

**MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ**

**Lesnická a dřevařská fakulta**

**Ústav nauky o dřevě**

**Navlhavost dřeva.**

**Experimentální analýza a model sorpční isotermy dřeva.**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2015**

**ŠTEFAN SRNKA**

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci: **Navlhavost dřeva. Experimentální analýza a model sorpční isotermy dřeva.**

vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů, a v souladu s platnou *Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací*.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 Autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity o tom, že předmetná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně, dne: 29.4 2015

.....

**Pod'akovanie:**

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce doc. Dr. Ing. Petrovi Horáčkovi za konzultácie, cenné rady a vedenie pri spracovaní bakalárskej práce.

## **ABSTRAKT**

Hlavným cieľom tejto bakalárskej práce bolo stanoviť sorpčnú izotermu u troch druhov dreva – smreku, buku, a dubu v teplote ktorá bola v laboratóriu.

Za týmto účelom bola prevedená séria merania vzorkou. Použili sme päť relatívnych vzušných vlhkostí, v ktorých sme ustanovili pomocou nasýtených roztokov solí päť rôznych relatívnych vlhkostí vzduchu. Pre dosiahnutie maximálnej presnosti výsledkov bol počet kusov stanovený na sto pre každý druh dreva a rozdelených po dvadsať kusoch pre každý exikátor.

Z nameraných hodnôt po vybratí z exikátorov boli vypočítané váhovou metódou rovnovážne vlhkosti dreva a tieto výsledky boli spracované do grafov. Porovnali sme vypočítané hodnoty rovnovážnej vlhkosti dreva s teoretickým modelom sorpčnej izotermy.

Výsledky poukázali na to, že rovnovážne vlhkosti dreva medzi jednotlivými drevami sa líšili. U smreku vykazovali hodnoty rovnovážnych vlhkosti dreva mierne vyššie hodnoty u dvoch relatívnych vlhkostí vzduchu, ale u ostatných druhov sa hodnoty nelíšili. Náš model sme považovali za verifikovaný..

### **Kľúčové slova:**

smrek, buk, dub, sorpčná izoterma, rovnovážna vlhkosť dreva, relatívna vlhkosť vzduchu

## **ABSTRACT**

The main aim of the bachelor thesis was to determine the sorption isotherms for the three types of wood - spruce, beech and oak in temperature which was in the laboratory.

To this purpose was converted to a series of the measurement samples. We used five relative air humidity in which we have established by using saturated salt solutions of five different relative humidity. To achieve a max. accuracy of the results, the number of pieces was 100 for each type of wood which was divided to twenty pieces for each desiccator.

From the measured values after chosen from desiccators were calculated by weighting method equilibrium humidity of wood and those results was processed into graphs. From the calculated values were compared to the values of the equilibrium humidity of wood from the theoretical model sorption isotherms.

We compared the calculated equilibrium moisture content of wood with a theoretical equilibrium moisture content of wood differed between. The results showed that the sorption isotherms were different. Wood equilibrium moisture of spruce exhibited a slightly higher value for the two relative humidity, but in the other kinds of wood they wasn't different. We considered our model to verified.

### **Keywords:**

spruce, beech, oak, sorption isotherms, equilibrium wood humidity, relative air humidity

## OBSAH

<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>8</b>
<b>2 LITERÁRNY PREHĽAD.....</b>	<b>9</b>
2.1 Vlhkosť a navlhavosť.....	9
2.2 Rozdelenie vody v dreve.....	10
2.3 Rovnovážna vlhkosť dreva.....	11
2.4 DeBoer – Zwickerova sorpcia:.....	12
2.5 Sorpčná izoterma u dreva smrek a Kollmanov diagram.....	14
2.6 Chemikálie a ich rovnovážna vlhkosť vzduchu nad nimi.....	15
2.7 Absorpcia a desorpcia.....	16
2.8 Transport vlhkosti v dreve.....	18
2.9 Hustota dreva.....	19
<b>3 CIEĽ PRÁCE.....</b>	<b>21</b>
<b>4 METODIKA PRÁCE.....</b>	<b>22</b>
4.1 Absorpcia a desorpcia.....	22
4.2 Hustota.....	22
4.3 Teplota.....	23
4.4 Stanovenie rovnovážnej vlhkosti dreva váhovou metódou.....	24
4.5 Model sorpčnej izotermy.....	25
4.6 Termodynamika.....	27
4.7 Štatistika.....	30
<b>5 MATERIÁL.....</b>	<b>31</b>
5.1 Hustota vzoriek.....	31
5.2 Chemikálie na dosiahnutie vlastných vybraných RVV.....	32
<b>6 VÝSLEDKY EXPERIMENTU.....</b>	<b>34</b>
6.1 Hustota vzoriek.....	34
6.2 Vypočítaná rovnovážna vlhkosť dreva pri rôznych relatívnych vlhkosti vzduchu....	35
6.3 Teoretická modelová sorpčná izoterma.....	40
6.4 Experimentálna sorpčná izoterma a porovnanie z modelom plus chybové úsečky ...	41
6.5 Popisná štatistika – variačná analýza.....	44
6.6 Verifikácia teoretického modelu sorpčnej izotermy.....	51
6.7 Porovnanie navrhovanej tabuľky z literárny modelom.....	54
<b>7 DISKUSIA.....</b>	<b>55</b>

7.1 Vysvetlenie výsledkov .....	55
7.2 Interpretácia výsledkov .....	56
7.3 Praktické využitie sorpčnej izotermy .....	56
7.4 Vplyv faktorov na rovnovážnu vlhkosť dreva .....	57
7.5 Napučanie a zosychanie dreva .....	58
7.6 Vplyv veľkosti telies .....	60
<b>8 ZÁVER .....</b>	<b>61</b>
<b>9 SUMMARY .....</b>	<b>62</b>
<b>10 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY.....</b>	<b>63</b>

# 1 ÚVOD

Navlhavosť dreva nás zaujíma z toho dôvodu, že každý druh dreva má rôznu anatomickú stavbu a chemické zloženie, čo má za následok iné fyzikálne a mechanické vlastnosti. Najdôležitejšou fyzikálnou vlastnosťou je jeho vlhkosť, schopnosť prijímať a odovzdávať vlhkosť do prostredia, v ktorom sa práve nachádza. Táto vlastnosť sa nazýva hygroskopicita, a podľa nej sa aj drevo považuje hygroskopický materiál. Navlhavosť súvisí z vlhkosťou dreva, a tá je jedným zo zásadných parametrov pri vstupe dreva ako materiálu do výroby a používaní ako následného výrobku k ďalšiemu slúženiu. Preto si myslíme, že by sa malo touto témou zaoberať čo najviac.

I popri rôznych výhodách aké drevo má, je v poslednej dobe najviac spomínaná ekologická výhoda dreva ako spracovanie odpadu a následné výrobu energie. Zároveň má aj nedostatky ako je horľavosť, značnú nasiakavosť čo spôsobuje zmeny jeho tvaru a vlastností a relatívne nízku odolnosť voči pôsobeniu biotických činiteľov. Nedostatky dreva sa odstraňujú vhodnými technologickými postupmi pri spracovaní, modifikáciami jeho vlastností, prípadne úpravami rôznymi látkami.

Hlavný cieľ našej bakalárskej práce spočíval v prehĺbení našich znalostí, zároveň sme sa chceli dozvedieť, či sa navlhavosť dreva líši u rôznych druhov dreva s tým, vedomím, že navlhavosť dreva súvisí okrem iného aj z napučením a zosychaním dreva a jeho rozmerovými zmenami.

Motivácia tejto práce je, že sme chceli experimentálne potvrdiť alebo vyvrátiť teoretický model sorpčnej izotermy, ktorá nebola experimentálne overená. Prišli sme aj k návrhu na zlepšenie a navrhli sme konkrétne rovnovážne vlhkosti dreva pre každý druh dreva smrek, buk, dub pri určitej vlhkosti vzduchu a teplote.



## 2 LITERÁRNY PREHĽAD

Okrem viacerých príspevkov z odborných časopisov, ktoré sme našli a použili v bakalárskej práci, vychádzame z troch základných kníh od Kollmana a Côte (1968), Siaua (1984) a Skaara (1988).

### 2.1 Vlhkosť a navíhavosť

Požgaj et al. (1997) rozumie pod vlhkosťou dreva množstvo vody nachádzajúce sa v dreve. V prípade, že je vyjadrené pomerom hmotnosti vody k hmotnosti absolútne suchého dreva hovoríme o absolútnej vlhkosti, ale ak sa vlhkosť dreva vyjadruje pomerom hmotnosti vody a hmotnosti mokrého dreva, v takomto prípade hovoríme o relatívnej vlhkosti (ďalej len RVV).

Horáček (2008) uvádza, že najčastejšie sa absolútna a relatívna vlhkosť vyjadruje podľa vzťahov:

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

kde  $m_w$  - hmotnosť vlhkého dreva (kg, g),  $m_0$  - hmotnosť absolútne suchého dreva (kg, g) a  $m_v$  - hmotnosť vody (kg, g)

Podľa Rackovej (2015) sa vlhkosť skúšobného vzorku  $W$  sa vypočíta ako percento z hmotnosti s presnosťou na 0,1% podľa vzorca:

$$W_r = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100 \quad (2.1b)$$

kde  $W_r$  je referenčná vlhkosť skúšobného vzorku v %,

$m_1$  je hmotnosť skúšobného vzorku v gramoch pred sušením

$m_2$  je hmotnosť skúšobného vzorku v gramoch po sušení

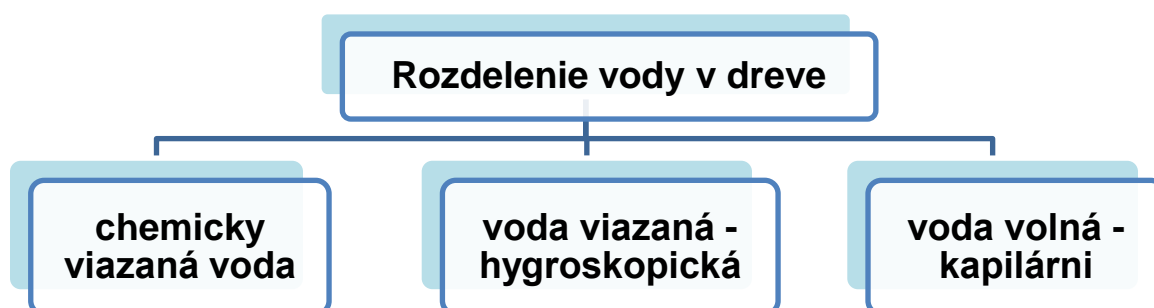
Viacerí autori konštatujú (Gandelová – Horáček – Šlezingerová, 2014), že: vlhkosť dreva má veľký význam pri spracovaní dreva a používaní výrobkov z dreva. Táto vlhkosť sa označuje za technickú vlhkosť. Technická vlhkosť zahrňuje tak

výrobnú ako prevádzkovú vlhkosť. Ako obecné pravidlo sa považuje pravidlo, že výrobná vlhkosť sa má rovnať prevádzkovej vlhkosti, resp. u niektorých druhov výrobkov má byť o 1 – 2 % nižšia. Tým sa predídne nežiaducim deformáciám v dôsledku kolísania teploty a relatívnej vlhkosti prostredia.

Drevo je materiálom, ktorý má schopnosť meniť svoju vlhkosť podľa vlhkosti okolitého vzduchu, preto ak vzorku dreva umiestnime do prostredia, ktoré má konštantné parametre a necháme ju tam dostatočne dlho, docielime tým stav vlhkostnej rovnováhy (Požgaj et al., 1997).

## 2.2 Rozdelenie vody v dreve

Na základe toho, akým spôsobom je voda uložená v dreve môžeme ju rozdeliť na chemicky viazanú, viazanú – hygroskopickú a voľnú – kapilárnu. Chemicky viazaná voda je súčasťou chemických zlúčenín, a nie je možné ju odstrániť z dreva sušením, ale jedine spálením. Je možné ju zistiť pri chemických analýzach dreva, pričom jej celkové množstvo predstavuje 1 – 2 % sušiny dreva. V prípade chemicky viazanej vody je nevyhnutné poznamenať, že pri charakteristike fyzikálnych a mechanických vlastností nemá žiadny význam. Voda viazaná – hygroskopická nachádzajúca sa v bunkových stenách je viazaná vodíkovými mostmi na hydroxylové skupiny OH amorfní časti celulózy a hemicelulózy a má zásadný význam pri charakteristike fyzikálnych a mechanických vlastností. Voda voľná – kapilárna je prítomná iba za predpokladu výskytu vody viazanej, tzn. pri vlhkosti dreva od 30 % do maximálnej vlhkosti okolo 150 – 200 %. V dreve vyplňuje lumeny buniek a medzibunkové priestory (pozri obr. 1).



Obr. 1 Rozdelenie vody v dreve

Zdroj: Gandelová – Horáček – Šlezingerová (2014)

### 2.3 Rovnovážna vlhkosť dreva

Rovnovážna vlhkosť dreva (EMC), je definovaná ako obsah vlhkosti v dreve je prírastok alebo úbytok vlhkosti. Vzťah medzi relatívnou vlhkosťou vzduchu (EMC) a teplotou je znázornená v tab. 1. Pre väčšinu praktických účelov, hodnoty v tab. 1 môžu byť aplikované na drevo akéhokoľvek druhu. Tieto hodnoty boli vypočítané z nasledujúcej rovnice pre výpočet sorpčnej izotermy:

$$EMC (\%) = \frac{1,800}{W} \left[ \frac{Kh}{1-Kh} + \frac{K_1Kh+2K_1K_2K^2h^2}{1+K_1Kh+K_1K_2K^2h^2} \right] \quad (2.3)$$

kde:  $h$  je relatívna vlhkosť a parametre  $W$ ,  $K$ ,  $K_1$  a  $K_2$  závisia na teplote:

pre teplotu  $T$  v °C,

$$W=349+1,29T+0,0135T^2$$

$$K=0,805+0,000736T-0,00000273T^2$$

$$K_1=6,27-0,00938T-0,00293T^2$$

$$K_2=1,91+0,0407T+0,000293T^2$$

pre teplotu  $T$  v °F,

$$W=330+0,452T+0,00415T^2$$

$$K=0,791+0,000463T-0,000000844T^2$$

$$K_1=6,34-0,000775T-0,0000935T^2$$

$$K_2=1,09+0,0284T+0,0000904T^2$$

Simpson (1973) ukázal, že táto rovnica dobre zapadá k RVD – RVV – teplotným údajom. Rovnovážna vlhkosť dreva závisí na rovnici + koeficienty  $W$ ,  $K$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  a výpočet tých koeficientov v závislosti na teplote v °C.

Vzťah medzi rovnovážnou vlhkosťou dreva a relatívnou vzdušnou vlhkosťou a teplotou. Teplota v °C alebo vo Farejnhajtoch. Táto tabuľka je považovaná za univerzálny nástroj a platí to s vysokou pravdepodobnosťou len pre smrek Sitku. Táto tabuľka je grafická podoba Kollmanovho diagramu čo taktiež platí len pre smrek Sitku. Veľmi ľahko sa táto tabuľka porovnáva s našimi výpočtami ľahšie ako z Kolmanovým diagramom, pretože sú tu konkrétne výsledky a konkrétne čísla.

Tab. 1 Obsah vlhkosti v % pri rôznych hodnotách relatívnej vlhkosti

Temperature		Moisture content (%) at various relative humidity values																		
(°C)	(°F)	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%
-1.1	(30)	1.4	2.6	3.7	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.4	11.3	12.4	13.5	14.9	16.5	18.5	21.0	24.3
4.4	(40)	1.4	2.6	3.7	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.4	11.3	12.3	13.5	14.9	16.5	18.5	21.0	24.3
10.0	(50)	1.4	2.6	3.6	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.3	11.2	12.3	13.4	14.8	16.4	18.4	20.9	24.3
15.6	(60)	1.3	2.5	3.6	4.6	5.4	6.2	7.0	7.8	8.6	9.4	10.2	11.1	12.1	13.3	14.6	16.2	18.2	20.7	24.1
21.1	(70)	1.3	2.5	3.5	4.5	5.4	6.2	6.9	7.7	8.5	9.2	10.1	11.0	12.0	13.1	14.4	16.0	17.9	20.5	23.9
26.7	(80)	1.3	2.4	3.5	4.4	5.3	6.1	6.8	7.6	8.3	9.1	9.9	10.8	11.7	12.9	14.2	15.7	17.7	20.2	23.6
32.2	(90)	1.2	2.3	3.4	4.3	5.1	5.9	6.7	7.4	8.1	8.9	9.7	10.5	11.5	12.6	13.9	15.4	17.3	19.8	23.3
37.8	(100)	1.2	2.3	3.3	4.2	5.0	5.8	6.5	7.2	7.9	8.7	9.5	10.3	11.2	12.3	13.6	15.1	17.0	19.5	22.9
43.3	(110)	1.1	2.2	3.2	4.0	4.9	5.6	6.3	7.0	7.7	8.4	9.2	10.0	11.0	12.0	13.2	14.7	16.6	19.1	22.4
48.9	(120)	1.1	2.1	3.0	3.9	4.7	5.4	6.1	6.8	7.5	8.2	8.9	9.7	10.6	11.7	12.9	14.4	16.2	18.6	22.0
54.4	(130)	1.0	2.0	2.9	3.7	4.5	5.2	5.9	6.6	7.2	7.9	8.7	9.4	10.3	11.3	12.5	14.0	15.8	18.2	21.5
60.0	(140)	0.9	1.9	2.8	3.6	4.3	5.0	5.7	6.3	7.0	7.7	8.4	9.1	10.0	11.0	12.1	13.6	15.3	17.7	21.0
65.6	(150)	0.9	1.8	2.6	3.4	4.1	4.8	5.5	6.1	6.7	7.4	8.1	8.8	9.7	10.6	11.8	13.1	14.9	17.2	20.4
71.1	(160)	0.8	1.6	2.4	3.2	3.9	4.6	5.2	5.8	6.4	7.1	7.8	8.5	9.3	10.3	11.4	12.7	14.4	16.7	19.9
76.7	(170)	0.7	1.5	2.3	3.0	3.7	4.3	4.9	5.6	6.2	6.8	7.4	8.2	9.0	9.9	11.0	12.3	14.0	16.2	19.3
82.2	(180)	0.7	1.4	2.1	2.8	3.5	4.1	4.7	5.3	5.9	6.5	7.1	7.8	8.6	9.5	10.5	11.8	13.5	15.7	18.7
87.8	(190)	0.6	1.3	1.9	2.6	3.2	3.8	4.4	5.0	5.5	6.1	6.8	7.5	8.2	9.1	10.1	11.4	13.0	15.1	18.1
93.3	(200)	0.5	1.1	1.7	2.4	3.0	3.5	4.1	4.6	5.2	5.8	6.4	7.1	7.8	8.7	9.7	10.9	12.5	14.6	17.5
98.9	(210)	0.5	1.0	1.6	2.1	2.7	3.2	3.8	4.3	4.9	5.4	6.0	6.7	7.4	8.3	9.2	10.4	12.0	14.0	16.9
104.4	(220)	0.4	0.9	1.4	1.9	2.4	2.9	3.4	3.9	4.5	5.0	5.6	6.3	7.0	7.8	8.8	9.9			
110.0	(230)	0.3	0.8	1.2	1.6	2.1	2.6	3.1	3.6	4.2	4.7	5.3	6.0	6.7						
115.6	(240)	0.3	0.6	0.9	1.3	1.7	2.1	2.6	3.1	3.5	4.1	4.6								
121.1	(250)	0.2	0.4	0.7	1.0	1.3	1.7	2.1	2.5	2.9										
126.7	(260)	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.4												
132.2	(270)	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4													

Zdroj: Fitzpatrick et al., 2013

U smreku sitky (Sitka spruce) sme zistili, že sorpčná izoterma má oveľa väčšie hodnoty rovnovážnej vlhkosti dreva z výnimkou medzery hydroskopicity. Domnievame sa, že je to preto, lebo drevo smreku Sitky má menšiu hustotu než náš smrek v ČR (Fitzpatrick et al., 2013).

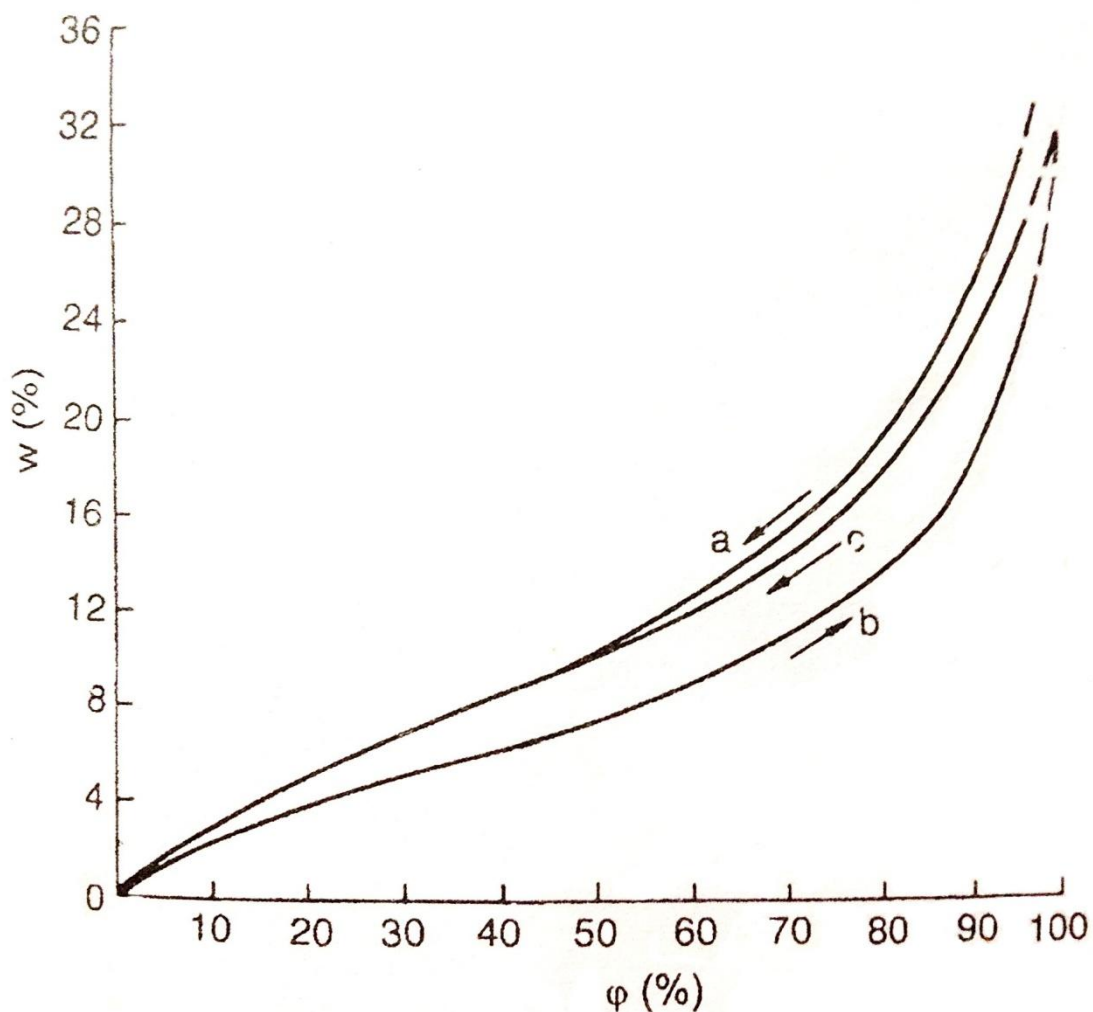
#### 2.4 DeBoer – Zwickerova sorpcia:

$$w = \frac{1}{B} \ln \frac{A}{\ln \frac{1}{\varphi}} \quad (2.4)$$

Kde koeficienty A a B sú funkciou teploty:

$$A = 7,731706 - 0,014348.T$$

$$B = 0,008746 + 0,000567.T$$



Obr. 2 Sorpčná izoterma dreva (*Tilia* sp.) pri teplote 30 °C.

**a** – iniciatívna desorpcia, **b** – adsorpcia, **c** – oscilujúca sorpcia.

V odbornej literatúre a vedeckých článkoch sme našli desiatky sorpčných izoteriem, a je len na čitateľovi akú sa rozhodne použiť. Veľká výhoda pri nájdení sorpčnej izotermy je, keď z danou sorpčou izotermou je zhoda z experimentom.

**Langmuirova, Dentova a BET sorpce** – tieto teórie vychádzajú z povrchových sorpčných teórií a predpokladajú sorpciu vody v dvoch formách.

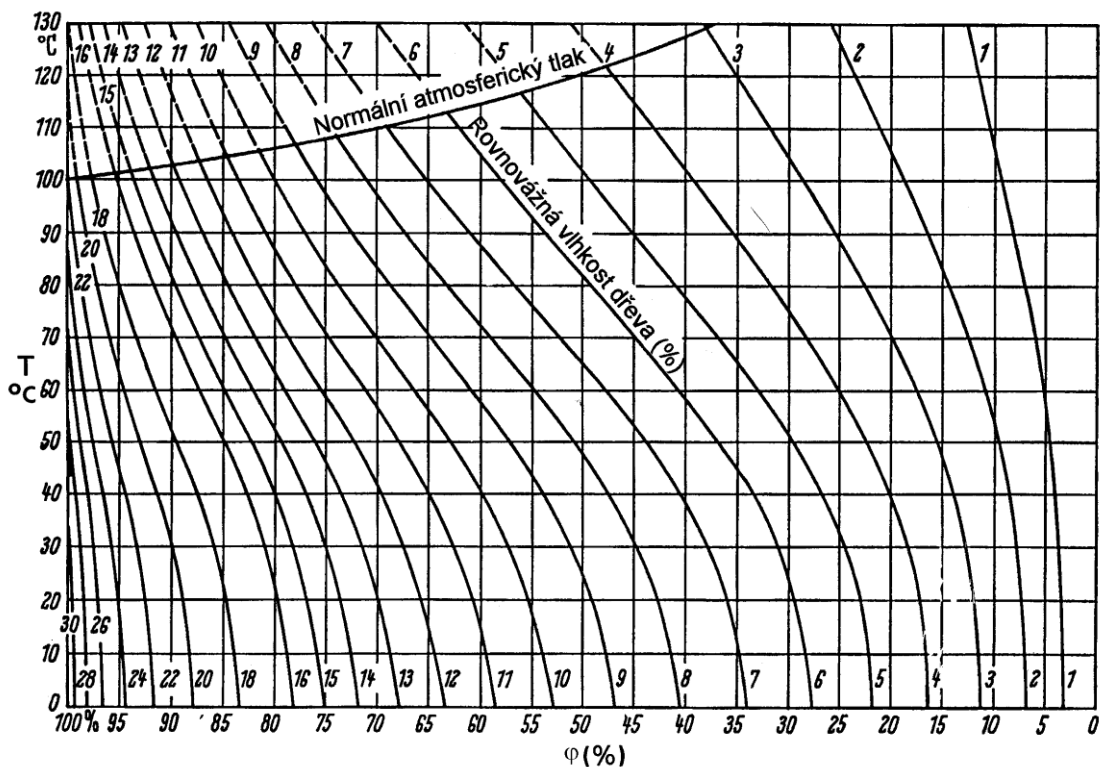
1) primárne – monomolekulárna sorpcia na izolovaných primárnych sorpčných miestach v bunečnej stene.

2) sekundárne – polymolekulárna sorpcia v dôsledku chemických síl.

## 2.5 Sorpčná izoterma u dreva smrek a Kollmanov diagram

Sorpčná izoterma vyjadruje závislosť rovnovážnej vlhkosti dreva od relatívnej vlhkosti vzduchu pri konštantnej teplote (Požgaj et al., 1997). Rozdiel sorpčných izoteriem pri absorpcii a desorpcii sa nazýva hysterezou sorpcie a pre rozpätie relatívnej vzdušnej vlhkosti (ďalej len RVV) 10 – 90 % je pomerne konštantný (Gandelová – Horáček – Šlezingerová (2014).

Rovnovážna vlhkosť dreva, ako funkcia relatívnej vlhkosti a teploty vzduchu, závisí na druhu dreva a je daná v referenčných tabuľkách (žiadne referenčné tabuľky pre rôzne druhy dreva neexistujú, väčšinou sa vychádza zo smreku, kde graf (pozri obr. 2) založený na meraní Keylwertha a Loughborougha má podobu sieťky (Kollmann a Côté, 1968).



Obr. 3 Nomogram pre stanovenie rovnovážnej vlhkosti dreva v závislosti na relatívnej vzdušnej vlhkosti  $\varphi$  a teplote prostredia  $T$

## 2.6 Chemikálie a ich rovnovážna vlhkosť vzduchu nad nimi

Rovnovážna vlhkosť dreva bola zisťovaná v exikátoroch váhovou metódou. V exikátoroch sme sa rozhodli že budeme udržiavať relatívnu vlhkosť vzduchu nad roztokmi soli (pozri tab. 2).

Tab. 2 Relatívna vlhkosť vzduchu nad nasýtenými vodnými roztokmi solí  
v %

Teplota °C	LiCl H <sub>2</sub> O	MgCl <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O	NaCl	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	KNO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
0	14,7	35,0	60,6	74,9	83,7	97,6	99,1
5	14,0	36,4	59,2	75,1	82,6	96,6	98,4
10	13,3	34,2	57,8	75,2	81,7	95,5	97,9
15	12,8	33,9	56,3	75,3	81,1	94,4	97,5
20	12,4	33,6	54,9	75,5	80,6	93,2	97,2
25	12,0	33,2	53,4	75,8	80,3	92,0	96,9
30	11,8	32,8	52,0	75,6	80,0	90,7	96,6
35	11,7	32,5	50,6	75,5	79,8	89,3	96,4
40	11,6	32,1	49,2	75,4	79,6	87,9	96,2
45	11,5	31,8	47,7	75,1	79,3	86,5	96,0
50	11,4	31,4	46,3	74,7	79,1	85,0	95,8

Rozhodli sme sa pre nasýtené roztoky soli, aj keď je možné použiť aj koncentrácie kyselín podľa európskej technickej normy (ČSN EN ISO 12571).

Tab. 3 ukazuje a odporúča pracovať s niektorými z uvedených údajov, najmä o koncentrácii kyseliny sírovej, ktorá je bežne používaná (ČSN 490143).

Tab. 3 Relatívna vlhkosť vzduchu pri 20°C nad nasýtenými roztokmi solí a nenasýtenými roztokmi kyselín

Zlúčenina	$\varphi$ (%)	Zlúčenina	$\varphi$ (%)
H <sub>2</sub> O	100	10% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	96
CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O	98	16% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	91
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .10H <sub>2</sub> O	93	30% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	75
K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	88	40% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	54
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	81	50% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	33
NaC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> .3H <sub>2</sub> O	76	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	96
NaNO <sub>2</sub>	66	BaCl <sub>2</sub>	91
NaBr.2H <sub>2</sub> O	58	NaCl	75
Na <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> .2H <sub>2</sub> O	52	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	54
KNO <sub>2</sub>	45	MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	33
CrO <sub>3</sub>	35	NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	93,1
KC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	20	NH <sub>4</sub> Cl	79,5
LiCl.H <sub>2</sub> O	15	CaCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	32,5

Rovnovážna vlhkosť dreva okrem relatívnej vzdušnej vlhkosti je ovplyvnená aj teplotou.

## 2.7 Absorpcia a desorpcia

Keď je vlhkosť dreva nižšia než odpovedá stavom vlhkostnej rovnováhy, drevo priama – absorbuje – vodu vo forme vodnej páry z okolitého ovzdušia, pokiaľ nedosiahne stav vlhkostnej rovnováhy. Pokiaľ je vlhkosť dreva vyššia než stav vlhkostnej rovnováhy, nastáva proces opačný a drevo vodu stráca, čo nazývame desorpcii. Rozdiel medzi absorpciou a desorpciou je zhruba 1 až 2 %. (Gandelová et al., 2014).

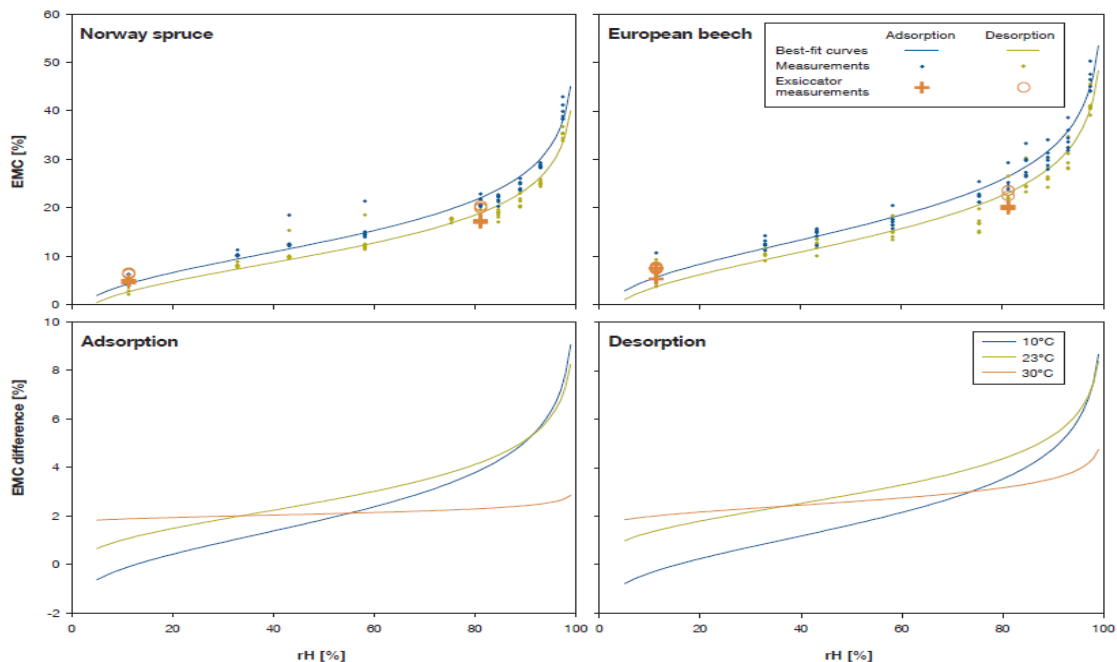
Hysterézu možno vysvetliť ako efekt desorpcie na aktívnu sorpčnú stranu pozdĺž celulóзовých reťazcov, ktoré počas doby ako strácala vodu zostala zviazaná k sebe. Počas následnej adsorpcie na povrchu dochádza k namáhaniu tlakom, ktorý znižuje rovnovážnu vlhkosť dreva a navyše vedie k tomu, že niektoré z väzieb medzi reťazcami budú prerušené, kým sa nedosiahne bod nasýtenia vlákien. Následným desorpčným krokom sa bude opakovať predchádzajúci proces (Siau, 1995).

Drevo je hygroskopický materiál. Obr. 3 ukazuje, koľko vodnej páry drevo absorbuje na rôzne relatívne vlhkosti (%). Tento diagram sa nazýva sorpční izoterma



alebo vlhkosť rovnovážna krivka. To je podobné pre všetky drevá, pretože všetky druhy dreva majú podobnú kompozíciu bunkovej steny (Wadsö, 1993).

Výsledky experimentov - exikátorov sú podobné tým zo špeciálneho sorpčného zariadenia. Rozdiely v izotermách smreku a buku sú uvedené v obr. 4. Buk lesný má obvykle vyššiu (EMC) to jest rovnovážnu vlhkosť dreva než nórsky smrek. Táto odchýlka sa zvyšuje z rastúcim (RH) to jest z rastúcou relatívnou vlhkosťou vzduchu v nízkych a stredných teplotách zatiaľ čo zostáva takmer konštantná pri vysokých teplotách (Schunk et al., 1987).

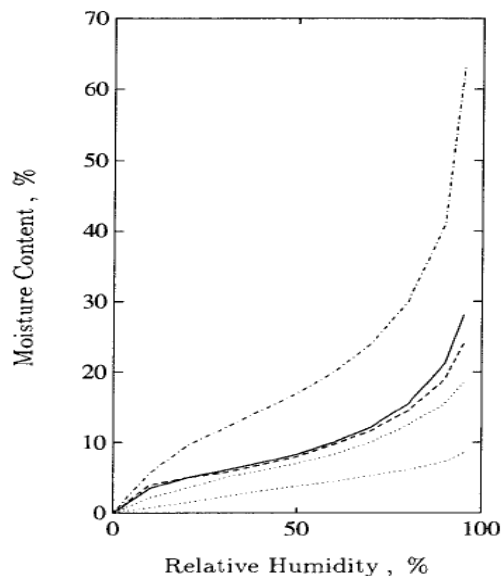


Obr. 4 Absorpcia a desorpcia

Izotermy na obr. 4 sú pre absorpciu. Odpovedajúce krivky desorpcie spočívajú predovšetkým z kriviek pre absorpciu, pretože tam je hysteréza v chovaní sorpčnej izotermy. Sorpčná izoterma dáva vlhkosť. Obsah dreva do relatívnej vlhkosti okolia 100%. V tomto okamžiku sú bunkové steny z dreva nasýtené vlhkosťou. Vlhosť, obsah, hmotnosť vody delené hmotnosť suchého dreva, je potom približne 30%. Tento bod sa nazýva bod nasýtenia vlákien (lumenov).

Relatívna vlhkosť nad 84% znamená, že nie je prítomna kvapalná voda. V takýchto relatívnych vlhkostiach absorbuje všetku vlhkosť látky v bunkovej stene. Sorpčná izoterma je adsorpcia v bunkovej stene dreva. Chemickými procesmi, je možné oddeliť komponenty bunkovej steny a taktiež ich sorpčné izotermy. Obr. 5 ukazujú

výsledky týchto meraní, z ktorých je možné skonštruovať sorpčné izotermy celého dreva pridaním krivky, kde jednotlivé súčasti vynásobíme ich hmotnosťou frakcie v dreve (Christensen a Kelsey 1959, Takamura 1968). Máme však na pamäti, že chemické procesy použité k izolácii komponentov bunkových stenách pravdepodobne zmenia pôvodnú štruktúru týchto polymérov.



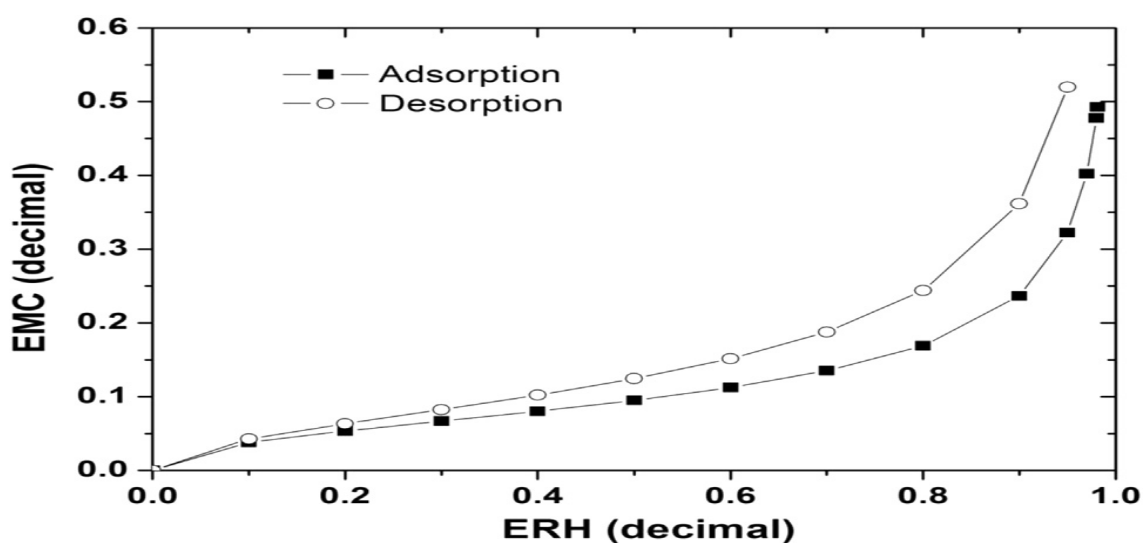
Obr. 5 Adsorpčná izoterma dreva

Pri 25 °C : Drevo (—), Hemicelulóza (---), Celulóza (- - -) a Lignin (····). Dve krivky sú zobrazené na lignin. Príprava dvoma rôznymi spôsobmi (prispôbené z Christensena a Kelseya, 1959). Obsah vlhkosti je vyjadrené ako hmotnosť vody na hmotnosť suchého dreva (%) (Wadsö, 1993).

## 2.8 Transport vlhkosti v dreve

Transport vodnej pary v dreve je difúziou, tj. náhodný pohyb molekúl vedie k vyrovnaniu rozdielov v koncentrácii. To je veľmi častý proces, ktorý sa nachádza vo všetkých pevných látkach, kvapalinách a parách, napr. jemné parfumy za bezvetria. Adolf Fick (1855, pozri tiež Tyrell 1964) študovali difúzie iónov vo vode a bol zistený zákon, ktorý sa od tej doby volal Fickův zákon (Wadsö, 1993).

Cieľom štúdie od Mitchella a Overenda bolo zistiť, aký vplyv teploty a relatívnej vlhkosti na sorpčných vlastnostiach a rýchlosť sušenia drevnej biomasy, a vytvoriť model sorpčnej izotermy. Experiment bol tvorený v prostredí s regulovanou teplotou komory. Výsledky ukázali že pri nízkych teplotách a vysokej relatívnej vlhkosti okolitého vzduchu viedlo k vyššej rovnováhe obsahu rovnovážnej vlhkosti deva (EMC) pre desorpciu a adsorpčné procesy. Pri vyššej teplote, bola relatívna vlhkosť dreva (EMC) dosiahnutá v priebehu kratšej doby sušenia a tým pádom indikuje vyššiu mieru sorpcie. Relatívna vlhkosť vzduchu tiež pozitívne koreluje s rýchlosťou adsorpcie (pozri obr. 6).



Obr. 6 Adsorpcia a desorpcia krivky ako predpovedala modifikovaná Oswin rovnica na základe experimentálnych údajov.

Zdroj: Mitchell a Overend (ed.)

## 2.9 Hustota dreva

Pod hustotou dreva rozumieme hmotnosť jeho objemovej jednotky, pričom sa najčastejšie vyjadruje v  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  alebo  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ . Vedieť aká je hustota dreva nadobúda na význame v prípade mechanického a chemického spracovania, kde sa kladie dôraz na hmotnostné množstvo drevnej hmoty a kde je potrebné vedieť, koľko drevnej hmoty obsahuje konkrétna objemová jednotka. Zároveň je hustota dreva jedným z ukazovateľov vhodnosti použitia dreva na také účely, kde sa vyžaduje nízka hmotnosť

a súčasne vysoká pevnosť alebo pružnosť (stavebníctvo), ale aj pri použití dreva na hudobné nástroje a pod. (Požgaj et al., 1997).

Gandelová – Horáček – Šlezingerová (2014) rozumie pod drevnou substanciou hmotu bunkových stien bez submikroskopických dutín, ktorá je označovaná  $\rho_s$ , a je vyjadrená pomerom hmotnosti drevnej substancie  $m_s$  a príslušného objemu  $V_s$ :

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (2.9a)$$

Pre hlavný našej bakalárskej práce bolo nevyhnutné oboznámiť sa aj s pojmom hustota dreva z dôvodu za účelom dosiahnutia priemerných hodnôt vzoriek jednotlivých druhov dreva. V nasledujúcej kapitole sme sa bližšie zaoberali vlhkosťou a navíhavosťou dreva.

Dreviny sú v zmysle Wadsa (1993) rozdelené do štyroch hlavných skupín:

- 1) ihličnaté
- 2) listnaté kruhovite - pórovité
- 3) listnaté polokruhovite - pórovité
- 4) listnaté roztrúšene - pórovité dreva.

Dreva podľa hustoty pri vlhkosti  $w = 12\%$  delíme dreva na :

- ľahké (350 do 540 kg/m<sup>3</sup>) napr.: (SM) smrek, (JD) jedľa, (BO) borovica a i.
- stredne ťažké (540-750 kg/m<sup>3</sup>) napr.: (BK) buk, (DB) dub a i.
- ťažké (nad 750 kg/m<sup>3</sup>) napr.: (AG) agát, (HB) hrab a i. (zdroj: <http://thuja.mendelu.cz>).

Vzorec pre výpočet vlhkého dreva:

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad (2.9b)$$

Kde  $\rho_w$  je hustota dreva pri 12 % vlhkosti.

Súčasne existuje závislosť vlhkého dreva na hustote suchého dreva:

$$\rho_w = \rho_0 \frac{1+w}{1+K_{av}w} \quad (2.9c)$$

### 3 CIEĽ PRÁCE

Hlavným cieľom bakalárskej práce bolo porovnať namerané a vypočítané hodnoty rovnovážnej vlhkosti dreva z teóriou sorpčnej izotermy, ktoré boli prevedené v laboratórnych podmienkach.

Na dosiahnutie hlavného cieľa bolo nevyhnutné stanoviť a rozpracovať čiastkové ciele, ktoré spočívali:

- v štúdiu odbornej literatúry, na základe ktorej sme popísali teóriu sorpcie u dreva, pričom sme sa hlavne zamerali na modely popisujúce sorpčnú izotermu.

- v stanovení sorpčnej izotermy a rovnovážnej vlhkosti dreva pre zvolené druhy dreva, kde sme sa konkrétne zamerali na smrek, buk a dub. Na zistenie sorpčnej izotermy nami vybraných druhov dreva sme použili experiment, kde sme rovnovážne vlhkosti dreva stanovili nad nasýtené roztoky solí pomocou piatich relatívnych vzdušných vlhkostí.

- vo výpočte sorpčnej izotermy na základe modelu a jeho porovnanie s výsledkami experimentu.

- v navrhnutí tabuliek, v ktorých sme spracovali rovnovážna vlhkosť dreva na - rovnovážnej vlhkosti vzduchu a teplote vzduchu.

V nasledujúcej kapitole našej bakalárskej práce sme sa podrobne zaoberali metodikou práce, ktorú sme použili pri písaní našej práce.

## **4 METODIKA PRÁCE**

Pri písaní našej bakalárskej práce sme použili viacero metód. Podstata metodiky písania našej bakalárskej práce spočívala v zbere, zhromažďovaní, triedení informácií z rôznych zdrojov, či už z domácich, alebo zahraničných kníh, odborných časopisov a internetových stránok zameraných na tému sorpčnej izotermy dreva a navlhavosti dreva, kde sme použili lineárnu metódu. Takto získané informácie sme následne analyzovali, tzn., rozkladali na menšie časti. V praktickej časti našej bakalárskej práce sme ako výskumnú metódu použili experiment, ktorým sme zisťovali sorpčnú izotermu rôznych druhov dreva (smrek, buk, dub) a pri rôznej rovnovážnej vlhkosti vzduchu. Metódu komparácie sme použili pri porovnávaní výsledkov nášho experimentu s teóriou sorpčnej izotermy uvedenej v prvej kapitole našej bakalárskej práce. Jednoduchý aritmetický priemer sme použili pri výpočte rovnovážnej vlhkosti dreva. Metódu syntézy (zovšeobecňovanie) sme použili v závere našej bakalárskej práce. Pri písaní bakalárskej práce sme sa snažili postupovať logicky, výsledkom čoho bola štruktúra bakalárskej práce, ktorá pozostáva zo siedmich hlavných kapitol.

### **4.1 Absorpcia a desorpcia**

V experimente sme sa rozhodli pracovať len absorpciou. Bolo to pre nás jednoduchšie vzorky vysušiť, potom klimatizovať v podmienkach stanovených RVV nad nasýteným roztokom soli, než aby sme išli z druhej strany a pracovali z mokrým drevom a čakali ako dlho sa budú vyrovnávať podmienky. Ale vieme, že to čo sme v experimente robili popisuje len absorpcia.

### **4.2 Hustota**

Samotný priebeh experimentu pozostával z niekoľkých fáz. V predprípravnej fáze experimentu sme zamerali na výber druhov dreva u ktorých budeme analyzovať sorpčnú izotermu. Zo skupiny ihličnatých drev sme za zástupcu vybrali smrek, zo skupiny kruhovite-pórovitých sme vybrali dub a zo skupiny roztrúseno-pórovitých sme

zvolili buk. Jednotlivé vzorky druhov dreva sme narezali na rozmer 10,5 mm x 10,5 mm x 5,3 mm, pričom z každého nami vybraného dreva sme vyrobili 200 kusov vzoriek. Ďalej sme pristúpili k zisteniu priemernej hustoty vzoriek smreku, buku a dubu aby sme urobili ďalší výberový súbor.

Triedenie vzoriek bolo len vizuálne, podľa uhlu letokruhov v jednotlivých smeroch a podľa hmotnosti. (pozri obr. 7).



Obr. 7 Triedenie vzoriek

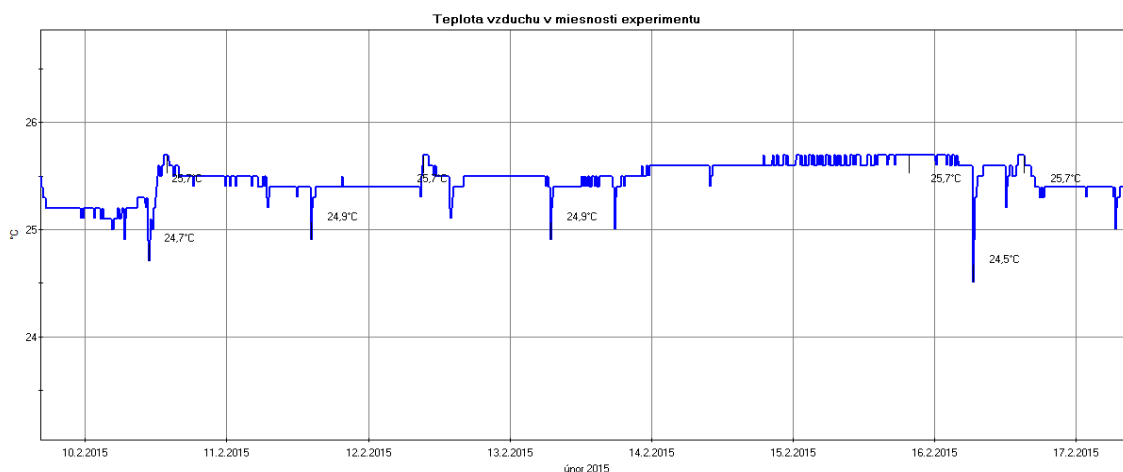
Hustota dreva nás zaujímala z dôvodu, aby sme vybrali také vzorky dreva ktoré budú najpodobnejšie veľkosti, smerom letokruhov a váhou. Zo všetkých vzorkou sme vybrali z každého druhu dreva 100 kusov ktoré mali hustoty:

- priemerná hustota vzoriek smreku (*Picea Abies*) bola  $\rho = 320 \text{ kg/m}^3$
- priemerná hustota vzoriek buku (*Fraxinus*) bola  $\rho = 450 \text{ kg/m}^3$
- priemerná hustota vzoriek dubu (*Quercus*) bola  $\rho = 412 \text{ kg/m}^3$

### 4.3 Teplota

V súvislosti s teplotou je nevyhnutné uviesť, že sme ju meriali, pričom sa zaznamenávala a ukládala do prístroja.

Na obr. 8 je znázornené, že v miestnosti v ktorej experiment prebiehal sa teplota menila od max. 25,7 °C do min. 24,5 °C. Keďže minimálne hodnoty 24,5 °C boli len na krátku dobu a v malých intervaloch ako je na grafe z prístroja vidieť, tak sme tieto údaje nepovažovali za dôležité a priemer bol vypočítaný a spresnený na hodnotu 25,4 °C (pozri obr. 8).



Obr. 8 Vývoj teploty vzduchu v miestnosti experimentu (priemer 25,4 °C) pomocou meriaceho prístroja GMH 3350 značky Greisinger electronic

#### 4.4 Stanovenie rovnovážnej vlhkosti dreva váhovou metódou

Po uplynutí uvedenej doby sme vzorky vybrali z exikátorov, odvážili a vysušili pri teplote 103°C (±2°C) na 4 hodiny. Takto vysušené vzorky sme opäť odvážili a získané údaje sme spracovali do prehľadných tabuliek, v ktorých sme podľa čísla vzoriek jednotlivých druhov dreva uviedli ich váhu tesne po vybraní z exikátorov ( $m_1$ ) ako aj váhu vzoriek po vysušení ( $m_0$ ). Pomocou vzorca (4.4a) sme váhovou metódou vypočítali RVD. Pri každom druhu dreva sme vybrali minimálnu a maximálnu RVD. Pri tvorbe modelu bolo najdôležitejšie stanoviť teplotu v miestnosti počas experimentu, ktorá bola v našom prípade 25,4°C. Následne sme tieto údaje spracovali do grafov, kde sme porovnali výsledky experimentu s modelom.

V experimente sme sa rozhodli pracovať len s asorpciou, tzn, že vzorky boli vysušené a až potom sa postupne ustálila ich vlhkosť nad nasýtených roztokoch soli.

$$W = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (4.4)$$

kde  $W$  - je referenčná vlhkosť skúšobného vzorku v %

$m_w$  - je hmotnosť skúšobného vzorku v gramoch pred sušením

$m_0$  - je hmotnosť skúšobného vzorku v gramoch po sušení



#### 4.5 Model sorpčnej izotermy

Sorpčná izoterma pre jednotlivá dreva bola konštruovaná na základe teórie termodynamiky vody viazanej v dreve, a to podľa vzťahu medzi zmenou entalpie ( $\Delta H$ ) a pomocou voľnej energie ( $\Delta G$ ) vody viazanej.

Miesto štandardného vyjadrenia:

$$\Delta H_s = \Delta G_s + T \cdot \Delta S \quad (4.5a)$$

kde  $\Delta H_s$  je zmena entalpie,

$\Delta G_s$  je zmena voľnej energie,

$\Delta S_s$  je zmena entalpie,

$T$  je absolútna teplota.

sme použili:

$$\Delta H_s = \Delta G_s \cdot K \quad (4.5b)$$

kde  $K$  je koeficient degradácie energie

$$K = 1 - \frac{T \Delta S_s}{\Delta G_s} \quad (4.5c)$$

Zmena entalpie vody viazanej ( $\Delta H_s$ ) odpovedá diferenciálnemu teplu sorpcie ( $E_s$ )

$$-\Delta H_s = +E_s \quad (4.5d)$$

Diferenciálne teplo sorpcie ( $E_s$ ) je možné podľa Boermanova zákona popísať ako závislosť na vlhkosti dreva:

$$E_s = a \cdot e^{-b \cdot w} \quad (4.5e)$$

kde  $w$  - vlhkosť dreva (%)

$a$  – diferenciálne teplo suchého dreva ( $w = 0\%$ )(J.mol<sup>-1</sup>)

$b$  – tvarový koeficient (-)

Zmena voľnej energie podľa Boerovho zákona pre univerzálny plyn je :

$$\Delta G = R \cdot T \cdot \ln \varphi \quad (4.5f)$$

kde  $R$  – univerzálna plynová konštanta ( $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$T$  – absolútna teplota (K)

$\varphi$  – relatívna vzdušná vlhkosť (-)

Koeficient degradácie energie ( $K$ ) môžeme podobne ako diferenciálne teplo sorpcie ( $E_s$ ) vyjadriť :

$$K = m \cdot e^{n \cdot w} \quad (4.5g)$$

kde  $m$  a  $n$  sú koeficienty závislé na teplote.

Po dosiahnutí  $E_s$ ,  $\Delta G$  a  $K$  do termodynamической rovnice dostávame:

$$-Q \cdot e^{-bw} = R \cdot T \cdot \ln \varphi \cdot m \cdot e^{n \cdot w} \quad (4.5h)$$

Odkiaľ po úprave:

$$\ln \frac{1}{\varphi} = \frac{a}{m \cdot R \cdot T} \cdot e^{-(b+n) \cdot w} \quad (4.5i)$$

Táto rovnica je formálne podobná rovnica sorpčnej izotermy podľa Andersona – McCarthyho:

$$\ln \frac{1}{\varphi} = A \cdot e^{-Bw} \quad (4.5j)$$

kde  $A = 7,7317 - 0,01435 T$

$B = 0,00875 + 0,000567 T$

Táto sorpčná izoterma platí pre smrekové drevo.

Pre známu teplotu  $T$ , (napr.  $T = 293$  K) poznáme diferenciálne teplo sorpcie smrekového dreva pri  $w = 0$  % ( $a = 17,331 \text{ J.mol}^{-1}$ ) a známi tvarový koeficient diferenciálneho tepla sorpcie u smreku ( $b = 0,119$ ) môžeme koeficienty  $m$  a  $n$  vypočítať zo vzťahu:

$$\frac{Q}{m.R.T} = A \quad (4.5k)$$

$$b + n = B \quad (4.5l)$$

Priemerná hodnota koeficientu  $m$  pre teplotu 20 - 50 °C je 2.

Priemerná hodnota koeficientu  $n$  pre teplotu 20 – 50 °C je 0,6.

Rovnica sorpčnej izotermy pre akékoľvek ďalšie drevo je potom:

$$\ln \frac{1}{\varphi} = \frac{Q}{2.R.T} . e^{- (b+0,6).w} \quad (4.5m)$$

Koeficienty  $a$  a  $b$  pre rôzne dreva uvádza Požgaj et.al (1997).

Tab. 4 Koeficienty  $a$  a  $b$  pre rôzne dreva

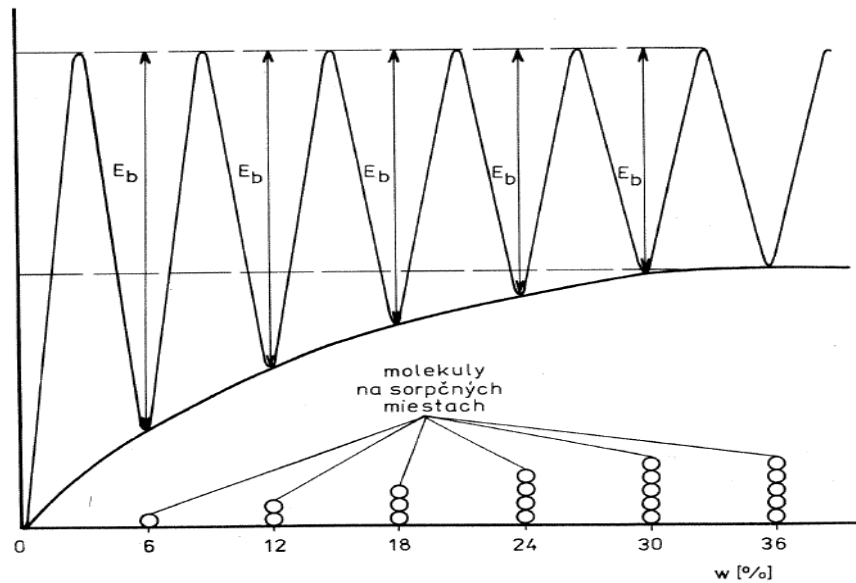
Druh dreva	a	b
SM	17.311	0,119
BK	16.683	0,117
DB	13.988	0,115

Zdroj: Požgaj et.al (1997)

## 4.6 Termodynamika

Pri termodynamike nás zaujímal entalpia celkovej a vnútornej energie vody. Hodnota a tvarový koeficient s ktorými sme vychádzali z údajov uvedených v knihe Štruktúra a vlastnosti dreva od Požgaj et al. a tabuľky od Jokla a Pavlíkovej (1984).

Mechanizmus difúzie v bunkovej stene rozumieme aj tak, že molekula vody je viazaná na danom sorpčnom mieste ako keby spadla do jamy. Aby táto molekula mohla prekonať energetickú bariéru, ktorá ju udržiava v potenciálovej jame, musí získať energiu väčšiu ako je energia aktivácie  $E_b$ . (pozri obr. 9).



Obr. 9 Aktivovaná difúzia vody v dreve a potenciálne jamy

Rovnica pre výpočet krivky, ktoré môže byť ploché alebo ostré v mocnínovej podobe až do medzery hydrokopicity. Záleží na hodnotách ktoré dosadíme z tab. 5 a tab. 6.

$$Q_L = a' \cdot \exp(-b \cdot w) \quad (4.6a)$$

Kde:  $Q_L$  je diferenciálne teplo sorpcie ( $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ )

$a'$  je smernica v ( $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ )

$b$  je tvarový koeficient v ( $\%^{-1}$ )

Hodnoty pre  $Q_L$  su pre každý druh dreva vlhkosť dreva sú hodnoty rôzne a na to nám slúži tab. 5

Tab. 5 Hodnoty diferenciálneho tepla sorpcie  $Q_L$  ( $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) určené zo zmáčacieho tepla

w (%)	BK	DB	BR	TP	BO	SM	priemer
0,5	15,73	14,44	13,27	12,56	17,42	16,31	16,82
1,3	14,33	13,18	12,20	11,54	15,66	15,83	15,20
2,7	12,17	11,23	10,55	9,94	13,00	12,55	12,75
4,0	10,46	9,68	9,22	8,62	10,93	10,75	10,82
6,0	8,26	7,70	7,47	6,97	8,35	8,48	8,41
9,3	5,62	5,27	5,29	4,90	5,38	5,72	5,55
13,3	3,53	3,35	3,49	3,19	3,15	3,55	3,35
16,0	2,57	2,35	2,63	2,38	2,20	2,57	2,39
18,6	1,89	1,82	2,00	1,80	1,55	1,89	1,72

Zdroj: Jokla a Pavlíková (1984)

Tab. 6 Hodnoty koeficientov  $a'$ ,  $b$  v rovnici podľa Skaara (1988), Jokla a Pavlíkovej (1984)

( $a'$  - je diferenciálne teplo sorpcie,  $b$  - je tvarový koeficient)

materiál	$a'$ ( $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ )	$b$ ( $\%^{-1}$ )	prameň
smrek	21,082	0,1440	STAMM – LOUGHBOROUGH (1939)*
smrek	20,631	0,1448	WEICHERT (1963)
buk	16,622	0,1337	WEICHERT (1963)
lis. drevo	21,316	0,1886	WEICHERT (1963)
vlákno	16,564	0,1350	BABBIT (1942)*
hinoki	20,435	0,1420	KAJITA (1896)*
nezn. druh	16,090	0,1240	VOLBEHR (1896)*
<b>buk</b>	<b>16,683</b>	<b>0,1170</b>	JO KEL a PAVLÍKOVÁ (1984)
<b>dub</b>	<b>13,988</b>	<b>0,1145</b>	JO KEL a PAVLÍKOVÁ (1984)
breza	15,299	0,1045	JO KEL a PAVLÍKOVÁ (1984)
topoľ	13,265	0,1047	JO KEL a PAVLÍKOVÁ (1984)
borovica	18,641	0,1337	JO KEL a PAVLÍKOVÁ (1984)
<b>smrek</b>	<b>17,311</b>	<b>0,1191</b>	JO KEL a PAVLÍKOVÁ (1984)
priemer	17,911	0,1260	JO KEL a PAVLÍKOVÁ (1984)

Pramene označené \* sú citované podľa Skaara (1988).

## 4.7 Štatistika

Súbory ktoré sme zmerali, sme následne zhodnotili popisnou štatistikou  $S_x$ ,  $V_x$  a vypočítali sme priemer hodnôt.

**Smerodajná odchylka ( $S_x$ )** – definuje variačný koeficient ( $V_x$ ) ktorý je určeným podielom smerodajnej odchýlky ( $S_x$ ) a priemernými hodnotami vzoriek. Smerodajná odchýlka sa vyjadruje v ( $\text{kg/m}^3$ ).

**Variačný koeficient ( $V_x$ )** – nám udáva hodnotu v (%) a hovorí nám o tom aká je variabilita hodnôt. Priemerná hodnota variačného koeficientu u dreva je 10 – 30 %. Variačný koeficient je interpretácia 3 hodnôt – počtom vzorkou, priemernými hodnotami vzoriek a hustotou.

Variačný koeficient sa vyjadruje bezrozmernou hodnotou.

## 5 MATERIÁL

### 5.1 Hustota vzoriek

V experimente sme sa rozhodli pracovať s drevami s ktorými sa najčastejšie stretávame na našom území. Z druhu ihličnatého dreva som sa rozhodol pre smrek (*Picea*), z kruhovite-pórovitého druhu to bol dub (*Quercus*) a z roztršeno-porovitého druhu dreva buk (*Fagus*).

Pre dosiahnutie určitej presnosti v hustote a v rozmeroch som sa rozhodol triediť vzorky pomocou váženia. Rozmery všetkých vzoriek sa pohybovali v 10,5 mm x 10,5 mm x 5,3 mm (pozri tab. 7).

Tab. 7 Rozmery všetkých vzoriek

Druh dreva	Počet vzoriek (ks)	Rozmery (mm)	Hustota		
			Priemerná hustota ( $\text{kg/m}^3$ )	smerodajná odchýlka ( $S_x$ ) - ( $\text{kg/m}^3$ )	variálny koeficient ( $V_x$ ) (bezrozmerná hodnota)
Smrek (SM)	100	10,5x10,5x5,3	320	18,0	0,058
Buk (BK)	100	10,5x10,5x5,3	450	22,0	0,048
Dub (DB)	100	10,5x10,5x5,3	412	21,0	0,050



Obr. 10 Veľkosť vzoriek

Veľkosť vzoriek sme v prvej fáze vizuálne triedili podľa smeru letokruhov a vzhľadu, v druhej fáze sme merali ich rozmery a následne vážili. Vybrali sme také vzorky, ktoré mali hodnoty čo najviac podobné.

## 5.2 Chemikálie na dosiahnutie vlastných vybraných RVV

Ďalší krok nášho experimentu spočíval v príprave exikátorov, v ktorých sme vytvorili relatívnu vlhkosť vzduchu a to za pomoci nasledujúcich nasýtených roztokov solí:

**1. chlorid horečnatý ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )** – technický hexahydrát, kde na dosiahnutie **RVV 33 %** pri teplote 20 °C bola rozpustnosť 167 g chloridu horečnatého na 100 ml demineralizovanej vody

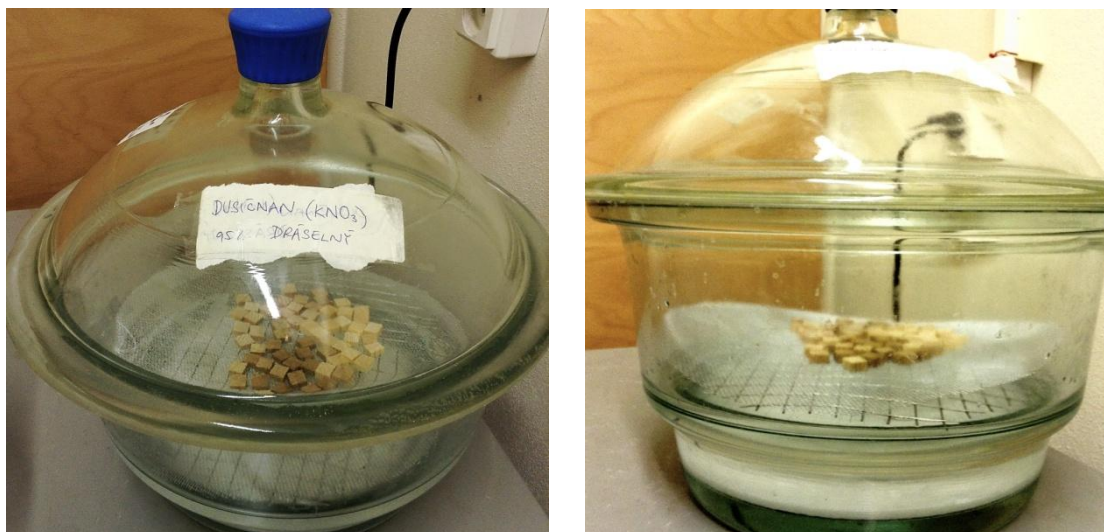
**2. chlorid sodný ( $\text{NaCl}$ )**, kde na dosiahnutie **RVV 75 %** pri teplote 20 °C bola rozpustnosť 35,86 g chloridu sodného na 100 ml demineralizovanej vody,

**3. chlorid draselný ( $\text{KCl}$ )**, kde na dosiahnutie **RVV 86 %** pri teplote 20 °C bola rozpustnosť 34,19 g chloridu draselného na 100 ml demineralizovanej vody,

**4. dusičnan draselný ( $\text{KNO}_3$ )**, kde na dosiahnutie **RVV 95 %** pri teplote 20 °C bola rozpustnosť 31,87 g dusičnana draselného na 100 ml demineralizovanej vody,

**5. demineralizovaná voda ( $\text{H}_2\text{O}$ )** pri teplote 20 °C bola **RVV 99 %**.

Do takto pripravených exikátorov sme do každého z nich vložili sieťku, ktorej účelom bolo zabrániť prepadnutiu vzoriek do roztokov nasýtených solí. Následne sme vložili 20 ks vzoriek smreku do jednotlivých exikátorov, tak sme postupovali aj v prípade buku a dubu (pozri obr. 11).



Obr. 11 Exikátor dusičnanu draselného ( $\text{KNO}_3$ ) so vzorkami smreku, buku a dubu



Vzorky smreku, buku a dubu sme nechali v jednotlivých exikátoroch až do doby, pokiaľ nebola dosiahnutá nami cielená RVV. RVV bola dosiahnutá približne po 30 dňoch uloženia vzoriek dreva do exikátorov pri priemernej teplote v miestnosti 25,4 °C.

## 6 VÝSLEDKY EXPERIMENTU

### 6.1 Hustota vzoriek

Z tab. 8 je evidentne vidieť, že najmenšiu hustotu z drev s ktorými som pracoval, mal smrek potom dub a buk. Hustota vzoriek smreku sa pohybovala od 289 kg/m<sup>3</sup> do 351 kg/m<sup>3</sup>. Hustota vzoriek buku sa pohybovala od 418 kg/m<sup>3</sup> do 482 kg/m<sup>3</sup> a hustota vzoriek dubu sa pohybovala od 370 kg/m<sup>3</sup> do 455 kg/m<sup>3</sup>. Priemerná hustota smreku bola 323 kg/m<sup>3</sup>. Priemerná hustota buku bola 452 kg/m<sup>3</sup> a priemerná hustota dubu 425 kg/m<sup>3</sup>.

Tab. 8 Hustota vzoriek smreku, buku a dubu (kg/m<sup>3</sup>)

Vzorka č.	Smrek	Buk	Dub
1.	289	418	370
2.	298	418	396
3.	300	418	399
4.	304	427	401
5.	309	432	412
6.	309	433	414
7.	311	437	417
8.	312	445	418
9.	315	446	426
10.	320	457	426
11.	325	462	431
12.	332	467	435
13.	333	469	436
14.	334	469	437
15.	334	472	438
16.	341	473	444
17.	345	473	444
18.	347	474	448
19.	350	475	449
20.	351	482	455
<b>priemer</b>	<b>323</b>	<b>452</b>	<b>425</b>
<b>Sx</b>	<b>1,9</b>	<b>2,2</b>	<b>2,2</b>
<b>Vx</b>	<b>5,8</b>	<b>4,9</b>	<b>5,1</b>

Tabuľka 8 je príkladom 20 vzorkou, pre jeden exikátor kde relatívna vlhkosť vzduchu bola dosiahnutá 33 %. Výsledok nášho súboru hovorí, že je veľmi homogénny, teda sú tam malé rozptyly a že všetky vzorky v experimente majú zhruba rovnakú hustotu a tým pádom som eliminoval vplyv hustoty a mám malý variačný koeficient u všetkých troch druhov dreva – to znamená 6 % pre vzorky smrek, 5 % pre vzorky buku, a 5 % pre vzorky dubu. Tým pádom, variačný koeficient ( $V_x$ ) je malý, a ďalej vychádzam z toho, že hustota je takmer identická medzi všetkými 20-timi vzorkami daného druhu dreva.

## **6.2 Vypočítaná rovnovážna vlhkosť dreva pri rôznych relatívnych vlhkosti vzduchu**

Tab. 9 ukazuje váhové hodnoty vzoriek v smreku, buku a dubu po vybratí z exikátora ( $m_1$ ) kde bola 33 % relatívna vlhkosť vzduchu (RVV). Následne vysušené a opäť odvážené ( $m_0$ ) a vypočítané relatívne vlhkosti dreva (RVD) pomocou vzorca a dosadené do grafu. U smreku sa pohybovala RVD max. 9,23% a min. 7,72 %. Buk mal max. 9,69 % a min. 5,04 a dub mal maximálnu hodnotu RVD 8,94 % a minimálnu 5,72 %. Výsledok nášho súboru hovorí, že je veľmi homogénny, teda sú tam malé rozptyly a že všetky vzorky v experimente majú zhruba rovnakú rovnovážnu vlhkosť dreva.

Variačný koeficient ( $V_x$ ) – je malý a mám hodnoty 5 % pre smrek, 15 % pre buk a 10 % pre dub. Ďalej vychádzam z toho, že relatívna vlhkosť dreva je takmer identická medzi všetkými 20-timi vzorkami daného druhu dreva.

U vzorky smreku a dubu u jedného telieska došlo k neočakávaným hodnotám (hodnoty sú prečiarknuté) a považujeme ich za odľahlé merania, preto sme sa rozhodli ďalej s nimi nepracovať.

Tab. 9 Relatívna vlhkosť vzduchu (RVV) 33 %

Vzorka č.	Smrek			Buk			Dub		
	$m_1$	$m_0$	RVD	$m_1$	$m_0$	RVD	$m_1$	$m_0$	RVD
1.	0,271	0,258	5,03	0,430	0,407	5,65	0,401	0,370	8,94
2.	0,279	0,259	7,72	0,431	0,407	5,89	0,443	0,410	8,04
3.	0,285	0,261	9,19	0,437	0,416	5,04	0,443	0,410	8,04
4.	0,287	0,263	9,12	0,450	0,417	7,91	0,469	0,432	8,56
5.	0,293	0,270	8,51	0,451	0,419	7,63	0,469	0,435	7,81
6.	0,305	0,281	8,54	0,454	0,421	7,83	0,470	0,436	7,79
7.	0,308	0,282	9,21	0,457	0,421	8,55	0,472	0,444	6,30
8.	0,312	0,286	9,09	0,457	0,429	6,52	0,479	0,444	7,88
9.	0,330	0,303	8,91	0,458	0,429	6,75	0,480	0,454	5,72
10.	0,336	0,308	9,09	0,462	0,429	7,69	0,489	0,455	7,47
11.	0,343	0,315	8,88	0,465	0,429	8,39	0,495	0,460	7,60
12.	0,351	0,322	9,00	0,465	0,432	7,63	0,495	0,460	7,60
13.	0,352	0,325	8,30	0,469	0,432	8,56	0,495	0,460	7,60
14.	0,355	0,325	9,23	0,475	0,433	9,69	0,500	0,461	8,45
15.	0,355	0,327	8,56	0,478	0,435	9,42	0,507	0,470	7,87
16.	0,356	0,329	8,20	0,478	0,441	8,39	0,511	0,475	7,57
17.	0,360	0,330	9,09	0,479	0,444	7,88	0,514	0,476	7,98
18.	0,360	0,331	8,76	0,479	0,445	7,64	0,517	0,478	8,15
19.	0,360	0,331	8,76	0,480	0,446	7,62	0,517	0,483	7,03
20.	0,377	0,346	8,95	0,480	0,449	6,90	0,518	0,494	4,85
priemer	<b>0,329</b>	<b>0,303</b>	<b>8,80</b>	<b>0,462</b>	<b>0,429</b>	<b>7,58</b>	<b>0,484</b>	<b>0,450</b>	<b>7,71</b>
Sx	-----	-----	<b>0,403</b>	-----	-----	<b>1,184</b>	-----	-----	<b>0,740</b>
Vx	-----	-----	<b>0,046</b>	-----	-----	<b>0,156</b>	-----	-----	<b>0,096</b>
MIN	-----	-----	<b>7,72</b>	-----	-----	<b>5,04</b>	-----	-----	<b>5,72</b>
MAX	-----	-----	<b>9,23</b>	-----	-----	<b>9,69</b>	-----	-----	<b>8,94</b>

Tab. 10 ukazuje váhové hodnoty vzoriek smreku, buku a dubu po vybratí z exikátora ( $m_1$ ) kde bola 75 % relatívna vlhkosť vzduchu (RVV). Následne vysušené a opäť odvážené ( $m_0$ ) a vypočítané rovnovážne vlhkosti dreva (RVD) sme dosadili do grafu. Maximálna hodnota smreku bola 16,96 % a minimálna hodnota 14,59 %. Buk mal max. 16,58 % a min. 14,95 %. A dub vykazoval hodnotu max.15,01 % a min. 12,93 %. Výsledok nášho súboru hovorí, že je veľmi homogénny, teda sú tam malé rozptyly a že všetky vzorky v experimente majú zhruba rovnakú rovnovážnu vlhkosť dreva.

Variačný koeficient (Vx) – je malý a mám hodnoty 4 % pre smrek, 3 % pre buk a 3 % pre dub. Ďalej vychádzam z toho, že relatívna vlhkosť dreva je takmer identická medzi všetkými 20-timi vzorkami daného druhu dreva.

Tab. 10

Relatívna vlhkosť vzduchu (RVV) 75 %

Vzorka č.	Smrek			Buk			Dub		
	$m_1$	$m_0$	RVD	$m_1$	$m_0$	RVD	$m_1$	$m_0$	RVD
1.	0,328	0,281	16,72	0,466	0,403	15,63	0,352	0,309	13,91
2.	0,331	0,283	16,96	0,471	0,404	16,58	0,354	0,311	13,82
3.	0,332	0,286	16,08	0,476	0,411	15,81	0,360	0,315	14,28
4.	0,333	0,288	15,62	0,480	0,414	15,94	0,361	0,316	14,24
5.	0,338	0,289	16,95	0,482	0,416	15,86	0,361	0,318	13,52
6.	0,344	0,295	16,61	0,482	0,416	15,86	0,370	0,325	13,84
7.	0,344	0,296	16,21	0,484	0,420	15,23	0,381	0,333	14,41
8.	0,348	0,299	16,38	0,491	0,425	15,52	0,383	0,333	15,01
9.	0,350	0,300	16,66	0,492	0,428	14,95	0,385	0,336	14,58
10.	0,351	0,302	16,22	0,495	0,429	15,38	0,386	0,339	13,86
11.	0,356	0,307	15,96	0,500	0,430	16,27	0,388	0,339	14,45
12.	0,365	0,313	16,61	0,500	0,432	15,74	0,390	0,340	14,70
13.	0,366	0,314	16,56	0,500	0,434	15,20	0,391	0,342	14,32
14.	0,367	0,317	15,77	0,500	0,434	15,20	0,392	0,343	14,28
15.	0,368	0,319	15,36	0,504	0,434	16,12	0,392	0,343	14,28
16.	0,369	0,322	14,59	0,505	0,435	16,09	0,393	0,348	12,93
17.	0,376	0,323	16,40	0,505	0,435	16,09	0,402	0,350	14,85
18.	0,382	0,329	16,10	0,506	0,438	15,52	0,407	0,357	14,00
19.	0,385	0,330	16,66	0,509	0,440	15,68	0,411	0,360	14,16
20.	0,387	0,332	16,56	0,518	0,449	15,36	0,465	0,407	14,25
<b>priemer</b>	<b>0,356</b>	<b>0,306</b>	<b>16,25</b>	<b>0,493</b>	<b>0,427</b>	<b>15,70</b>	<b>0,386</b>	<b>0,339</b>	<b>14,19</b>
<b>Sx</b>	-----	-----	<b>0,578</b>	-----	-----	<b>0,415</b>	-----	-----	<b>0,470</b>
<b>Vx</b>	-----	-----	<b>0,036</b>	-----	-----	<b>0,026</b>	-----	-----	<b>0,033</b>
<b>MIN</b>	-----	-----	<b>14,59</b>	-----	-----	<b>14,95</b>	-----	-----	<b>12,93</b>
<b>MAX</b>	-----	-----	<b>16,96</b>	-----	-----	<b>16,58</b>	-----	-----	<b>15,01</b>

Tab. 11 ukazuje váhové hodnoty vzoriek smreku, buku a dubu po vybratí z exikátora ( $m_1$ ) kde bola 86 % relatívna vlhkosť vzduchu (RVV) nad roztokom. Následne vysušené a opäť odvážené ( $m_0$ ) a vypočítané rovnovážne vlhkosti dreva (RVD) pomocou vzorca. Smrek za max. 19,01 % a min 17,05 %. Buk max 18,96 % a min 16,27 %. Dub maximálnu hodnotu RVD vykazoval 18,59 % a minimálnu 14,32 %. Výsledok nášho súboru hovorí, že je veľmi homogénny, teda sú tam malé rozptyly a že všetky vzorky v experimente majú zhruba rovnakú rovnovážnu vlhkosť dreva.

Variačný koeficient ( $Vx$ ) – je malý a mám hodnoty 3 % pre smrek, 5 % pre buk a 8 % pre dub. Ďalej vychádzam z toho, že relatívna vlhkosť dreva je takmer identická medzi všetkými 20-timi vzorkami daného druhu dreva.

Tab. 11

Relatívna vlhkosť vzduchu (RVV) 86 %

Vzorka č.	Smrek			Buk			Dub		
	$m_1$	$m_0$	RVD	$m_1$	$m_0$	RVD	$m_1$	$m_0$	RVD
1.	0,334	0,281	18,86	0,485	0,410	18,29	0,345	0,292	18,15
2.	0,335	0,284	17,95	0,485	0,411	18,00	0,345	0,293	17,74
3.	0,338	0,284	19,01	0,489	0,413	18,40	0,349	0,295	18,30
4.	0,344	0,291	18,21	0,493	0,423	16,54	0,351	0,300	17,00
5.	0,347	0,292	18,83	0,493	0,424	16,27	0,355	0,306	16,01
6.	0,350	0,299	17,05	0,495	0,424	16,74	0,360	0,310	16,12
7.	0,352	0,300	17,33	0,495	0,424	16,74	0,362	0,315	14,92
8.	0,354	0,301	17,60	0,496	0,425	16,70	0,362	0,316	14,55
9.	0,356	0,303	17,49	0,496	0,425	16,70	0,367	0,318	15,40
10.	0,364	0,308	18,18	0,500	0,428	16,82	0,374	0,323	15,78
11.	0,366	0,310	18,06	0,501	0,430	16,51	0,374	0,327	14,37
12.	0,370	0,313	18,21	0,503	0,432	16,43	0,389	0,328	18,59
13.	0,372	0,316	17,72	0,505	0,432	16,89	0,390	0,334	16,76
14.	0,377	0,317	18,92	0,505	0,434	16,35	0,390	0,338	15,38
15.	0,377	0,320	17,81	0,507	0,435	16,55	0,393	0,342	14,91
16.	0,379	0,320	18,43	0,508	0,436	16,51	0,396	0,344	15,11
17.	0,381	0,322	18,32	0,509	0,436	16,74	0,399	0,345	15,65
18.	0,383	0,324	18,20	0,512	0,439	16,62	0,415	0,359	15,59
19.	0,384	0,325	18,15	0,515	0,442	16,51	0,415	0,363	14,32
20.	0,385	0,326	18,09	0,527	0,443	18,96	0,423	0,366	15,57
<b>priemer</b>	<b>0,362</b>	<b>0,306</b>	<b>18,12</b>	<b>0,501</b>	<b>0,428</b>	<b>16,96</b>	<b>0,377</b>	<b>0,325</b>	<b>16,01</b>
<b>Sx</b>	-----	-----	<b>0,532</b>	-----	-----	<b>0,775</b>	-----	-----	<b>1,323</b>
<b>Vx</b>	-----	-----	<b>0,029</b>	-----	-----	<b>0,046</b>	-----	-----	<b>0,083</b>
<b>MIN</b>	-----	-----	<b>17,05</b>	-----	-----	<b>16,27</b>	-----	-----	<b>14,32</b>
<b>MAX</b>	-----	-----	<b>19,01</b>	-----	-----	<b>18,96</b>	-----	-----	<b>18,59</b>

Tab. 12 ukazuje váhové hodnoty vzoriek smreku, buku a dubu po vybratí z exikátora ( $m_1$ ) kde bola 95 % relatívna vlhkosť vzduchu (RVV). Následne vysušené a opäť odvážené ( $m_0$ ) a pomocou vzorca vypočítané relatívne vlhkosti dreva (RVD) s ktorými sme ďalej pracovali v grafe. Smrek mal max. hodnotu 24,19 % a min. hodnotu 21,03 %. Buk mal max. 26,63 % a min. 21,01 %. Dub max. 24,91 % a min. 18,28 %. Výsledok nášho súboru hovorí, že je veľmi homogénny, teda sú tam malé rozptyly a že všetky vzorky v experimente majú zhruba rovnakú rovnovážnu vlhkosť dreva.

Variačný koeficient ( $Vx$ ) – je malý a mám hodnoty 4 % pre smrek, 8 % pre buk a 12 % pre dub. Ďalej vychádzam z toho, že relatívna vlhkosť dreva je takmer identická medzi všetkými 20-timi vzorkami daného druhu dreva.

Tab. 12 Relatívna vlhkosť vzduchu (RVV) 95 %

Vzorka č.	Smrek			Buk			Dub		
	$m_1$	$m_0$	RVD	$m_1$	$m_0$	RVD	$m_1$	$m_0$	RVD
1.	0,341	0,279	22,22	0,504	0,398	26,63	0,361	0,289	24,91
2.	0,349	0,281	24,19	0,505	0,404	25,00	0,361	0,292	23,63
3.	0,351	0,290	21,03	0,507	0,405	25,18	0,364	0,293	24,24
4.	0,372	0,304	22,36	0,508	0,405	25,43	0,367	0,295	24,40
5.	0,374	0,305	22,62	0,509	0,410	24,14	0,367	0,297	23,56
6.	0,377	0,306	23,20	0,513	0,413	24,21	0,368	0,299	23,07
7.	0,377	0,310	21,61	0,514	0,414	24,15	0,373	0,301	23,92
8.	0,380	0,310	22,58	0,518	0,417	24,22	0,374	0,314	19,10
9.	0,380	0,313	21,40	0,520	0,419	24,10	0,380	0,319	19,12
10.	0,381	0,314	21,33	0,521	0,430	21,16	0,381	0,322	18,32
11.	0,385	0,315	22,22	0,522	0,431	21,11	0,384	0,322	19,25
12.	0,386	0,315	22,53	0,522	0,431	21,11	0,389	0,323	20,43
13.	0,387	0,317	22,08	0,523	0,431	21,34	0,398	0,336	18,45
14.	0,387	0,317	22,08	0,524	0,433	21,01	0,401	0,337	18,99
15.	0,389	0,319	21,94	0,525	0,433	21,24	0,401	0,339	18,28
16.	0,391	0,322	21,42	0,526	0,434	21,19	0,403	0,339	18,87
17.	0,399	0,323	23,52	0,527	0,435	21,14	0,404	0,340	18,82
18.	0,400	0,325	23,07	0,534	0,438	21,91	0,407	0,341	19,35
19.	0,400	0,327	22,32	0,538	0,444	21,17	0,408	0,344	18,60
20.	0,401	0,328	22,25	0,540	0,445	21,34	0,434	0,363	19,55
priemer	<b>0,362</b>	<b>0,307</b>	<b>22,30</b>	<b>0,501</b>	<b>0,424</b>	<b>22,84</b>	<b>0,386</b>	<b>0,320</b>	<b>20,74</b>
Sx	-----	-----	<b>0,780</b>	-----	-----	<b>1,898</b>	-----	-----	<b>2,490</b>
Vx	-----	-----	<b>0,035</b>	-----	-----	<b>0,083</b>	-----	-----	<b>0,120</b>
MIN	-----	-----	<b>21,03</b>	-----	-----	<b>21,01</b>	-----	-----	<b>18,28</b>
MAX	-----	-----	<b>24,19</b>	-----	-----	<b>26,63</b>	-----	-----	<b>24,91</b>

Tab. 13 ukazuje váhové hodnoty vzoriek smreku, buku a dubu po vybratí z exikátora ( $m_1$ ) kde bola 99 % relatívna vlhkosť vzduchu (RVV). Následne vysušené a opäť odvážené ( $m_0$ ) a vypočítané rovnovážne vlhkosti dreva (RVD) pomocou vzorca s ďalej spracované v grafe. U smreku bol max. 33,45 % a min. 27,94 %. Buk mal max. 38,37 % a min 29,45 % a dub max. hodnota 40,78 % a min. hodnota 32,15 %. Výsledok nášho súboru hovorí, že je veľmi homogénny, teda sú tam malé rozptyly a že všetky vzorky v experimente majú zhruba rovnakú rovnovážnu vlhkosť dreva.

Variačný koeficient ( $V_x$ ) – je malý a mám hodnoty 6 % pre smrek, 6 % pre buk a 7 % pre dub. Ďalej vychádzam z toho, že relatívna vlhkosť dreva je takmer identická medzi všetkými 20-timi vzorkami daného druhu dreva.

Tab. 13 Relatívna vlhkosť vzduchu (RVV) 99 %

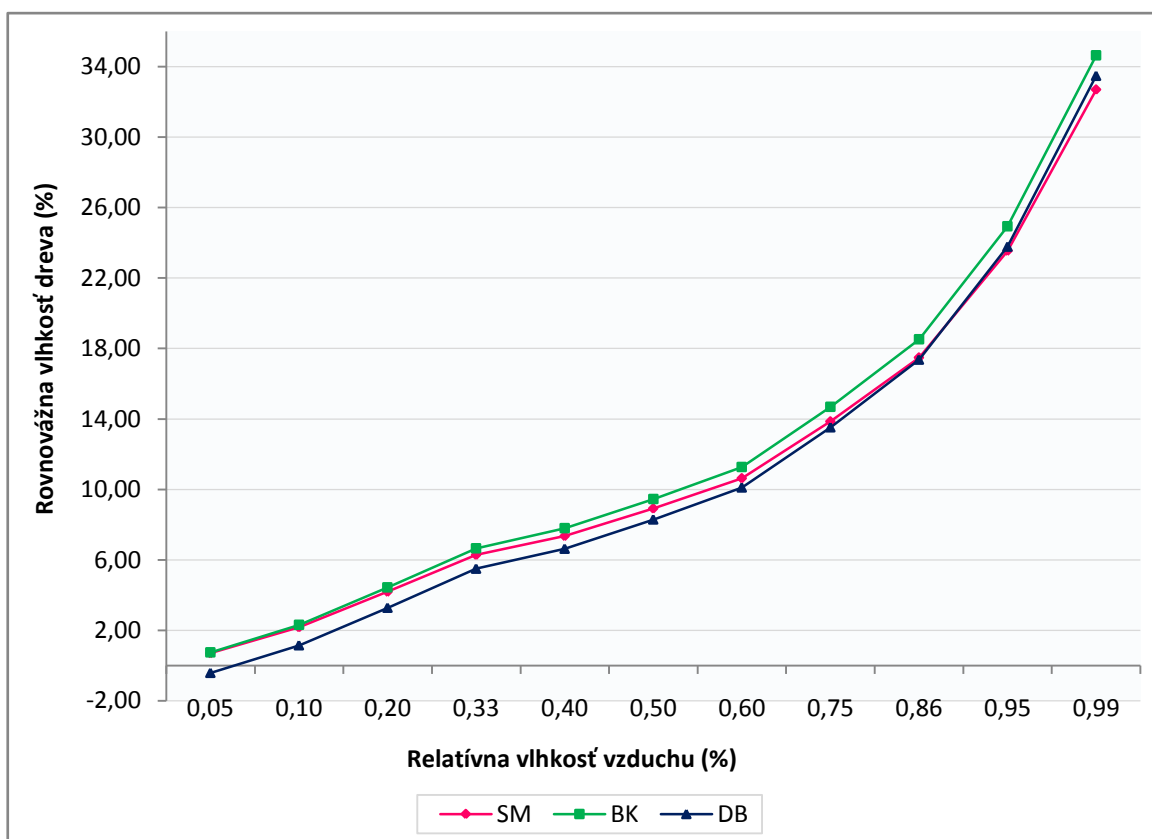
Vzorka č.	Smrek			Buk			Dub		
	m <sub>1</sub>	m <sub>0</sub>	RVD	m <sub>1</sub>	m <sub>0</sub>	RVD	m <sub>1</sub>	m <sub>0</sub>	RVD
1.	0,366	0,275	33,09	0,501	0,387	29,45	0,480	0,363	32,23
2.	0,368	0,277	32,85	0,508	0,388	30,92	0,485	0,367	32,15
3.	0,369	0,278	32,73	0,510	0,390	30,76	0,490	0,370	32,43
4.	0,370	0,280	32,14	0,537	0,400	34,25	0,520	0,376	38,29
5.	0,375	0,281	33,45	0,541	0,403	34,24	0,521	0,385	35,32
6.	0,378	0,289	30,79	0,542	0,403	34,49	0,534	0,386	38,34
7.	0,380	0,297	27,94	0,548	0,408	34,31	0,541	0,387	39,79
8.	0,387	0,300	29,00	0,556	0,412	34,95	0,546	0,388	40,72
9.	0,392	0,301	30,23	0,561	0,413	35,83	0,547	0,395	38,48
10.	0,399	0,310	28,70	0,566	0,425	33,17	0,555	0,396	40,15
11.	0,399	0,311	28,29	0,567	0,435	30,34	0,556	0,402	38,30
12.	0,401	0,312	28,52	0,573	0,433	32,33	0,565	0,405	39,50
13.	0,402	0,313	28,43	0,583	0,436	33,71	0,565	0,405	39,50
14.	0,416	0,318	30,81	0,584	0,437	33,63	0,566	0,407	39,06
15.	0,418	0,325	28,61	0,588	0,438	34,24	0,573	0,407	40,78
16.	0,421	0,327	28,74	0,591	0,440	34,31	0,575	0,413	39,22
17.	0,424	0,329	28,87	0,592	0,440	34,54	0,577	0,413	39,70
18.	0,427	0,330	29,39	0,595	0,440	35,22	0,583	0,416	40,14
19.	0,436	0,338	28,99	0,600	0,440	36,36	0,584	0,416	40,38
20.	0,440	0,340	29,41	0,613	0,443	38,37	0,585	0,420	39,28
<b>priemer</b>	<b>0,398</b>	<b>0,307</b>	<b>30,05</b>	<b>0,563</b>	<b>0,421</b>	<b>33,77</b>	<b>0,547</b>	<b>0,396</b>	<b>38,19</b>
<b>Sx</b>	-----	-----	<b>1,834</b>	-----	-----	<b>2,153</b>	-----	-----	<b>2,813</b>
<b>Vx</b>	-----	-----	<b>0,061</b>	-----	-----	<b>0,064</b>	-----	-----	<b>0,074</b>
<b>MIN</b>	-----	-----	<b>27,94</b>	-----	-----	<b>29,45</b>	-----	-----	<b>32,15</b>
<b>MAX</b>	-----	-----	<b>33,45</b>	-----	-----	<b>38,37</b>	-----	-----	<b>40,78</b>

### 6.3 Teoretická modelová sorpčná izoterma

Obr. 12 je model sorpčnej izotermy s ktorým som pracoval v experimente pri priemernej teplote v miestnosti 25,4°C. Najvyššie hodnoty (RVD) pri určitých (RVV) vykazuje buk (BK). Druhý druh dreva je smrek (SM) a následne za ním dub (DB). U všetkých troch drieb je jasne vidieť že z rastúcou relatívnou vlhkosťou vzduchu (RVV) rastie aj rovnovážna vlhkosť dreva (RVD).

Od nuly až po cca 86 % je jasné že poradie do najväčšieho Buk, Smrek, Dub a od cca 86 % rovnovážnej vlhkosti vzduchu je vidieť ako sa dané druhy prekrývajú v tesnom poradí od najväčšieho Buk, Dub, Smrek (pozri obr. 12).





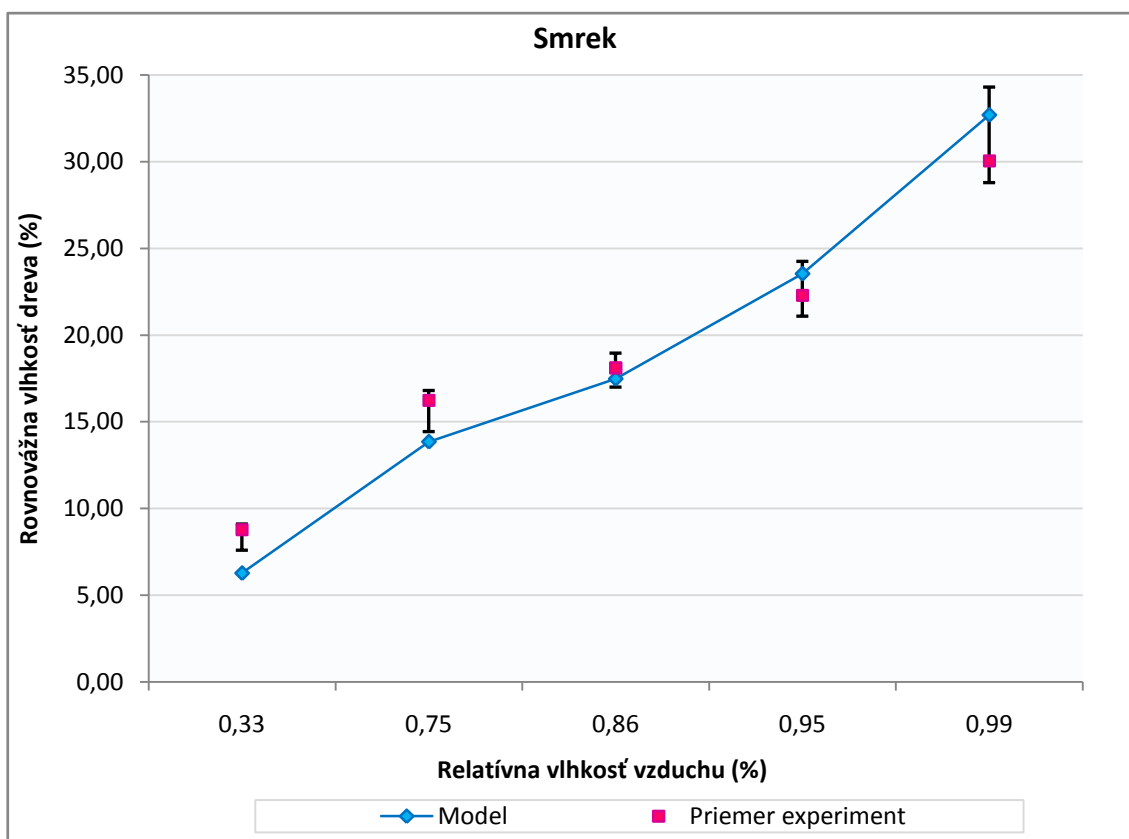
Obr. 12 Teoretický model - sorpčná izoterma dreva pri teplote 25,4 °C

#### 6.4 Experimentálna sorpčná izoterma a porovnanie z modelom plus chybové úsečky

Obr. 13 porovnáva experimentálne hodnoty **smreku** z teoretickým modelom a chybovými úsečkami v ňom. Teoretický model je plná modrá čiara ktorá prechádza grafom. Priemerné experimentálne hodnoty sú vyznačené červené body v každej relatívnej vlhkosti vzduchu a sú vyznačené v chybových úsečkách max a min. Je jasné, že experimentálne hodnoty vychádzajú z úsečky teoretického modelu pri 33% a pri 75% (RVV) ale od 86% do 99% (RVV) experimentálne hodnoty prechádzajú cez teoretický model.

Tab. 14 RVV a RVD smreku pri **T = 25,4 °C**

Teplota	T = 25,4 °C				
RVV	33 %	75 %	86 %	95 %	99 %
RVD	8,79 %	16,24 %	18,12 %	22,30 %	30,05 %

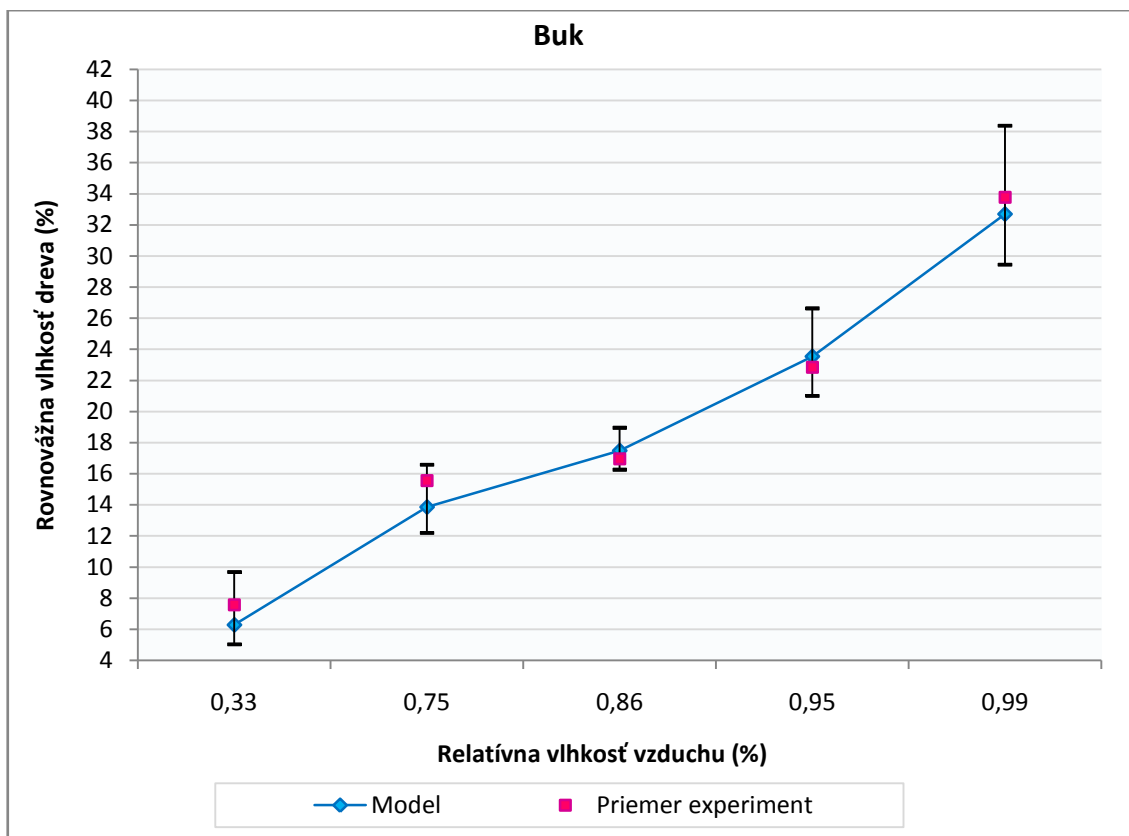


Obr. 13 Porovnanie relatívnej vlhkosti dreva smreku: teoretický model vs. experiment pri teplote 25,4 °C

Obr. 14 porovnáva experimentálne hodnoty **buku** z teoretickým modelom a chybovými úsečkami v ňom. Teoretický model je plná čiara ktorá prechádza grafom. Priemerné experimentálne hodnoty sú vyznačené červeným bodom v každej rovnovážnej vlhkosti vzduchu a sú vyznačené v chybových úsečkách. Je jasné, že experimentálne hodnoty nevychádzajú z úsečky teoretického modelu, tým pádom experiment verifikoval model.

Tab. 15 RVV a RVD buku pri T = 25,4 °C

Teplota	T = 25,4 °C				
RVV	33 %	75 %	86 %	95 %	99 %
RVD	7,57 %	15,55 %	16,96 %	22,84 %	33,77 %

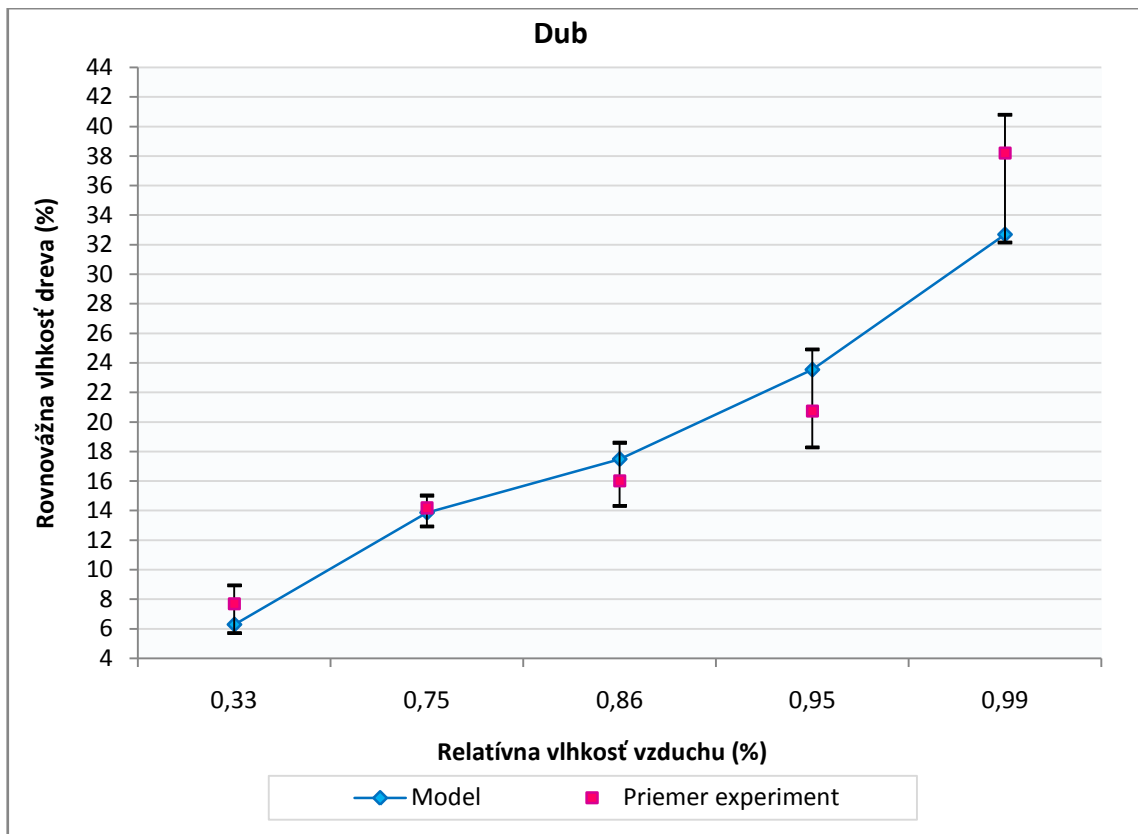


Obr. 14 Porovnanie relatívnej vlhkosti dreva buku: teoretický model verzus experiment pri teplote 25,4 °C

Obr. 15 porovnáva experimentálne hodnoty **dubu** z teoretickým modelom a chybovými úsečkami v ňom. Teoretický model je plná čiara ktorá prechádza grafom. Priemerné experimentálne hodnoty sú vyznačené červeným bodom v každej rovnovážnej vlhkosti vzduchu a sú vyznačené v chybových úsečkách. Je jasné, že experimentálne hodnoty nevychádzajú z úsečky teoretického modelu, tým pádom experiment verifikoval model.

Tab. 16 RVV a RVD dubu pri  $T = 25,4$  °C

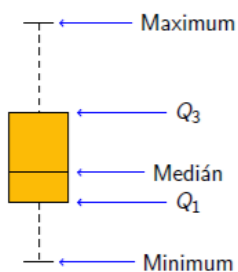
Teplota	$T = 25,4$ °C				
RVV	33 %	75 %	86 %	95 %	99 %
RVD	7,70 %	14,18 %	16,01 %	20,74 %	38,19 %



Obr. 15 Porovnanie relatívnej vlhkosti dreva u dubu: teoretický model verzus experiment pri teplote 25,4 °C

### 6.5 Popisná štatistika – variačná analýza

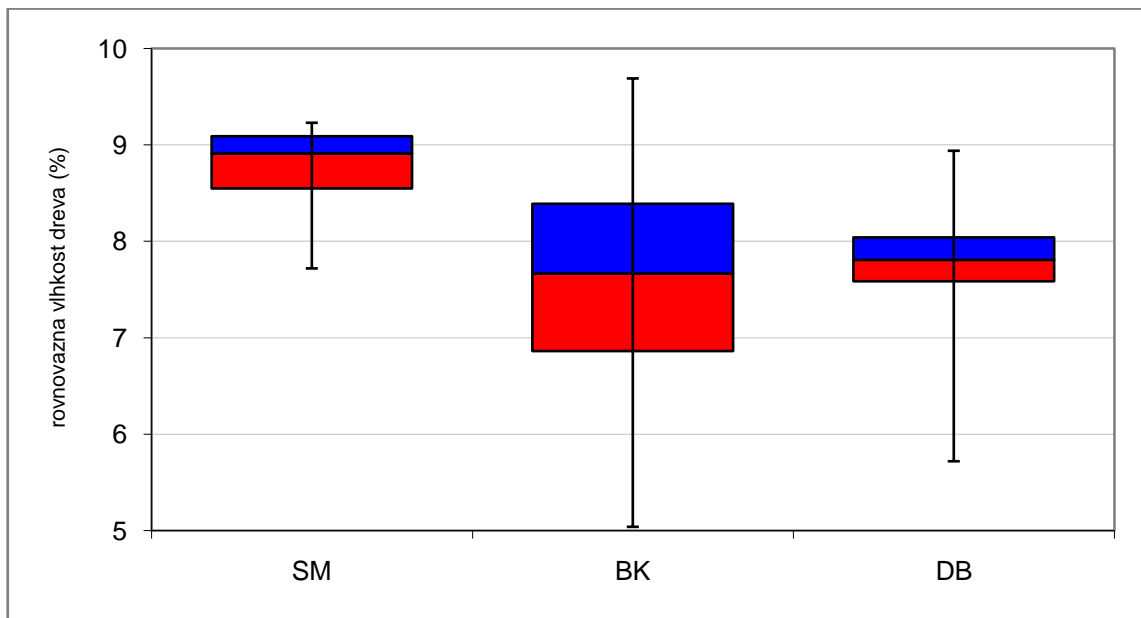
Pre prehľadné zhrnutie všetkých výsledkov týkajúcich sa rovnovážnych vlhkostí dreva sa vyjadrili pomocou krabicového grafu (alebo tiež krabicového diagramu) Obr. 16 až Obr. 24 a je to podstate grafické znázornenie piatich hodnôt: minima, prvého kvartilu (25 %), mediánu, tretieho kvartilu (75 %) a maxima.



Obr. 16 Grafické znázornenie minima, prvého kvartilu, mediánu, tretieho kvartilu a maxima

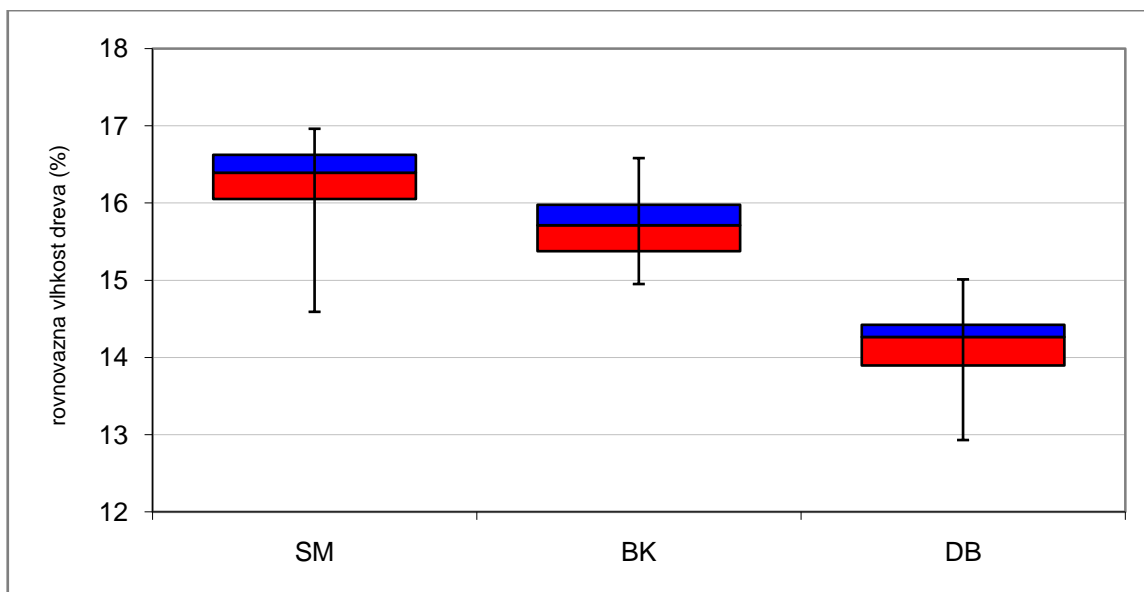
Krabicové grafy nám dávajú informáciu o rozložení súboru, ktoré sa vo väčšine prípadov dá označiť za normálne. V krabicových grafoch sú označené aj priemerné hodnoty rovnovážnej vlhkosti dreva získaných pomocou analytického výpočtu. Tie sú mediánom experimentálnych výsledkov vo väčšine prípadov síce pomerne vzdialený, ale v rámci možností sa dajú označiť za rovnaké.

Z obr. 17 je vidieť, že u relatívnej vlhkosti vzduchu pri **33 %** má najväčší rozptyl max a min buk, potom dub a smrek. Hodnoty mediánu sú u smreku 8,9 % RVD. Buk má medián 7,7 % RVD a dub 7,8 % RVD. U smreku je pozorovať že väčšina hodnôt je vo vyššej polovici u maxima. Postup od najväčších hodnôt pri 33 % relatívnej vlhkosti vzduchu vykazuje smrek, buk a dub.



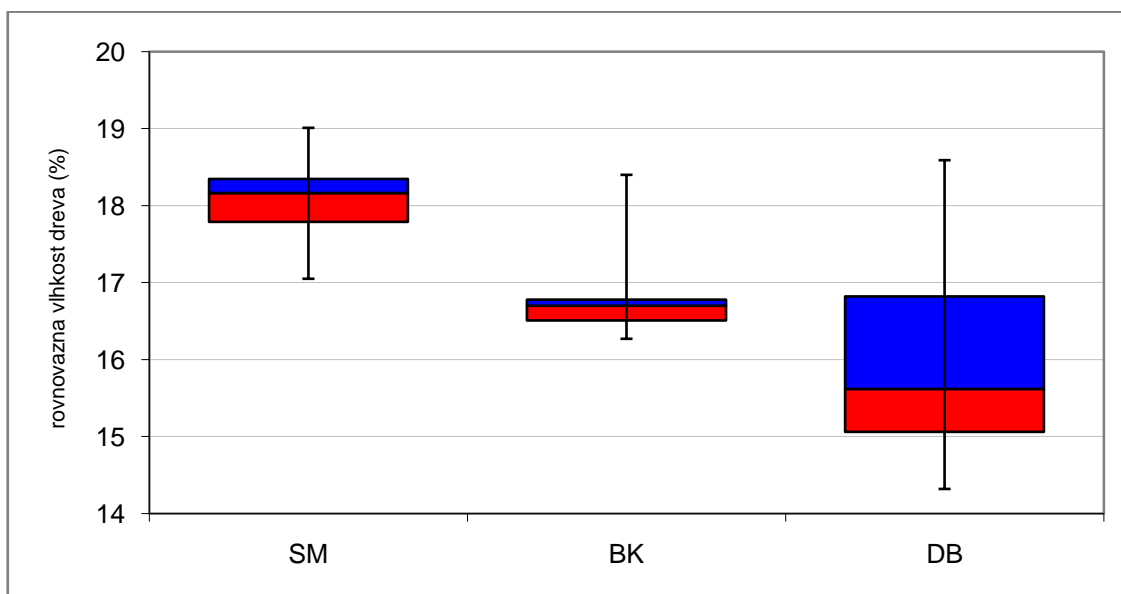
Obr. 17 Variačná analýza pomocou krabicového grafu z experimentálnych hodnôt pre relatívnu vlhkosť vzduchu **33 %**

Z obr. 18 je vidieť, že u relatívnej vlhkosti vzduchu pri **75 %** vykazuje smrek opäť hodnoty prevažne vo vyššej polovici u maxima. Buk a dub vykazuje hodnoty bez extrémov. Postup od najväčších hodnôt pri 75 % relatívnej vlhkosti vzduchu vykazuje smrek, buk a dub.



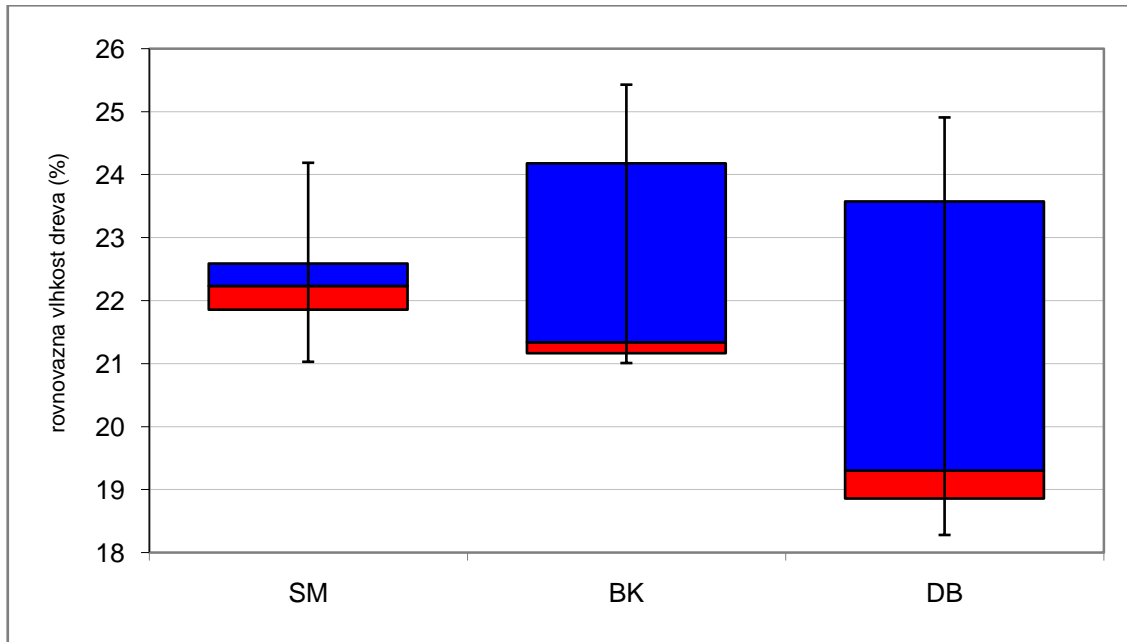
Obr. 18 Variačná analýza pomocou krabicového grafu z experimentálnych hodnôt pre relatívnu vlhkosť vzduchu **75 %**

Z obr. 19 je vidieť, že u relatívnej vlhkosti vzduchu pri **86 %** má smrek hodnoty priaznivé ale u buku pozorujeme že hodnoty sa pohybujú v nižšej polovici pri minime a medián dosahuje hodnotu 16,7 % RVD. Dub má pomerne veľký rozptyl hodnôt max a min, a kde má medián hodnotu 15,6 % RVD až do 16,8 % tretieho kvartilu. Postup od najväčších hodnôt pri 86 % relatívnej vlhkosti vzduchu vykazuje opäť smrek, buk a potom dub.



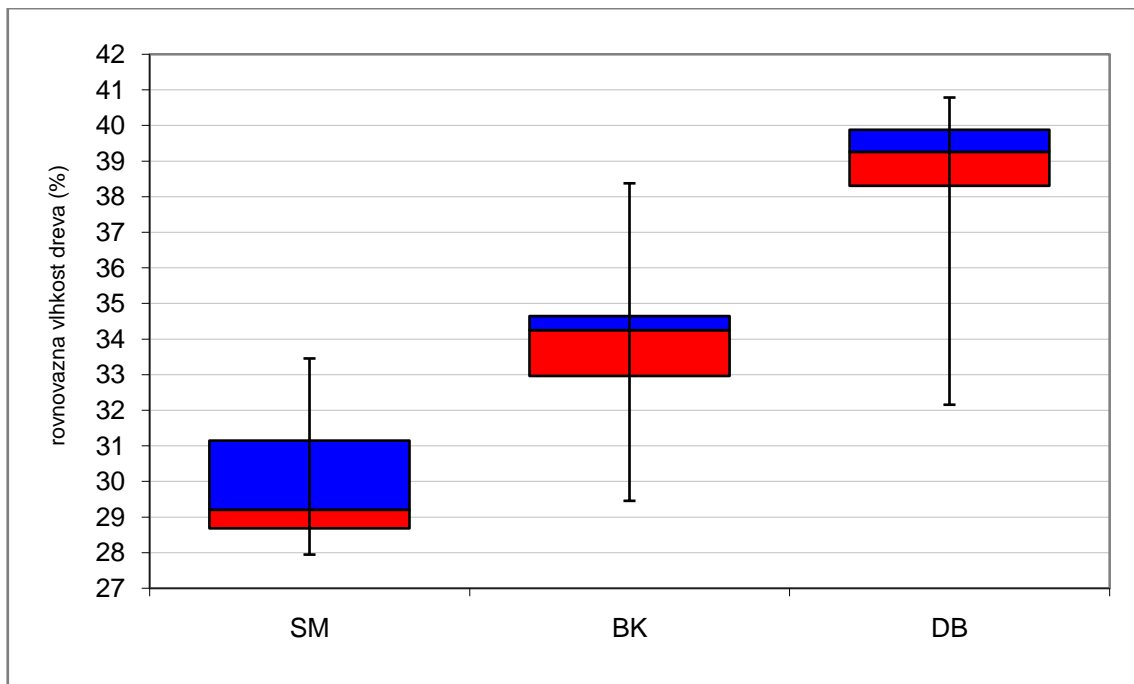
Obr. 19 Variačná analýza pomocou krabicového grafu z experimentálnych hodnôt pre relatívnu vlhkosť vzduchu **86 %**

Z obr. 20 je vidieť, že u relatívnej vlhkosti vzduchu pri **95 %** sa poradie od najväčších hodnôt zmenil tak, že buk má najvyššie hodnoty, potom nasleduje smrek a dub. Buk a dub majú vysoké hodnoty tretieho kvartilu. Buk má medián 21,3 % a tretí kvartil 24,2 %. Dub má medián 19,3 % a tretí kvartil 23,6 %.



Obr. 20 Variačná analýza pomocou krabicového grafu z experimentálnych hodnôt pre relatívnu vlhkosť vzduchu **95 %**

Z obr. 21 je vidieť, že u relatívnej vlhkosti vzduchu pri **99 %** sa poradie od najväčších hodnôt zmenil tak, že dub má výrazne veľké hodnoty, potom nasleduje buk a smrek.

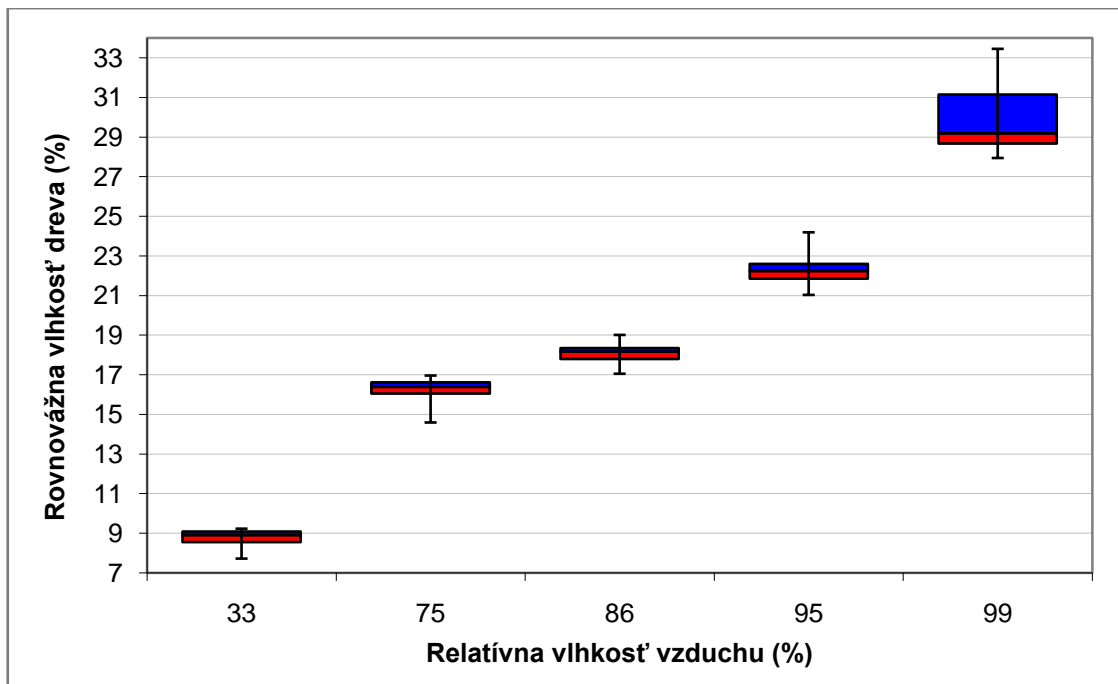


Obr. 21 Variačná analýza pomocou krabicového grafu z experimentálnych hodnôt pre relatívnu vlhkosť vzduchu **99 %**

Z obr. 22 je vidieť, že **smrek** vykazoval pomerne očakávané výsledky až na rozdiel 99 % relatívnej vlhkosti vzduchu kde je viac 75 % kvartilu (tretieho kvartilu) na rozdiel od 25 % kvartilu (prvého kvartilu). Rozpätie max a min u 99 % relatívnej vlhkosti vzduchu je najväčší od ostatných.

**Vo výsledkoch poukazujeme na skutočnosť, že pri vyšších relatívnych vlhkostiach máme väčšie rozptyly. U smreku je to u 99 % relatívnej vlhkosti vzduchu.**

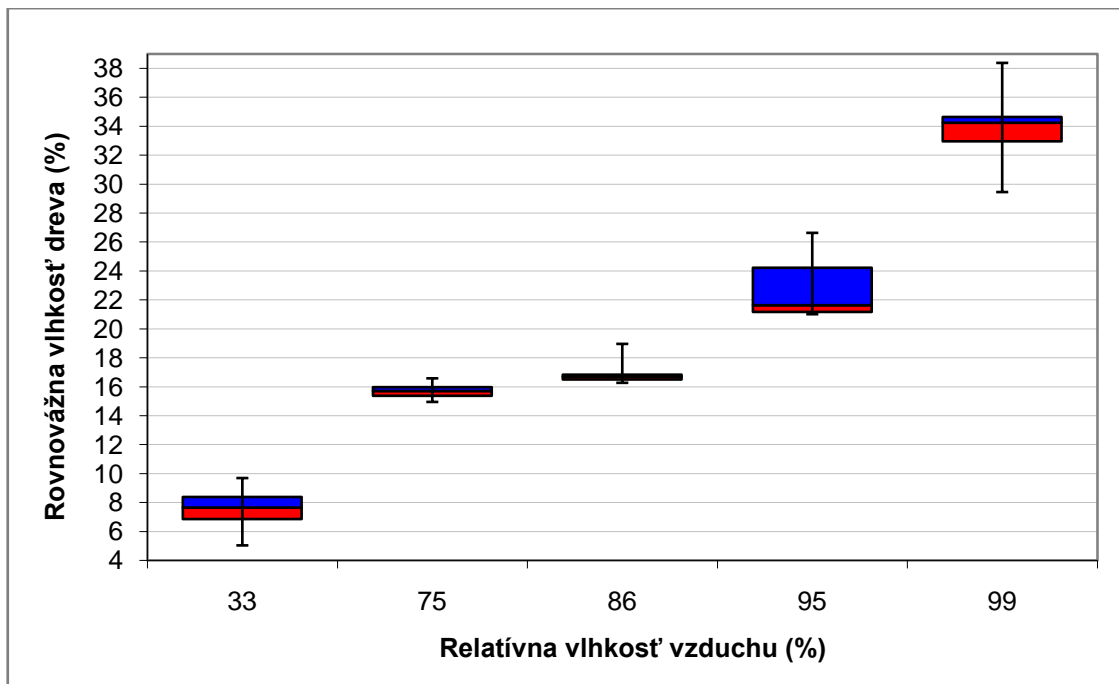




Obr. 22 Variačná analýza pomocou krabicového grafu z experimentálnych hodnôt pre **smrek**

Z obr. 23 je vidieť že **buk** vykazoval taktiež pomerne očakávané výsledky až na rozdiel 95 % relatívnej vlhkosti vzduchu kde je viac 75 % kvartilu na rozdiel od 25 % kvartilu.

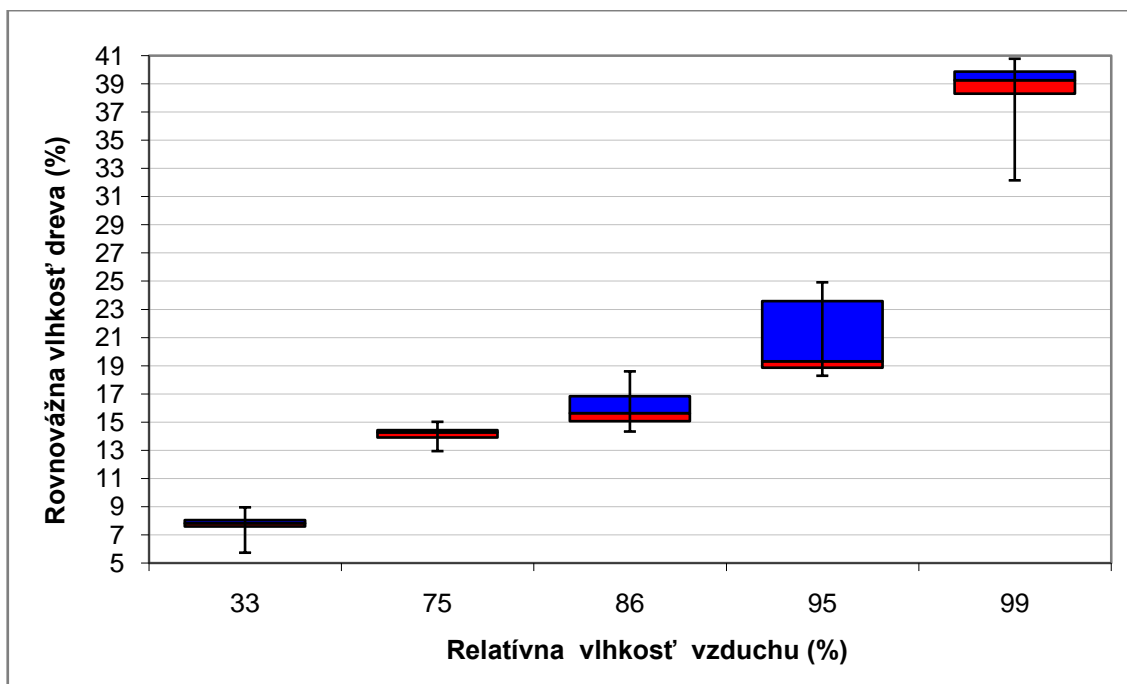
Vo výsledkoch poukazujeme na skutočnosť, že pri vyšších relatívnych vlhkostiach máme väčšie rozptyly. U buku je to u 95 % a 99 % relatívnej vlhkosti vzduchu.



Obr. 23 Variačná analýza pomocou krabicového grafu z experimentálnych hodnôt pre **buk**

Z obr. 24 je vidieť že **dub** vykazoval pomerne dobré výsledky až na rozdiel 86 % relatívnej vlhkosti vzduchu a 95 % relatívnej vlhkosti vzduchu kde je viac 75 % kvartilu na rozdiel od 25 % kvartilu.

Vo výsledkoch poukazujeme na skutočnosť, že pri vyšších relatívnych vlhkostiach máme väčšie rozptyly. U dubu je to u 86 %, 95 % a 99 % relatívnej vlhkosti vzduchu.

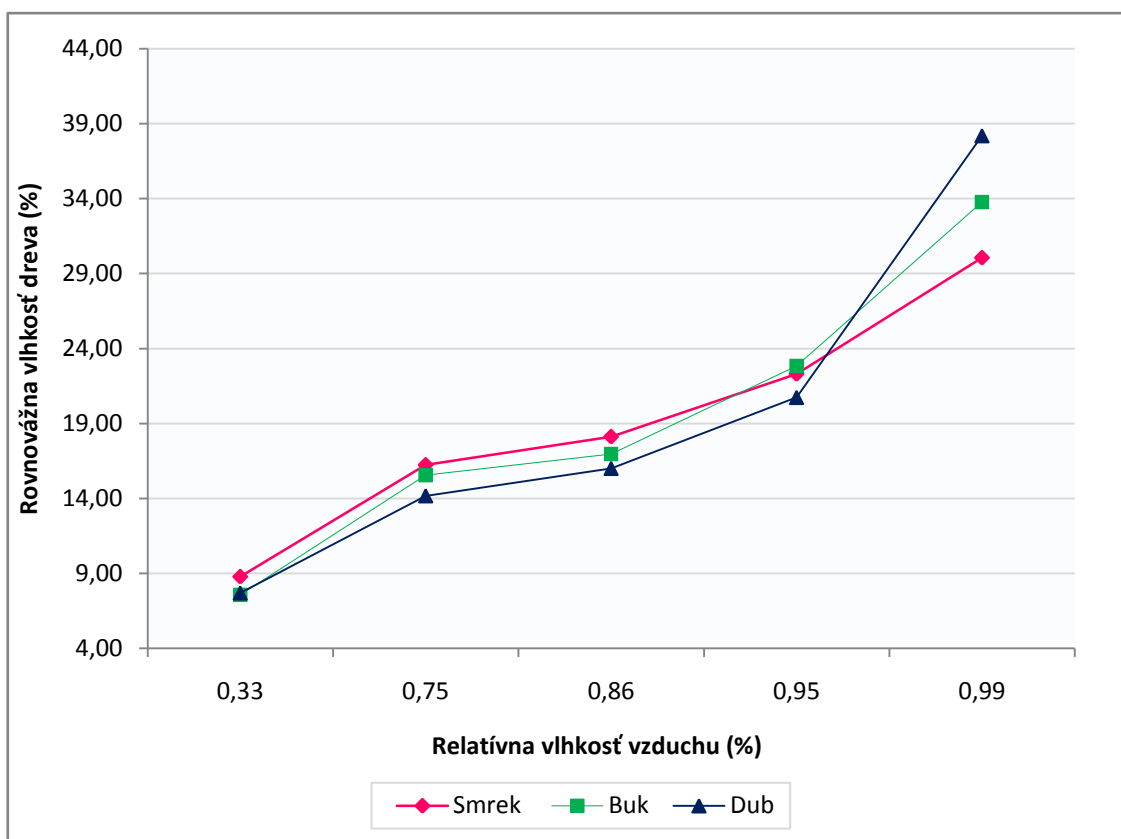


Obr. 24 Variačná analýza pomocou krabicového grafu z experimentálnych hodnôt pre **dub**

Obecne platí, že z rastúcou relatívnou vlhkosťou dreva ako keby dochádzalo k zväčšovaniu variability a môže to súvisieť s kapilárnou kondenzáciou.

## 6.6 Verifikácia teoretického modelu sorpčnej izotermy

Obr. 25 ukazuje experimentálne hodnoty smreku buku a dubu v priemerných vypočítaných hodnotách rovnovážnej vlhkosti dreva na teplotu 25,4 °C s ktorou sme pracovali počas celého experimentu. Najväčšie hodnoty vykazoval pri (RVV) 33 %, smrek, ktorý mal hodnoty 8,79 %, potom dub zo 7,70 % a buk zo 7,57 %. Najväčšie hodnoty relatívnej vzdušnej vlhkosti (RVV) pri 75 % vykazoval tiež smrek 16,24 %, potom buk 15,55 % a dub 14,18 %. Hodnoty relatívnej vzdušnej vlhkosti (RVV) pri 86 % mal najväčšie hodnoty opäť smrek 18,12 %, potom ňom buk 16,96 % a dub 16,01 %. Postupnosť pri relatívne vlhkosť vzduchu (RVV) 95 % od najväčšej bol u buku 22,84 %, nasleduje smrek 22,30 a dub 20,74 %. Poradie pri relatívnej vzdušnej vlhkosti vzduchu (RVV) 99 % bolo poradie od najväčšieho dub 38,19 % buk 33,91 % a smrek 30,05 % (pozri obr. 25).



Obr. 25 Experiment - sorpčná izoterma dreva pri teplote 25,4 °C

Tab. 17 je návrh rovnovážnych vlhkostí dreva závislých na relatívnu vlhkosť vzduchu a teploty pre smrek. Hodnoty rovnovážnej vlhkosti dreva (RVD), pre smrek pri teplote s ktorou sme pracovali v experimente to je 25,4 °C a pre ostatné teploty bola vypočítaná pre každú teplotu rovnovážna vlhkosť dreva (RVD). Návrhový model vychádza z experimentálnych priemerných hodnôt rovnovážnej vlhkosti dreva. Z modelom s ktorým sme pracovali bol taký, že u smreku v oblasti 60 °C až 100 °C pri relatívnej vzdušnej vlhkosti 0,5 % neposkytoval relevantné údaje, tak sme údaje nedopisovali podľa nášho názoru a nevymýšľali aké by tam mohli byť, ale vyplnili sme políčko pomlčkami.

Tab. 17 **Smrek**

RVV (%)	Experiment teplota <b>25,4 °C</b>	Navrhnutý model ( °C )									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0,5	-----	1,1	0,8	0,6	0,3	0,1	-----	-----	-----	-----	-----
10	-----	2,7	2,3	2,0	1,7	1,5	1,2	0,9	0,6	0,3	0,1
20	-----	4,8	4,4	4,0	3,7	3,3	3,0	2,6	2,3	2,0	1,7
<b>33</b>	<b>6,3</b>	7,0	6,5	6,1	5,7	5,3	4,9	4,5	4,1	3,7	3,4
40	-----	8,1	7,6	7,1	6,7	6,2	5,8	5,4	5,0	4,6	4,2
50	-----	9,7	9,2	8,7	8,2	7,7	7,2	6,8	6,3	5,9	5,5
60	-----	11,5	10,9	10,4	9,8	9,3	8,8	8,3	7,8	7,3	6,9
<b>75</b>	<b>13,9</b>	14,9	14,2	13,6	12,9	12,3	11,7	11,1	10,6	10,0	9,5
<b>86</b>	<b>17,5</b>	18,8	17,9	17,1	16,4	15,6	15,0	14,3	13,6	13,0	12,4
<b>95</b>	<b>23,5</b>	25,1	24,1	23,1	22,2	21,3	20,4	19,6	18,8	18,1	17,3
<b>99</b>	<b>32,7</b>	34,7	33,4	32,1	30,9	29,8	28,7	27,6	26,6	25,6	24,7

Tab. 18 je návrh rovnovážnych vlhkostí dreva závislých na relatívnu vlhkosť vzduchu a teploty pre buk. Hodnoty rovnovážnej vlhkosti dreva (RVD), pre buk pri teplote s ktorou sme pracovali v experimente to je 25,4 °C a pre ostatné teploty bola vypočítaná pre každú teplotu rovnovážna vlhkosť dreva (RVD). Návrhový model vychádza z experimentálnych priemerných hodnôt rovnovážnej vlhkosti dreva. Z modelom s ktorým sme pracovali bol taký, že u buku v oblasti 60 °C až 100 °C pri relatívnej vzdušnej vlhkosti 0,5 % neposkytoval relevantné údaje, tak sme údaje nedopisovali podľa nášho názoru a nevymýšľali aké by tam mohli byť, ale vyplnili políčka pomlčkami.

Tab. 18 **Buk**

RVV (%)	Experiment teplota <b>25,4 °C</b>	Navrhnutý model ( °C )									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0,5	-----	1,2	0,9	0,6	0,4	0,1	-----	-----	-----	-----	-----
10	-----	2,8	2,5	2,2	1,8	1,5	1,2	0,9	0,6	0,3	0,1
20	-----	5,1	4,7	4,3	3,9	3,5	3,1	2,8	2,4	2,1	1,8
<b>33</b>	<b>6,7</b>	7,4	6,9	6,4	6,0	5,5	5,1	4,7	4,3	3,9	3,5
40	-----	8,6	8,1	7,6	7,1	6,6	6,1	5,7	5,3	4,9	4,5
50	-----	10,4	9,8	9,2	8,7	8,1	7,6	7,1	6,7	6,2	5,8
60	-----	12,3	11,6	11,0	10,4	9,8	9,2	8,7	8,2	7,7	7,2
<b>75</b>	<b>14,7</b>	15,9	15,1	14,3	13,6	13,0	12,3	11,7	11,1	10,5	10,0
<b>86</b>	<b>18,5</b>	19,9	19,0	18,1	17,3	16,5	15,7	15,0	14,3	13,7	13,0
<b>95</b>	<b>24,9</b>	26,7	25,5	24,4	23,4	22,4	21,5	20,6	19,7	18,9	18,2
<b>99</b>	<b>34,6</b>	36,9	35,4	34,0	32,7	31,4	30,2	29,0	27,9	26,9	25,9

Tab. 19 je návrh rovnovážnych vlhkostí dreva závislých na relatívnu vlhkosť vzduchu a teploty pre dub. Hodnoty rovnovážnej vlhkosti dreva (RVD), pre dub pri teplote s ktorou som pracoval v experimente to je 25,4 °C a pre ostatné teploty bola vypočítaná pre každú teplotu rovnovážna vlhkosť dreva (RVD). Návrhový model vychádza z experimentálnych priemerných hodnôt rovnovážnej vlhkosti dreva. Z modelom s ktorým sme pracovali bol taký, že u dubu v oblasti 20 °C až 100 °C pri relatívnej vzdušnej vlhkosti 0,5 % neposkytoval relevantné údaje, tak sme údaje nedopisovali podľa nášho názoru a nevymýšľali aké by tam mohli byť, ale vyplnili políčko pomlčkami. To isté sme spravili aj v oblasti pri teplote 70 °C až 100 °C a pri relatívnej vzdušnej vlhkosti 10 %.

Tab. 19 **Dub**

RVV (%)	Experiment teplota <b>25,4 °C</b>	Navrhnutý model ( °C )									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0,5	----	0,0	----	----	----	----	----	----	----	----	----
10	----	1,6	1,3	1,0	0,7	0,5	0,2	----	----	----	----
20	----	3,9	3,5	3,1	2,8	2,4	2,1	1,8	1,5	1,2	0,9
<b>33</b>	<b>5,5</b>	6,2	5,7	5,3	4,9	4,5	4,1	3,7	3,3	3,0	2,6
40	----	7,4	6,9	6,4	6,0	5,5	5,1	4,7	4,3	3,9	3,5
50	----	9,1	8,6	8,1	7,5	7,1	6,6	6,1	5,7	5,3	4,9
60	----	11,1	10,4	9,8	9,3	8,7	8,2	7,7	7,2	6,8	6,3
<b>75</b>	<b>13,5</b>	14,7	13,9	13,2	12,5	11,9	11,3	10,7	10,1	9,6	9,0
<b>86</b>	<b>17,4</b>	18,7	17,8	17,0	16,2	15,4	14,7	14,0	13,4	12,7	12,1
<b>95</b>	<b>23,8</b>	25,5	24,4	23,3	22,3	21,4	20,5	19,6	18,8	18,0	17,2
<b>99</b>	<b>33,5</b>	35,7	34,2	32,9	31,6	30,3	29,1	28,0	27,0	25,9	25,0

### 6.7 Porovnanie navrhovanej tabuľky z literárny modelom

Z tab. 20 vyplýva, že čím je vyššia relatívna vlhkosť vzduchu, tým modely medzi sebou viac odpovedajú a u malých relatívnych vlhkostí vzduchu sa rozchádzajú, ale iba s chybou, ktorá je len 10 % -tná.

Tab. 20 Porovnanie literárneho modelu s nami navrhnutou tabuľkou

RVV	Literárny model 40 °C	Model Naša navrhnutá tabuľka 40 °C	O koľko % sa naše hodnoty menšie od literatúry
20 %	4,1	3,7	+ 10 %
40 %	7,1	4,7	+ 5 %
60 %	10,1	9,8	+ 2 %

## 7 DISKUSIA

### 7.1 Vysvetlenie výsledkov

U výsledkoch sme dosiahli pár krát k vysokým hodnotám ako napr. u smreku pri porovnávaní experimentálnych hodnôt s teoretickým modelom. Kde pri relatívnej vlhkosti vzduchu (RVV) 0,33 % a 0,75 % obr.11 sa hodnoty vyšplhali vyššie než teoretický model. Vysvetlenie tejto skutočnosti si nevieme 100 % vysvetliť, ale jedným z riešení môžeme považovať chemické zloženie smreku, a že vzorky u 0,33 % RVV mohli obsahovať viac hemicelulózy či celulózy. Ďalším riešením môže byť, že vzorky obsahovali viacvrstevné dreňové lúče ktoré majú funkciu zásobnú – vodivú. Celkovo u vzoriek smreku sme dostali vyššie rovnovážne vlhkosti dreva oproti buku či dubu.

U dubu pri relatívnej vlhkosti vzduchu 0,99 % nám vyskočila nečakane hodnoty rovnovážnej vlhkosti dreva až na 38,19 % a nevieme si to taktiež jednoznačne vysvetliť. Jedno z riešení môže byť že dub má veľké jarné cievy a v nich pri vysokej relatívnej vlhkosti vzduchu kondenzovala voda pričom to nedochádzalo u smrek a u buku. Tento jav nazývame kapilárna kondenzácia. Je to stav rovnováhy fázy kvapalina - plyn, ktorom dochádza pri vyšších rovnovážnych tlakov, kde sa tvorí multivrstva. Povrchové napätie zvyšuje príťažlivé sily v póroch a trhlinách a zväčšuje tým väzbovú energiu a absorpčné teplo – dochádza teda k vyššej adsorpcii molekúl, ako by tomu bolo na rovnom povrchu. Ale i napriek vysokým hodnotám rovnovážnej vlhkosti dreva ktoré vykazoval dub si môžeme všimnúť na obr. 13, že spodná hranica nameraného minima prechádza teoretickou úsečkou, tým pádom to považujeme za verifikované.

Čo sa týka vzoriek u buku, tak sa výsledky experimentu najlepšie zhodujú z teoretickým modelom. Tým pádom môžeme skonštatovať, že u smreku a dubu by sa mohlo na experimente ešte viac zapracovať a pri ďalšom experimente na ne dať viac pozor.

## 7.2 Interpretácia výsledkov

Sorpčná izoterma sa u druhou dreva smrek, buk, a dub líši primárne pre chemické zloženie každého druhu, a pre hustotu dreva. Je známe, že z rastúcou hustotou dreva klesá rovnovážna vlhkosť dreva, takže hustota je taktiež dôležitá. Rozdiel medzi chemickým zložením u smreku je, že najväčší podiel má celulóza 45,6 % oproti buku a dubu. Preto si vysvetľujeme vyššie hodnoty rovnovážnej vlhkosti dreva u nameraných relatívnych vlhkostí vzduchu 0,33 % a 75 %. Celulóza patrí medzi polysacharidy (polymery zložené z mnoho monosacharidou navzájom) a viaže na seba určité množstvo vlhkosti, ktoré je v rovnováhe z vlhkostí v okolí. Je navlhavá len na povrchu. Má zo 70 % kryštalický charakter a sú v nej sorpčné miesta otočené smerom do vnútra a na ne sa voda nedostáva. Voda sa dostáva len do 30 % celulózy. Hemicelulóza je z pravidla kryštalická, tým pádom by mala mať najväčšiu navlhavosť lebo lignin je hydrofóbna látka ktorá nie je navlhavá a chová sa ako termoplast ktorý plní v dreve funkciu tmelu látok.

## 7.3 Praktické využitie sorpčnej izotermy

Využitie sorpčnej izotermy tak ako aj výpočet rovnovážnej vlhkosti dreva je potrebné poznať, pretože pri zmene rovnovážnej vlhkosti dreva sa menia aj rozmery – drevo napúča, zosychá a rúca sa.

Keď sa nastavuje sušiaci poriadok, tak je potreba vedieť odpovedajúcu vlhkosť dreva s okolitými podmienkami. To znamená, že je treba vedieť či nie sú nejaké rozdiely medzi jednotlivými druhmi dreva čo sa týka rovnovážnej vlhkosti dreva. Okrem toho je taktiež dôležité vedieť pri sušiacom poriadku druh dreviny, hrúbku reziva, požadované akosti reziva, vstupnú a výstupnú vlhkosť reziva.

Zo zmenou vlhkosti v dreve (do medze hydroskopicity) sú vplyvom napučania a zosychania taktiež spojené tvarové a rozmerové zmeny materiálu a nesprávnym vysušením potom dochádza k znehodnoteniu výrobku. Z tohto dôvodu je podstatné vedieť navlhavosť daného druh dreva, (teda rovnovážnu vlhkosť) v daných podmienkach.



## 7.4 Vplyv faktorov na rovnovážnu vlhkosť dreva

Rovnovážna vlhkosť dreva nie je iba funkciou relatívnej vlhkosti vzduchu, ale aj teplota je schopná ju ovplyvniť.

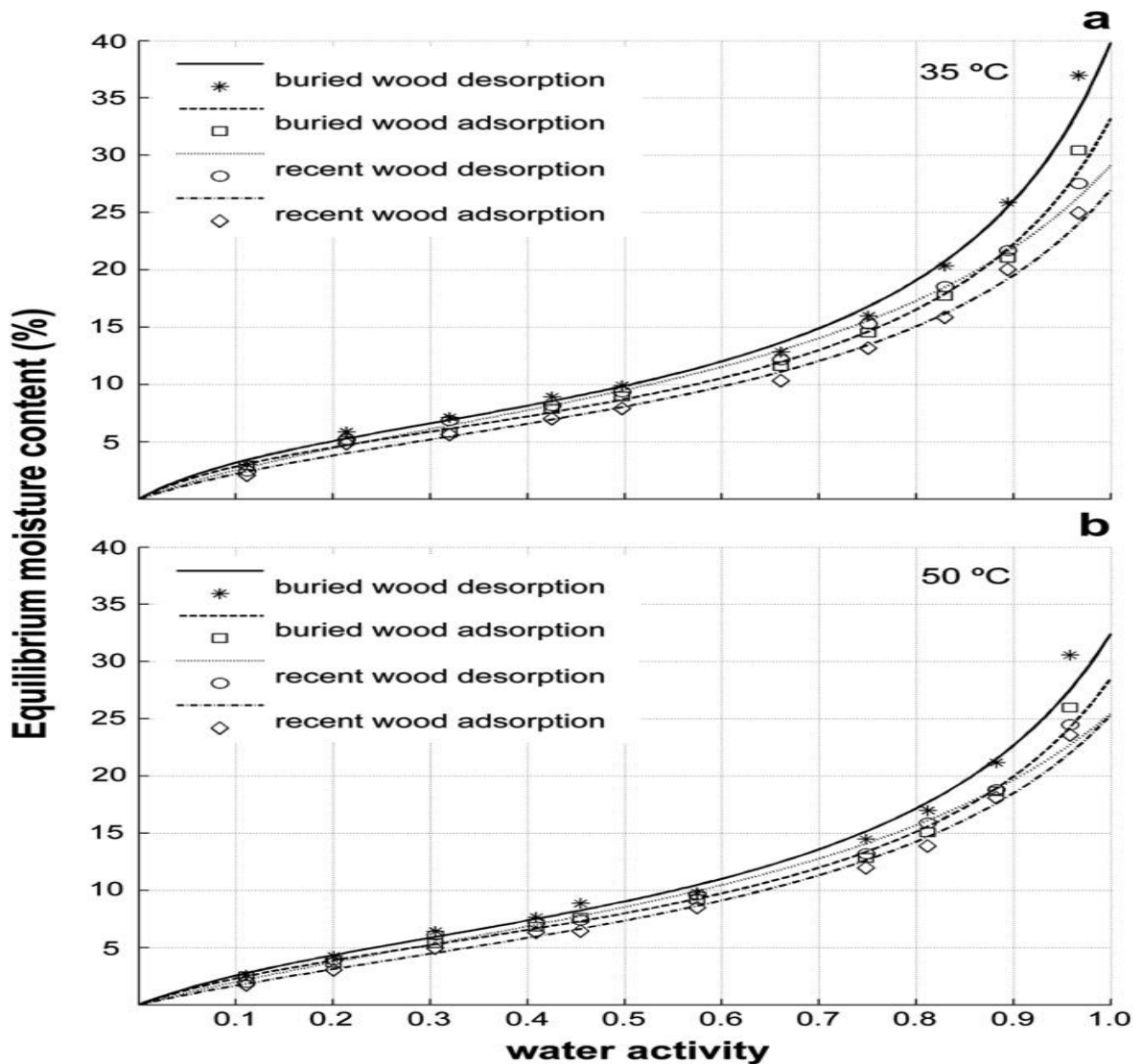
Roztoky sa môžu tiež podieľať na vplyv rovnovážnej vlhkosti dreva a to tým spôsobom že sa poskladajú inak, napr.: o koncentrácii kyseliny sírovej ktorá je bežne používaná (pozri ČSN 490143).

Kým sorpčné teórie predpokladajú, že rovnovážna vlhkosť dreva zodpovedajúca danej teplote a relatívnej vlhkosti vzduchu je daná jednoznačne, skutočnosť je taká, že rovnovážna vlhkosť, ktorú drevo nadobudne pri sorpcii, je o niečo nižšia než tá, ktorá sa dosahuje pri desorpcii. Tento jav môžeme nájsť v literatúre pod dvomi rôznymi pomenovania a to sorpčná hystereza a vplyv histórie sorpcie.

Hygroelastický efekt sa taktiež javí ako jedno z možných vysvetlení sorpčnej hysterezy, pretože sa experimentálne zistilo, že rovnovážna vlhkosť dreva zaťaženého tlakovými napätiami je nižšia a pri ťahových napätiach vyššia než rovnovážna vlhkosť voľne uloženého dreva. Za týchto predpokladov musíme pripustiť fakt, že drevo je pri sorpcii vystavené tlakovým napätiam, ktoré vyvoláva pôsobenie vnútorných častí telesa, ktoré blokujú napučanie vonkajších častí. Pri desorpcii je to práve naopak, tzn., že vnútorné časti nedovoľujú vonkajším voľne zoschnúť, pôsobia na ne ťahovými napätiami, čo má za výsledok vyššiu rovnovážnu vlhkosť dreva.

Z analýzy vedeckých článkov sme ďalej zistili, že faktor ako je vek stromu tiež vplýva na sorpčnú izotermu dreva. Cieľom (Estebana et al. 2010) bola hygroskopicitu dubu *Quercus spp.* vo veku  $5910 \pm 250$  BP (Before Present – pred súčasnosťou) a porovnanie dreva dlho uloženého v zemi (pochovaného - buried wood) s drevom súčasným (recent wood) a následne vypočítaná sorpčná izoterm pri teplote 35° C a 50° C podľa modelu GAB (pozri obr. 26).

Je jasné, že vek stromu hrá tiež rolu pri určovaní rovnovážnej vlhkosti dreva. Staré drevo má vyššiu rovnovážnu vlhkosť dreva ako drevo súčasné.



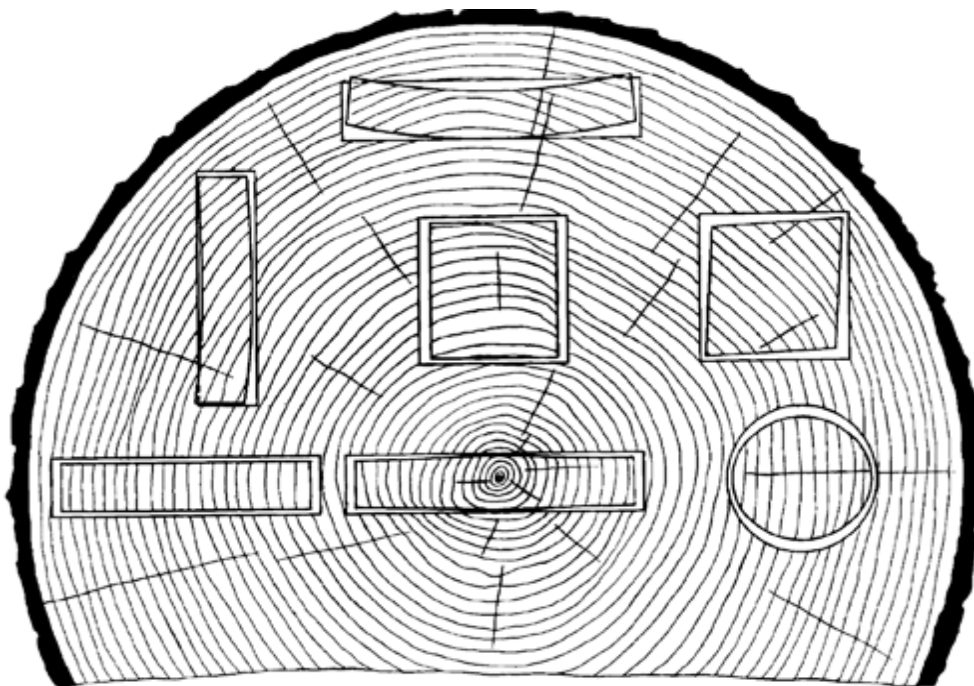
Obr. 26 Sorpčná izoterma dubového dreva vo veku  $5910 \pm 250$  BP pri teplote (a)  $35^{\circ}\text{C}$  (b)  $50^{\circ}\text{C}$  dreva (buried – uloženého v zemi) a dreva (súčasného - recent) a rozdiel pri adsorpcii a desorpcii.

### 7.5 Napučanie a zosychanie dreva

Rovnovážna vlhkosť dreva je dôležitá z toho dôvodu, že ovplyvňuje aj rozmerové zmeny, ktoré sú iné u buku ako sú u dubu či smreku a zmena vlhkosti aj keď len o jedno percento spôsobí oveľa väčšiu zmenu rozmeru u buku ako u napríklad dubu pretože vieme že buk je drevo z veľkým napučením.

Drevo je rozmerovo stabilný, keď obsah vody je vyšší, než je bod nasýtenia vlákien. Pod medz hydrokopicity drevo zmení rozmer, keď získa vlhkosť (napučí)

alebo stráca vlhkosť (zmenšuje), pretože objem bunkovej steny je závislý na množstve viazanej vody. Toto napučanie a zosychanie môže viesť k deformovaniu, ako napr. medzier v oblasti podlahových krytín. Z tohto dôvodu je dôležité, aby rozmerovú stabilitu chápať a nevystavovať veľkému kolísaniu vlhkosti počas prevádzky. S ohľadom na rozmerovú stabilitu, drevo je anizotrópny materiál. Zosychá najviac v smere letokruhov (tangenciálne),(radiálne), a (pozdĺžne). Hlavné druhy skreslenia v dôsledku týchto účinkov sú znázornené na obr. 27. Tangenciálne zmrštenie je asi tak dvakrát veľké ako radiálne.



Obr. 27 Charakteristika zmršťovania dreva

ZDROJ : Glass, Zelnika

Zosychanie nazývame procesom, pri ktorom drevo zmenšuje svoje lineárne rozmery, plochu alebo celkový objem, a to pri strate vody viazanej v rozsahu HM – 0 %. Rozoznávame zosychanie lineárne a (v jednotlivých anatomických smeroch – pozdĺžne, radiálne a tangenciálne ), plošné ( zmena plochy telesa) a objemové ( zmena objemu telesa) (*Gandelová et al., 1996* )

## 7.6 Vplyv veľkosti telies

Predpokladáme, že keby sme pracovali v experimente z väčšími vzorkami čo sa týka rozmerov, tak by sme očakávali iné výsledky vypočítaných rovnovážnych vlhkostí dreva i keď si myslíme že by sa nejednalo o extrémne rozdiely. Vysvetľujeme si to tým, že drevo je i keby sme vzali do úvahy rovnaký druh dreva tak každý strom môže mať inú chemickú stavbu aj keď nie veľmi odlišnú. Aj keď sa predsa pokúšame pestovať stromy, u ktorých budeme vedieť aké budú mať vlastnosti aj z hľadiska spracovateľnosti. Nazývame to šľachtenie, genetická modifikácia či čistá kultúra jednotlivých druhou semien.

## 8 ZÁVER

Myslíme si, že sa nám podarilo naplniť hlavný cieľ našej bakalárskej práce, rovnovážne vlhkosti dreva boli namerané, vypočítané a porovnané s teoretickým modelom sorpčnej izotermy.

Týmto experimentom sme potvrdili platnosť teoretického modelu okolo teploty 25,4 °C a ďalej sme ho v tabuľkách extrapolovali.

Z vyhodnotenia experimentu vyplýva, že nie je možné hydrotermicky upravovať všetky druhy dreva na rovnakú vlhkosť, pokiaľ sú určené do rovnakých klimatických podmienok, lebo každé z druhov dreva má v týchto podmienkach inú rovnovážnu vlhkosť.

Na vplyv rovnovážnej vlhkosti dreva má vplyv nielen druh dreva, hustota, chemické zloženie ale aj teplota, vek dreva, ale aj veľkosť vzoriek. Z tohto dôvodu je podstatné vedieť, akú má daný druh dreva rovnovážnu vlhkosť dreva v daných podmienkach.

U smreku pri teplote 25,4 °C bola rovnovážna vlhkosť dreva pri 33 %, 75 %, 86 %, 95 %, a 99 % relatívnej vlhkosti vzduchu nasledovná 8,79 %, 16,24 %, 18,12 %, 22,30 %, 30,05 %.

U buku pri teplote 25,4 °C bola rovnovážna vlhkosť dreva pri 33 %, 75 %, 86 %, 95 %, a 99 % relatívnej vlhkosti vzduchu nasledovná 7,57 %, 15,55 %, 16,96 %, 22,84 %, 33,77 %.

U dubu pri teplote 25,4 °C bola rovnovážna vlhkosť dreva pri 33 %, 75 %, 86 %, 95 %, a 99 % relatívnej vlhkosti vzduchu nasledovná 7,70 %, 14,18 %, 16,01 %, 20,74 %, 38,19 %.

## 9 SUMMARY

We think, we have achieved to fulfill the main objective of our thesis, the equilibrium moisture content of wood have been measured, calculated and compared with the theoretical model of sorption isotherms.

Experiments have confirmed the validity of the theoretical model about temperature of 25.4 ° C and further we extrapolated it in the tables.

The evaluation of the experiment shows, that is not possible hydrothermally modify all kinds of wood on the same humidity, until they are intended into the the same climatic conditions, because each type of wood has different equilibrium moisture content in the same conditions.

To influence the equilibrium moisture content of wood has an impact not only the type of wood, density, chemical composition but also temperature, age of timber but also the size of the samples. Therefore is important to know what kind of wood is the equilibrium moisture content of wood in the particular conditions.

For spruce at 25.4 ° C, the equilibrium moisture of wood in 33%, 75%, 86%, 95%, and 99% relative humidity was following 8.79%, 16.24%, 18.12%, 22, 30%, 30.05%.

For beech at 25.4 ° C, the equilibrium moisture of wood in 33%, 75%, 86%, 95%, and 99% relative humidity was following 7,57 %, 15,55 %, 16,96%, 22,84 %, 33,77 %.

For oak at 25.4 ° C, the equilibrium moisture of wood in 33%, 75%, 86%, 95%, and 99% relative humidity was following 7,70 %, 14,18 %, 16,01 %, 20,74 %, 38,19 %.

## 10 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- ESTEBAN, L. G. et al. Effects of burial of *Quercus* spp. wood aged 5910±250 BP on sorption and thermodynamic properties, *International Biodeterioration & Biodegradation* 64(2010)371-377, Madrid 2010.
- FITZPATRICK, John, J. et al. *Moisture sorption isotherm study of Sitka spruce, larch, willow and miscanthus chips and stems*, Ireland 2013.
- GENDELOVÁ, Libuše., HORÁČEK, Petr a ŠLEZINGEROVÁ, Jarmila. *Nauka o dřevě*. Brno: ES MZLU, 2014, 176 s. ISBN 978-80-7375-312-2, Brno 1996.
- GLASS, Samuel, V., ZELINKA, Samuel, L. Moisture Relations and Physical Properties of Wood. In: General Technical Report FPL-GTR-190, Chapter 4, Forest Products Laboratory 1999.
- HORÁČEK, Petr. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. Brno: ES MZLU, 1998, 124 s. ISBN 978-80-7375-169-2, Brno 2008.
- KOLLMANN, F., CÔTÉ, A. Principles of Wood Science and Technology. I. Solid Wood. Springer-Verlag, 1968. 592 s.
- MITCHELL, C. P., OVEREND, R. P. (ed.). Moisture sorption isotherms and drying characteristics of aspen (*Populus tremuloides*). In: *Biomass & Bioenergy*. [citované 2015-02-28]. Dostupné na internete: <<http://www.elsevier.com/locate/biombio>>.
- POŽGAJ, Alexander, et al. *Štruktúra a vlastnosti dreva.*, 485 s. ISBN 80-07-00960-4, 2. vyd. Bratislava: Príroda, 1997.
- RACKOVÁ, M. Vlhkoměry na dřevo, Metody kalibrace. In: *Technický předpis metrologický*, ČMI, verzia 3, Pardubice 2015.
- SIAU, John. F. Wood: *Influence of Moisture on Physical Properties.*: Department of Wood Science and Forest Products. 227 s. Virginia 1995.
- SCHUNK. Christian et al. *Methods for equilibrium moisture content determinativ*. Technische Universität München, Chair of Ecoclimatology, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, 85354 Freising, Germany 1987, [schunk@wzw.tum.de](mailto:schunk@wzw.tum.de)
- SCHUNK. Christian et al. Freising, Germany. Technical Report 35, Technische Universität München, Ottawa 1987.

SKAAR, Christen. *Wood-Water Relations*. Berlin: Springer-Verlag, 283 s. ISBN 3-540-19258-1, New York 1988.

WADSÖ, L. *Studies of Water Vapor Transport and Sorption in Wood: Building Materials*. Lund: Lund University, 1993.

*Elektronické zdroje:*

<http://thuja.mendelu.cz>