263	0.00256082995	12515	0.0000179096337
0.49	7.175	0.00252992616	12668	0.00000826666183
0.50	7.150	0.00252109398	12712	0.00000551074116
0.52	7.226	0.00254758898	12580	0.000013777403

The 'User-Specified Regression, Least Squares' dialog box shows 'Function: none'. The 'Estimated function' dialog box shows the function:  $y = 1.00000000000000 \cdot T + 0.00000000000000 \cdot \text{Var3} + 0.00000000000000 \cdot E$ .

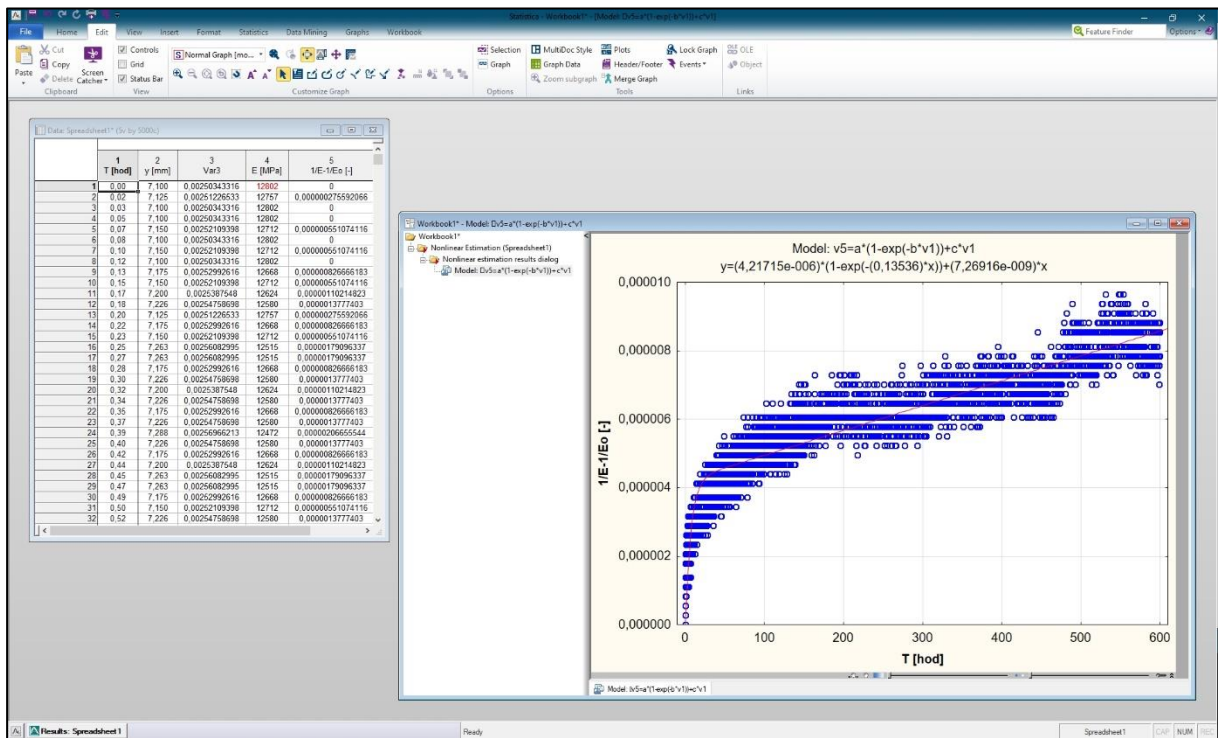
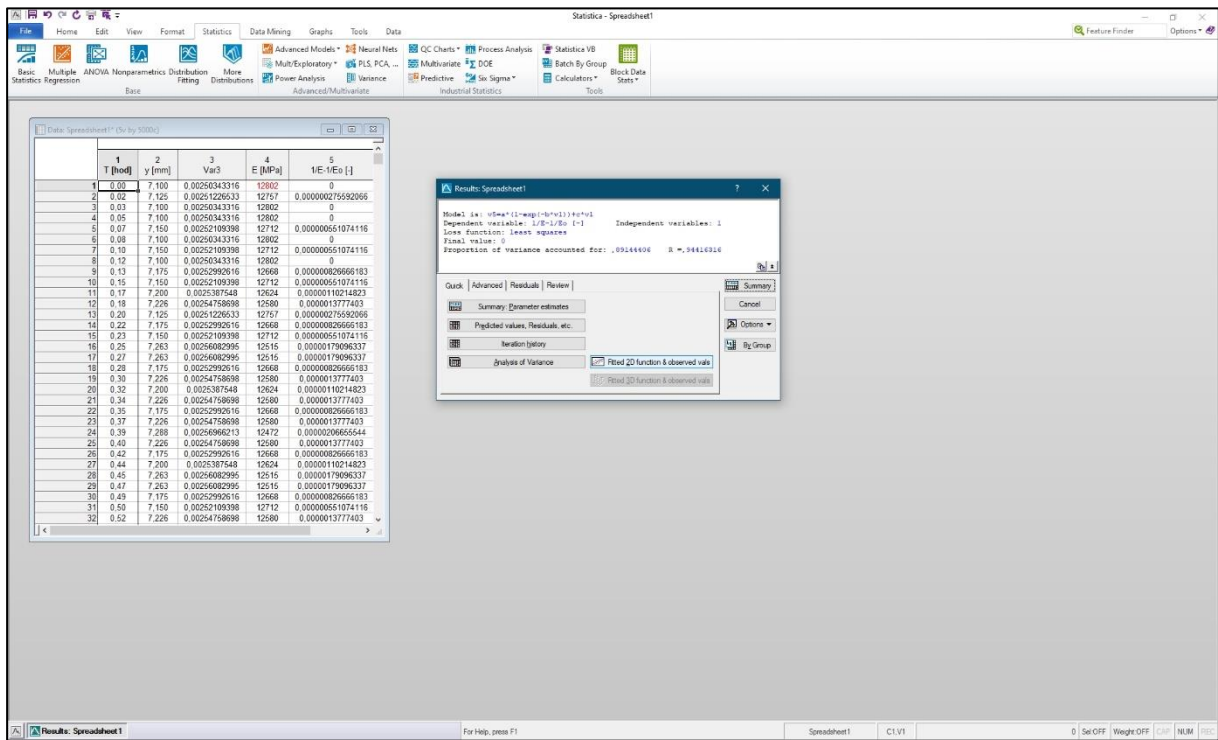
The screenshot shows the Minitab interface with the same data spreadsheet and two dialog boxes. The 'Nonlinear Least Squares Model Estimation' dialog box shows the following details:

- Model id:  $y = a \cdot \exp(-b \cdot T) + c$
- Number of parameters to be estimated: 3
- Scale function (a): least squares
- Dependent variable: 1/E-1/Eo [-]
- Independent variables: T [hoo]
- Missing data are casewise deleted
- Number of trials cases: 3077
- Estimation method: Levenberg-Marquadt
- Maximum number of iterations: 50
- Convergence criterion: 1.0E-6
- Start values: 10000 for all parameters

The 'Specify start values' dialog box shows the following values:

- a: 10000
- b: 0.1
- c: 100000000



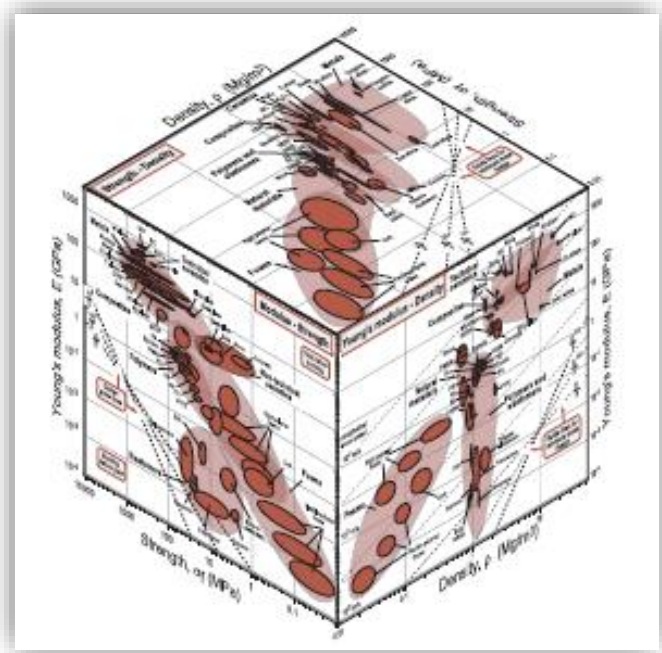
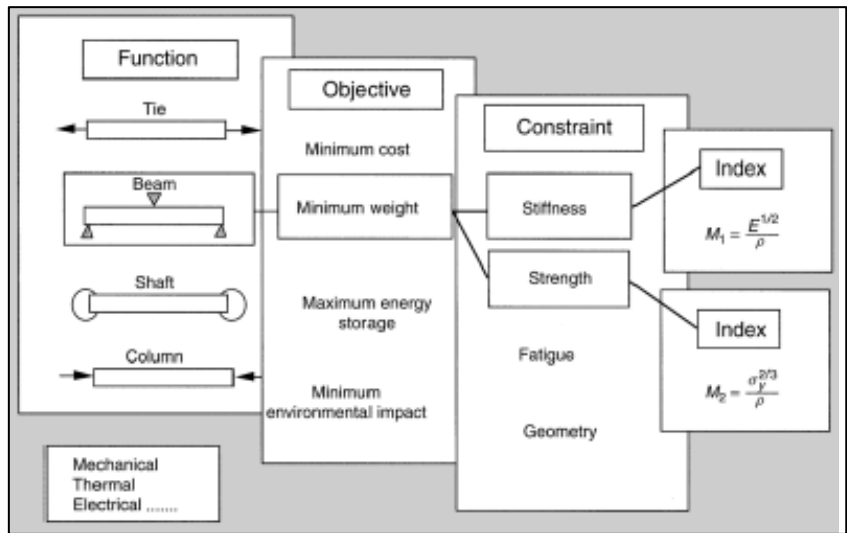
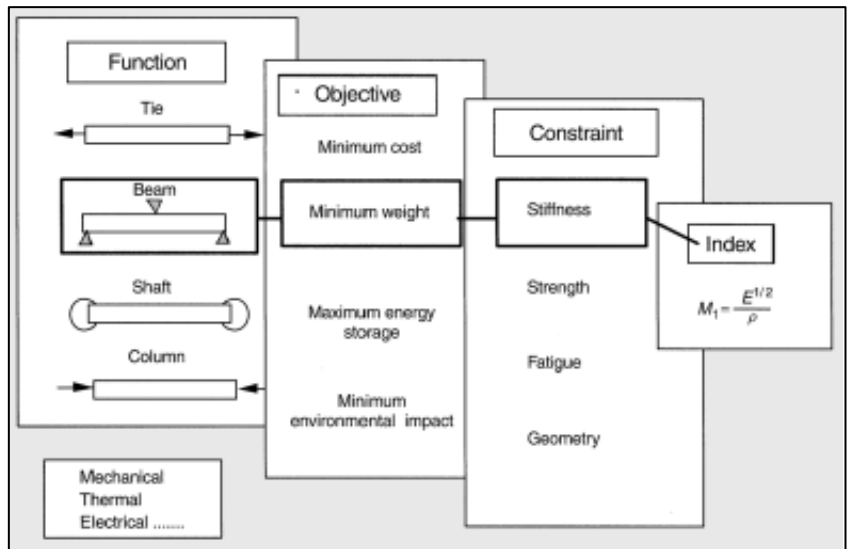


Model is:  $v = a \cdot (1 - \exp(-b \cdot y)) + c \cdot y$  (Spreadsheet)

Effect	Sum of Squares	DF	Mean Squares	F-value	p-value
Regression	0.000000	3.000	0.000000	115619.4	0.00
Residual	0.000000	3874.000	0.000000		
Total	0.000000	3877.000			
Corrected Total	0.000000	3876.000			
Regression vs Corrected Total	0.000000	3.000	0.000000	12557.7	0.00

Model is:  $v = a \cdot (1 - \exp(-b \cdot y)) + c \cdot y$  (Spreadsheet)

Estimate	Standard error	t-value	p-value	Lo. Conf. Limit	Up. Conf. Limit
3597	0.000000	0.00	0.00	0.000000	0.000000
3598	0.135200	0.032089	0.00	0.128911	0.141899
3599	0.000000	0.000000	0.00	0.000000	0.000000



Název: Viskoelastické chování dřeva a materiálů na jeho bázi:  
reologie a její význam při tečení dřeva – review a experimenty

Autoři: Ing. Vlastimil Borůvka, PhD.

Vydavatel: Česká zemědělská univerzita v Praze

Určeno: pro posluchače FLD

Povoleno: ediční radou FLD

Tisk: elektronická verze

Náklad: -

Počet stran: 36

Doporučená cena: -

Vydání: první

Rok vydání: 2020

ISBN: 978-80-213-3021-4