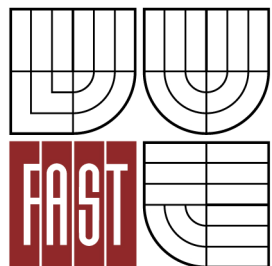




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND
COMPONENTS

VLASTNOSTI DŘEVA RŮZNÉHO STÁŘÍ S OHLEDEM NA TEPELNÉ NAMÁHÁNÍ

PROPERTIES OF WOOD OF DIFFERENT AGES CONSIDERING HEAT EXPOSITION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Ester Venhodová

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAN VANĚREK, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor 3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant Bc. Ester Venhodová

Název Vlastnosti dřeva různého stáří s ohledem na tepelné namáhání

Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce 31. 3. 2011

Datum odevzdání diplomové práce 13. 1. 2012

V Brně dne 31. 3. 2011



.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Regináč, L. a kolektiv Náuka o dreve II. Vysoká škola lesnícka a drevárska vo Zvolene:1990, 424 stran, ISBN 80-228-0062-7

Matovič, A. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva. Vysoká škola zemědělská v Brně:1993, 212 stran, ISBN 80-7157-086-9

Lexa, J., Nečesaný, V., Paclt, J., Tesařová, M., Štofko, J. Mechanické a fyzikálne vlastnosti dreva. Drevársky výskumný ústav v Bratislave:1952, 432 stran

Zásady pro vypracování

V rámci sanací dřevěných staveb a konstrukcí se setkáváme se stavem, který vyžaduje náhradu silně poškozeného dřeva za nové. V případě, že se jedná o objekt památkově chráněný, pak by měl být zvolen způsob sanace, který zohledňuje požadavky Benátské charty na zachování původních tradičních technik a původní materiálové substance. Pro naplnění těchto požadavků se u takových objektů v případě, že je to možné, využívá náhrada poškozeného prvku za dřevo přibližně stejného stáří a stejné materiálové substance, které je získané z objektů podřadnějšího typu.

U starého dřeva se díky změně chemického složení (zejména sníženého podílu akcesorických látek) snižuje jeho sorpční schopnost, což lze považovat za přínosný efekt. Důležitou otázkou však hraje v případě zabudování starého dřeva do objektu i jeho stav biologického napadení. Tyto prvky před zabudováním do objektu by tedy měly být sterilizovány, nejlépe aplikací mikrovlnného záření, kterým by byly zničeny zárodky dřevokazných škůdců.

Diplomová práce by v experimentální části měla na vybraných bezvadných tělesech dřeviny ověřit následující parametry:

- a) stanovit a ověřit sorpční charakteristiky dřevin různého stáří
- b) ověřit vliv tepelné úpravy dřeviny s ohledem na isothermické sorpční charakteristiky
- c) ověřit vliv tepelné úpravy dřeviny s ohledem na mechanické charakteristiky.

Předepsané přílohy

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací



.....
Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Tato práce se věnuje experimentálnímu ověření sorpčních a mechanických vlastností dřeva jedle ze 17. až 21. století. Dřevo různého stáří je termicky ošetřeno teplotou 60°C, 120°C a 180°C po dobu 17 hodin. Následně je posuzován vliv tepelné úpravy dřeva na jeho sorpční isothermické charakteristiky a pevnost v tlaku ve směru vláken.

Klíčová slova

tepelné ošetření, termická degradace, jedle, dřevo různého stáří, sorpce, pevnost v tlaku ve směru vláken

Abstract

This thesis discusses the experimental verification of sorption and mechanical properties of fir wood from the 17th to 21th century. The wood of different ages is thermally treated with temperature of 60°C, 120°C and 180°C for a 17 hours. The effect of thermal treatment of wood on the isothermal sorption characteristics and compressive strength in fiber direction is evaluated.

Keywords

thermal treatment, thermal degradation, fir wood, wood of different ages, sorption, compressive strength in fiber direction

Bibliografická citace VŠKP

VENHODOVÁ, Ester. *Vlastnosti dřeva různého stáří s ohledem na tepelné namáhání*. Brno, 2011. 52 s., 68 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 10.1.2012

.....
podpis autora

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Vaněrkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

Obsah:

1	Úvod	1
2	Vlhkostní vlastnosti dřeva	2
2.1	Vlhkost dřeva	2
2.2	Bobtnání a sesychání	4
2.3	Vliv vlhkosti na vlastnosti dřeva	5
2.4	Teorie sorpce.....	6
2.4.1	Průběh adsorpčního děje.....	6
2.4.1.1	Monomolekulární sorpce (chemická sorpce, adsorpce).....	7
2.4.1.2	Polymolekulární sorpce (adsorpce).....	8
2.4.1.3	Kapilární kondenzace	9
2.4.2	Sorpční izotermy	9
2.4.2.1	Langmuirova, Dentova a BET sorpce	10
2.4.2.2	Anderson - McCarthyho sorpce (deBoer - Zwickerova sorpce)	11
3	Vliv tepelného ošetření dřeva na jeho vlastnosti	12
3.1	Vliv teploty na strukturu a chemické vlastnosti.....	12
3.1.1	Krystalinita celulózy.....	13
3.2	Vliv teploty na sorpci.....	14
3.3	Vliv teploty na mechanické vlastnosti	15
4	Vlastnosti starého dřeva.....	17
4.1	Změna chemického složení s ohledem na stáří.....	17
4.2	Změna mechanických vlastností s ohledem na stáří.....	18
4.3	Změna fyzikálních vlastností s ohledem na stáří	20
5	Cíl práce.....	22
6	Metodika práce a použitý materiál	23
6.1	Vzorky	24
6.2	Postup práce	24
6.2.1	Klimatizace vzorků předepsaným prostředím	24
6.2.2	Termické namáhání	25
6.2.3	Klimatizace vzorků předepsaným prostředím	26
6.2.4	Pevnost v tlaku ve směru vláken	27
7	Výsledky a diskuze zkoušek.....	28
7.1	Rovnovážná vlhkost.....	28
7.1.1	Srovnání sorpčních izoterem dřeva různého stáří, diskuze	28
7.2	Termické ošetření dřeva.....	31
7.3	Rovnovážná vlhkost po tepelném ošetření	34
7.3.1	Srovnání sorpčních izoterem dřeva ošetřeného teplotou 60°C, diskuze	34
7.3.2	Srovnání sorpčních izoterem dřeva ošetřeného teplotou 120°C, diskuze	37
7.3.3	Srovnání sorpčních izoterem dřeva ošetřeného teplotou 180°C, diskuze	40
7.4	Pevnost v tlaku ve směru vláken.....	43
7.4.1	Srovnání pevností v tlaku ve směru vláken, diskuze.....	43
8	Závěr.....	46
9	Seznam použitých zdrojů.....	48
10	Seznam použitých zkratk a symbolů	51
11	Seznam příloh	52
12	Přílohy	53
12.1	Sorpční hodnoty RVD různého stáří	53
12.2	Desorpční hodnoty RVD různého stáří	57
12.3	Sorpční hodnoty RVD po tepelném ošetření.....	61
12.4	Desorpční hodnoty RVD po tepelném ošetření.....	64
12.5	Pevnost v tlaku ve směru vláken dřeva různého stáří	67

1 Úvod

Dřevo patří k nejstarším a nejoblíbenějším přírodním materiálům s vysoce všestranným využitím. Je to materiál, který může být při odborném hospodaření v lesích neustále obnovován a využíván v rozmanitých průmyslových odvětvích, jako je stavebnictví, výroba nábytku, hudebních nástrojů, ale také v chemickém a papírenském průmyslu. Pro svůj přírodní charakter, přirozenou kresbu, příznivé fyzikální a mechanické vlastnosti je žádaným prvkem životního prostředí člověka.

Z pohledu anatomické struktury a chemického složení je však dřevo velmi složitým materiálem. Po morfologické stránce se skládá z buněk, resp. z jejich stěn, po chemické stránce jde o materiál lignocelulózový, tj. skládající se z polysacharidické složky, již představuje celulóza, hemicelulózy, malou měrou pak pektinové látky, a aromatické složky reprezentované ligninem. Protože buňky, tvořící dřevo jsou většinou protáhlé, orientované rovnoběžně s osou kmene či větve, nemá dřevo v různých směrech ani stejnou strukturu, ani stejné vlastnosti. Je tedy anizotropním materiálem a jako takový je třeba jej posuzovat a hodnotit.

Dřevo představuje pružný, pevný a přitom lehký materiál, který má dobré tepelně izolační vlastnosti, je odolný proti chemikáliím, lehce se opracovává, spojuje a povrchově upravuje. Výrobky získané ze dřeva mohou mít však i četné nedostatky, jako je již zmíněná anizotropie, snadná zápalnost a hořlavost a také značná navlhavost a nasáklivost, důsledkem čehož dochází ke změně jeho rozměrů, tvaru i vlastností. Nevýhodou je také jeho relativně nízká odolnost vůči působení biotických činitelů. Tyto nedostatky však lze vhodným způsobem omezit nebo i vyloučit, např. vhodnými technologickými postupy při zpracování, modifikacemi jeho vlastností nebo úpravou různými látkami.

Stejně jako ostatní materiály, i dřevo postupně stárne a je třeba se o něj průběžně starat. Avšak i při pravidelné údržbě dochází k určitým defektům s dopadem na zhoršení původní kvality a funkčnosti. Poškozené dřevěné konstrukce a jiné dřevařské výrobky je třeba v dané situaci obnovit vhodným sanačním zásahem a předejít tak havárii celého objektu. Nicméně, pokud jsou zachovány příznivé podmínky, může dřevěná konstrukce vzhledem ke své trvanlivosti plnit po staletí svoji funkci bez významného poškození.

2 Vlhkostní vlastnosti dřeva

2.1 Vlhkost dřeva

Vlhkost dřeva udává množství vody nebo jiné tekutiny, kterou dřevo obsahuje, v poměru ke hmotnosti dřeva. Vyjadřuje se nejčastěji v procentech suché hmotnosti dřeva – **vlhkost absolutní** w_{abs} , někdy v procentech mokré hmotnosti dřeva – **vlhkost relativní** w_{rel} [4].

$$w_{abs} = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 = \frac{m_v}{m_0} \cdot 100; [\%] \quad (2.1a)$$

$$w_{rel} = \frac{m_w - m_0}{m_w} \cdot 100 = \frac{m_v}{m_w} \cdot 100; [\%] \quad (2.1b)$$

m_w – hmotnost vlhkého dřeva [g]

m_0 – hmotnost absolutně suchého dřeva [g]

m_v – hmotnost vody obsažené ve dřevě [g]

Pro dřevo je charakteristické, že svojí vlhkost přizpůsobuje vnějším podmínkám. Tato vlastnost se nazývá **hygroskopicitá**. Přijímáním nebo vydáváním molekul vody ve formě vodní páry se dřevo dostává do rovnováhy, která odpovídá okolní relativní vlhkosti a teplotě vzduchu. Při dlouhodobé relativní vlhkosti vzduchu 95-99% dřevo výrazně navlhá a jeho absolutní vlhkost se ustaluje na 28-35%, což je hodnota blízká **mezi hygroskopicity** – **MH**. Mez hygroskopicity je pomyslný stav, kdy jsou buněčné stěny zcela nasyceny vodou a buněčné dutiny (lumeny) jsou zcela bez vody. Hodnoty meze hygroskopicity u různých druhů dřev jsou uvedeny v tabulce 2.1 [1, 3].

Tabulka 2.1: Mez hygroskopicity u různých druhů dřeva (podle Trendelenburga a Mayer-Wegelina 1955, upraveno Matovičem 1993) [6].

Mez hygroskopicity [%]	Druh dřeva
22 – 24	jádro dřeva jehličnanů s vysokým obsahem pryskyřice: <i>borovice, modřín, douglaska, vejmutovky, limba</i>
23 – 25	jádro listnáčů s kruhovitě a polokruhovitě pórovitou stavbou dřeva: <i>akát, jedlý kaštan, dub, jasan, ořech, třešeň</i>
26 – 28	jádro dřeva jehličnanů s nižším obsahem pryskyřice: <i>borovice, modřín</i>
30 – 34	dřevo s bělím a vyzrálým dřevem u jehličnanů: <i>smrk, jedle</i> ; běl u jehličnatých dřevin s výrazným jádrem: <i>borovice, vejmutovka, modřín</i>
32 – 35 a více	dřevo listnáčů s roztroušeně pórovitou stavbou bez výrazného jádra: <i>lípa, vrba, topol, olše, bříza, buk, habr</i> ; běl u listnáčů s kruhovitě a polokruhovitě pórovitou stavbou dřeva: <i>akát, jedlý kaštan, dub, jasan, ořech, třešeň</i>

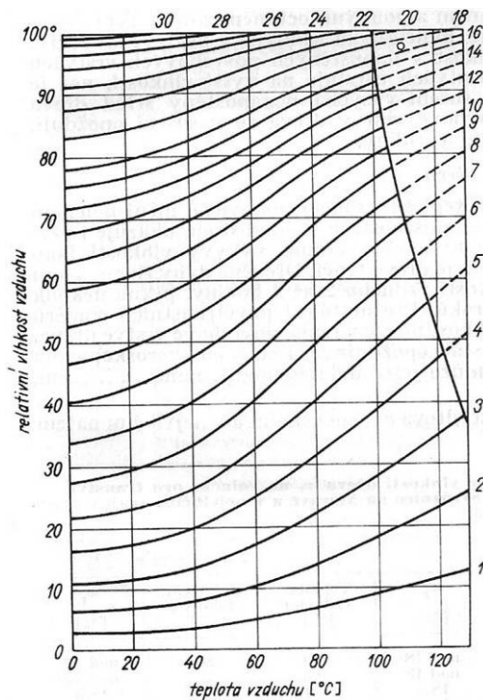
Aby bylo možno pochopit vztahy mezi dřevem a vodou, je potřebné znát základní příčinu hygroskopicity dřeva. Všeobecně se hygroskopicitu vysvětluje elektrostatickou příbuzností mezi dřevem a vodou a velkým vnitřním povrchem dřeva (fibril). Voda je tzv. polární podstatou, což znamená, že OH^- část její molekuly je elektricky negativní a H^+ část elektricky pozitivní. Dřevo, resp. celulóza, je také polární podstatou vzhledem na radikál OH^\cdot , který je oproti pozitivní části vody negativní. Všechny tyto látky jsou lyofilní nebo hygroskopické [16].

Dřevo lehce přijímá i kapalnou vodu, která se do jeho lumenů dostává kapilárními silami – dochází k procesu nasákavosti. Jeho maximální vlhkost, nebo-li **mez nasycení buněčných stěn (MNBS)**, přitom roste v závislosti na pórovitosti dřeva, u buku až k cca. 120%, resp. u smrku až k 200% [1, 6].

Dřevo tedy může obsahovat vodu vázanou (hygroskopickou), vodu volnou (kapilární) a vodu chemicky vázanou.

- **Voda vázaná (hygroskopická)** se nachází v buněčných stěnách a je vázaná vodíkovými můstky na hydroxylové skupiny OH^- amorfni části celulózy a hemicelulózy. Voda vázaná se ve dřevě v průměru vyskytuje při vlhkostech 0-30%. Při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností má největší a zásadní význam.
- **Voda volná (kapilární)** vyplňuje ve dřevě lumény buněk a mezibuněčné prostory. Vyskytuje se ve dřevě tehdy, je-li současně uložena v buněčných stěnách voda vázaná. Na fyzikální a mechanické vlastnosti má podstatně menší význam než voda vázaná.
- **Voda chemicky vázaná** je součástí chemických sloučenin. Nelze ji ze dřeva odstranit sušením, ale pouze spálením, proto je ve dřevě obsažena i při nulové absolutní vlhkosti dřeva. Zjišťuje se při chemických analýzách dřeva a její celkové množství představuje 1-2% sušiny dřeva. Při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností nemá žádný význam [5].

Při uložení na vzduchu dřevo vyschne až do tzv. **hygroskopické rovnovážné vlhkosti**, která závisí na teplotě a relativní vlhkosti vzduchu, což je graficky znázorněno na obrázku 2.1 [2].



Obrázek 2.1: Keylwerth - Loughboroughův nomogram (plné křivky značí rovnovážnou vlhkost dřeva při atmosférickém tlaku 101,3kPa, křivky čárkované při vyšších tlacích) [7].

2.2 Bobtnání a sesychání

Bobtnání vyjadřuje míru zvětšení objemu dřeva, spojeného s ukládáním tekutiny do submikroskopické struktury. Udává se obvykle v procentech rozměru dřeva v absolutně suchém stavu.

Sesychání dřeva vyjadřuje míru zmenšení objemu, spojeného s odstraněním tekutiny ze submikroskopické struktury. Udává se obvykle v procentech rozměru dřeva v nabobtnaném stavu [4].

Rozměry a tvary dřeva se tedy mění se změnou jeho vlhkosti, a to v intervalu od 0% až do MH. Rozměry běžně používaného dřeva se přitom mění nejméně v podélném směru (max. sesychání $\alpha_L = 0,15-0,65\%$), poté v radiálním směru (max. sesychání $\alpha_R = 2,5-6,7\%$) a nejvíce v tangenciálním směru (max. sesychání $\alpha_T = 8,3-14,7\%$) [1].

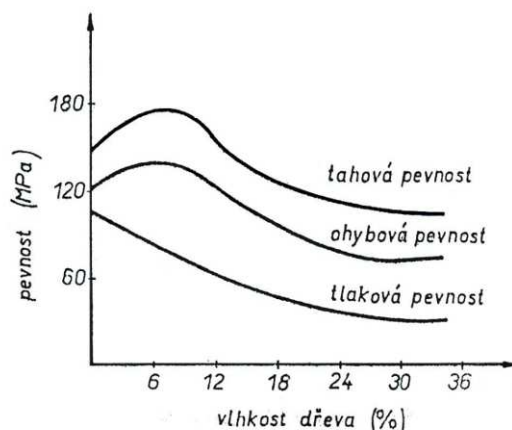
2.3 Vliv vlhkosti na vlastnosti dřeva

Vlhkost dřeva má velký vliv na některé vlastnosti dřeva, mezi které patří především jeho rozměrová stabilita, mechanické vlastnosti, trvanlivost a tepelná stabilita. Mechanické vlastnosti dřeva jsou ovlivněny změnami jeho vlhkosti pod MH (viz. obrázek 2.2). Přibírá-li suché dřevo vlhkost, snižují se jeho statické pevnosti i modul pružnosti a naopak vysychání dřeva má za následek zvětšení hodnot většiny mechanických vlastností. Vliv změn vlhkosti na pevnost je u dřevěných konstrukčních prvků méně výrazný než u malých bezvadných těles. Zvětšení pevnosti vysycháním může být do značné míry eliminováno, zejména u rozměrných prvků z přírodního dřeva, vlivem trhlin způsobených sesycháním [2].

Vlivem vlhkosti dochází k bobtnání a sesychání, které má mimo mechanických vlastností vliv také na objemové změny dřeva. Nerovnoměrné sesychání a bobtnání v různých směrech má v praxi všeobecně známé nepříznivé následky ve změnách tvaru dřeva (dřevo tzv. „pracuje“). Je to velmi nepříjemná vlastnost dřeva a je nutno s ní vždy při jeho použití počítat. Při neregulovaném nebo vícenásobném vysoušení se navíc ve dřevě mohou tvořit trhliny, které snižují použití, někdy i pevnost dřeva [4, 3].

Vlhkost dřeva ovlivňuje i jeho tepelnou stabilitu. Voda vytlačuje z pórů dřeva vzduch, namísto kterého se usazuje a jelikož je tepelná vodivost vody asi 25x vyšší než tepelná vodivost suchého vzduchu, dochází ke zvýšení tepelné vodivosti dřeva [16].

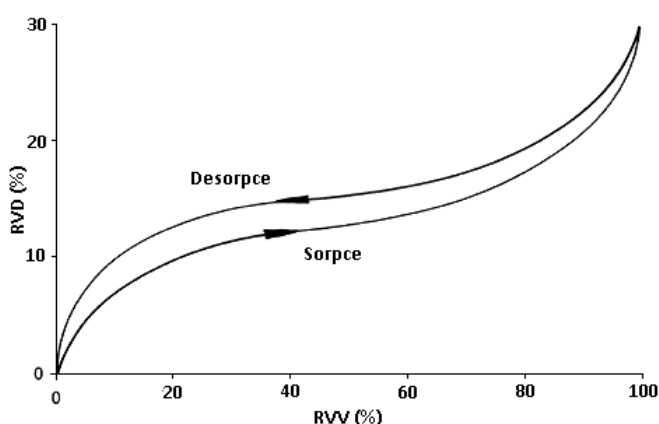
Vyšší obsah vlhkosti ve dřevě zvyšuje možnost napadení dřevokaznými houbami a hmyzem a tím také snižuje jeho trvanlivost. Pro růst dřevokazných hub je potřebná vlhkost dřeva cca 30-70%, pro dřevokazný hmyz postačuje vlhkost již 10%.



Obrázek 2.2: Vliv vlhkosti dřeva na jeho pevnosti [6].

2.4 Teorie sorpce

Vystavíme-li absolutně suché dřevo působení prostředí o určité teplotě a relativní vlhkosti vzduchu, začne dřevo vodu obsaženou ve vzduchu poutat procesem zvaným **adsorpce**. Proces opačný, kdy dřevo ztrácí vodu a ta se odpařuje do okolního ovzduší, nazýváme **desorpce**. Tento proces změn vlhkosti dřeva v závislosti na vlhkosti okolního vzduchu je vratný, avšak ne po stejné křivce (viz. obrázek 2.3). Pro stejnou relativní vlhkost vzduchu je vlhkost dřeva vyšší při desorpci než při adsorpci vody, a to v rozpětí relativní vlhkosti vzduchu $\phi = 30 - 90\%$ o 2,5 až 3,5%. Rozdíl mezi adsorpcí a desorpcí se nazývá **hystereze sorpce** a zmenšuje se přibližováním se 0% a 100% relativní vlhkosti vzduchu, kdy klesá na nulovou hodnotu [6].



Obrázek 2.3: Sorpční izoterma dřeva [20].

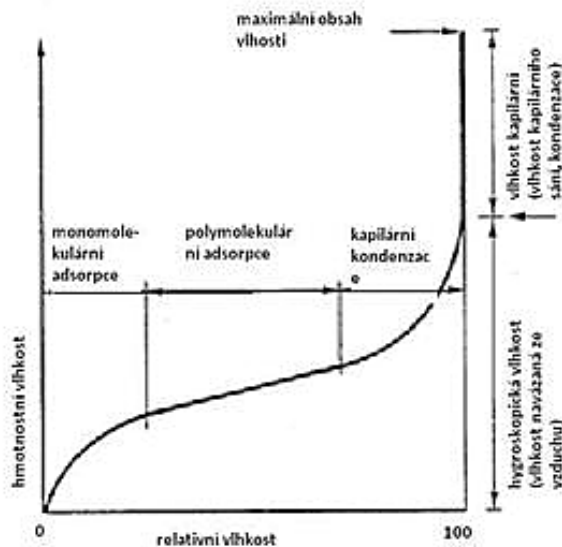
Jev hystereze sorpce vody se vysvětluje různými příčinami:

- 1) Odlišný úhel kontaktu vody se stěnami kapilár v buněčných stěnách při adsorpci a desorpci. Tato teorie se však zdá být nevhodnou při nízkých relativních vlhkostech, kdy se nevyskytuje kapilární kondenzace.
- 2) Hydroxylové skupiny celulózy a ligninu jsou při desorpci spojené molekulami vody, zatímco při adsorpci se nasytí vzájemně a voda zde již nemůže vniknout.
- 3) Cykly hystereze plasticity a sorpce představují ztráty energie, které mohou být navzájem korelované a je možno je v obou případech vyjádřit v J/g [7].

2.4.1 Průběh adsorpčního děje

Během adsorpce dochází postupně ke třem dějům (viz. obrázek 2.4) označovaným jako:

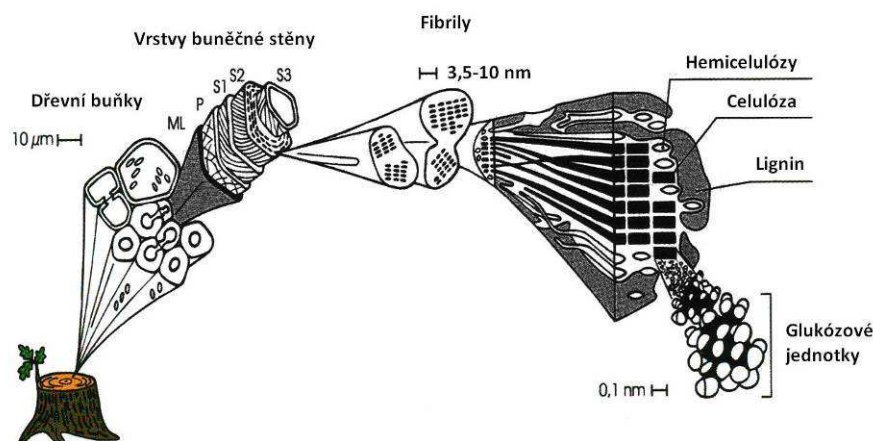
- monomolekulární sorpce (chemická sorpce, adsorpce),
- polymolekulární sorpce (adsorpce),
- kapilární kondenzace.



Obrázek 2.4: Fáze sorpce podle teorie multimolekulární adsorpce (teorie BET) [9].

2.4.1.1 Monomolekulární sorpce (chemická sorpce, adsorpce)

Monomolekulární sorpce je první fází adsorpce. Předpokládá se, že molekuly vody jsou poutány přitažlivými silami sorpčních míst neorientovaných amorfních oblastí celulóзовých řetězců, případně celé holocelulózy. Vazbami přes vodíkové můstky jsou molekuly ukládány do mezimicelárních a mezifibrilárních prostor, které jsou dostatečně prostorné pro umístění molekul vody (průměr molekuly vody 0,3 nm). Vzhledem k submikroskopické stavbě buněčné stěny dochází k monomolekulární sorpci nejprve v amorfní části fibril, kde se nachází nejvíce volných hydroxylových skupin (viz. obrázek 2.5). Na povrchu fibrilární struktury buněčné stěny se postupně vytváří vrstvičky vody, kdy je pravděpodobně na každém volném sorpčním místě navázána jedna molekula vody. Teorie monomolekulární sorpce vychází z představy velkého vnitřního povrchu dřeva, na kterém se nachází izolovaná sorpční místa tvořená volnými OH skupinami. Touto teorií je vysvětlována sorpce při RVD 0 - 7%, což odpovídá RVV $\leq 20\%$. V důsledku značné pevnosti vazeb vodíkovými můstky ($4 - 40 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$) jsou molekuly vody v monomolekulární vrstvě zahuštěny na hustotu $1,3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Nízká rovnovážná vlhkost dřeva ještě nezpůsobuje významnější bobtnání buněčné stěny, proto monomolekulární sorpce není doprovázena změnami a dislokacemi v krystalické oblasti celulózy. Matematicky je monomolekulární sorpce popisována Langmuirovou sorpční izotermou, viz. rovnice 2.6 [8].



Obrázek 2.5: Schéma znázorňující strukturu buněčné stěny a chemickou stavbu dřeva. Buňky dřeva jsou tvořeny **buněčnou stěnou** (střední lamela, primární a sekundární stěna) a **buněčnou dutinou (lumenem)**. Buněčnou stěnu tvoří lamely, které se skládají z jednotlivých **makrofibril**, s průměrem příčného řezu 400nm, a ty asi z 20 **mikrofibril (micel)**. Mikrofibrilu (šířka 10-30 nm, délka až několik mm) tvoří přibližně 20-60 elementárních **fibril** (průměr 3,5-10 nm, délka 30-80 nm). Kostru fibrily tvoří řetězce celulózy (cca. 40 vláken šířky 0,4-0,8 nm a délky až 5 μm) a mezifibrilární prostor vyplněný ligninem a hemicelulózami (amorfní oblast) [21].

2.4.1.2 Polymolekulární sorpce (adsorpce)

Následující fází adsorpce je polymolekulární sorpce. Nad vrstvičkou molekul vody poutaných přes vodíkové můstky sorpčních míst amorfní části celulózy se adsorbují další molekuly, které vytvářejí polymolekulární vrstvu. Tato vrstva je tvořena až pěti řadami molekul vody, které jsou na povrchu monomolekulární vrstvy drženy Van der Waalsovými mezimolekulárními silami, elektrostatickými silami a částečně i slábnoucími silami vodíkových můstků sorpčních míst. Polymolekulární vrstva není rozložena rovnoměrně, některé oblasti absorbují více než jiné. S rostoucí vzdáleností molekul vody od povrchu sorbentu (holocelulóza) klesá vliv vazeb vodíkovými můstky a fyzikální vlastnosti adsorbované vody se blíží vlastnostem vody kapalné. Průměrná hustota takto vázané vody se pohybuje kolem $1,0 - 1,2 \text{ g.cm}^{-3}$ a povrchové napětí odpovídá vodě kapalné. S rostoucí tloušťkou polymolekulární sorpce je spojováno značné bobtnání buněčné stěny, jehož důsledkem je také rozevření původně nedostupných krystalických oblastí celulózy a vytváření mezokapilár. Touto teorií je vysvětlována sorpce při RVD 7 - 15%, což odpovídá RVV = 20 - 70%. Matematicky je polymolekulární sorpce popisována Dentovou nebo BET (Brauer-Emmet-Teller) sorpční izotermou, viz. rovnice 2.4 [8].

2.4.1.3 Kapilární kondenzace

Při relativní vlhkosti vzduchu vyšší než 70% dochází v mikro- a mezokapilárách ke kapilární kondenzaci, která závisí na poloměru kapilár. Zvláště v mezokapilárách buněčné stěny o poloměru $5 \cdot 10^{-8} - 10^{-6} \text{ m}$ může docházet ke kondenzaci vzdušné vlhkosti již při relativní vzdušné vlhkosti nižší než stav nasycení. Závislost popisuje Kelvinova rovnice :

$$\frac{2\sigma \cos \theta}{r} = -\frac{\rho_{H_2O} RT}{V_w} \ln \varphi \quad (2.2)$$

σ - povrchové napětí kapaliny (voda $0,073 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$)

$\cos \theta$ - úhel smáčnění kapaliny (voda $\theta=0^\circ$)

r - poloměr zakřivení menisku v kapiláře (m)

ρ_{H_2O} - hustota kapaliny (voda $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

R - univerzální plynová konstanta ($8,31 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

T - absolutní teplota ($^\circ\text{K}$)

V_w - molární hmotnost kapaliny (voda $18 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$)

φ - relativní vlhkost vzduchu (%)

Z rovnice vyplývá, že od určitého poloměru při dané relativní vzdušné vlhkosti vodní pára v kapiláře kondenzuje a smáčí vnitřní povrch dřeva jako kapalina se stejnými fyzikálními vlastnostmi. S rostoucí vlhkostí je tato voda odváděna do intermicelárních a interfibrilárních prostor buněčné stěny. Maximální vlhkost, které je v buněčné stěně dosaženo, závisí na maximálním roztažení fibrilární struktury. Toto roztažení je omezeno jednak mechanickými vlastnostmi buněčné stěny - její pružností, a jednak vrstevnatostí buněčné stěny s odlišným průběhem fibrilární struktury v sekundárních vrstvách buněčné stěny. Teorie kapilární kondenzace se uplatňuje při RVD od 15 - 20% do MH [8].

2.4.2 Sorpční izotermy

V literatuře jsou popsány desítky sorpčních izoterem, jedním z kritérií použitelnosti dané sorpční izotermy je její shoda s experimentálními daty. Na tomto principu jsou konstruovány empirické modely. V této kapitole se budeme naopak zabývat těmi izotermami, které mají teoretické opodstatnění a vycházejí z vrstevnatého modelu a termodynamiky sorpce.

Konkrétní hodnoty sorpční izotermy - stav vlhkostní rovnováhy v závislosti na relativní

vlhkosti a teplotě vzduchu - můžeme určit buď z nomogramů nebo výpočtem z některé rovnice sorpční izotermy. Obvyklým nomogramem je Keylwerth - Loughboroughův nomogram (viz. obrázek 2.1) [5].

2.4.2.1 Langmuirova, Dentova a BET sorpce

Langmuirova, Dentova a Brunauer - Emmet - Tellerova (BET) sorpce vycházejí z povrchové sorpční teorie a předpokládají sorpci vody ve dvou formách:

- **primární** - monomolekulární sorpce na izolovaných primárních sorpčních místech buněčné stěny,
- **sekundární** - polymolekulární sorpce v důsledku chemických sil.

Rozdíl mezi sorpčními izotermami spočívá v tom, že Langmuir vzal do úvahy pouze primární sorpci, zatímco Dent a BET počítají s oběma formami. Dent a BET se však liší v chápání termodynamických vlastností vody v mono- a polymolekulární vrstvě. Dent vychází z předpokladu, že se tyto liší, BET mezi nimi nedělají rozdíl. Vzhledem k tomu, že termodynamika sorpce prokazuje změny entalpie, entropie a volné energie vody vázané s vlhkostí dřeva, lépe skutečnosti odpovídá sorpční izoterma Dentova.

a) **Dentova sorpční izoterma** vychází z následujících předpokladů. S rostoucí vlhkostí dřeva roste počet vrstev molekul vody vázané od A_0 - A_n . Při dosažení stavu vlhkostní rovnováhy mezi tlakem vodních par okolí a ve dřevě je nastolena termodynamická rovnováha mezi jednotlivými vrstvami adsorbované vody. Důsledkem je, že evaporace vody z vrstvy A_i odpovídá kondenzaci ve vrstvě A_{i-1} .

Proporci mezi rychlostí evaporace a kondenzace potom vyjadřují koeficienty proporcionality b_i , odkud:

$$A_1 = b_1 \varphi A_0 \quad (2.3a)$$

$$A_i = b_i \varphi A_{i-1} \quad (2.3b)$$

Z termodynamického hlediska existuje zásadní rozdíl mezi dvěma fázemi sorpce - monomolekulární a polymolekulární - proto vystačíme pouze se dvěma koeficienty b_i a Dentova sorpční-izoterma má tvar:

$$\frac{w}{w_M} = \frac{b_1 \varphi}{(1 - b_2 \varphi)(1 - b_2 \varphi + b_1 \varphi)} \quad (2.4)$$

w - rovnovážná vlhkost dřeva (%),

w_M - max. vlhkost v monomolekulární vrstvě, tj. hranice mezi mono-a polymolekulární vrstvou (6-8%).

Koeficienty b_1 a b_2 stanovíme z rovnice analogické Boltzmannovu vztahu:

$$b_1 = e^{\left(\frac{\Delta GM}{RT}\right)} \quad (2.5a)$$

$$b_2 = e^{\left(\frac{\Delta GP}{RT}\right)} \quad (2.5b)$$

ΔGM - průměrná volná energie vody vázané v monomolekulární vrstvě 0-7%,
 ΔGP - průměrná volná energie vody vázané v polymolekulární vrstvě 7% - MH.
 Při teplotě 20°C je $\Delta GM \approx 3600 \text{ J.mol}^{-1}$ a $\Delta GP \approx 880 \text{ J.mol}^{-1}$.

b) Langmuirova sorpční izoterma se od Dentovy (2.4) liší tím, že uvažuje pouze s monomolekulární sorpcí, tedy že $b_2 = 0$. Její tvar má potom podobu:

$$\frac{w}{w_0} = \frac{b_1 \varphi}{(1 - b_1 \varphi)} \quad (2.6)$$

Žádná z uvedených sorpčních izoterm neuvažuje s kapilární kondenzací, proto je jejich použití omezeno na rozsah relativní vzdušné vlhkosti do 70 % [5].

2.4.2.2 Anderson - McCarthyho sorpce (deBoer - Zwickerova sorpce)

Anderson - McCarthyho sorpce, někdy zvaná deBoer-Zwickerova sorpce, je sorpční izotermou mající semiempirický tvar. Vychází z předpokladu, že pokles volné energie vody vázané během sorpce je přímo úměrný poklesu sorpčního tepla, t.j. že platí:

$$\Delta H_s \approx \Delta G_s \quad (2.7)$$

Po dosazení dostaneme:

$$- 21100 e^{-14w} \approx RT \ln \varphi, \quad (2.8a)$$

odkud po úpravě získáme tvar:

$$\ln \varphi \approx - \frac{21100}{RT} e^{-14w}, \quad (2.8b)$$

který odpovídá zhruba obecné Arrheniově rovnici $y = Ae^{-Bw}$. Vyjádřením koeficientů A a B jako závisle proměnných na absolutní teplotě můžeme vztah (2.8b) převést na rovnici:

$$\ln \frac{1}{\varphi} = Ae^{-Bw} \quad (2.9a)$$

odkud:

$$w = \frac{1}{B} \ln \frac{A}{\ln \frac{1}{\varphi}}, \quad (2.9b)$$

kde podle deBoer-Zwicker:

$$A = 7,731706 - 0,014348.T \text{ a } B = 0,008746 + 0,000567.T, \quad (2.10a)$$

nebo podle Chung-Pfost:

$$A = 0,19 \cdot 10^5 T^{-1,5} \text{ a } B = 0,39 \cdot 10^{-3} T^{1,07}. \quad (2.10b)$$

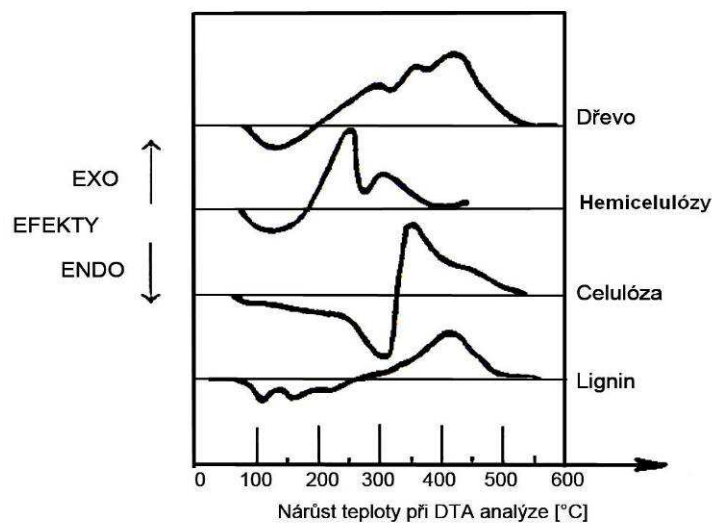
[5]

3 Vliv tepelného ošetření dřeva na jeho vlastnosti

3.1 Vliv teploty na strukturu a chemické vlastnosti

Dřevo, jako materiál složený z 49-51 % uhlíku, 43-44 % kyslíku a 6-7 % vodíku, se lehce zapálí a hoří. Termická degradace dřeva je souborem chemických reakcí (depolymerizace, dehydratace a jiné) iniciovaných ohřevem, nebo-li aktivační tepelnou energií. Z diferencních termických analýz (DTA), termogravimetrických analýz (TG), ale i z jiných termických a fyzikálně-chemických analýz použitých na vyhodnocení v průběhu termického rozkladu dřeva vyplývá následující:

- **Hemicelulózy** se rozkládají při teplotách pod 200 °C, s výraznějším exotermickým efektem nad 200 °C.
- **Celulóza** se výrazně depolymerizuje při teplotách nad 300 °C za vzniku levoglukózanu (1,6-anhydro-β-D-glukopyranózy), který se následně přemění na hořlavé plyny.
- **Lignin** se výrazněji exotermicky rozkládá až při teplotách nad 300 až 400 °C, resp. i vyšších [1].



Obrázek 3.1: Schéma energetických efektů při termickém rozkladu dřeva a jeho složek (endotermické reakce - ENDO, exotermické reakce - EXO) [1].

3.1.1 Krystalinita celulózy

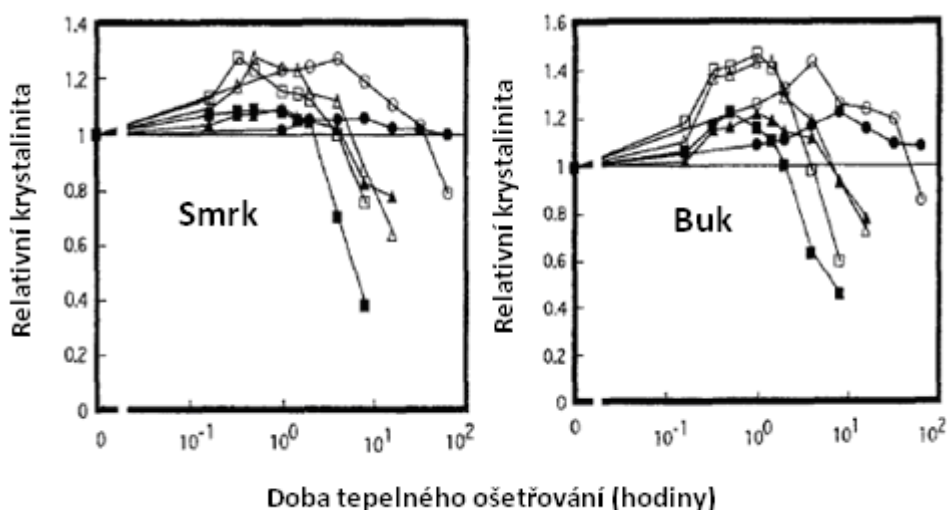
Celulóza je základní stavební složkou dřeva, tvoří fibrilární kostru buněčných stěn. Vlákenné makromolekuly celulózy, které jsou velmi pevné (odolné proti tahovým a tlakovým silám) se pomocí vodíkových vazeb seskupují ve vyšší strukturální jednotky – fibrily – které jsou odlišně uloženy v jednotlivých vrstvách buněčné stěny (viz. obrázek 2.5).

Celulóza se ve dřevě vyskytuje ve formě amorfni a krystalické. U krystalické části celulózy jsou vodíkové vazby mezi celulóзовými makromolekulami rozloženy pravidelně, takže vzniká uspořádaný prostorový systém podobný mřížce krystalu. U nativní celulózy představuje krystalická část asi 70% celulózy, u izolované v podobě buničiny kolem 40%. Zbytek celulózy bez prostorového uspořádání makromolekul tvoří amorfni část. Krystalická část celulózy je chemicky velmi stálá, reakce celulózy se uskutečňují nejdříve v amorfni části [17].

Relativní podíl krystalické a amorfni části celulózy se nazývá krystalinita. Tato vlastnost ovlivňuje adsorpci vody do dřeva. Voda, která vniká do buněčných stěn, se váže především v amorfni oblastech a na povrchu krystalických oblastí, kde jsou k dispozici volné sorpční místa v podobě hydroxylových skupin. Voda vnikající do buněčných stěn anatomických elementů dřeva se adsorbuje především na tyto volné OH skupiny amorfni oblastí celulózy

a na hemicelulózy. Čím vyšší je tedy krystalinita a tím i podíl krystalické části celulózy, tím je nižší hygroskopicita dřeva [17].

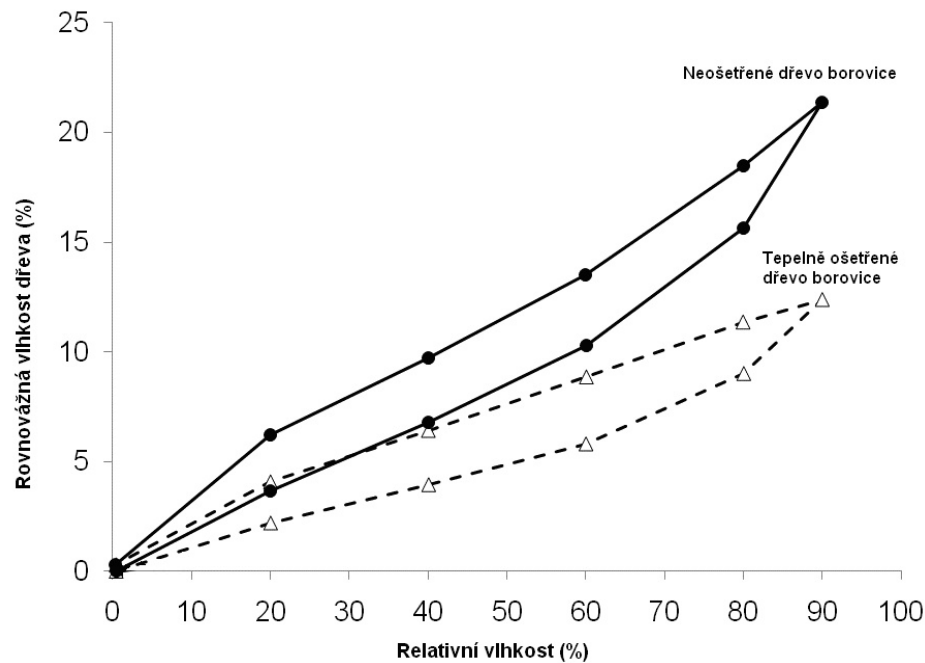
Krystalinita celulózy hraje svou roli i při termickém zpracování dřeva. Při působení vyšších teplot (100 - 220°C) dochází k hydrolytické depolymerizaci amorfní celulózy, kdy výsledkem je pokles polymerizačního stupně a poměrný nárůst krystalického podílu. Na tento proces má mimo jiné vliv i vlhkost dřevní hmoty, jelikož bylo dokázáno, že ve vlhkém stavu je nárůst krystalického podílu téměř dvakrát vyšší, než ve stavu vysušeném. Z obrázku 3.2 je také patrné, že na míru krystalinity má vliv teplota a doba, po kterou vysoká teplota na dřevo působí. Tato změna krystalinity má za následek zvýšení rozměrové stálosti, biologické odolnosti, mírný nárůst hodnot modulu pružnosti a již zmiňované snížení hygroskopicity [14, 22].



Obrázek 3.2: Relativní krystalinita tepelně ošetřovaného dřeva smrku a buku. Plné symboly - vysušený stav, prázdné symboly - vlhký stav. □ - 220°C, Δ - 200°C, ○ - 180°C. [14]

3.2 Vliv teploty na sorpci

Působení vysoké teploty na dřevo ovlivňuje jeho hygroskopicitu dvěma způsoby, reversibilně či ireversibilně. Výše teploty rozhoduje, který z těchto dějů ve dřevě probíhá. V případě teplot cca do 100°C nastává okamžitý efekt vysušení, tj. snížení hodnoty rovnovážné vlhkosti, což lze definovat jako efekt reversibilní. Při vystavení dřeva vysokým teplotám, zejména nad 150°C, dochází k permanentnímu snížení jeho hygroskopicity [10].

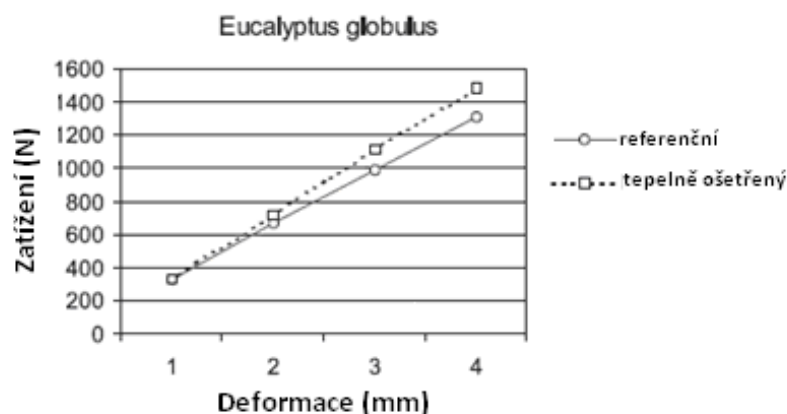


Obrázek 3.3: Sorpční izotermy neošetřené a tepelně ošetřené (teplota nad 150°C) borovice [11].

Tento efekt, kdy se mění hygroskopicita v závislosti na teplotě ošetření dřeva můžeme pozorovat na sorpčních izotermách zobrazených na obrázku 3.3. Tato změna je způsobena především termickou degradací hemicelulóz, tepelné ošetření sníží absorpci vody do stěn dřevních buněk, což je způsobeno redukcí hydroxylových skupin. Následkem omezeného množství OH^- skupin pak dochází ke snížení hygroskopicity. Nemalý vliv na tento jev má i zmíněná změna krystalinity celulózy, kdy se při vyšších teplotách (nad 100°C) zvyšuje podíl krystalické formy celulózy na úkor amorfnní (viz. kapitola 3.1.1). Na proces degradace jednotlivých složek dřeva má kromě teploty významný vliv i doba jejího působení [12].

3.3 Vliv teploty na mechanické vlastnosti

Struktura dřeva se při termickém rozkladu mění již od její molekulární hladiny. Vlivem teplot 130 – 150°C mohou buněčné stěny nejprve tloustnout, to má za následek počáteční nárůst modulu pružnosti, posléze se ale zeslabují, vznikají v nich trhliny, buňky se vzájemně izolují, což je doprovázeno tvorbou trhlinek ve střední lamelle. Lomová plocha buněčných stěn je zjevně křehčí, což nepřímou poukazuje na proces depolymerizace celulózy. Modul pružnosti i pevnost klesá [1, 22].



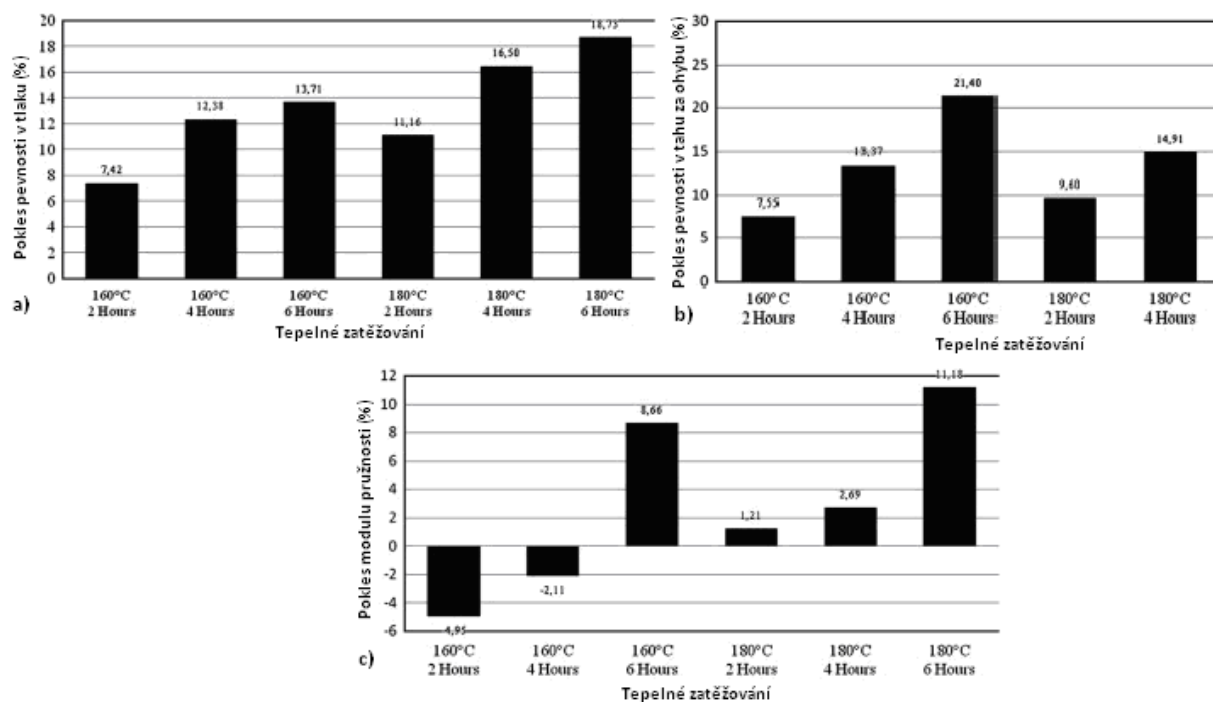
Obrázek 3.4: Porovnání modulu pružnosti tepelně ošetřeného a neošetřeného vzorku *Eucalyptus globulus*. [13]

Tabulka 3.1: Porovnání modulu pružnosti tepelně ošetřeného a neošetřeného dřeva *Eucalyptus globulus*. [13]

	Směr zkoušení	Modul pružnosti (MPa)
Neošetřené dřevo	tangenciální	16 157
	radiální	15 191
Tepelně ošetřené dřevo (180°C)	tangenciální	28 193
	radiální	27 099

Z obrázku 3.4 a tabulky 3.1 je patrná deformace v elastické oblasti u vzorku dřeva eukalyptu neošetřeného a tepelně ošetřeného při 180 °C. Další zkoušky prokázaly, že v příčném tahu došlo vlivem termické degradace ke snížení pevnosti o 26%. Rozdíl byl zaznamenán i v barvě, dřevo eukalyptu, které je velmi světlé, se stalo po tepelném ošetření tmavě hnědé [13].

Obrázek 3.5 znázorňuje změnu pevnosti v tlaku, pevnosti v tahu za ohybu a modulu pružnosti v závislosti na teplotě a době ošetření hrušně. U pevností v tlaku i tahu došlo ve všech případech k poklesu charakteristik, modul pružnosti zpočátku narůstal (do 4 hodin ošetření při teplotě 160°C), následně však došlo také k poklesu.



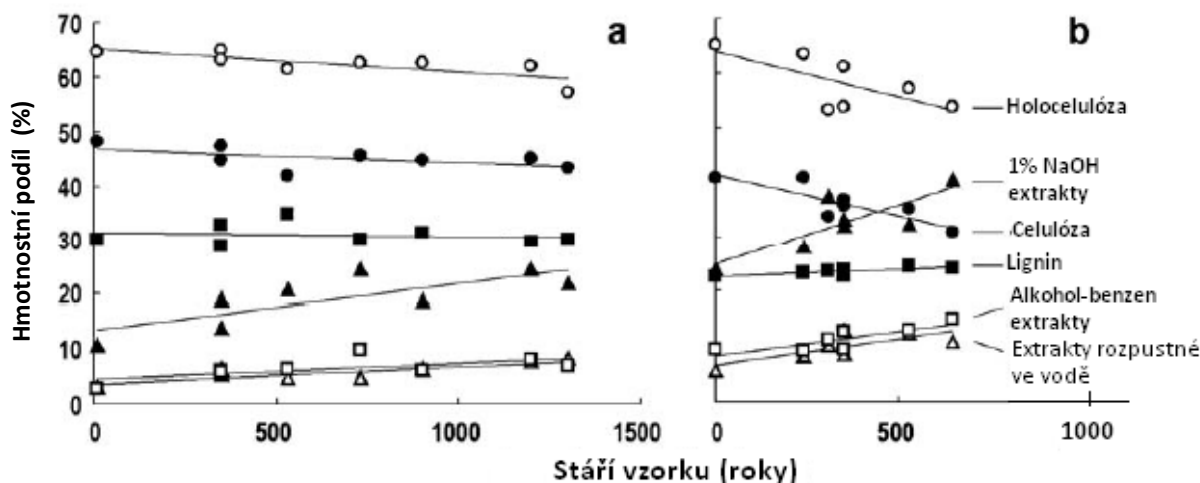
Obrázek 3.5: Pokles pevnostních charakteristik v závislosti na teplotě a době tepelného ošetření hrušně (*Pyrus elaeagnifolia* Pall.): a) pevnost v tlaku, b) pevnost v tahu za ohybu, c) modul pružnosti [15].

4 Vlastnosti starého dřeva

Po dobu působení dřeva zabudovaného v konstrukci dochází ke změnám jeho struktury a vlastností, které závisí především na rozsahu a intenzitě vlivu prostředí. Korodována či degradována je chemická, mikroskopická i makroskopická struktura.

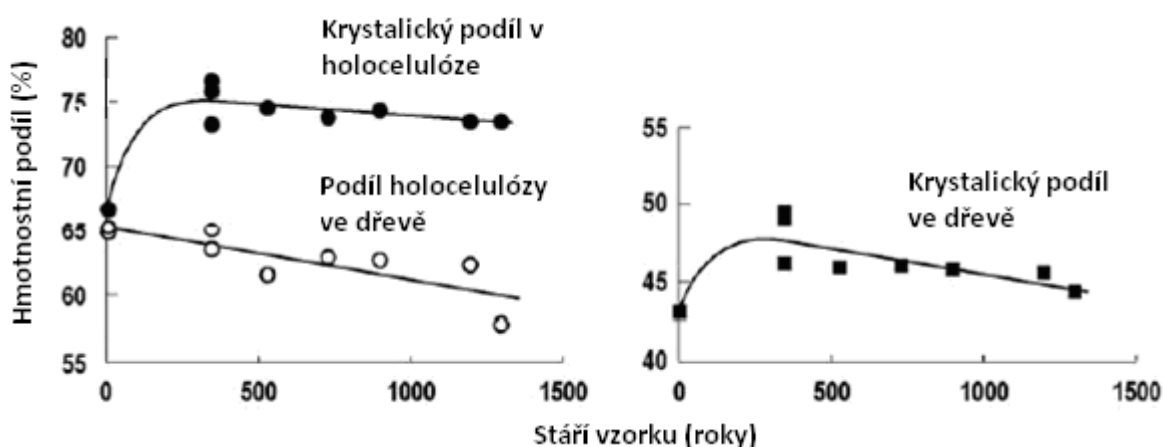
4.1 Změna chemického složení s ohledem na stáří

Z výsledků chemických analýz dřeva různého stáří je zřejmé, že dochází ke změnám jeho složení již od molekulární hladiny. Jak je patrné z obrázku 4.1, v průběhu času dochází k poklesu obsahu holocelulózy, stejně jako celkové celulózy ve dřevě, k nárůstu obsahu alkalicky rozpustných podílů, ale ke změně obsahu ligninu téměř nedochází. Tyto výsledky naznačují, že část polysacharidů degradovalo na alkalicky rozpustné látky, zatímco degradace ligninu je poměrně pomalá. Experiment byl prováděn na dřevu cypřiše a japonského jilmovitého stromu Keyaki, přičemž chemická degradace probíhala u Keyaki rychleji [18].



Obrázek 4.1: Vliv stáří dřeva na jeho chemické složení u a) cypřiše (*Chamaecyparis obtusa*) a b) Keyaki (*Zelkova schneideriana*) [18]

Stárnutí dřeva rovněž způsobuje změny ve stavbě celulózy. Obrázek 4.2 znázorňuje změnu krystalinity v závislosti na stáří dřeva, krystalický podíl celulózy mírně narůstá v prvních 300 letech stáří a následně postupně klesá.

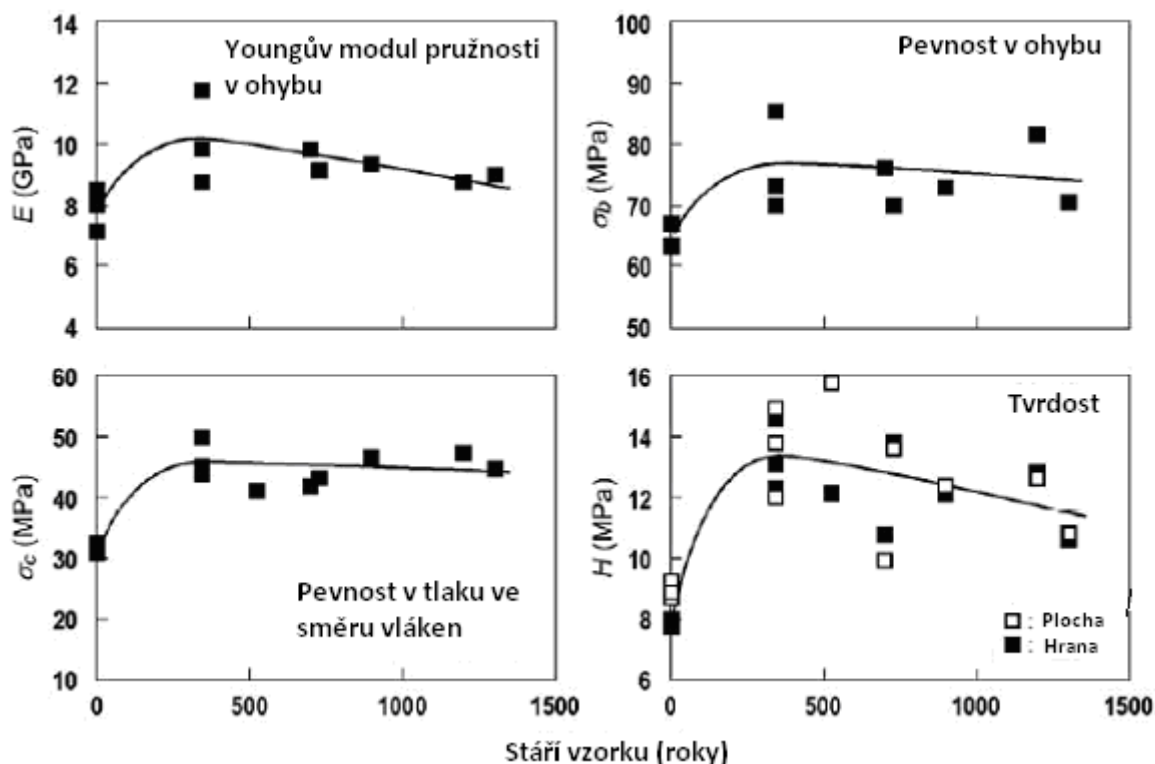


Obrázek 4.2: Změna krystalinity v závislosti na stáří dřeva cypřiše (*Chamaecyparis obtusa*) [18].

4.2 Změna mechanických vlastností s ohledem na stáří

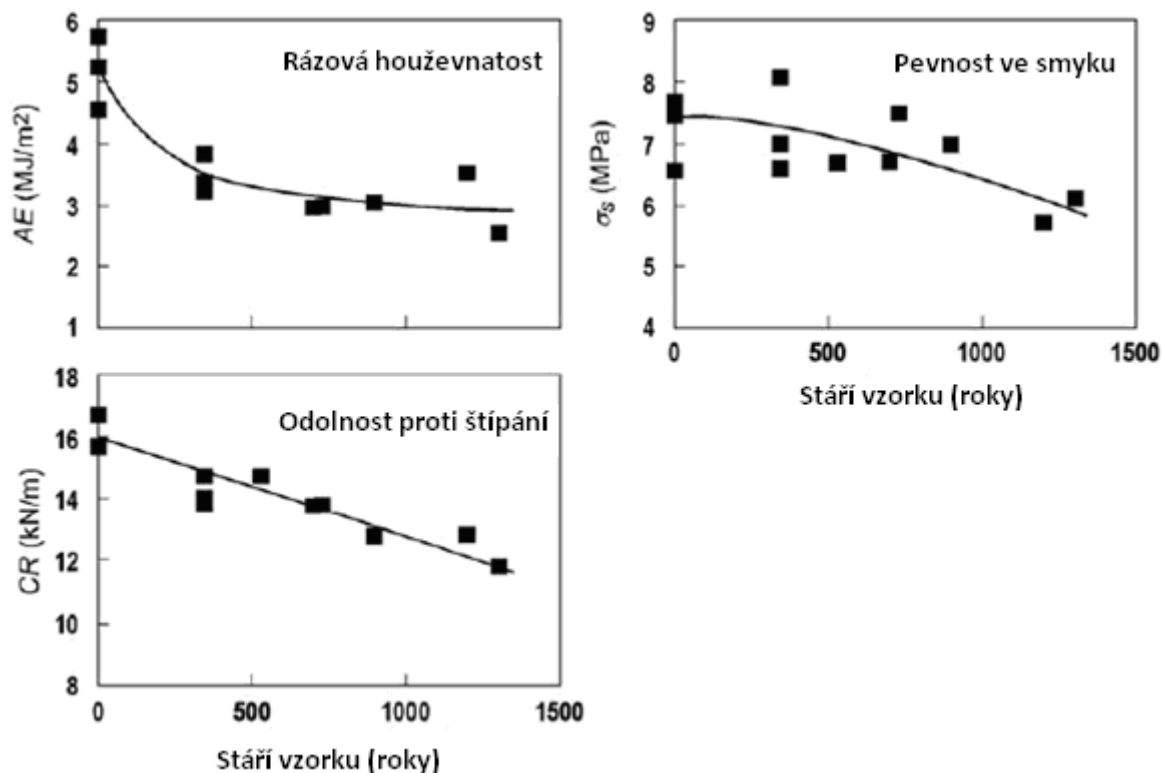
Vliv stáří dřeva na mechanické vlastnosti souvisí s krystalinitou celulózy, jelikož stejně jako krystalinita, do cca 300 let věku křivka stoupá a následně mírně klesá (obrázek 4.3). Tato skutečnost je nepřímým důkazem, že krystalizace celulózy je zodpovědná za vylepšení mechanických vlastností, a to po dobu několika stovek let. Krystalická vlákna zde hrají důležitou roli, protože jejich tuhost je mnohem vyšší, než tuhost matrice. Youngův modul krystalické celulózy je asi 130 GPa, zatímco amorfni matrice maximálně 8 GPa. Z tohoto

důvodu můžeme tedy usuzovat, že vyšší podíl krystalické celulózy u staršího dřeva vede k vyšší tuhosti dřeva [18].



Obrázek 4.3: Vliv stáří dřeva na Youngův modul pružnosti ohybu, pevnost v ohybu, pevnost v tlaku ve směru vláken a tvrdost [18].

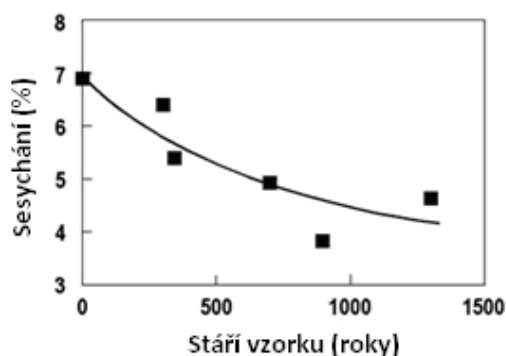
Změna chemického složení vlivem stárnutí ale nemá na dřevo jen pozitivní vliv. Obrázek 4.4 znázorňuje závislost rázové houževnatosti (AE), pevnosti ve smyku (σ_s) a odolnosti proti štípání (CR) na stáří dřeva. Všechny tyto vlastnosti jsou degradovány věkem. Tato skutečnost naznačuje, že se dřevo stává během stárnutí křehčí, což můžeme přičíst chemické degradaci amorfni matrice. Jedná se zejména o hemicelulózy, které jsou důležité pro dobrou soudržnost mezi vlákny a maticí. Je totiž známo, že soudržnost mezi vlákny a maticí je důležitá pro houževnatost kompozitu (dřeva), zatímco pevnost je určena výztužnými vlákny. Proto je přirozené, že se dřevo stává křehkým, pokud je soudržnost vláken a matrice oslabena degradací hemicelulóz [18].



Obrázek 4.4: Vliv stáří dřeva na rázovou houževnatost (AE), pevnost ve smyku (σ_s) a odolnost proti štípání (CR) [18].

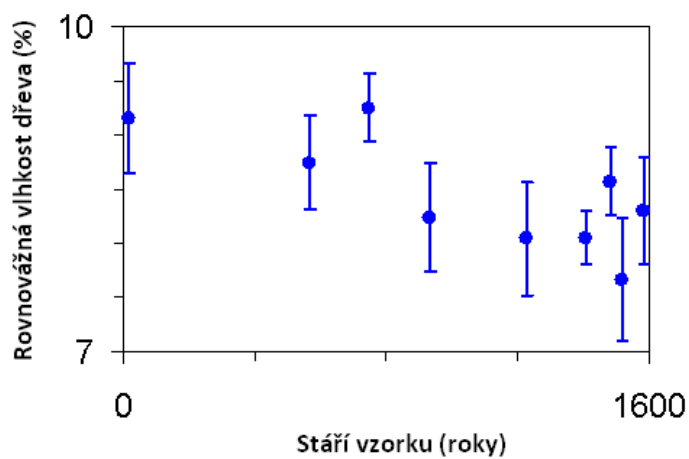
4.3 Změna fyzikálních vlastností s ohledem na stáří

Změna fyzikálních vlastností spolu se stárnutím dřeva opět zásadně souvisí s krystalinitou celulózy a podílem hemicelulóz ve dřevě. Velkou výhodou stárnoucího dřeva je jeho rozměrová stabilizace. Obrázek 4.5 zobrazuje změny v maximálním tangenciálním sesychání dřeva cypříše v důsledku stárnutí, kdy nižší hodnoty sesychání staršího dřeva způsobují vyšší rozměrovou stabilitu při měnících se vlhkostních podmínkách. Tato dimenzionální stabilizace je vysvětlována degradací a ztrátou hygroskopických hemicelulóz, stejně jako krystalizací celulózy vlivem stárnutí dřeva [18].



Obrázek 4.5: Tangenciální sesychání dřeva cypříše v závislosti na stáří dřeva [18].

Obrázek 4.6 popisuje vztah mezi rovnovážnou vlhkostí a stářím dřeva. Z grafu vyplývá, že rovnovážná vlhkost má tendenci klesat spolu s narůstajícím stářím dřeva. To opět souvisí s krystalinitou dřeva a s degradací hemicelulóz, kdy na hydroxylové OH skupiny amorfní celulózy a hemicelulóz se vodíkovými můstky váže volná (hygroskopická) voda. To má za následek snížení množství těchto OH skupin a tím i hygroskopicity dřeva [19].



Obrázek 4.6: Rovnovážná vlhkost dřeva cypřiše v závislosti na stáří dřeva [19].

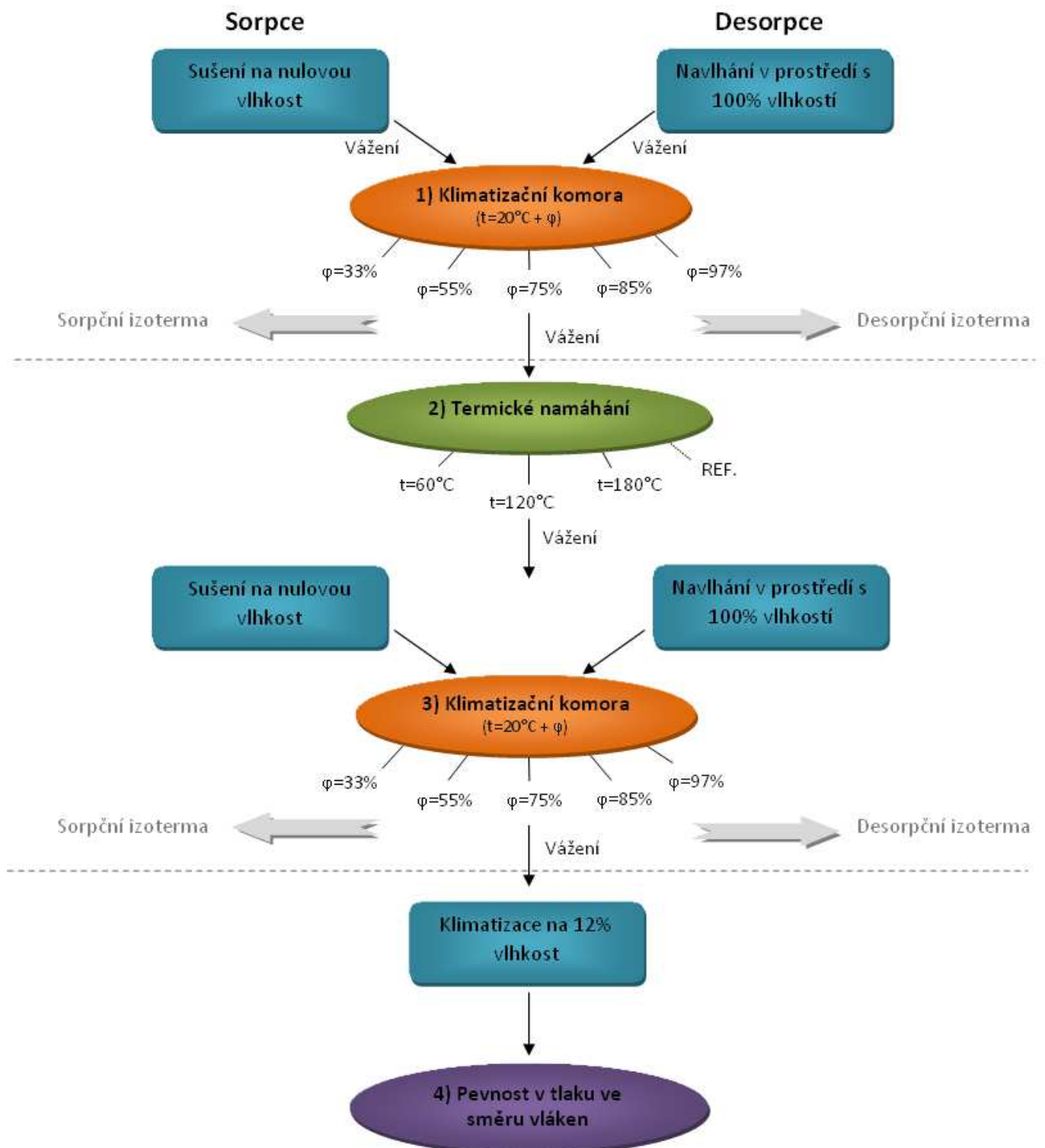
5 Cíl práce

Zejména u památkově chráněných objektů může nastat stav, kdy je potřeba v rámci sanace poškozeného zabudovaného prvku přistoupit k náhradě tohoto dřeva za dřevo přibližně stejného stáří. Výhoda použití dřeva stejně starého je jak estetické hledisko, tak i předpoklad snížení sorpční schopnosti dřeva. Před tímto krokem je však vhodné dřevěné prvky sterilizovat z důvodu možného napadení dřevokazným hmyzem, nejlépe pomocí horkovzdušné sterilizace nebo aplikací mikrovlnného záření, které zaručí likvidaci všech vývojových stádií hmyzu. Proto se v rámci práce budu zabývat experimentálním posouzením změny sorpčních a mechanických vlastností v závislosti na stáří a na teplotě ošetření dřeva.

Díličními úkoly práce je:

1. stanovit a ověřit sorpční charakteristiky dřevin různého stáří,
2. ověřit vliv tepelné úpravy dřeviny s ohledem na isothermické sorpční charakteristiky,
3. ověřit vliv tepelné úpravy dřeviny s ohledem na mechanické charakteristiky.

6 Metodika práce a použitý materiál



6.1 Vzorky

Pro experiment zabývající se stanovením sorpčních a mechanických vlastností dřeva různého stáří s ohledem na tepelné namáhání byly vybrány vzorky jedlového dřeva, a to z objektů ze 17. - 21. stol. Vzorky byly odebrány z celého objemu trámu, aby byly zastoupeny vzorky z jádra i běle. Z každé skupiny vzorků rozdělených podle stáří byla vyrobena část tělísek o rozměrech 20x20x30 mm a druhá část o rozměrech 20x20x60 mm. Objemové hmotnosti dřeva v suchém stavu jsou uvedeny v tabulce 6.1, celkové počty vzorků pro experiment v tabulce 6.2.

Tabulka 6.1: Objemová hmotnost.

Vzorek		Objemová hmotnost [kg/m ³]	
17.stol.	1 (r.1618)	470	405
	5 (r.1620)	375	
	7 (r.1596)	365	
18.stol.	3 (r.1712)	455	455
	4 (r.1717)	450	
19.stol.	39 (r.1842)	420	410
	40 (r.1852)	450	
	41 (r.1853)	360	
20.stol.	20 (r.1908)	410	410
21.stol.	0 (r.2011)	430	430

Tabulka 6.2: Celkové počty vzorků pro experiment.

Stáří	Počet [ks]	
	20x20x60 mm	20x20x30 mm
17.stol.	63	68
18.stol.	70	60
19.stol.	61	72
20.stol.	9	19
21.stol.	46	14

6.2 Postup práce

6.2.1 Klimatizace vzorků předepsaným prostředím

Sorpce - připravené vzorky byly vysušeny v sušárně Memmert UNB 500 při teplotě $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$ do ustálené hmotnosti, zváženy na laboratorních vahách na 0,01g a rozměry změřeny s přesností 0,01mm. Z těchto údajů se vypočítala objemová hmotnost dřeva v suchém stavu. Poté byly vzorky uloženy postupně do klimatizační komory WEISS WK 600

s 5-ti různými prostředími – 33%, 55%, 75%, 88% a 97% rel. vlhkosti vzduchu při 20°C a normálním atmosférickém tlaku. Rozdělení vzorků je zaznamenáno v tabulce 6.3. Po ustálení hmotnosti vzorků dřeva byla gravimetricky vypočítána rovnovážná vlhkost dřeva podle rovnice [8]:

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100, \quad [\%] \quad (6.1)$$

m_w – hmotnost vlhkého dřeva [g],
 m_0 – vlhkost absolutně suchého dřeva [g].

Z vypočítaných hodnot byla sestrojena sorpční izoterma.

Tabulka 6.3: Rozdělení vzorků pro klimatizaci.

Vzorky	Počet [ks]				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
17.stol.	18	18	17	17	17
18.stol.	14	14	14	14	15
19.stol.	15	15	14	16	19
20.stol.	4	4	4	4	6
21.stol.	7	7	7	8	8

Desorpce – stejné vzorky se po zjištění sorpčních charakteristik nechaly navlhnout ve vlhkostní skříni ERICHSEN Hygrotherm 519 v prostředí se 100% vlhkostí. Poté se postupně uložily do klimatizační komory se stejnými prostředími jako při sorpci, nechaly se vysychat do ustálení hmotnosti, opět se zvážily a vypočítala se rovnovážná vlhkost dřeva. Z vypočítaných hodnot se sestrojila desorpční izoterma.

Určování vlhkosti dřeva probíhalo podle ČSN 49 0103.

6.2.2 Termické namáhání

V druhé fázi experimentu byly vzorky vystaveny tepelnému namáhání při 60°C, 120°C a 180°C po dobu 17 hodin. Čtvrtá skupina vzorků sloužila jako referenční. Rozdělení vzorků je zaznamenáno v tabulce 6.4. Tepelné namáhání probíhalo v sušárně Memmert UNB 500, u které bylo možno regulovat teplotu podle potřeby. Současně byla sledována aktuální teplota jak uvnitř vybraných vzorků, tak přímo v sušárně. K tomuto účelu sloužila soustava obsahující elektrické termočlánky, měřicí ústřednu QUANTUM MX1609 a počítač se softwarem pro sběr, vizualizaci a vyhodnocení měřených hodnot CatmanEasy.

Po termickém namáhání se vzorky opět zvažily na laboratorních vahách na 0,01g z důvodu změny hmotnosti během tepelného ošetření.

Tabulka 6.4: Rozdělení vzorků pro tepelné namáhání.

Vzorky	Počet [ks]			
	60°C	120°C	180°C	REF
17. stol.	40	40	40	11
18. stol.	40	40	41	9
19. stol.	40	40	42	11
20. stol.	8	11	6	3
21. stol.	30	15	11	4



Obrázek 6.1: Termické namáhání v sušárně Memmert UNB 500 a soustava měřicí ústředny QUANTUM MX1609, elektrických termočlánků a PC se softwarem CatmanEasy.

6.2.3 Klimatizace vzorků předepsaným prostředím

Následná klimatizace vzorků probíhala podle stejného postupu jako v bodě 6.1.1. Pro urychlení experimentu se sorpce i desorpce prováděla najednou, každá na polovině vzorků, které byly v předešlém kroku podrobeny tepelnému namáhání.

6.2.4 Pevnost v tlaku ve směru vláken

Posledním krokem experimentu bylo určení mechanických vlastností, a to pevnosti v tlaku ve směru vláken (dle ČSN 49 0110). Pro zkoušky se použil zkušební lis WPM ZD 40. Hodnoty pevností vzorků poškozených trhlinami nebo požerky byly vyloučeny.

Pevnost v tlaku ve směru vláken byla vypočítána dle vztahu [8]:

$$\sigma_p = \frac{F_{max}}{a \cdot b} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (6.2)$$

F_{max}síla na mezi pevnosti [N],
a, b.....příčné rozměry tělesa [mm].



Obrázek 6.2: Zkoušení pevnosti v tlaku ve směru vláken.

7 Výsledky a diskuze zkoušek

7.1 Rovnovážná vlhkost

Do tabulek v příloze (12.1 – 12.10) jsou přehledným způsobem zaznamenány hodnoty rovnovážné vlhkosti dřeva pro jednotlivá časová období při daných podmínkách vypočtené gravimetrickou metodou, která je popsána v kapitole 6.2.1. Kromě konkrétních hodnot jsou v tabulkách uvedeny i průměrné hodnoty rovnovážných vlhkostí dřev (\bar{x}) a jejich směrodatné odchylky (S_x).

7.1.1 Srovnání sorpčních izoterem dřeva různého stáří, diskuze

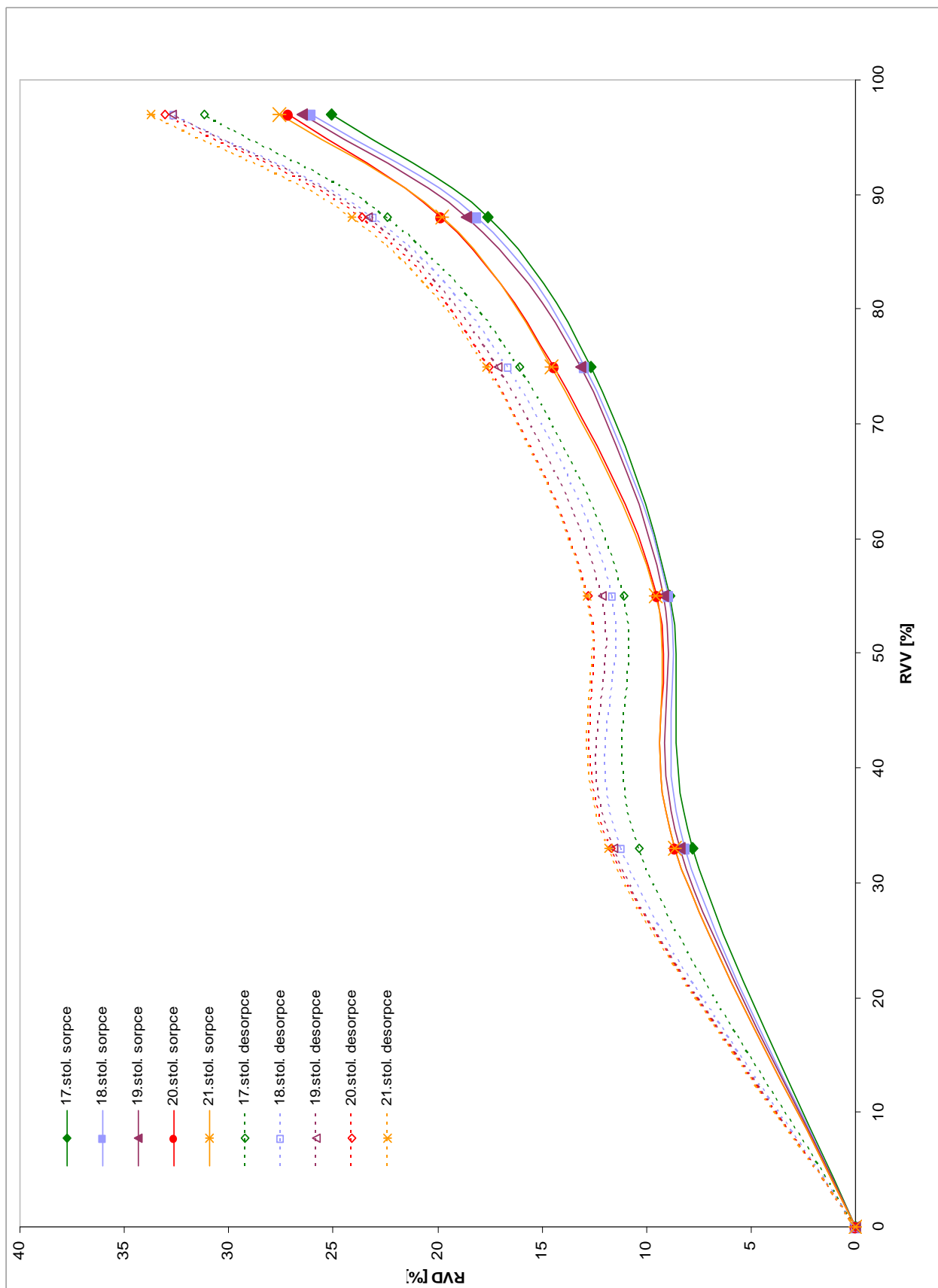
V následujících tabulkách (7.1 a 7.2) jsou zaznamenány průměrné hodnoty sorpční a desorpční RVD pro jednotlivá časová období a teplotu ošetření. Kromě průměrných hodnot (\bar{x}) jsou zde uvedeny i relativní změny vlhkosti (procentuální rozdíl vůči nejnižší hodnotě RVD v daném prostředí).

Tabulka 7.1: Průměrné hodnoty (\bar{x}) a relativní změny RVD při sorpci referenčních vzorků.

RVV	17.stol.		18.stol.		19.stol.		20.stol.		21.stol.	
	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti
33%	7,82	0%	8,16	4,2%	8,39	6,8%	8,67	9,8%	8,67	9,8%
55%	8,87	0%	8,98	1,2%	9,22	3,8%	9,47	6,3%	9,57	7,3%
75%	12,65	0%	12,97	2,5%	13,14	3,7%	14,4	12,2%	14,54	13,0%
88%	17,59	0%	18,17	3,2%	18,64	5,6%	19,85	11,4%	19,79	11,1%
97%	25,1	0%	26,09	3,8%	26,5	5,3%	27,18	7,7%	27,58	9,0%

Tabulka 7.2: Průměrné hodnoty (\bar{x}) a relativní změny RVD při desorpci referenčních vzorků.

RVV	17.stol.		18.stol.		19.stol.		20.stol.		21.stol.	
	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti
33%	10,33	0%	11,18	7,6%	11,59	10,9%	11,70	11,7%	11,83	12,7%
55%	11,06	0%	11,62	4,8%	12,13	8,8%	12,79	13,5%	12,87	14,1%
75%	16,05	0%	16,60	3,3%	17,08	6,0%	17,51	8,3%	17,68	9,2%
88%	22,39	0%	23,06	2,9%	23,34	4,1%	23,63	5,2%	24,13	7,2%
97%	31,19	0%	32,64	4,4%	32,69	4,6%	33,05	5,6%	33,73	7,5%



Obrázek 7.1: Srovnání sorpčních izoterm dřeva ze 17., 18., 19., 20. a 21. stol.

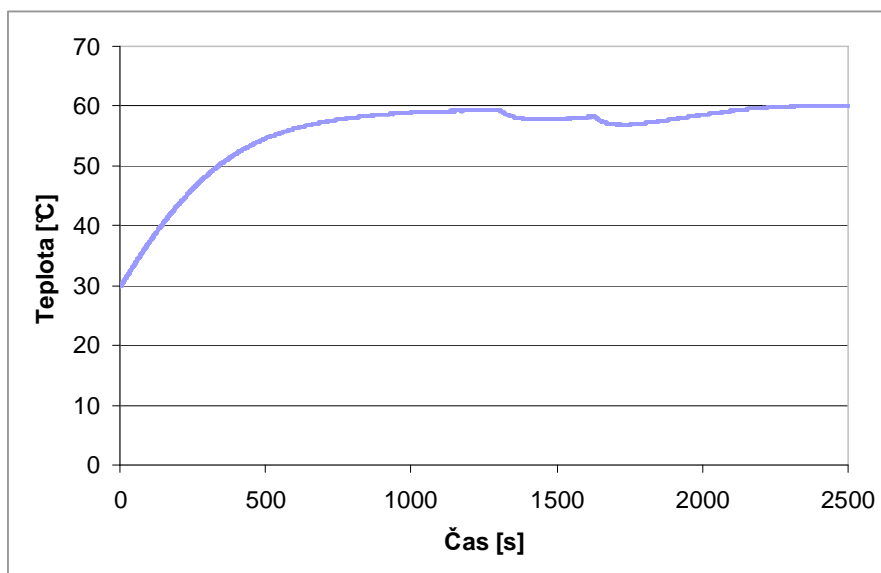
Na základě sorpčních izoterem dřeva ze 17. - 21.stol. získaných experimentem (viz. obrázek 7.1) lze říci, že stáří dřeva ovlivňuje jeho hygroskopicitu. S narůstajícím stářím má rovnovážná vlhkost dřeva při zachování stejných podmínek tendenci klesat. Tento fakt potvrzuje výsledky Yokoyamy a kol. (2009), který přisuzuje tento efekt změně krystalinity celulózy a degradaci hemicelulóz v průběhu stárnutí dřeva (viz. kapitola 4.3).

Průběh sorpčních izoterem je rovnoměrný, bez výrazných odchylek v daném trendu. Stáří dřeva ovlivňuje jeho rovnovážnou vlhkost v průběhu 400 let až o 13,0% při sorpci a 14,1% při desorpci.

Hygroskopicita je vlastností, která zásadním způsobem ovlivňuje i další vlastnosti dřeva. Dřevo o vyšší vlhkosti má nižší pevnost, pružnost i tvrdost. Dochází také ke změně tepelných, akustických, elektrických i optických vlastností. V neposlední řadě se se zvyšující vlhkostí dřeva snižuje jeho rozměrová stabilita (bobtnání dřeva) a také jeho trvanlivost – vlhké dřevo je živnou půdou zejména pro dřevokazné houby.

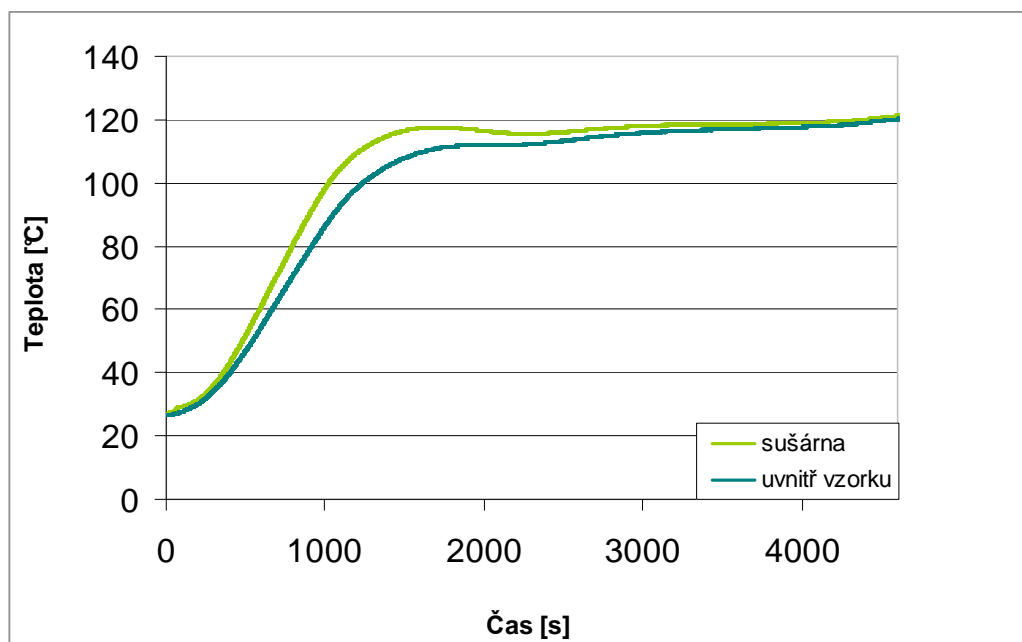
7.2 Termické ošetření dřeva

Vzorky dřeva různého stáří se podrobily tepelnému namáhání při 3 teplotách – 60°C, 120°C a 180°C po dobu 17 hodin.



Obrázek 7.1: Nárůst teploty při termickém namáhání teplotou 60°C

Při působení teploty nižší než 100°C na dřevo nedochází k trvalým změnám fyzikálních, mechanických ani chemických vlastností, proto při termickém namáhání teplotou 60°C po dobu 17 hodin nedocházelo ani k viditelným změnám na vzorcích dřeva. Nárůst teploty je patrný z obrázku 7.1. Dosažení teploty 60°C trvalo cca 37 min., po této době se začalo odměřovat 17 hodin do konce tepelného namáhání.



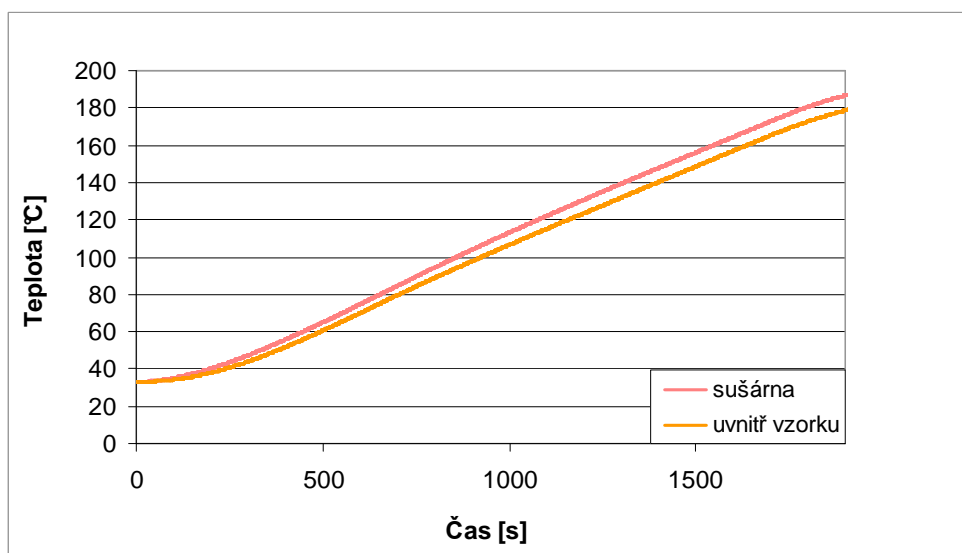
Obrázek 7.2: *Nárůst teploty při termickém namáhání teplotou 120°C.*

Namáhání teplotou 120°C již na vzorcích dřeva následek zanechalo. Vlivem termické degradace složek dřeva, jako je částečné odbourání hemicelulóz a dalších chemických změn ve struktuře, došlo k úbytku hmotnosti, a to v průměru o 0,7%. Průběh nárůstu teploty v sušárně i uvnitř vzorku je zaznamenán na obrázku 7.2. V sušárně bylo dosaženo teploty 120°C asi po 73 minutách, uvnitř vzorku byl nárůst teploty pomalejší, ale teploty 120°C bylo dosaženo jen o 3 minuty později.



Obrázek 7.3: *Vzorky dřeva po tepelném ošetření při 60°C, 120°C a 180°C.*

Nejvýraznější změna nastala při termickém ošetření vzorků při teplotě 180°C. Mimo úbytek hmotnosti, který činil při působení touto teplotou průměrně 8,9%, došlo i k výrazné změně barvy vzorků. Z původně světle se změnila na tmavě hnědou (viz. obrázek 7.3). Tato změna barvy je způsobena odbouráváním polysacharidického podílu, neboli hemicelulóz a celulózy. V průběhu tepelného ošetření teplotou 180°C vzorky získaly i charakteristickou vůni.



Obrázek 7.4: *Nárůst teploty při termickém namáhání teplotou 180°C.*

Nárůst teploty v sušárně při ošetření dřeva teplotou 180°C byl strmější než u předchozích, což je patrné z grafu 7.4. Požadované teploty bylo dosaženo v sušárně asi po 30 minutách, uvnitř vzorků o 2 minuty později. Následně byla teplota udržována po dobu 17 hodin.

7.3 Rovnovážná vlhkost po tepelném ošetření

Do tabulek v příloze (12.11 – 12.16) jsou přehledným způsobem zaznamenány hodnoty rovnovážné vlhkosti dřeva pro jednotlivá časová období a teplotu ošetření při daných podmínkách vypočtené gravimetrickou metodou, která je popsána v kapitole 6.2.1. Kromě konkrétních hodnot jsou v tabulkách uvedeny i průměrné hodnoty rovnovážných vlhkostí dřev (\bar{x}) a jejich směrodatné odchylky (S_x).

7.3.1 Srovnání sorpčních izoterem dřeva ošetřeného teplotou 60°C, diskuze

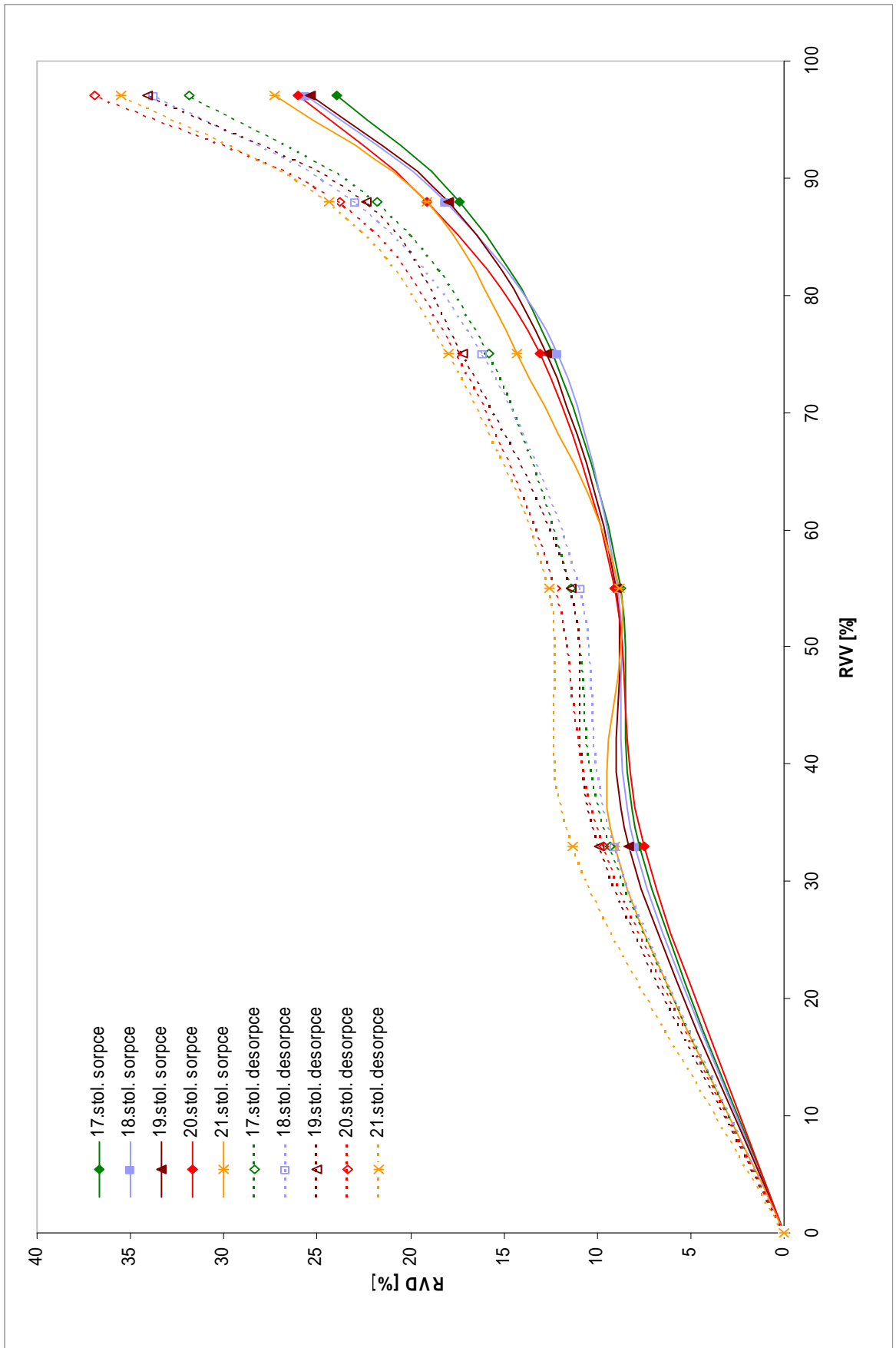
V následujících tabulkách (7.3 a 7.4) jsou zaznamenány průměrné hodnoty sorpční a desorpční RVD pro teplotu ošetření 60°C a jednotlivá časová období. Kromě průměrných hodnot (\bar{x}) jsou zde uvedeny i relativní změny vlhkosti (procentuální rozdíl vůči nejnižší hodnotě RVD v daném prostředí).

Tabulka 7.3: Průměrné hodnoty (\bar{x}) a relativní změny RVD při sorpci vzorků ošetřených teplotou 60°C.

RVV	17.stol.		18.stol.		19.stol.		20.stol.		21.stol.	
	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti
33%	7,75	3,1%	8,01	6,2%	8,36	10,2%	7,51	0%	8,53	12,0%
55%	8,76	0%	8,89	1,5%	8,98	2,4%	9,10	3,7%	8,82	0,7%
75%	12,43	2,3%	12,14	0%	12,72	4,6%	13,02	6,8%	14,33	15,3%
88%	17,35	0%	18,14	4,4%	17,96	3,4%	19,09	9,1%	19,11	9,2%
97%	23,97	0%	25,60	6,4%	25,38	5,6%	26,05	8,0%	27,27	12,1%

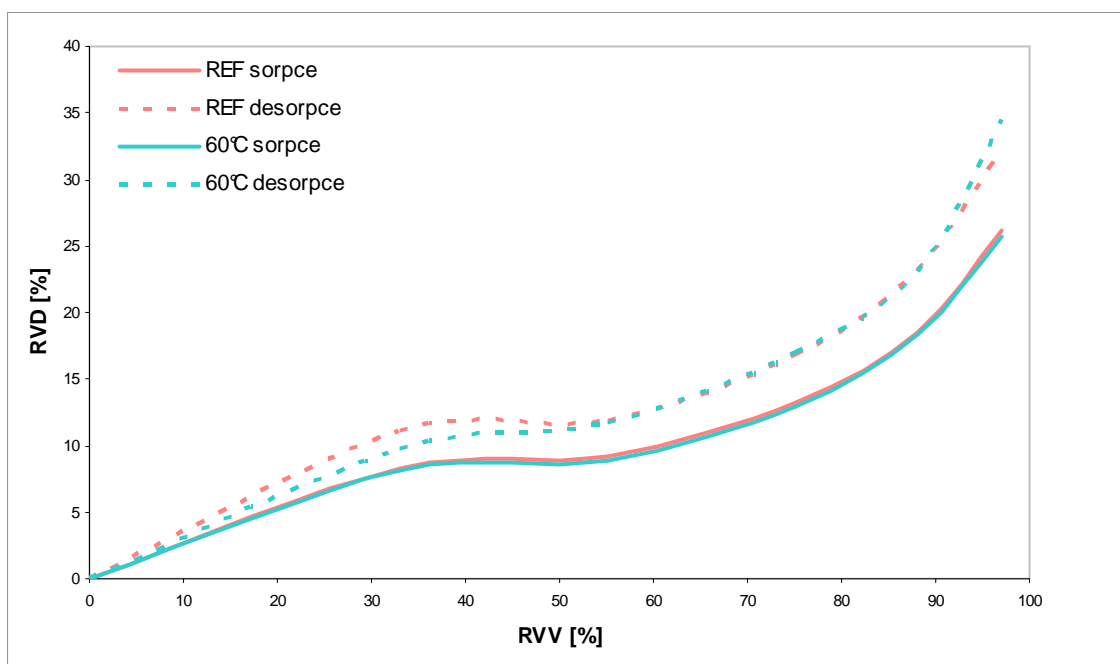
Tabulka 7.4: Průměrné hodnoty (\bar{x}) a relativní změny RVD při desorpci vzorků ošetřených teplotou 60°C.

RVV	17.stol.		18.stol.		19.stol.		20.stol.		21.stol.	
	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti
33%	9,28	2,0%	9,09	0%	9,88	8,0%	9,65	5,8%	11,29	19,5%
55%	11,37	4,2%	10,89	0%	11,38	4,3%	12,26	11,2%	12,59	13,5%
75%	15,81	0%	16,11	1,9%	17,18	8,0%	17,58	10,1%	18,00	12,2%
88%	21,77	0%	22,92	5,0%	22,40	2,8%	23,76	8,4%	24,38	10,7%
97%	31,89	0%	33,80	5,7%	34,07	6,4%	36,90	13,6%	35,52	10,2%



Obrázek 7.5: Srovnání sorpčních izoterm dřeva ze 17., 18., 19., 20. a 21. stol. ošetřeného teplotou 60°C.

Obrázek 7.5 zobrazuje grafické porovnání sorpčních izoterm dřeva různého stáří ošetřeného teplotou 60°C po dobu 17 hodin. Průběh sorpčních i desorpčních izoterm ve všech měřených bodech rovnovážné vlhkosti vzduchu zcela neodpovídá teorii, že se zvyšujícím se stářím dřeva klesá jeho hygroskopicita, ale trend zůstává stále zachován. Rozdíly v rovnovážné vlhkosti dřeva jsou v řádech desetin % RVD a mohou být způsobeny různými vlastnostmi dřeva jádra a běle, což je přirozenou vlastností dřeva, se kterou je třeba počítat při vyhodnocování zkoušek.



Obrázek 7.6: Porovnání sorpčních izoterm dřeva neošetřeného (REF) a tepelně ošetřeného teplotou 60°C.

Pozn.: Pro sestavení sorpčních izoterm byly použity průměrné hodnoty neošetřeného a tepelně ošetřeného dřeva ze 17.-21.stol.

Působení teploty nižší než 100°C na dřevo nezanechává žádné změny na chemické struktuře, tedy ani na sorpčních vlastnostech dřeva, což dokazuje i srovnání s referenční izotermou na obrázku 7.6.

7.3.2 Srovnání sorpčních izoterem dřeva ošetřeného teplotou 120°C, diskuze

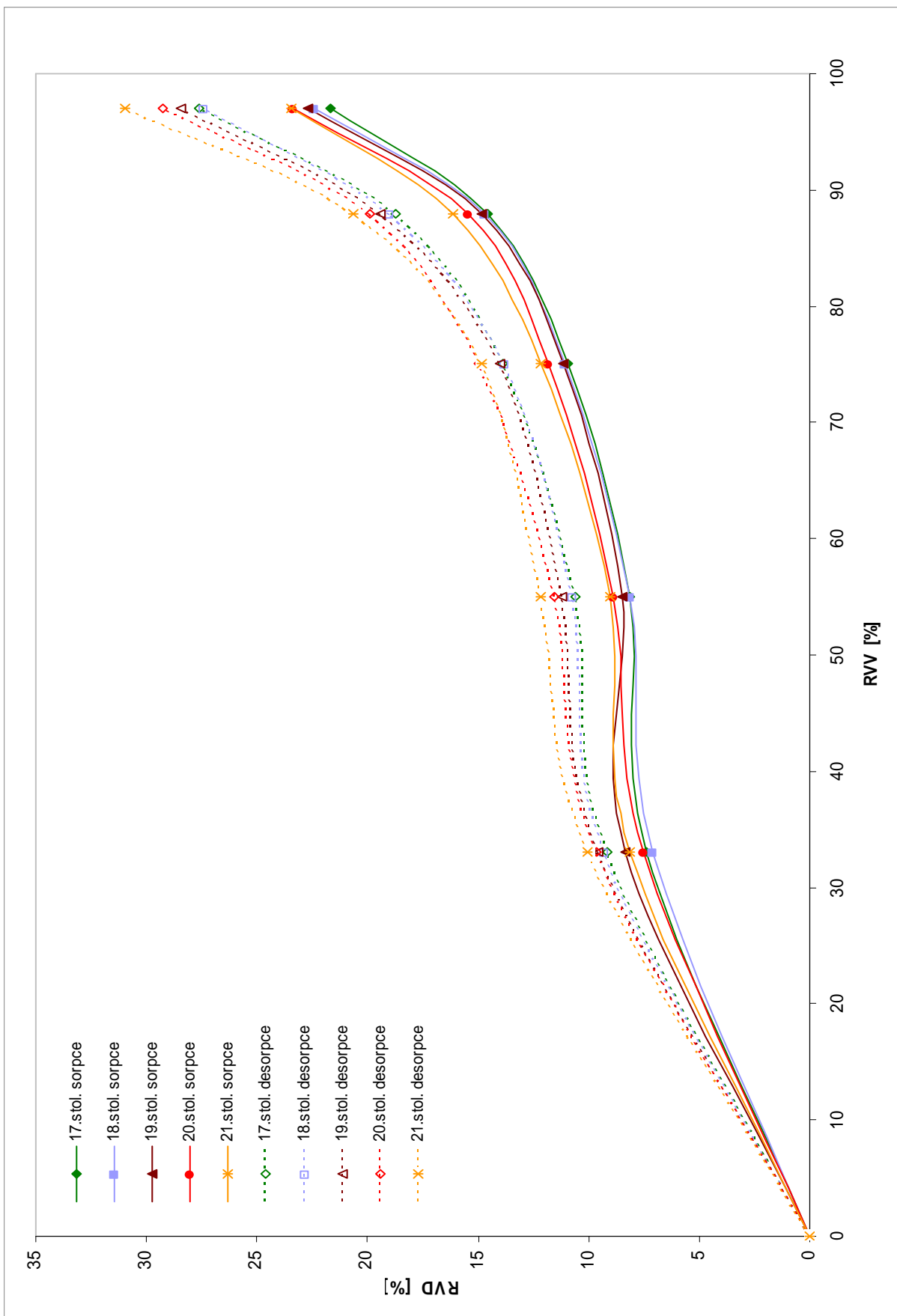
V následujících tabulkách (7.5 a 7.6) jsou zaznamenány průměrné hodnoty sorpční a desorpční RVD pro teplotu ošetření 120°C a jednotlivá časová období. Kromě průměrných hodnot (\bar{x}) jsou zde uvedeny i relativní změny vlhkosti (procentuální rozdíl vůči nejnižší hodnotě RVD v daném prostředí).

Tabulka 7.5: Průměrné hodnoty (\bar{x}) a relativní změny RVD při sorpci vzorků ošetřených teplotou 120°C.

RVV	17.stol.		18.stol.		19.stol.		20.stol.		21.stol.	
	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti
33%	7,36	3,5%	7,10	0%	8,36	15,1%	7,54	5,8%	8,21	13,5%
55%	8,12	0%	8,16	0,5%	8,47	4,1%	8,87	8,5%	9,04	10,2%
75%	10,93	0%	11,09	1,4%	11,17	2,1%	11,84	7,7%	12,15	10,0%
88%	14,57	0%	14,73	1,1%	14,83	1,8%	15,44	5,6%	16,11	9,6%
97%	21,66	0%	22,43	3,4%	22,68	4,5%	23,36	7,3%	23,47	7,7%

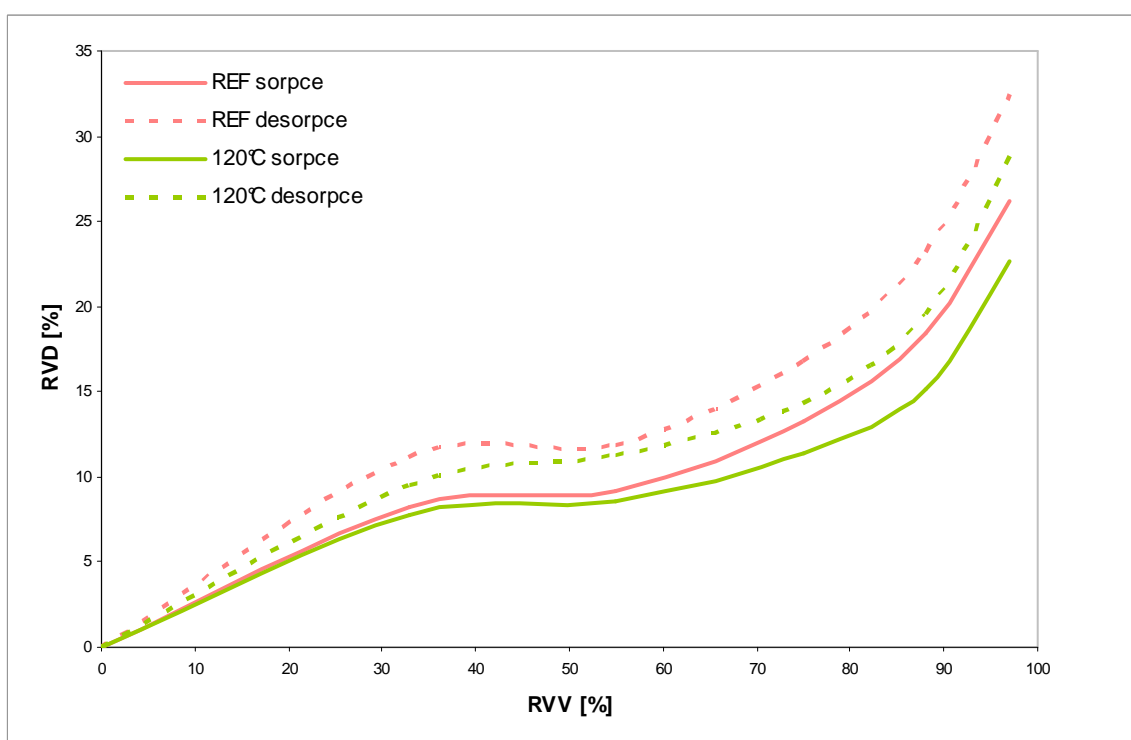
Tabulka 7.6: Průměrné hodnoty (\bar{x}) a relativní změny RVD při desorpci vzorků ošetřených teplotou 120°C.

RVV	17.stol.		18.stol.		19.stol.		20.stol.		21.stol.	
	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti
33%	9,18	0%	9,30	1,3%	9,54	3,8%	9,63	4,7%	10,05	8,7%
55%	10,60	0%	10,73	1,2%	11,21	5,4%	11,53	8,1%	12,17	12,9%
75%	13,86	0,1%	13,84	0%	14,02	1,3%	14,97	7,5%	14,83	6,7%
88%	18,73	0%	19,02	1,5%	19,44	3,7%	19,87	5,7%	20,63	9,2%
97%	27,59	0,7%	27,40	0%	28,47	3,8%	29,23	6,3%	30,98	11,6%



Obrázek 7.7: Srovnání sorpčních izoterm dřeva ze 17., 18., 19., 20. a 21. stol. ošetřeného teplotou 120°C.

Grafické srovnání sorpčních izoterem dřeva ze 17. - 21. stol. ošetřeného teplotou 120°C je znázorněno na obrázku 7.7. Stejně jako u vzorků ošetřených teplotou 60°C, trend snižování hygroskopicity se vzrůstajícím stářím dřeva je zachován, ale neplatí v celém průběhu sorpčních izoterem. Nejvýraznější rozdíl je při sorpci u vzorků z 19. stol., kdy při RVV 33% dosahuje RVD nejvyšších hodnot, a to o 15,1% vyšších než u vzorků z 18.stol. Následný průběh je již odpovídající trendu. Všechny odchylky v RVD jsou stejně jako u vzorků ošetřených teplotou 60°C v řádech desetin % RVD a jsou tedy také pravděpodobně způsobeny různými vlastnostmi dřeva jádra a běle.



Obrázek 7.8: Porovnání sorpčních izoterem dřeva neošetřeného (REF) a tepelně ošetřeného teplotou 120°C.

Pozn.: Pro sestavení sorpčních izoterem byly použity průměrné hodnoty neošetřeného a tepelně ošetřeného dřeva ze 17.-21.stol.

Na obrázku 7.8 je znázorněno porovnání referenční sorpční izotermy a sorpční izotermy dřeva po tepelném ošetření teplotou 120°C. Potvrdil se předpoklad, že při dlouhodobém termickém ošetření teplotou vyšší než 100°C dochází ke snižování hygroskopicity dřeva, při tomto experimentu u sorpce až o 3,4% RVD a u desorpce o 3,7% RVD. Efekt je způsoben především částečnou termickou degradací hemicelulóz a také i zvyšujícím se podílem krystalické formy celulózy (viz. kapitola 3.2).

7.3.3 Srovnání sorpčních izoterm dřeva ošetřeného teplotou 180°C, diskuze

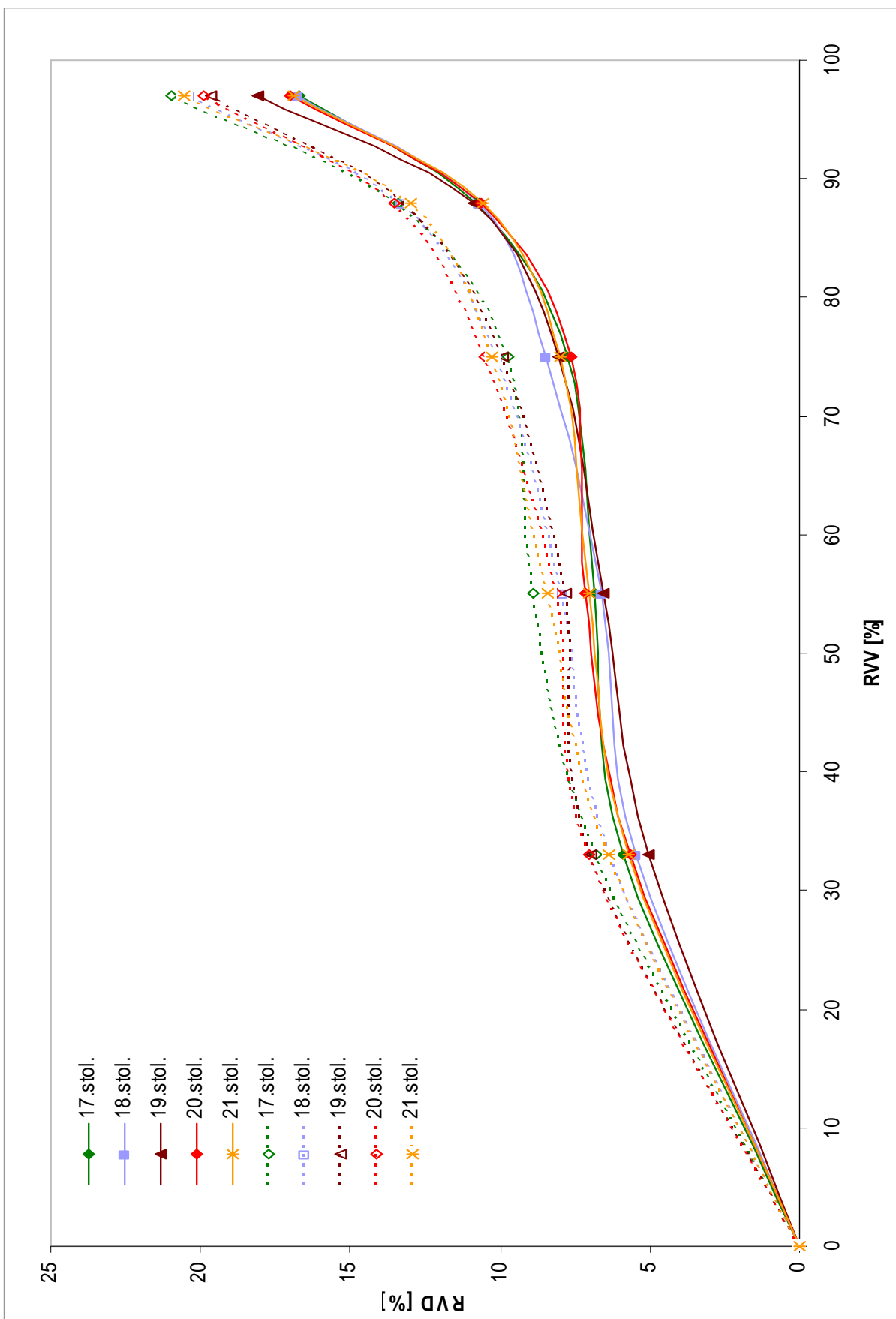
V následujících tabulkách (7.7 a 7.8) jsou zaznamenány průměrné hodnoty sorpční a desorpční RVD pro teplotu ošetření 180°C a jednotlivá časová období. Kromě průměrných hodnot (\bar{x}) jsou zde uvedeny i relativní změny vlhkosti (procentuální rozdíl vůči nejnižší hodnotě RVD v daném prostředí).

Tabulka 7.7: Průměrné hodnoty (\bar{x}) a relativní změny RVD při sorpci vzorků ošetřených teplotou 180°C.

RVV	17.stol.		18.stol.		19.stol.		20.stol.		21.stol.	
	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti
33%	5,90	14,1%	5,48	7,5%	5,07	0%	5,64	10,1%	6,02	15,8%
55%	6,87	4,2%	6,62	0,6%	6,58	0%	7,17	8,2%	7,01	6,1%
75%	7,75	1,4%	8,45	9,6%	8,03	4,9%	7,64	0%	7,98	4,3%
88%	10,81	2,4%	10,73	1,7%	10,88	3,0%	10,63	0,8%	10,55	0%
97%	16,70	0%	16,79	0,5%	18,09	7,7%	17,02	1,9%	16,91	1,2%

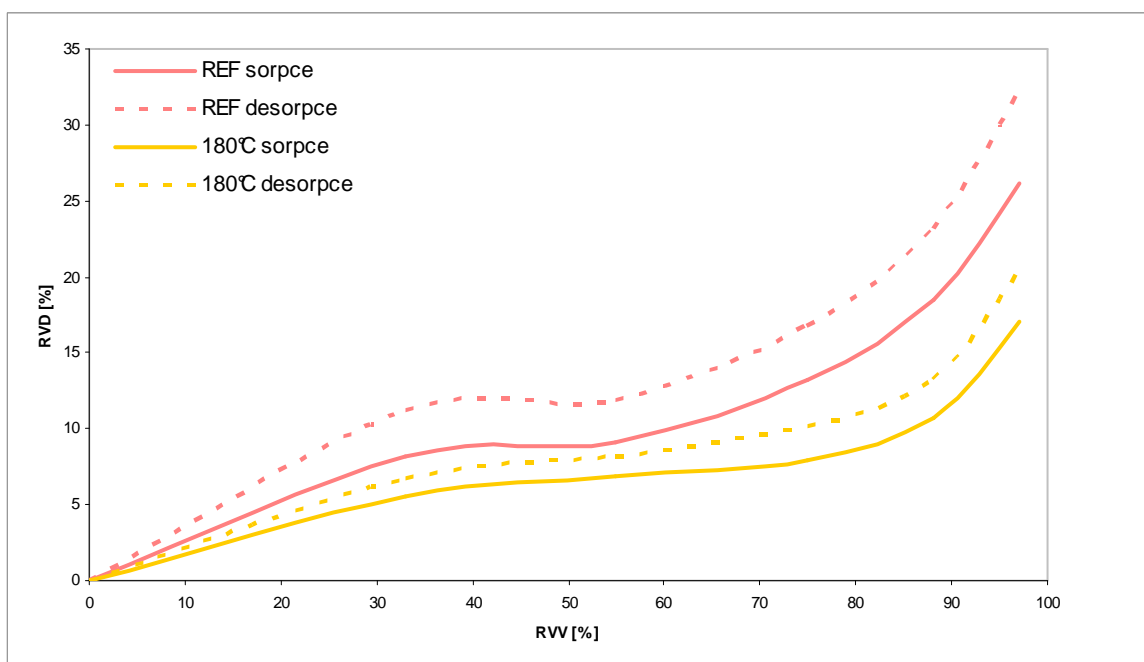
Tabulka 7.8: Průměrné hodnoty (\bar{x}) a relativní změny RVD při desorpci vzorků ošetřených teplotou 180°C.

RVV	17.stol.		18.stol.		19.stol.		20.stol.		21.stol.	
	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti	\bar{x} [%]	Rel. změna vlhkosti
33%	6,80	6,9%	6,33	0%	7,00	9,6%	7,04	10,1%	6,37	0,6%
55%	8,90	12,1%	7,96	1,8%	7,82	0%	8,10	3,5%	8,41	7,0%
75%	9,76	0%	10,08	3,2%	9,90	1,4%	10,51	7,1%	10,30	5,2%
88%	13,37	2,9%	13,27	2,2%	13,16	1,4%	13,53	4,1%	12,98	0%
97%	20,99	6,5%	20,37	3,7%	19,62	0%	19,88	1,3%	20,55	4,5%



Obrázek 7.9: Srovnání sorpčních izoterm dřeva ze 17., 18., 19., 20. a 21. stol. ošetřeno teplotou 180°C.

Na obrázku 7.9 lze pozorovat srovnání sorpčních izoterem vzorků dřeva ze 17. - 21. stol. ošetřených teplotou 180°C po dobu 17 hodin. Zde již není patrný trend snižování hygroskopicity spolu se zvyšujícím se stářím dřeva. Podíl amorfnní části celulózy a hemicelulóz klesá s věkem dřeva, starší dřevo má tedy nižší hygroskopicitu. S termickým ošetřením při vyšších teplotách dochází k částečné degradaci tohoto amorfnního podílu. Jelikož má novější dřevo vyšší podíl amorfnního podílu, probíhá u něj degradace ve vyšší míře a v průběhu tepelného ošetření se obsah těchto složek dřevní hmoty ustálí u všech stáří dřeva na přibližně stejné hodnotě. Lze tedy předpokládat, že podíl hemicelulóz i krystalinita celulózy ve dřevě je po termickém ošetření přibližně stejný u nového i starého dřeva. Míra degradace je samozřejmě závislá jak na teplotě ošetření, tak i na délce expozice.



Obrázek 7.10: Porovnání sorpčních izoterem dřeva neošetřeného (REF) a tepelně ošetřeného teplotou 180°C.

Pozn.: Pro sestavení sorpčních izoterem byly použity průměrné hodnoty neošetřeného a tepelně ošetřeného dřeva ze 17.-21.stol.

Obrázek 7.10 znázorňuje porovnání sorpčních izoterem referenčních a dřeva ošetřeného při teplotě 180°C. Mezi izotermami je patrný výrazný rozdíl, hodnoty rovnovážné vlhkosti dřeva klesly při ošetření teplotou 180°C u sorpce až o 9,0% RVD a u desorpce o 12,1% RVD. Sorpční izoterma dřeva termicky ošetřeného teplotou 180°C má také plošší tvar, než sorpční izoterma referenční.

7.4 Pevnost v tlaku ve směru vláken

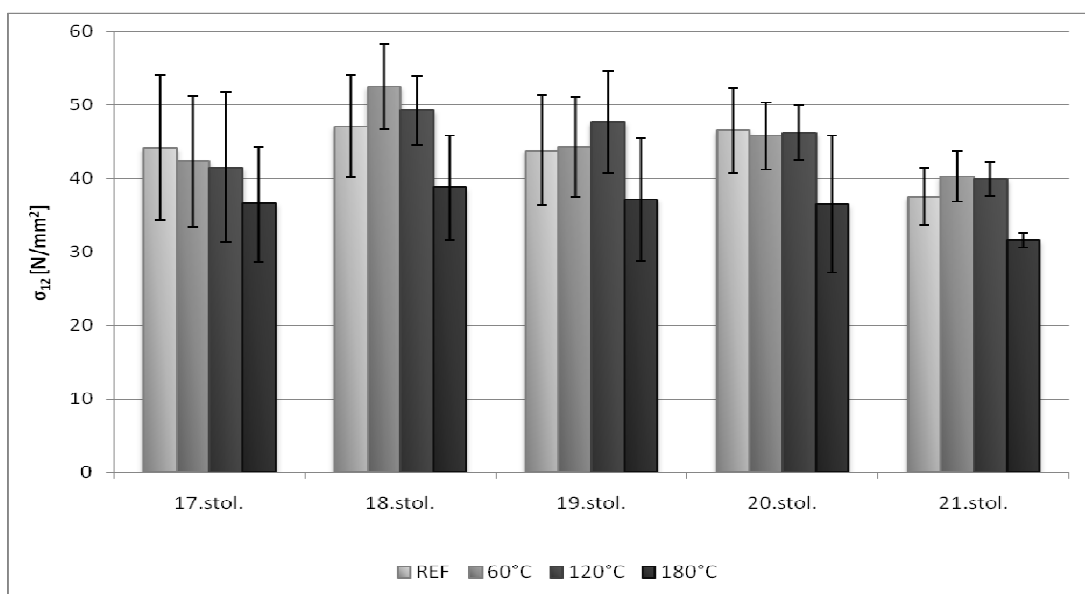
Do tabulek v příloze (12.17 – 12.20) jsou přehledným způsobem zaznamenány hodnoty pevnosti dřeva v tlaku ve směru vláken při 12% RVD pro jednotlivá časová období a teplotu, při které byly vzorky ošetřeny. Kromě konkrétních hodnot jsou v tabulkách uvedeny i průměrné hodnoty rovnovážných vlhkostí dřev (\bar{x}) a jejich směrodatné odchylky (S_x).

7.4.1 Srovnání pevností v tlaku ve směru vláken, diskuze

V následující tabulce (7.9) jsou zaznamenány průměrné pevnosti v tlaku ve směru vláken pro jednotlivá časová období a teplotu ošetření. Kromě průměrných hodnot (\bar{x}) jsou zde uvedeny i relativní změny σ_{12} (procentuální rozdíl vůči nejnižší hodnotě pevnosti při dané teplotě ošetření).

Tabulka 7.9: Průměrné hodnoty (\bar{x}) a relativní změny pevnosti v tlaku ve směru vláken tepelně ošetřeného dřeva.

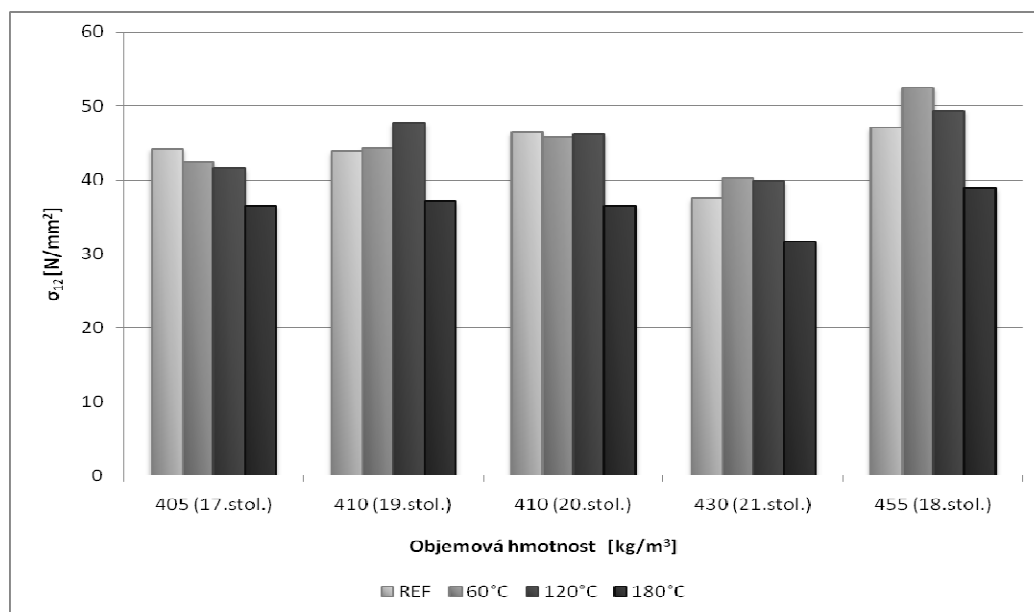
Teplota ošetření	17.stol.		18.stol.		19.stol.		20.stol.		21.stol.	
	\bar{x} [N/mm ²]	Rel. změna σ_{12}	\bar{x} [N/mm ²]	Rel. změna σ_{12}	\bar{x} [N/mm ²]	Rel. změna σ_{12}	\bar{x} [N/mm ²]	Rel. změna σ_{12}	\bar{x} [N/mm ²]	Rel. změna σ_{12}
REF	44,22	15,1%	47,10	20,3%	43,84	14,4%	46,52	19,3%	37,52	0%
60°C	42,30	4,8%	52,50	23,3%	44,31	9,1%	45,77	12,0%	40,29	0%
120°C	41,53	3,9%	49,30	19,0%	47,66	16,2%	46,18	13,6%	39,92	0%
180°C	36,52	13,5%	38,77	18,5%	37,14	14,9%	36,48	13,4%	31,60	0%



Obrázek 7.11: Srovnání pevností v tlaku ve směru vláken dřeva ze 17.-21.stol. termicky neošetřeného (REF) a ošetřeného teplotou 60°C, 120°C a 180°C.

Obrázek 7.11 znázorňuje porovnání pevností v tlaku ve směru vláken pro dřevo ze 17. - 21. stol. ošetřené teplotou 60°C, 120°C a 180°C a referenční vzorky. Na základě tohoto grafu lze říci, že se částečně potvrdila teorie Gunduze a kol. (2009; viz. kapitola 3.3), že se zvyšující se teplotou ošetření klesá i pevnost vzorků. Nejvíce patrný je tento trend u dřeva ošetřené teplotou 180°C, kde činí diference až 21,6% (20. stol.) oproti pevnosti dřeva referenčního. Pro dřevo ze 17. stol. se tendence potvrdila u všech teplot ošetření. U ostatních teplot není tento trend tak výrazný, nebo se nepotvrdil. Pro teplotu 60°C byl maximální pokles pevnosti o 4,3% (17. stol.) a naopak vzestup o 10,3% (18. stol.). Pro teplotu 120°C byl zaznamenán maximální pokles o 6,1% (17. stol.) a vzestup o 8,0% (19. stol.). Rozdíly ve výsledcích jsou pravděpodobně způsobeny různými vlastnostmi dřeva jádra a běle, které bylo pro experiment použito. Dalším faktorem mající výraznou úlohu při dosažení maximální pevnosti je doba teplotního zatížení, kdy v rámci experimentu byla zvolena doba 17 hodin (z důvodu simulace horkovzdušné sterilizace dřeva).

Podle Obataya (2007), který vychází ve své práci z výsledků Kohary (1950), do stáří dřeva cca 300 let dochází k nárůstu mechanických vlastností (modulu pružnosti, pevnosti v tahu, tvrdosti a také námi zkoušené pevnosti v tlaku ve směru vláken). Tato tendence se potvrdila téměř u všech zkoušených vzorků zařazených dle stáří. Nejvyšší nárůst pevnosti v tlaku ve směru vláken v závislosti na stáří vzorků byl pozorován u dřeva ošetřené teplotou 60°C z 18. stol., kde činil 23,3%. Neshoda nastala pouze u vzorků z 20. stol., a to při ošetření teplotou 60°C a vzorků referenčních.



Obrázek 7.12: Závislost pevnosti v tlaku ve směru vláken na objemové hmotnosti dřeva ze 17.-21. stol. termicky neošetřené (REF) a ošetřené teplotou 60°C, 120°C a 180°C.

Vzhledem k maximální hodnotě pevnosti v tlaku ve směru vláken zde hraje také důležitou roli objemová hmotnost dřeva, což bylo potvrzeno i v experimentu, kdy nejvyšších pevností bylo dosaženo u jedlového dřeva z 18. stol., které mělo i nejvyšší hodnotu objemové hmotnosti (455 kg/m^3). Naopak i přes fakt zvyšující se hodnoty objemové hmotnosti vzorků z 19. až 21. stol. hodnoty pevností klesaly (viz. obrázek 7.12).



Obrázek 7.13: Charakteristické porušení vzorků ošetřených teplotou 180°C při zkoušce pevnosti v tlaku ve směru vláken.

Dlouhodobé teplotní zatížení teplotou 180°C způsobilo změnu ve struktuře dřeva, což také způsobilo i charakteristické porušení při zkoušce pevnosti v tlaku ve směru vláken. Docházelo k úplnému rozpadu vzorků, a to zvláště podél letokruhů (viz. obrázek 7.13). Tato zvýšená křehkost spolu s barevnou změnou dřeva je nepřímým důkazem výrazného termického narušení lignocelulózové matrice dřeva.

8 Závěr

Hlavním úkolem této diplomové práce bylo stanovit a ověřit sorpční charakteristiky dřeva jedle různého stáří. Dle sorpčních izoterm dřeva ze 17. až 21. století, které byly sestrojeny na základě tohoto experimentu, byl konkretizován předpoklad, že stáří dřeva ovlivňuje jeho hygroskopicitu a to v pozitivním slova smyslu, tedy že se zvyšujícím se stářím dřeva jeho hygroskopicita klesá. Výrazných změn bylo zaznamenáno u dřeva nejstaršího (17. stol.), které ve vlhkostních expozicích vykazovalo nejvyšší pokles rovnovážné vlhkosti oproti novému dřevu, a to až o 14,1%. V rámci experimentu byla rovněž ověřena interpretace fází sorpční izoterm podle teorie multimolekulární adsorpce.

V druhé části experimentu bylo provedeno termické ošetření dřeva při 60°C, 120°C a 180°C po dobu 17 hodin. Na takto ošetřených vzorcích byl následně ověřen vliv tepelné úpravy dřeva na jeho isothermické sorpční a také mechanické charakteristiky.

U dřeva termicky ošetřeného již není rozdíl v hygroskopicitě v závislosti na stáří dřeva tak výrazný, nebo není vůbec patrný. Tento fakt je pravděpodobně způsoben jak tepelným ošetřením, kdy degradace složek dřeva probíhá nezávisle na jeho stáří, tak mohou mít svůj podíl i různé vlastnosti jádra a běle. Dle srovnání sorpčních izoterm dřeva tepelně ošetřeného s referenčními se potvrdil předpoklad, že při dlouhodobém termickém ošetření teplotou vyšší než 100°C dochází ke snižování hygroskopicity dřeva. U termického ošetření teplotou 180°C klesla rovnovážná vlhkost dřeva až o 12,1% vzhledem k rovnovážné vlhkosti vzorků referenčních. Tento efekt je spojen s degradací hemicelulóz, stejně tak jako se zvyšujícím se podílem krystalické části celulózy.

Z mechanických charakteristik byla zkoušena pevnost v tlaku ve směru vláken. Ze srovnání závislosti pevnosti na teplotě ošetření vzorků lze říci, že jednoznačná tendence je zřejmá jen u vzorků ošetřených teplotou 180°C, a to pokles pevnosti až o 21,6%. U ostatních teplot není tento trend tak výrazný, nebo se nepotvrdil. Pro teplotu 60°C byl maximální pokles pevnosti o 4,3% a naopak vzestup o 10,3%. Pro teplotu 120°C byl zaznamenán maximální pokles o 6,1% a vzestup o 8,0%. Dlouhodobá zátěž teplotou 180°C způsobila nejen výraznou barevnou změnu vzorků, ale i zvýšila křehkost dřeva, což se projevilo při zkoušce pevnosti v tlaku ve směru vláken charakteristickým porušením. Během dosažení maximální pevnosti došlo k úplnému rozpadu vzorků, a to zvláště podél letokruhů.

V závislosti pevnosti dřeva v tlaku ve směru vláken na stáří došlo do stáří dřeva cca 300 let k nárůstu pevnosti až o 23,3%. Na tomto výsledku má podíl jak předpokládaná rostoucí krystalinita celulózy, tak konkrétně u vzorků z 18. stol. také vyšší objemová hmotnost.

Závěrem této práce lze říci, že vlastnosti neošetřeného dřeva vyššího stáří jsou z hlediska hygroskopicity i pevnosti v tlaku ve směru vláken pozitivní. Nahrazení poškozeného zabudovaného prvku dřevěným prvkem přibližně stejného stáří na úkor nového dřeva se jeví jako vhodný krok, a to jak z hlediska lepších fyzikálně-mechanických vlastností starého dřeva, tak i z důvodu estetiky a recyklace dřeva. Tepelné ošetření těchto dřevěných prvků má pozitivní vliv na sorpční vlastnosti dřeva, dlouhodobé ošetření při vyšších teplotách se však projevuje negativně na mechanických charakteristikách (v experimentu byla ověřena pevnost v tlaku ve směru vláken). Avšak při teplotách, které se používají pro horkovzdušnou sterilizaci (max. 120°C) k tomuto poklesu pevnosti nedochází nebo dochází v minimální míře. Výsledkem by pak mělo být využití starého dřeva tepelně ošetřeného v rámci dezinfekce horkovzdušnou sterilizací či mikrovlnným ohřevem při sanaci památkově chráněných dřevěných objektů.

9 Seznam použitých zdrojů

- [1] REINPRECHT, Ladislav, *Ochrana dřeva : vysokoškolská učebnica*, vydání první, Zvolen : Technická univerzita ve Zvoleni, 2008, 453 s., ISBN 978-80-228-1863-6
- [2] KAFKA, Emanuel a kol., *Dřevařská příručka, 1. část*, Praha: nakladatelství technické literatury, 1989, 483 s., ISBN 80-03-00009-02
- [3] REINPRECHT, Ladislav, *Procesy degradácie dreva*, vydání druhé, Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 1998, 150 s., ISBN 80-228-0662-5
- [4] VANĚREK, Jan a kol., *Kovové a dřevěné materiály: studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2006, 127s.
- [5] JURENKA, Michal, *Analýza rovnovážné vlhkosti dřeva při pokojové vlhkosti: bakalářská práce*, Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Lesnická fakulta, Ústav nauky o dřevě, 2006, 58 s., vedoucí bakalářské práce: doc. Dr. Ing. Petr Horáček
- [6] MATOVIČ, Anton, *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva*, vydání první, Brno: Vysoká škola zemědělská v Brně, 1993, 212s., ISBN 80-7157-086-9
- [7] REGINÁČ, Ladislav a kol., *Náuka o dreve II*, Zvolen: Vysoká škola lesnícka a drevárska vo Zvolene, Drevárska fakulta, Katedra nauky o dreve a mechanickej technologie dreva, 1990, 424 s., ISBN 80-228-0062-7
- [8] <http://wood.mendelu.cz/cz/sections/Props/?q=node/40>
- [9] <http://www.izolace.cz/index.asp?module=ActiveWeb&page=WebPage&DocumentID=2615>
- [10] TIME, Berit, *Hygroscopic moisture transport in wood*, PhD Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Department of Building and Construction Engineering, Norway, 1998, 216 s., ISBN: 8247102137, [cit. 2011-11-11] dostupný z www: <http://www.ivt.ntnu.no/docs/bat/bm/phd/AvhandlingBeritTime.pdf>
- [11] ENGELUND, Emil, KLAMER, Morten, VENAS, Thomas Mark, *Acquisition of sorption isotherms for modified woods by the use of dynamic vapour sorption instrumentation. Principles and Practice*, Stockholm: The International Research Group on Wood Protection, 2010, 10 s., [cit. 2011-10-11] dostupný z www: <http://www.innonetlifestyle.com/innonetmodificerettrae/files/2011/06/Forskningsartikel-fra-Thomas-Ven%C3%A5s-2010.pdf>

- [12] KORKUT, Derya Sevim ; GULLER, Biotin, The effects of heat treatment on physical properties and surface roughness of red-bud maple (*Acer trautvetteri* Medw.) wood, *Bioresource Technology* [online], květen 2008, ročník 99, číslo 8., [cit. 2011-09-27], dostupný z [www: <www.sciencedirect.com/science/article/B6V24-4PDSYP6-1/2/48a2ee4ee8f51af9bfb2b730499992f3>](http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V24-4PDSYP6-1/2/48a2ee4ee8f51af9bfb2b730499992f3), ISSN 0960-8524
- [13] SANTOS, J.A., Mechanical behaviour of Eucalyptus wood modified by heat, *Wood Science and Technology*, 2000, ročník 34, číslo 4., s. 39-43, [cit. 2011-10-05] dostupný z [www: <www.joyx.joensuu.fi/~karenlam/petri/struct/4786Borr.pdf](http://www.joyx.joensuu.fi/~karenlam/petri/struct/4786Borr.pdf)
- [14] BHUIYAN, Tariqur Rabbani ; HIRAI, Nobuyuki; SOBUE, Nobuo, Changes of crystallinity in wood cellulose by heat treatment under dried and moist conditions, *The Japan Wood Research Society* [online], 2000, ročník 46, číslo 3., [cit. 2011-10-20], dostupný z [www:< www.springerlink.com/index/J62432H12L1K871V.pdf>](http://www.springerlink.com/index/J62432H12L1K871V.pdf).
- [15] GUNDUZ, Gokhan; AYDEMIR, Deniz; KARAKAS, Gurdeniz, The effects of thermal treatment on the mechanical properties of wild Pear (*Pyrus elaeagnifolia* Pall.) wood and changes in physical properties, *Materials & Design* [online], prosinec 2009, ročník 30, číslo 10., [cit. 2011-11-30], dostupný z [www: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TX5-4W26GCD-2/2/caec9104ef6a95a87db17cf4e011adc9>](http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TX5-4W26GCD-2/2/caec9104ef6a95a87db17cf4e011adc9). ISSN 0261-3069.
- [16] LEXA, Jaroslav; NEČESANÝ, Vladimír; PACLT, Jiří; TESAŘOVÁ, Mária; ŠTOFKO, Ján, *Technologia dreva I.: Mechanické a fyzikálne vlastnosti dreva*, Bratislava: Práca, vydavateľstvo ROH , 1952, 431 s.
- [17] ŠLEZINGEROVÁ, Jarmila; HORÁČEK, Petr; GANDELOVÁ, Libuše, *Nauka o dřevě*, vydání první, Brno: Mendlova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 1996, 184 s., ISBN 80-7157-194-6
- [18] OBATAYA, Eiichi, *Characteristics of aged wood and Japanese traditional coating technology for wood protection*, Graduate School of Life and Environmental Science University of TSUKUBA, únor 2007, Japonsko, [cit.2011-11-10], dostupný z [www: http://www.citedelamusique.fr/pdf/musee/obataya-anglais.pdf](http://www.citedelamusique.fr/pdf/musee/obataya-anglais.pdf), Ibaraki 305-8572
- [19] YOKOYAMA, Misao a kol., *Mechanical characteristics of aged Hinoki wood from Japanese historical buildings*, C.R. Physique 10, 2009, 12 s., [cit.2011-11-10], dostupný z [www: http://hal.archivesouvertes.fr/docs/00/53/88/02/PDF/CRMec_Yokoyama_libraly.pdf](http://hal.archivesouvertes.fr/docs/00/53/88/02/PDF/CRMec_Yokoyama_libraly.pdf)
- [20] http://user.mendelu.cz/stencl/frvs_2196-2008/pdf/04_sorpni_izotermny.pdf

- [21] MULLER, Johann; *Holzschutz im Hochbau*, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2005, 363 s., ISBN 3-8167-6647-1
- [22] REINPRECHT, Ladislav; VIDHOLDOVÁ, Zuzana, *Termodrevo – Thermowood*, Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, Drevarská fakulta, 2011, 89s., ISBN: 978-80-87427-05-7

10 Seznam použitých zkratek a symbolů

RVD, w – rovnovážná vlhkost dřeva [%]

RVV, φ – rovnovážná vlhkost vzduchu [%]

\bar{x} – aritmetický průměr [-]

S_x – směrodatná odchylka [-]

F_{\max} – síla na mezi pevnosti [N]

a, b – příčné rozměry tělesa [mm]

σ_p – pevnost v tlaku ve směru vláken [N/mm^2]

σ_{12} – pevnost v tlaku ve směru vláken při 12% rovnovážné vlhkosti dřeva [N/mm^2]

m_w – hmotnost vlhkého dřeva [g]

m_0 – vlhkost absolutně suchého dřeva [g]

σ – povrchové napětí kapaliny [N/m]

$\cos \theta$ – úhel smáčnění kapaliny [°]

r – poloměr zakřivení menisku v kapiláře [m]

$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ – hustota kapaliny [kg/m^3]

R – univerzální plynová konstanta [J/mol.K]

T – absolutní teplota [K]

V_w – molární hmotnost kapaliny [g/mol]

w_M – max. vlhkost v monomolekulární vrstvě [%]

ΔGM – průměrná volná energie vody vázané v monomolekulární vrstvě [J/mol]

ΔG_p – průměrná volná energie vody vázané v polymolekulární vrstvě [J/mol]

α_L – max. sesychání v podélném směru [%]

α_R – max. sesychání v radiálním směru [%]

α_T – max. sesychání v tangenciálním směru [%]

w_{abs} – vlhkost absolutní [%]

w_{rel} – vlhkost relativní [%]

m_v – hmotnost vody obsažené ve dřevě [g]

MH – mez hygroskopicity

MNBS – mez nasycení buněčných stěn

11 Seznam příloh

Do tabulek 12.1 – 12.10 jsou přehledným způsobem zaznamenány hodnoty rovnovážné vlhkosti neošetřeného dřeva pro jednotlivá časová období při daných podmínkách. V tabulkách 12.11 – 12.16 jsou zaznamenány hodnoty rovnovážné vlhkosti termicky ošetřeného dřeva pro jednotlivá časová období a teplotu ošetření při daných podmínkách. Všechny hodnoty RVD jsou vypočtené gravimetrickou metodou, která je popsána v kapitole 6.2.1. Kromě konkrétních hodnot jsou v tabulkách uvedeny i průměrné hodnoty rovnovážných vlhkostí dřev (\bar{x}) a jejich směrodatné odchylky (S_x).

V tabulkách 12.17 – 12.20 jsou zaznamenány hodnoty pevností v tlaku ve směru vláken při 12% rovnovážné vlhkosti dřeva jedle ze 17. - 21. stol pro jednotlivá časová období a teplotu, při které byly vzorky ošetřeny. Kromě konkrétních hodnot jsou v tabulkách uvedeny i průměrné hodnoty rovnovážných vlhkostí dřev (\bar{x}) a jejich směrodatné odchylky (S_x).

12 Přílohy

12.1 Sorpční hodnoty RVD různého stáří

Tabulka 12.1: Tabulka gravimetricky stanovených sorpčních hodnot rovnovážných vlhkostí dřeva ze 17. stol. za teploty vzduchu 20°C, relativní vlhkost vzduchu 33 %, 55%, 75%, 88%, 97% a při normálním atmosférickém tlaku.

Vzorek	RVD [%] ze 17. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	7,87	8,86	12,45	18,19	23,97
2	7,96	8,87	13,18	17,53	25,04
3	8,17	8,96	12,54	16,67	25,83
4	7,87	8,83	12,52	18,99	23,53
5	8,75	8,98	13,07	18,22	24,89
6	7,84	8,78	12,53	17,89	25,58
7	7,93	8,90	13,04	17,70	24,37
8	7,71	8,91	11,82	15,37	25,45
9	7,95	8,49	12,66	17,50	25,28
10	7,52	8,96	11,20	16,87	24,57
11	7,61	9,21	13,02	17,62	26,56
12	7,50	9,06	12,72	17,14	25,88
13	7,32	9,05	12,25	18,82	24,35
14	7,69	8,80	12,98	17,08	25,20
15	7,56	8,45	13,13	17,84	24,68
16	7,98	9,18	12,86	17,75	25,83
17	7,37	8,41	13,15	17,92	25,68
18	8,12	8,90	-	-	-
\bar{x}	7,82	8,87	12,65	17,59	25,10
S_x	0,33	0,22	0,51	0,82	0,76

Tabulka 12.2: Tabulka gravimetricky stanovených sorpčních hodnot rovnovážných vlhkostí dřeva z 18. stol. za teploty vzduchu 20°C, relativní vlhkosti vzduchu 33 %, 55%, 75%, 88%, 97% a při normálním atmosférickém tlaku.

Vzorek	RVD [%] z 18. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	8,13	8,88	12,58	19,58	27,05
2	8,22	8,81	12,42	17,57	24,85
3	8,23	8,92	12,81	18,12	25,81
4	8,20	9,02	12,80	18,07	25,06
5	8,39	9,30	13,46	17,09	25,52
6	7,83	9,48	14,31	16,75	25,72
7	8,28	8,98	12,61	18,06	26,27
8	7,57	8,25	11,76	18,46	25,47
9	7,84	9,12	12,97	18,54	25,37
10	7,86	8,34	12,71	18,57	26,27
11	8,09	8,22	12,83	18,51	27,67
12	8,67	9,48	13,69	19,24	26,86
13	8,62	9,32	14,17	17,83	26,83
14	8,33	9,53	12,45	17,92	25,50
15	-	-	-	-	27,06
\bar{x}	8,16	8,98	12,97	18,17	26,09
S_x	0,30	0,43	0,68	0,72	0,81

Tabulka 12.3: Tabulka gravimetricky stanovených sorpčních hodnot rovnovážných vlhkostí dřeva z 19. stol. za teploty vzduchu 20°C, relativní vlhkost vzduchu 33 %, 55%, 75%, 88%, 97% a při normálním atmosférickém tlaku.

Vzorek	RVD [%] z 19. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	8,17	8,74	12,77	18,33	26,73
2	7,97	9,01	13,96	19,89	25,99
3	8,00	8,68	13,20	18,39	26,11
4	8,57	9,03	13,25	18,86	26,04
5	8,26	9,06	13,02	19,21	26,25
6	8,24	9,04	12,15	18,81	26,41
7	7,55	9,28	12,56	17,20	25,82
8	8,64	8,76	12,34	17,85	26,50
9	8,09	8,58	12,48	18,26	25,27
10	8,21	9,59	12,76	18,86	25,86
11	8,69	9,35	13,99	18,48	26,25
12	8,56	8,75	14,92	19,17	27,26
13	8,01	8,55	13,07	18,40	25,89
14	9,59	11,72	13,51	19,10	26,02
15	9,26	10,09	-	19,09	27,44
16	-	-	-	18,40	27,33
17	-	-	-	-	27,91
18	-	-	-	-	26,62
19	-	-	-	-	27,74
\bar{x}	8,39	9,22	13,14	18,64	26,50
S_x	0,50	0,78	0,73	0,60	0,71

Tabulka 12.4: Tabulka gravimetricky stanovených sorpčních hodnot rovnovážných vlhkostí dřeva z 20. stol. za teploty vzduchu 20°C, relativní vlhkosti vzduchu 33 %, 55%, 75%, 88%, 97% a při normálním atmosférickém tlaku.

Vzorek	RVD [%] z 20. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	8,26	9,18	14,70	20,73	27,18
2	8,91	9,19	13,31	18,46	27,73
3	8,01	10,11	14,39	20,68	26,80
4	9,51	9,39	15,20	19,52	27,70
5	-	-	-	-	26,82
6	-	-	-	-	26,83
\bar{x}	8,67	9,47	14,40	19,85	27,18
S_x	0,58	0,38	0,69	0,94	0,40

Tabulka 12.5: Tabulka gravimetricky stanovených sorpčních hodnot rovnovážných vlhkostí dřeva z 21. stol. za teploty vzduchu 20°C, relativní vlhkosti vzduchu 33 %, 55%, 75%, 88%, 97% a při normálním atmosférickém tlaku.

Vzorek	RVD [%] z 21. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	8,72	9,66	14,50	20,51	27,06
2	9,20	9,67	12,55	19,67	26,74
3	8,79	9,71	15,04	20,59	28,68
4	8,90	9,32	14,49	19,47	27,24
5	8,41	9,66	15,20	20,79	27,93
6	8,19	9,79	16,00	18,37	27,43
7	8,49	9,21	14,01	19,03	28,74
8	-	-	-	19,86	26,83
\bar{x}	8,67	9,57	14,54	19,79	27,58
S_x	0,31	0,20	1,00	0,78	0,74

12.2 Desorpční hodnoty RVD různého stáří

Tabulka 12.6: Tabulka gravimetricky stanovených desorpčních hodnot rovnovážných vlhkostí dřeva ze 17. stol. za teploty vzduchu 20°C, relativní vlhkosti vzduchu 33 %, 55%, 75%, 88%, 97% a při normálním atmosférickém tlaku.

Vzorek	RVD [%] ze 17. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	10,55	10,15	16,62	23,09	30,95
2	10,92	11,59	16,85	23,88	31,75
3	10,76	10,56	17,01	20,96	31,29
4	10,33	10,75	16,74	22,04	31,21
5	10,14	10,49	15,98	22,85	31,03
6	10,41	11,61	15,49	22,71	31,23
7	10,47	11,33	15,67	21,30	30,65
8	10,08	11,09	15,41	20,64	31,03
9	10,36	11,04	15,19	22,08	31,30
10	10,18	10,87	16,03	21,81	31,03
11	10,07	11,62	16,15	22,05	32,07
12	10,60	11,30	16,19	22,93	31,03
13	10,44	11,16	13,48	22,50	31,86
14	9,69	11,23	16,72	23,18	32,88
15	10,71	11,34	16,57	22,41	31,17
16	9,15	10,59	16,19	23,02	29,80
17	10,74	11,06	16,55	23,23	30,00
18	10,30	11,23	-	-	-
\bar{x}	10,33	11,06	16,05	22,39	31,19
S_x	0,41	0,40	0,83	0,84	0,70

Tabulka 9.7: Tabulka gravimetricky stanovených desorpčních hodnot rovnovážných vlhkostí dřeva z 18. stol. za teploty vzduchu 20°C, relativní vlhkosti vzduchu 33 %, 55%, 75%, 88%, 97% a při normálním atmosférickém tlaku.

Vzorek	RVD [%] z 18. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	11,03	11,07	16,67	23,31	33,36
2	11,11	11,16	16,40	23,43	33,00
3	10,67	12,19	17,36	22,36	33,67
4	11,72	11,65	16,62	24,06	32,55
5	10,36	12,05	17,07	22,59	32,57
6	11,29	10,99	16,64	22,17	32,32
7	11,72	11,27	16,58	23,66	31,53
8	10,79	10,72	13,79	23,48	32,96
9	11,03	12,42	17,39	22,43	32,74
10	10,95	11,96	15,39	22,51	33,13
11	10,96	10,37	16,02	22,44	32,97
12	11,94	12,09	17,15	22,48	30,29
13	11,42	12,37	18,50	23,26	33,28
14	11,48	12,41	16,79	24,64	31,46
15	-	-	-	-	33,78
\bar{x}	11,18	11,62	16,60	23,06	32,64
S_x	0,43	0,66	1,04	0,72	0,90

Tabulka 9.8: Tabulka gravimetricky stanovených desorpčních hodnot rovnovážných vlhkostí dřeva z 19. stol. za teploty vzduchu 20°C, relativní vlhkosti vzduchu 33 %, 55%, 75%, 88%, 97% a při normálním atmosférickém tlaku.

Vzorek	RVD [%] z 19. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	11,19	11,62	16,21	23,01	33,18
2	11,45	11,46	18,54	22,49	32,67
3	11,58	12,45	16,89	22,61	32,68
4	11,62	12,32	17,29	23,26	33,14
5	11,54	12,23	16,96	23,43	33,59
6	11,48	12,18	16,36	23,41	32,98
7	11,05	11,39	16,81	22,87	32,54
8	11,32	12,38	16,61	22,88	31,67
9	11,47	11,66	16,94	23,21	31,98
10	11,33	12,18	16,54	22,84	32,19
11	11,38	12,08	16,49	25,60	32,18
12	11,64	12,20	18,41	23,02	32,58
13	11,26	12,47	18,08	23,59	32,67
14	12,58	12,81	17,05	23,08	32,23
15	12,96	12,50	-	24,58	33,81
16	-	-	-	23,52	33,46
17	-	-	-	-	33,07
18	-	-	-	-	32,13
19	-	-	-	-	32,44
\bar{x}	11,59	12,13	17,08	23,34	32,69
S_x	0,49	0,40	0,72	0,75	0,56

Tabulka 9.9: Tabulka gravimetricky stanovených desorpčních hodnot rovnovážných vlhkostí dřeva z 20. stol. za teploty vzduchu 20°C, relativní vlhkosti vzduchu 33 %, 55%, 75%, 88%, 97% a při normálním atmosférickém tlaku.

Vzorek	RVD [%] z 20. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	11,68	12,95	17,61	23,83	33,50
2	11,68	12,60	17,26	23,54	32,94
3	11,50	12,45	17,38	23,72	33,51
4	11,94	13,15	17,77	23,43	32,91
5	-	-	-	-	32,62
6	-	-	-	-	32,82
\bar{x}	11,70	12,79	17,51	23,63	33,05
S_x	0,16	0,28	0,20	0,16	0,34

Tabulka 9.10: Tabulka gravimetricky stanovených desorpčních hodnot rovnovážných vlhkostí dřeva z 21. stol. za teploty vzduchu 20°C, relativní vlhkosti vzduchu 33 %, 55%, 75%, 88%, 97% a při normálním atmosférickém tlaku.

Vzorek	RVD [%] z 21. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	11,74	12,96	17,88	23,26	34,32
2	12,31	12,97	17,66	24,51	33,82
3	11,84	12,91	17,58	24,52	32,62
4	11,63	12,56	17,43	24,06	33,53
5	11,85	12,64	17,51	24,37	33,73
6	11,50	13,05	18,12	23,04	33,03
7	11,93	13,03	17,58	24,36	34,18
8	-	-	-	24,89	34,57
\bar{x}	11,83	12,87	17,68	24,13	33,73
S_x	0,24	0,18	0,22	0,61	0,62

12.3 Sorpční hodnoty RVD po tepelném ošetření

Tabulka 12.11: Tabulka gravimetricky stanovených sorpčních hodnot rovnovážných vlhkostí dřeva ze 17.-21.stol tepelně ošetřeného při teplotě 60°C. Klimatizace probíhala za teploty vzduchu 20°C, relativní vlhkosti vzduchu 33 %, 55%, 75%, 88%, 97% a při normálním atmosférickém tlaku.

Vzorek	RVD [%] ze 17. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	7,81	8,86	14,10	17,33	25,80
2	8,18	8,62	13,58	17,00	24,85
3	6,94	9,65	11,44	16,96	20,64
4	8,07	7,91	10,59	18,10	24,61
\bar{x}	7,75	8,76	12,43	17,35	23,97
S_x	0,49	0,62	1,45	0,46	1,97
Vzorek	RVD [%] z 18. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	8,46	8,77	11,61	19,09	25,35
2	7,97	9,66	12,07	19,15	24,48
3	7,63	7,77	12,20	16,58	23,16
4	7,99	9,34	12,69	17,74	29,42
\bar{x}	8,01	8,89	12,14	18,14	25,60
S_x	0,30	0,72	0,39	1,06	2,34
Vzorek	RVD [%] z 19. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	7,63	9,39	11,50	18,71	24,96
2	8,23	8,47	12,96	17,15	25,87
3	8,33	8,60	14,06	18,47	25,67
4	9,23	9,48	12,35	17,53	25,03
\bar{x}	8,36	8,98	12,72	17,96	25,38
S_x	0,57	0,45	0,93	0,65	0,40
Vzorek	RVD [%] z 20. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	6,74	8,90	13,31	20,41	24,64
2	7,44	9,41	12,37	17,74	25,00
3	8,36	8,98	13,38	19,10	28,52
\bar{x}	7,51	9,10	13,02	19,09	26,05
S_x	0,66	0,22	0,46	1,09	1,75
Vzorek	RVD [%] z 21. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	9,03	8,98	13,79	19,95	25,08
2	8,27	8,38	14,45	17,59	27,35
3	8,29	9,09	14,74	19,79	29,38
\bar{x}	8,53	8,82	14,33	19,11	27,27
S_x	0,35	0,31	0,40	1,08	1,75

Tabulka 12.12: Tabulka gravimetricky stanovených sorpčních hodnot rovnovážných vlhkostí dřeva ze 17.-21.stol tepelně ošetřeného při teplotě 120°C. Klimatizace probíhala za teploty vzduchu 20°C, relativní vlhkosti vzduchu 33 %, 55%, 75%, 88%, 97% a při normálním atmosférickém tlaku.

Vzorek	RVD [%] ze 17. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	7,82	8,08	10,62	15,96	21,67
2	7,29	8,63	10,53	13,64	21,62
3	6,12	8,15	11,83	13,81	21,04
4	8,19	7,62	10,72	14,89	22,32
\bar{x}	7,36	8,12	10,93	14,57	21,66
S_x	0,78	0,36	0,53	0,93	0,45
Vzorek	RVD [%] z 18. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	7,09	7,38	10,85	15,54	22,10
2	6,73	8,94	12,59	14,63	21,94
3	7,15	8,96	11,78	15,60	22,86
4	7,43	7,38	9,16	13,15	22,82
\bar{x}	7,10	8,16	11,09	14,73	22,43
S_x	0,25	0,79	1,28	0,99	0,41
Vzorek	RVD [%] z 19. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	8,88	8,69	11,16	14,91	22,71
2	8,32	8,43	12,33	15,62	22,33
3	6,62	8,01	10,21	13,72	23,15
4	9,61	8,77	10,98	15,07	22,54
\bar{x}	8,36	8,47	11,17	14,83	22,68
S_x	1,10	0,30	0,76	0,69	0,30
Vzorek	RVD [%] z 20. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	8,68	9,36	11,49	14,81	22,64
2	6,34	8,18	12,27	15,36	23,62
3	7,59	9,05	11,75	16,15	23,82
\bar{x}	7,54	8,87	11,84	15,44	23,36
S_x	0,95	0,50	0,33	0,55	0,52
Vzorek	RVD [%] z 21. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	8,14	9,62	11,63	16,49	23,89
2	7,91	9,15	12,20	14,46	23,50
3	8,57	8,33	12,62	17,38	23,02
\bar{x}	8,21	9,04	12,15	16,11	23,47
S_x	0,27	0,53	0,41	1,22	0,36

Tabulka 12.13: Tabulka gravimetricky stanovených sorpčních hodnot rovnovážných vlhkostí dřeva ze 17.-21.stol tepelně ošetřeného při teplotě 180°C. Klimatizace probíhala za teploty vzduchu 20°C, relativní vlhkosti vzduchu 33 %, 55%, 75%, 88%, 97% a při normálním atmosférickém tlaku.

Vzorek	RVD [%] ze 17. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	5,77	5,79	7,72	10,32	16,99
2	6,98	7,62	8,10	11,04	16,13
3	5,57	7,60	7,64	10,94	16,96
4	5,26	6,49	7,54	10,95	16,70
\bar{x}	5,90	6,87	7,75	10,81	16,70
S_x	0,65	0,78	0,21	0,29	0,35
Vzorek	RVD [%] z 18. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	5,24	6,32	8,32	10,99	18,45
2	5,69	7,04	8,96	10,28	16,93
3	5,24	7,83	7,87	11,60	15,83
4	5,76	5,27	8,66	10,04	15,95
\bar{x}	5,48	6,62	8,45	10,73	16,79
S_x	0,24	0,94	0,40	0,61	1,05
Vzorek	RVD [%] z 19. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	5,58	5,65	7,65	11,09	17,59
2	5,11	7,20	8,31	11,05	18,67
3	5,22	6,14	8,51	10,56	18,02
4	4,38	7,32	7,66	10,82	18,09
\bar{x}	5,07	6,58	8,03	10,88	18,09
S_x	0,44	0,71	0,39	0,21	0,38
Vzorek	RVD [%] z 20. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	5,92	7,11	7,85	11,66	16,15
2	5,33	6,80	8,77	10,04	17,36
3	5,67	7,59	6,31	10,19	17,54
\bar{x}	5,64	7,17	7,64	10,63	17,02
S_x	0,24	0,33	1,01	0,73	0,62
Vzorek	RVD [%] z 21. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	5,73	8,05	8,05	10,37	16,78
2	5,95	7,71	7,18	10,90	15,96
3	6,38	5,26	8,71	10,37	17,98
\bar{x}	6,02	7,01	7,98	10,55	16,91
S_x	0,27	1,25	0,63	0,25	0,83

12.4 Desorpční hodnoty RVD po tepelném ošetření

Tabulka 12.14: Tabulka gravimetricky stanovených desorpčních hodnot rovnovážných vlhkostí dřeva ze 17.-21.stol tepelně ošetřeného při teplotě 60°C. Klimatizace probíhala za teploty vzduchu 20°C, relativní vlhkosti vzduchu 33 %, 55%, 75%, 88%, 97% a při normálním atmosférickém tlaku.

Vzorek	RVD [%] ze 17. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	9,49	10,55	15,14	19,76	30,45
2	9,29	11,25	16,51	20,38	30,15
3	9,44	12,17	17,36	23,85	34,38
4	8,91	11,52	14,23	23,08	32,56
\bar{x}	9,28	11,37	15,81	21,77	31,89
S_x	0,23	0,58	1,21	1,73	1,71
Vzorek	RVD [%] z 18. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	8,98	11,16	16,03	20,91	33,12
2	8,04	11,43	17,52	22,82	32,27
3	10,33	10,78	14,47	24,10	34,65
4	9,00	10,19	16,42	23,86	35,18
\bar{x}	9,09	10,89	16,11	22,92	33,80
S_x	0,82	0,47	1,09	1,26	1,17
Vzorek	RVD [%] z 19. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	10,45	11,17	16,62	23,40	36,42
2	8,83	11,15	18,38	21,69	32,45
3	10,39	10,87	16,91	23,51	32,02
4	9,84	12,32	16,82	21,00	35,39
\bar{x}	9,88	11,38	17,18	22,40	34,07
S_x	0,65	0,56	0,70	1,08	1,88
Vzorek	RVD [%] z 20. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	10,44	11,95	16,32	25,43	36,05
2	8,66	11,60	17,50	23,76	37,57
3	9,86	13,21	18,93	22,09	37,08
\bar{x}	9,65	12,26	17,58	23,76	36,90
S_x	0,74	0,69	1,07	1,36	0,63
Vzorek	RVD [%] z 21. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	11,42	11,09	18,04	24,15	38,30
2	10,11	12,94	17,92	24,56	35,15
3	12,35	13,74	18,05	24,44	33,13
\bar{x}	11,29	12,59	18,00	24,38	35,52
S_x	0,92	1,11	0,06	0,17	2,13

Tabulka 12.15: Tabulka gravimetricky stanovených desorpčních hodnot rovnovážných vlhkostí dřeva ze 17.-21.stol tepelně ošetřeného při teplotě 120°C. Klimatizace probíhala za teploty vzduchu 20°C, relativní vlhkosti vzduchu 33 %, 55%, 75%, 88%, 97% a při normálním atmosférickém tlaku.

Vzorek	RVD [%] ze 17. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	8,41	10,29	13,83	19,78	27,42
2	9,42	11,83	14,10	17,85	27,85
3	9,38	10,07	14,09	19,44	27,34
4	9,49	10,20	13,40	17,84	27,73
\bar{x}	9,18	10,60	13,86	18,73	27,59
S_x	0,44	0,71	0,28	0,89	0,21
Vzorek	RVD [%] z 18. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	8,67	10,03	14,85	19,14	28,28
2	9,16	10,75	13,46	19,21	28,86
3	10,75	11,63	13,65	18,75	26,98
4	8,61	10,53	13,41	18,97	25,50
\bar{x}	9,30	10,73	13,84	19,02	27,40
S_x	0,86	0,58	0,59	0,18	1,29
Vzorek	RVD [%] z 19. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	10,93	11,96	13,66	19,96	27,70
2	9,31	10,92	13,89	20,22	28,21
3	9,49	11,62	14,53	18,70	29,05
4	8,45	10,35	14,00	18,87	28,91
\bar{x}	9,54	11,21	14,02	19,44	28,47
S_x	0,89	0,62	0,32	0,66	0,55
Vzorek	RVD [%] z 20. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	9,69	10,90	15,74	19,58	29,16
2	9,70	12,45	13,50	19,94	28,27
3	9,49	11,26	15,67	20,09	30,24
\bar{x}	9,63	11,53	14,97	19,87	29,23
S_x	0,10	0,66	1,04	0,21	0,81
Vzorek	RVD [%] z 21. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	10,08	13,08	16,53	20,07	30,88
2	9,93	11,70	14,04	20,41	30,24
3	10,16	11,73	13,91	21,40	31,80
\bar{x}	10,05	12,17	14,83	20,63	30,98
S_x	0,10	0,64	1,21	0,56	0,64

Tabulka 12.16: Tabulka gravimetricky stanovených desorpčních hodnot rovnovážných vlhkostí dřeva ze 17.-21.stol tepelně ošetřeného při teplotě 180°C. Klimatizace probíhala za teploty vzduchu 20°C, relativní vlhkosti vzduchu 33 %, 55%, 75%, 88%, 97% a při normálním atmosférickém tlaku.

Vzorek	RVD [%] ze 17. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	6,19	8,89	9,32	14,10	22,90
2	7,63	7,66	10,27	13,22	23,38
3	7,45	9,45	9,14	12,56	19,91
4	5,91	9,58	10,33	13,62	17,79
\bar{x}	6,80	8,90	9,76	13,37	20,99
S_x	0,75	0,76	0,54	0,57	2,28
Vzorek	RVD [%] z 18. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	6,65	8,58	9,51	13,29	21,33
2	6,42	7,68	10,61	12,39	20,58
3	6,36	8,08	9,25	13,42	19,78
4	5,89	7,48	10,95	13,99	19,79
\bar{x}	6,33	7,96	10,08	13,27	20,37
S_x	0,28	0,42	0,71	0,57	0,64
Vzorek	RVD [%] z 19. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	5,63	7,57	8,84	12,24	20,33
2	6,18	7,32	9,61	12,86	21,77
3	8,29	8,87	10,94	14,38	17,95
4	7,89	7,52	10,21	13,15	18,45
\bar{x}	7,00	7,82	9,90	13,16	19,62
S_x	1,12	0,61	0,77	0,78	1,52
Vzorek	RVD [%] z 20. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	7,51	7,51	10,64	12,53	19,21
2	6,40	8,03	10,95	14,40	21,91
3	7,21	8,77	9,94	13,65	18,52
\bar{x}	7,04	8,10	10,51	13,53	19,88
S_x	0,47	0,52	0,42	0,77	1,46
Vzorek	RVD [%] z 21. stol.				
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 55\%$	$\varphi = 75\%$	$\varphi = 88\%$	$\varphi = 97\%$
1	5,32	9,00	10,22	13,14	22,14
2	6,08	7,79	8,62	13,25	20,00
3	7,71	8,43	12,05	12,55	19,52
\bar{x}	6,37	8,41	10,30	12,98	20,55
S_x	1,00	0,50	1,40	0,31	1,14

12.5 Pevnost v tlaku ve směru vláken dřeva různého stáří

Tabulka 12.17: Tabulka referenčních hodnot pevností v tlaku ve směru vláken pro vzorky dřeva ze 17.-21.stol.

Pozn.: červeně označené hodnoty jsou hodnoty vzorků poškozených prasklinami nebo požerky, tyto hodnoty do průměrné pevnosti v tlaku ve směru vláken nebyly započítávány.

Vzorek	σ_{12} [N/mm ²]				
	17.stol.	18.stol.	19.stol.	20.stol.	21.stol.
1	50,83	55,99	38,26	54,63	40,89
2	55,76	60,04	38,52	42,94	37,35
3	59,29	49,79	51,80	41,97	31,10
4	40,94	44,54	42,84		40,73
5	56,44	46,67	43,48		
6	43,37	37,14	51,74		
7	39,86	46,87	59,32		
8	29,57	44,16	40,30		
9	28,51	38,73	33,96		
10	41,69		40,54		
11	40,19		37,91		
\bar{x}	44,22	47,10	43,84	46,52	37,52
S_x	9,85	6,98	7,55	5,76	3,97

Tabulka 12.18: Tabulka hodnot pevností v tlaku ve směru vláken pro vzorky dřeva ze 17.-21.stol. tepelně ošetřených při teplotě 60°C.

Pozn.: červeně označené hodnoty jsou hodnoty vzorků poškozených prasklinami nebo požerky, tyto hodnoty do průměrné pevnosti v tlaku ve směru vláken nebyly započítávány.

Vzorek	σ_{12} [N/mm ²]				
	17.stol.	18.stol.	19.stol.	20.stol.	21.stol.
1	47,44	53,42	51,00	39,85	41,80
2	63,71	55,82	47,87	50,97	43,63
3	51,71	50,63	37,58	46,48	35,45
4	30,34	57,67	49,57	-	-
5	44,62	61,16	38,12	-	-
6	36,72	50,61	56,51	-	-
7	43,07	44,46	51,16	-	-
8	35,70	42,32	45,29	-	-
9	40,14	56,43	46,99	-	-
10	36,48	-	42,24	-	-
11	34,35	-	34,28	-	-
12	37,77	-	36,74	-	-
13	-	-	39,60	-	-
\bar{x}	42,30	52,50	44,31	45,77	40,29
S_x	8,98	5,82	6,81	4,57	3,50

Tabulka 12.19: Tabulka hodnot pevností v tlaku ve směru vláken pro vzorky dřeva ze 17.-21.stol. tepelně ošetřených při teplotě 120°C.

Pozn.: červeně označené hodnoty jsou hodnoty vzorků poškozených prasklinami nebo požerky, tyto hodnoty do průměrné pevnosti v tlaku ve směru vláken nebyly započítávány.

Vzorek	σ_{12} [N/mm ²]				
	17.stol.	18.stol.	19.stol.	20.stol.	21.stol.
1	53,84	57,66	45,22	50,02	2,52
2	59,00	55,86	56,50	48,39	4,91
3	57,48	52,16	49,48	46,19	7,10
4	34,05	46,99	52,14	40,12	8,50
5	38,80	47,09	47,97	-	-
6	37,08	42,97	49,39	-	-
7	31,41	49,30	55,64	-	-
8	42,52	41,64	45,57	-	-
9	38,46	51,70	47,39	-	-
10	35,60	46,56	34,28	-	-
11	26,19	50,41	34,96	-	-
12	37,00	-	51,33	-	-
13	42,01	-	41,45	-	-
\bar{x}	41,53	49,49	47,66	46,18	5,76
S _x	10,19	4,71	6,93	3,75	2,27

Tabulka 12.20: Tabulka hodnot pevností v tlaku ve směru vláken pro vzorky dřeva ze 17.-21.stol. tepelně ošetřených při teplotě 180°C.

Pozn.: červeně označené hodnoty jsou hodnoty vzorků poškozených prasklinami nebo požerky, tyto hodnoty do průměrné pevnosti v tlaku ve směru vláken nebyly započítávány.

Vzorek	σ_{12} [N/mm ²]				
	17.stol.	18.stol.	19.stol.	20.stol.	21.stol.
1	48,82	22,75	24,73	43,82	2,27
2	30,07	44,33	30,30	42,33	4,43
3	40,42	31,96	42,32	23,29	4,35
4	49,09	44,29	39,66	-	-
5	29,00	36,43	59,37	-	-
6	38,08	37,93	46,38	-	-
7	29,86	41,70	36,00	-	-
8	27,16	44,13	38,87	-	-
9	34,70	36,00	32,92	-	-
10	32,13	48,20	33,78	-	-
11	25,51	-	33,03	-	-
12	26,95	-	33,43	-	-
13	20,78	-	31,44	-	-
14	-	-	33,51	-	-
\bar{x}	36,52	37,72	37,14	36,48	3,68
S _x	7,87	7,10	8,35	9,35	1,00