

Mendelova univerzita v Brně  
Lesnická a dřevařská fakulta  
Ústav nauky o dřevě

---

# **Tepelné vlastnosti masivního dřevěného panelu spojeného kolíky bez použití lepidla**

**Bakalářská práce**

**Martin Pekár**



Zde bych rád poděkoval mému vedoucímu bakalářské práce Prof. Dr. Ing. Petru Horáčkovi za trpělivost, ochotu, motivaci a cenné rady, které mi pomohly zpracovat a dokončit tuto práci. Dále chci poděkovat Ing. Janu Tippnerovi, Ph.D. a Bc. Radimu Rouskovi za pomoc při zpracování a získávání dat potřebných k vypracování mé závěrečné práce.

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto práci: **Tepelné vlastnosti masivního dřevěného panelu spojeného kolíky bez použití lepidla** 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. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity o tom, že předmětná 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 1. dubna 2015

---

## **Abstrakt**

Hlavním tématem bakalářské práce bylo zjišťování fyzikálních vlastností masivních dřevěných panelů a to jak experimentálně tak teoretickými výpočty. Experimentální část spočívala ve výrobě dřevěných panelů, jejichž jednotlivé vrstvy byly spojeny kolíky. Soudržnost panelů byla založena na bobtnání kolíků, a tudíž nebylo zapotřebí použití, lepidla. Na těchto panelech byla provedena experimentální zkouška a z dosažených dat byl vypočítán tepelný odpor a tepelná vodivost.

V teoretické části byly zjišťovány základní fyzikální hodnoty panelů, jako hustota, hmotnost nebo rozměry. Následně byla podle příslušných vzorců vypočítána tepelná vodivost a tepelný odpor.

Panely byly vyhotoveny v různých variantách, aby se prokázaly nejideálnější vstupní parametry pro jejich výrobu.

## **Klíčová slova**

Tepelná vodivost, tepelný odpor, Thoma- Holz 100.

## **Abstract**

The main theme of this bachelor's thesis was to detect the physical properties of solid wood panels both experimental and theoretical calculations. Experimental part consisted in the production of wooden panels whose individual layers were combined pins. Coherence panels based on swelling pins and thus did not require the use of adhesives. On these panels was conducted experimental data obtained from the test was calculated thermal resistance and thermal conductivity.

The theoretical part were determined fundamental physical value panels, such as density, weight or dimensions . Subsequently, the appropriate formulas calculated thermal conductivity and thermal resistance.

The panels were made in different variants that showed the most ideal input parameters for their production.

## **Keywords**

Thermal conductivity , thermal resistance, Thoma- Holz 100



# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Cíl práce</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Literární přehled</b>	<b>12</b>
3.1	Thoma- Holz .....	12
3.1.1	Technické řešení .....	12
3.1.2	Tepelné vlastnosti .....	15
3.1.3	Požární bezpečnost .....	16
3.1.4	Historie firmy .....	16
3.2	Použití dřeva pro stavební konstrukční prvky .....	17
3.2.1	Materiál .....	17
3.2.2	Třídění.....	17
3.3	Typologie dřevostaveb .....	20
3.3.1	Srubové stavby .....	20
3.3.2	Sloupková soustava.....	21
3.3.3	Skeletová soustava .....	23
3.3.4	Panelová konstrukce .....	24
3.3.5	Hrázděná konstrukce.....	26
3.4	Technické požadavky na výrobky .....	27
3.4.1	Požární bezpečnost .....	27
3.4.2	Úspora energie a ochrana tepla .....	28
3.5	Vlastnosti dřeva .....	29
3.6	Fyzikální vlastnosti dřeva .....	30
3.6.1	Vlhkost .....	30
3.6.2	Bobtnání a sesychání dřeva .....	32
3.6.3	Hustota.....	34
3.6.4	Tepelná vodivost .....	35
3.6.5	Teplený odpor .....	36
3.6.6	Rychlost šíření zvuku.....	37
3.6.7	Modul pružnosti.....	38

---

<b>4</b>	<b>Metodika</b>	<b>40</b>
4.1	Experiment .....	40
4.1.1	Výroba panelů .....	40
4.1.2	Vlhkostní rozdělení .....	40
4.1.3	Třídění.....	40
4.1.4	Měření tepelných vlastností.....	42
4.2	Teorie .....	42
4.2.1	Výpočet tepelné vodivosti .....	42
4.2.2	Výpočet tepelného odporu .....	43
4.3	Vyhodnocení výsledků .....	44
<b>5</b>	<b>Materiál</b>	<b>45</b>
5.1	Experiment .....	45
5.1.1	Výroba kolíků .....	49
5.1.2	Výroba prken.....	49
5.1.3	Výroba panelů .....	53
<b>6</b>	<b>Výsledky</b>	<b>55</b>
6.1	Fyzikální vlastnosti prken.....	55
6.1.1	Vlhkost .....	55
6.1.2	Hustota.....	56
6.1.3	Rychlost šíření zvuku .....	57
6.1.4	Modul pružnosti.....	60
6.2	Tepelné vlastnosti .....	63
6.2.1	Tepelná vodivost .....	64
6.2.2	Tepelný odpor .....	68
<b>7</b>	<b>Diskuze</b>	<b>70</b>
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>73</b>
<b>9</b>	<b>Summary</b>	<b>75</b>
<b>10</b>	<b>Literatura</b>	<b>76</b>



# 1 Úvod

Dřevo se od nepaměti využívá jako jeden ze základních stavebních prvků pro stavbu domů a jiných objektů. Jeho užívání se značně omezilo v období průmyslové revoluce. Nedostatek objektivních informací o stavbách, které jsou ze dřeva postaveny, mělo za následek používání jiných stavebních materiálů.

V některých zemích se dřevo používá jako tradiční stavební materiál a stavby ze dřeva určují celkový výraz a vzhled dané krajiny. Pomalu se lidé začínají vracet ke dřevěným stavbám, protože se začínají vyvracet mýty, které se rozšířily, a tím zpomalily vývoj dřevostaveb. Tyto mýty a obavy se týkají především hořlavosti dřevostaveb, jejich tepelné akumulaci, špatnými akustickými vlastnostmi nebo celkovou životností.

Dřevo je také velmi účinný přírodní materiál a pozitivně ovlivňuje ekologický koloběh, který hraje vždy důležitou roli v souvislosti s naší živitelkou zemí.

Tato bakalářská práce je zaměřena na stanovení fyzikálních vlastností panelů z masivního dřeva. Tyto panely budou spojeny dřevěnými kolíky bez použití lepidla. Všechna data pro stanovení fyzikálních vlastností, budou zjišťovány experimentálně, proto bude nutno tyto panely vyrobit. Všechny naměřené výsledky budou zpracovány a srovnány s teoretickými výpočty.

Z fyzikálních vlastností budou zjišťovány především tepelně-technické vlastnosti jako například tepelná vodivost nebo tepelný odpor.

Na začátek je nutno vyrobit osm vícevrstvých panelů ze smrkového dřeva, na kterých budou následně zjišťovány zmiňované vlastnosti. Panel bude vyroben z prken, které se vyskytu vad. Visuální třídění prken se bude řídit normou ČSN EN 338. Druhá varianta třídění bude pomocí nedestruktivního defektoskopického přístroje, který funguje na principu měření času průchodu ultrazvukových vln. Při stanovení hustoty prken a při známých rozměrech bude vypočítán dynamický modul pružnosti a podle něj bude stanovena tuhost jednotlivých desek. Panely budou vyrobeny ve dvou variantách. U první varianty bude použit cílený výběr prken s nejvyšší pevností a to především v povrchových vrstvách panelu. Při druhé variantě se použije náhodný výběr prken. Dále budou použita prkna dvou různých vlhkostí: Prkna použita na první čtyři panely budou mít rovnovážnou vlhkost dřeva, přibližně 16%. Na další čtyři panely budou použita prkna s vlhkostí kolem meze hygroscopicity a to průměrně 28%. U všech vyráběných prken se vlhkost bude zjišťovat váhovou metodou. Všechny prkna se budou skládat do panelů a spojovat pomocí bukové kolíkové tyče, jejichž vlhkost bude 0%.

U takto vyrobených panelů se budou dále zjišťovat zmiňované vlastnosti. Na základě výsledků musí být jasně stanoveno, jaká je ideální skladba panelů i jaká je ideální počáteční vlhkost prken použitých pro výrobu panelů. Dále se

budou porovnávat teoreticky vypočítané hodnoty s experimentálně zjištěnými hodnotami.

## 2 Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je:

- a) Vyrobit zkušební panely, které budou spojeny dřevěnými kolíky bez použití lepidla. Tyto panely budou vyhotoveny ve dvou variantách, přičemž jedna varianta je vyrobena ze tříděných desek a druhá z netříděných desek. Rozdělení desek bude provedeno na základě vizuálního nebo pevnostního třídění a současně bude jedna polovina panelů suchá (cca 16%) a druhá mokrá (cca 28%).
- b) Stanovit hustotu jednotlivých desek a po výrobě panelů stanovit i hustota těchto panelů. Následovat bude srovnání hustoty použitých desek a hustota panelů. Tyto hustoty musí přibližně odpovídat.
- c) Změřit a teoreticky vypočítat tepelnou vodivost všech panelů. Tyto hodnoty budou srovnávány jak mezi sebou tak s hodnotami v literatuře.
- d) Změřit a teoreticky vypočítat tepelný odpor všech panelů. Tyto hodnoty budou opět srovnávány mezi sebou i s hodnotami v literatuře.
- e) Analyzovat vliv třídění prken a jejich vlhkost na jednotlivé fyzikální vlastnosti.

## 3 Literární přehled

Tato práce je zaměřena na testování zkušebních panelů, které jsou vyrobeny ze dřeva. Protože má dřevo mnoho faktorů (vad), které ovlivňují jeho fyzikální a mechanické vlastnosti, je použití značně omezené. Pro dosažení optimálních podmínek, je možno vytvářet konstrukčních řešení, které umožňují používat dřevo, které má horší vstupní vlastnosti.

Jedním z takových řešení je vrstvení dřeva a jeho následné spojení do celků. K tomuto spojení se dnes nejčastěji používají lepidla a jiné nedřevěné spojovací prvky. Firma Thoma- Holz, která sídlí v Rakousku, ovšem přišla s novou technologií, která potěšila jak samotné uživatele, tak všechny ekologické aktivisty. Tato firma začala stavět domy, které využívají maximální počet dřevěných prvků a minimum ostatních materiálů.

Následující kapitola je orientována na stručný popis a filosofii firmy, která je víceméně předlohou a inspirací pro celou tuto práci, jelikož se zde bude testovat obdobný konstrukční systém. Následující informace jsou čerpány z technických listů a webových stránek Thoma- Holz GmbH.

### 3.1 Thoma- Holz

Firma Thoma-Holz je rakouská firma, která byla založena v roce 1990 Erwinem Thomou. Firma se zabývá výstavbou dřevěných domů speciální konstrukce. Prozatím jako jediná firma na světě má tento systém patentován. Technická dokonalost staveb, s použitím minimálního množství nedřevěných materiálů, vzbuzuje už řadu let pozornost nejen ekologů, ale také lidí, kteří zastávají bydlení v dřevostavbách.

Firma zastává teorii o používání měsíčního dřeva, které je těženo v určité fázi měsíce v zimním období. Dále jsou těženy vysokohorské stromy, aby kvalita použitého dřeva byla ještě vyšší, vlivem větší hustoty a pomalého růstu. V jedné ze svých knih Erwin Thoma uvádí, že takto těžené dřevo. Které je správně opracováno, vydrží až 500 let bez použití nátěrových hmot (Thoma – viděl jsem tě růst: o prastarém a novém životě se dřevem, lesem a Měsícem 2006).

#### 3.1.1 Technické řešení

Systém, který je použit v konstrukci celé stavby, spočívá ve vrstvení prken a hranolů a to vertikálně, horizontálně nebo diagonálně. Pro výrobu těchto prken a panelů firma používá horské dřevo a to zejména smrk a borovici. Všechny tyto prvky jsou spojeny bukovými kolíky a to bez použití lepidla. Bukové kolíky jsou podsušeny a následně jsou zalisovány do předem vyvrtaných otvorů v poskládaných panelech. Vlivem pohybu vody ve dřevě (difuze) bukový kolík bobtná a zvětšuje svůj objem, tím dosáhne konstrukce požadované

pevnosti a tvarové stability. Díky tomuto systému, kdy opadá použití lepidla na vrstvení prken, je tato stavba ekologičtější a uživatelé těchto staveb tvrdí, že i pobyt v takovém domě je příjemnější.

Tloušťka těchto stěn se pohybuje od 12 do 36 cm, ale jelikož firma upřednostňuje zakázkovou výrobu, může se konstrukce celé stavby uzpůsobit přímo pro místo, kde bude dřevostavba stát. Na základě individuálního plánování a přání klienta je možné dosáhnout nejvyšší možné kvality a to díky vysokému stupni prefabrikace. Díky prefabrikaci se zkracuje čas potřebný k samotné výstavbě a minimalizují se i následné práce na místě stavby, tím se snižují i náklady. Díky rychlé výstavbě není interiér domu vystaven působení vlhkosti, kvůli které by mohly vznikat nežádoucí plísně. Stavební postup je vidět na Obr. 1- 4



Obr. 1 Dovoz prefabrikovaných panelů na místo stavby (webové stránky firmy Thoma-Holz)





Obr. 2 Montáž jednotlivých panelů na základovou desku (webové stránky firmy Thoma-Holz)



Obr. 3 Montáž druhého patra domu (webové stránky firmy Thoma-Holz)



Obr. 4 Usazení krovů a celé střechy domu (webové stránky firmy Thoma-Holz)

### 3.1.2 Tepelné vlastnosti

Tepelně izolační vlastností dřeva jsou velmi dobré a to především díky jeho stavbě. To, že se ve struktuře dřeva vyskytuje vysoký podíl vzduchu, dělá ze dřeva velmi dobrý izolant. Rychlé vytopení budovy je zapříčiněno tím, že u dřevěné stavby se ohřívá především vzduch v místnosti a ne stěny. U zděných staveb je tomu právě naopak.

Akumulační schopnost dřevostaveb není příliš vysoká a má malou tepelnou kapacitu. Kvůli tomu dřevostavba rychle ztrácí naakumulované teplo, ale vytopení této stavby je rychlé.

Stěny systému Holz 100 (typ dřevostavby, ve kterém se využívá jako stavební materiál téměř 100% dřevo) izolují asi dvakrát lépe než stěny masivních dřevostaveb. I u lepených nosníků je hodnota prostupu tepla vyšší. Na svých webových stránkách výrobce uvádí, že součinitel prostupu tepla stěny o tloušťce 36,4 cm systému Holz 100Thermo je  $\lambda = 0,079 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ . Při známé tepelné vodivosti a tloušťce stěny se dá jednoduchým poměrem vypočítat tepelný odpor. Ten ovšem výrobce na svých stránkách neuvádí. Vypočítaný tepelný odpor vychází  $R = 0,217 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ . Tyto hodnoty splňují podmínky pro nízkoenergetický dům.

### 3.1.3 Požární bezpečnost

Požární bezpečnost je jedna z nejdůležitějších složek, která je kontrolována už při návrhu a plánování, ale také při samotné výrobě, montáži a užívání budovy. Protipožární předpisy předepisují závazná pravidla pro stavební konstrukce, konstrukční prvky nebo materiály.

Firma Thoma- Holz uvádí, že systém stěn Holz100 zajišťuje 3-5krát lepší protipožární bezpečnost, než je tomu u železobetonových staveb nebo zděných staveb a to zejména u podlah a stropů. Je uváděno, že stěna o tloušťce 36,4 cm má hodnotu požární odolnosti REI=120 min. Základní charakteristika hodnot REI, bude řešena v kap. 3.4.1.

### 3.1.4 Historie firmy

Erwin Thomas v roce 1990 zakládá firmu Thoma s.r.o. Jedná se o pilu, kde se provádí pořez řeziva. Mezi roky 1992-95 firma začíná s výstavbou prvních dřevěných domů z masivních dřevěných panelů. V roce 1996 Erwin Thomas vydává knihu „... viděl jsem tě růst“, ve které popisuje dřevo jako nenahraditelný materiál a vyzdvihuje těžení měsíčního dřeva a dál tuto metodu těžení ve vhodnou dobu měsíční fáze, začíná využívat. Všechno řezivo používané na stavbu domů, jsou výhradně z této těžby a jsou vysoké kvality. Firma také přechází na ISO 9001, řízení kvality a jakosti všech výrobků., jako první v Rakousku. První patent na celodřevěné domy Holz100 vzniká v roce 1998. O rok později je otevřeno výzkumné centrum Goldegg, kde se testují stavební systémy a konstrukce staveb.

Firma také spolupracuje s evropskými univerzitami např. ve Vídni, Štýrském Hradci nebo Stuttgartu. Na těchto univerzitách se všechny technické hodnoty systému Holz100 potvrzují. Od roku 2000 firma začíná expandovat po celé Evropě. Dále se daří firmě rozšiřovat své výrobky do Japonska, Asie a Ameriky. V roce 2003 se zavádí robotická výroba pro ještě vyšší jakost výrobků a kvalitu všech prováděných operací. Roku 2005 je v Německu otevřeno zastoupení firmy, které má dvojnásobnou kapacitu výroby. Téhož roku vzniká partnerská síť po celé střední Evropě a vzniká i první partner v San Francisku. 2008- firma se pouští do výstavby čtyřpatrového hotelu „Forsthofalm“. Domy Holz100 se stávají měřítkem pro zelené budovy (nízkoenergetické). V roce 2010 firma staví pasivní dům. Jedná se o kancelářskou budovu se čtyřmi patry. Chlazení a topení je zajištěno pomocí solárních panelů.



## 3.2 Použití dřeva pro stavební konstrukční prvky

Stavět a konstruovat ze dřeva znamená proměnit přírodní surovinu na užitný výrobek. Technologické inovace umožňují navrhovat vyrábět nové konstrukce, které vykazují lepší vlastnosti. V 21. století je hned několik rozumných důvodů a argumentů, proč stavět právě dřevěné stavby. Důležitější je například fakt, že dřevo je přírodním produktem a současně materiálem, který má dobrou tepelně izolační vlastnosti, zdravotně nezávadný, regulující vlhkost a s možností opětovného zhodnocení. Zpracování této suroviny tolik nezatěžuje životní prostředí jak je tomu u zpracování betonu, cihel nebo oceli. (Kolb 2008)

### 3.2.1 Materiál

Pro použití na nosné konstrukce dřevostaveb se nejčastěji používá smrk a jedle, výjimku ale tvoří ani borovice, modřín nebo douglaska. Z listnatých druhů dřeva je to například buk nebo dub. Tyto tvrdé dřeviny jako je dub a buk se zpravidla používají jako dřevěné polštáře, kolíky, klíny a jiné vysoce namáhané konstrukční prvky.

### 3.2.2 Třídění

Při třídění rozlišujeme mezi těmito dvěma oblastmi použití:

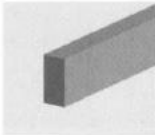
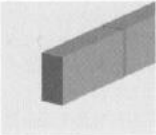
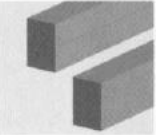
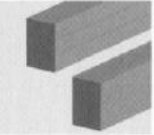
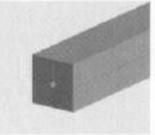
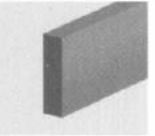
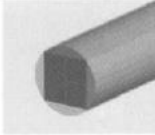
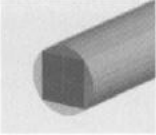
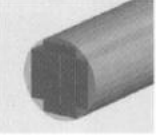
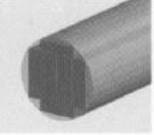
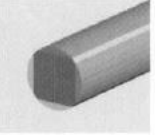
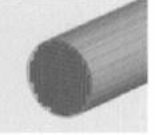
- dřevo s převážně nosnou funkcí, u něhož záleží na pevnostních a přetvárných vlastnostech i na trvanlivosti (zpravidla konstrukční dřevo), se třídí podle **tříd pevnosti**.
- dřevo s převážně nenosnou, dělicí, obkladovou nebo zčásti výztužnou funkcí, u něhož záleží na vzhledu (estetika) a charakteru povrchu i stabilitě tvaru a trvanlivosti (např. řezivo nebo hoblované řezivo), se třídí podle **jakostních tříd**.

Jestliže dřevo s nosnou funkcí, které je tříděné podle tříd pevnosti, musí současně odpovídat také estetickým požadavkům, používají se obě kritéria třídění. (Kolb 2008)

Takovéto rozdělení do pevnostních tříd je předmětem normy ČSN EN 338- Konstrukční dřevo- Třídy pevnosti.

#### a) Konstrukční dřevo

Konstrukční dřevo je dřevo, které plní ve stavbě převážně nosnou funkci. Přehled konstrukčního dřeva můžeme vidět na Obr. 5

Konstrukční dřevo						
	Rostlé dřevo		Lepené dřevo			Lepené lamelové dřevo
Typ	Řezivo	KVH	dvakrát lepeno	tříkrát lepeno	křížové lepeno	vícenásobně lepeno
Označení		Konstrukční rostlé dřevo se zubovitým spojem	Nosníky DuoBalken® Duplex	Nosníky Triobalken®	Křížové nosníky	B5H = lepené lamelové dřevo
Náčrt systému						
Využití dřeva z kulatiny						
Třídy pevnosti	C20, C24, C27, C35, C45	C20, C24, C27, C35, C45	C20, C24, C27, C35, C45	C20, C24, C27, C35, C45	C20, C24, C27, C35, C45	GL24k, GL24h, GL28k, GL28h, GL36k, GL36h
Běžná třída pevnosti	C24	C24	C24	C24	C24	GL24h
Průřezy	60/80 až 240/300	80/100 až 120/200	60/60 až 140/240	60/100 až 140/240	100/100 až 160/240	80/100 až 260/2000
Délky	až 8 m, ojediněle až 12 m	12–18 m	12–18 m	12–18 m	12–18 m	až 18 m, ojediněle až 40 m
Dostupnost	pořez podle rozpisu	pořez podle rozpisu	ze skladu	ze skladu	na požadavek	Částečně ze skladu, jinak výroba podle rozpisu
Sušení	nákladné, problematické	nákladné	jednoduché (lamely)	jednoduché (lamely)	nákladné	jednoduché (lamely)
Tvar	přímý	přímý	přímý	přímý	přímý	přímý, zakřivený

Obr. 5 Přehled konstrukčního dřeva (dřevo s převážně nosnou funkcí), (Kolb 2008)

## b) Rostlé dřevo

Jako rostlé dřevo se označují hranoly a konstrukční rostlé dřevo. Hranoly jsou řezané nosníky, zatímco označení konstrukční rostlé dřevo platí pro vysušené rostlé dřevo, délkově nastavované zubovitým spojem nebo nenastavované. Konstrukční rostlé dřevo bývá zpravidla nabízeno hoblované. Pro třídění staticky namáhaného rostlého dřeva je platná norma EN 338.

Systém tříd pevnosti stanovený v **EN 338** je uveden v následujících tabulkách. Je vytvořen z devíti tříd pro jehličnaté a topolové dřevo (Tab. 1) a šesti tříd pro listnaté dřevo (Tab. 2). Tento systém zahrnuje od nejnižší třídy jehličnatého dřeva C14 do nejvyšší třídy listnatého dřeva D70.

	C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30	C35	C40
	(MPa)								
Ohyb	14	16	18	22	24	27	30	35	40
Tah	8	10	11	13	14	16	18	21	24
Tah _ _	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Tlak	16	17	18	20	21	22	23	25	26
Tlak _  _	4,3	4,6	4,8	5,1	5,3	5,6	5,7	6,0	6,3
Smyk	1,7	1,8	2,0	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8
	(GPa)								
E    *)	7	8	9	10	11	12	12	13	14
E    **)	4,7	5,4	6,0	6,7	7,4	8,0	8,0	8,7	9,4
E _ _ *)	0,23	0,27	0,30	0,33	0,37	0,40	0,40	0,43	0,47
G    *)	0,44	0,50	0,56	0,63	0,69	0,75	0,75	0,81	0,88
	(kg.m <sup>-3</sup> )								
Hustota ***)	290	310	320	340	350	370	380	400	420

Poznámka:

\*) průměrná hodnota – hodnota, které není při normálním rozdělení dat dosaženo v 50 % případech

\*\* ) 5 % kvantil – hodnota, která se blíží hodnotě minimální a prakticky jí není dosaženo při normálním rozdělení dat v 5 % případech

\*\*\*) konvenční hustota

Tab. 1 : Třídy pevnosti a charakteristické hodnoty podle EN 338. Jehličnaté a topolové dřevo (při  $w=12\%$ ).

	D30	D35	D40	D50	D60	D70
	(MPa)					
Ohyb	30	35	40	50	60	70
Tah	18	21	24	30	36	42
Tah _ _	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,9
Tlak	23	25	25	29	32	34
Tlak _  _	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5
Smyk	3,0	3,4	3,8	4,9	5,3	6,0
	(GPa)					
E    *)	10	10	11	14	17	20
E    **)	8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8
E _ _ *)	0,64	0,69	0,76	0,93	1,13	1,33
G    *)	0,60	0,65	0,70	0,88	1,06	1,25
	(kg.m <sup>-3</sup> )					
Hustota ***)	530	560	590	650	700	900

Poznámka:

\*) průměrná hodnota – hodnota, které není při normálním rozdělení dat dosaženo v 50 % případech

\*\* ) 5 % kvantil – hodnota, která se blíží hodnotě minimální a prakticky jí není dosaženo při normálním rozdělení dat v 5 % případech

\*\*\*) konvenční hustota

Tab. 2: Třídy pevnosti a charakteristické hodnoty podle EN 338. Listnaté dřevo (při  $w=12\%$ ).

### c) Lepené dřevo

U většiny systémů dřevěných staveb se dnes téměř nepoužívá časté rostlé dřevo. Dřevo pro dřevěné stavby musí být vysušené a rozměrově přesné. Proto se používá vysušené konstrukční rostlé dřevo nastavované zubovitým spojem nebo nosníky slepené ze dvou nebo tří lamel. Lepené dřevo s lamelami nastavovanými jednotlivě zubovitým spojem je vhodné také na stropní systémy.

### d) Lepené lamelové dřevo

Lamely pro lepené lamelové dřevo se řídí podle normy EN 1194 „Dřevěné konstrukce- Lepené lamelové dřevo- Třídy pevnosti a stanovení charakteristických hodnot“. Jsou rozděleny do tříd: T11, T14,5 a T18 pro vizuálně tříděné řezivo a T22 jakož i T26 pro strojně tříděné lamely.

Hotové slepené lamelové dřevo se rozděluje do tříd pevnosti GL24, GL28 a GL36. Kromě toho se rozlišuje mezi homogenními a kombinovanými průřezy s lamelami rozdílných tříd. (Kolb 2008)

## 3.3 Typologie dřevostaveb

V dřevěných stavbách se v závislosti na konstrukci stěny uplatňují tyto konstrukční systémy:

- srubová stěnová konstrukce
- sloupková soustava
- skeletová soustava
- panelová konstrukce
- hrázděná konstrukce

### 3.3.1 Srubové stavby

Srubové stavby jsou rozšířené po celém světě, avšak největší význam mají v severovýchodních zemích, Rusku a Kanadě. Srubová stavba je charakteristická vodorovnými, na sebe vrstvenými prvky, které jsou v rozích spojeny rohovými spoji. Tyto spoje bývají často viditelné a umělecky zpracované. Nevýhodou těchto staveb je velká spotřeba materiálu (dřeva), pevné uspořádání půdorysu, velká míra sednutí všech prvků a v neposlední řadě vysoké nároky na řemeslnou dovednost tesařů.

Plášť budovy srubových staveb dříve sestával z jediné vrstvy, která měla současně obkladovou, nosnou a prostor tvořící funkci. Avšak v nynější době nároky uživatelů na izolaci a pohodu prostředí výrazně vzrostly. Tyto zvýšené

požadavky vedly k dnes běžným plášťům budovy a dřevěným konstrukčním prvkům s více vrstvami, které plní různé funkce.



Obr. 6 Příklad srubové stavby (webové stránky Srub.cz)

### 3.3.2 Sloupková soustava

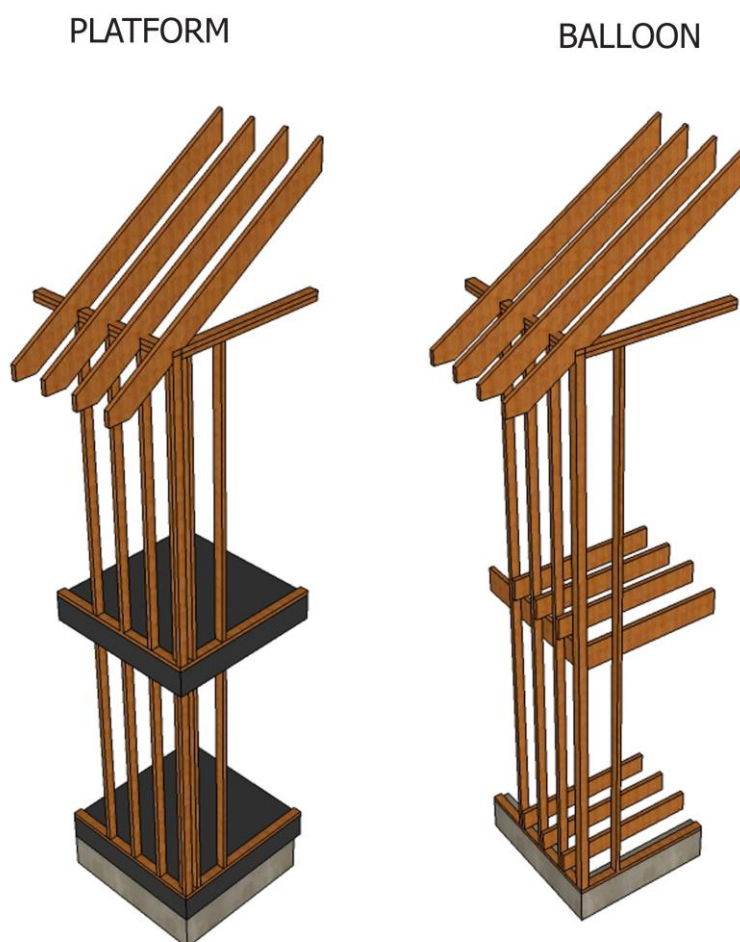
Sloupková konstrukce dřevostaveb spočívá v žebrovém stavebním systému, který je tvořen vertikálně postavenými dřevěnými sloupky. Jako podélné ztužení se používala prkna, desky nebo dnes velkoplošné materiály a mezi sloupky se umísťuje izolace. Charakteristickými znaky pro sloupkové stavby je oboustranně obložená konstrukce, štíhlý a vysoký průřez stavby, malá možnost prefabrikace (vysoká pracnost na staveništi) a těsná vzdálenost sloupků. Sloupkové soustavy se podobají hrázděné konstrukci. Rozdíl mezi sloupkovou a hrázděnou stavbou (viz. níže) je ten, že nosná kostra hrázděných staveb je sama vyztužena vzpěrami, zatímco u sloupkových staveb nosná konstrukce získává stabilitu vnějším bedněním z masivního dřeva, nebo velkoplošných materiálů na bázi dřeva. Jako sloupkovou sestavu lze chápat dva základní typy této konstrukce.

### a. Balloon- Frame

U systému Balloon-Frame, procházejí stěnové sloupky průběžně přes dvě nebo více podlaží. Spodní a horní uzavření tvoří vodorovná prkna (prahy a vaznice). Stropní nosníky jsou uloženy na stojaté fošně, která je zapuštěna do zářezů stěnových sloupků.

### b. Platform- Frame

Charakteristickým znakem Platform- Frame je poschoďová skladba. Plošina se během stavby používá jako pracovní plocha a výrobní místo. Běžně se používá pro stavbu jedno nebo dvoupodlažních domů. Tento systém umožňuje standardizaci a prefabrikaci a používání normalizovaných konstrukčních prvků. Kromě toho je tento způsob stavění velmi flexibilní vzhledem ke konstrukci i architektonickému řešení. (Kolb 2008)



Obr. 7 Rozdíl v konstrukčních systémech Balloon- Frame a Platform- Frame (webové stránky InterNACHI)



### 3.3.3 Skeletová soustava

Skeletová stavba je druh stavby, která ze sloupů, nosníků a výztužných prvků v pravidelném rastru tvoří nosnou konstrukci. Tato primární nosná konstrukce integruje stropy jako sekundární nosnou konstrukci z nosníků nebo z plošných prefabrikovaných konstrukčních prvků. Stěny už tedy vytvářejí pouze prostor a mohou být zabudovány nezávisle na tomto nosném skeletu, protože nemusí přenášet žádné zatížení. Výhodou této konstrukce je použití velkoplošných oken a prosklených ploch.

Skeletová stavba je protipólem ke stavbám z masivního dřeva a ke stavbám rámové konstrukce, zatímco u těchto staveb je nosná struktura lineární a zatížení přenášejí stěny, u skeletových staveb přenášejí zatížení bodově uspořádané sloupy. Takto vytvořená nosná konstrukce mívá v dnešní době velké rozpětí, a proto se zde dost často používá lepené lamelové dřevo. Které má lepší mechanické i fyzikální vlastnosti. (Kuklík 1994)



Obr. 8 Stavba skeletové soustavy- nosnou funkci tvoří skelet ze sloupů (webové stránky *Dřevo & Stavby*)

### 3.3.4 Panelová konstrukce

Tento typ staveb se vyrábí z prefabrikovaných velkoplošných dílců, které vznikají vrstvením lepeného nebo jinak spojeného dřeva, přičemž jednotlivé vrstvy jsou proti sobě vždy otočeny o 90 stupňů, což zajišťuje dokonalou tvarovou stabilitu. Vzhledem k technologii sušení a lepení vykazují tvarovou stálost i při změnách vlhkosti. Nosné prvky jsou používány jako stavebnice pro stěnové, stropní i střešní konstrukce. Celá „skládačka“ je nejčastěji vyráběna na počítačem řízených automatizovaných linkách. Pro technologii je charakteristické atraktivní přiznání pohledové textury dřeva v interiéru místností. Kontaktní tepelná izolace obvodového pláště se aplikuje zásadně z vnější strany nosné konstrukce tak, aby byla zachována difuzní otevřenost stěny. Další výhodou je rychlost výstavby a jednoduchost montážních spojů. Jedná se sice o dosud méně rozšířenou, ale zajímavou a perspektivní technologii pro moderní dřevostavbu.

Rozhodující část výroby panelových dřevostaveb se odehrává ve výrobních halách: stavba se zde smontuje „nanečisto“ a po ověření je převezena na staveniště, kde je hrubá stavba na předem připravený základ hotová za dva až tři dny. Významnou předností je proto rychlost výstavby. Ekonomická výroba spočívá v opakovatelnosti jednoho prvku vyráběného ve velkých sériích. Panely jsou ze zákona stanoveným výrobkem, musí být u nich ověřena shoda se základními požadavky. (webové stránky Dřevo & Stavby)

Používání CLT (jde o velkoformátové dřevěné panely, složené ze tří a více vrstev masivního dřeva, spojeného mechanicky anebo lepením. Zjednodušeně se dá říct, že jeden panel tvoří jednu stěnu domu. Tloušťky panelů se nejčastěji pohybují od 80 mm do tlouštěk cca 400 mm) panelů pro výrobu dřevostaveb má mnoho výhod a to ať už v úsporách energie tak v tvarové stálosti a přesnosti celé stavby. Jako panelovou konstrukci můžeme chápat i systém Thoma- Holz neboť jednotlivé stěny jsou prefabrikované a na místo stavby dovezené jako celek. Prakticky jde o CLT panely s tím rozdílem, že u systému Thoma- Holz 100 není použito lepidlo a jenom minimum nedřevěných spojovacích prvků. Místo lepidla jsou používány bukové kolíky, které udržují stabilitu stavby.





Obr. 9 Stavba rodinného domu z CLT panelů (webové stránky [Bydlení.cz](http://Bydlení.cz))



Obr. 10 Způsob montáže prefabrikovaných celků na místě stavby (webové stránky [ceskestavby.cz](http://ceskestavby.cz))

### 3.3.5 Hrázděná konstrukce

Pro hrázděné stavby je charakteristická patrová výstavba, oboustranně obložená nosná konstrukce, která zůstává zvenku viditelná, čistota rohových spojů a plátování. Dnes se tato konstrukce dřevostaveb používá už jen velice zřídka.



Obr. 11 Typický dům hrázděné konstrukce

### 3.4 Technické požadavky na výrobky

#### 3.4.1 Požární bezpečnost

Základní požadavek vyžaduje, aby bylo omezeno šíření požáru a aby nosnost konstrukce byla zajištěna po stanovenou dobu. Tyto požadavky mohou být splněny prokázáním požární odolnosti nosných a/nebo požárně dělicích konstrukcí. Mezinárodně je dohodnuto používání normové křivky teplota/čas. (viz ISO 834 Část 1) jako modelu pro plně rozvinutý požár. Je to dáno vztahem:

$$T = 345 \log_{10} (8 t + 1) + 20$$

*T - teplota plynu v peci ve °C*

*t - trvání tepelného namáhání v průběhu zkoušky v minutách.*

Základní kritéria používaná pro charakterizování požární odolnosti výrobku jsou:

- nosnost
- celistvost
- izolace

vyjádřené v minutách.

#### **Značky**

R- pro nosnost

E- pro celistvost

I- pro izolaci

jsou doplňovány zaznamenanou dobou požární odolnosti v minutách a jsou používány, pokud se charakterizace provádí podle normové křivky teplota/čas.

Třídy se vyjadřují takto:

#### **U nosných konstrukcí:**

REI - čas: Minimální doba, po kterou jsou splněna všechna kritéria (nosnost, celistvost a izolace).

RE - čas: Minimální doba, po kterou jsou splněna dvě kritéria, a to nosnost a celistvost

R - čas: Minimální doba, po kterou je splněno pouze kritérium nosnosti

### **U nenosných konstrukcí:**

EI - čas: Minimální doba, po kterou jsou splněna dvě kritéria, a to celistvost a izolace

E - čas: Minimální doba, po kterou je splněno pouze kritérium celistvosti.

Doba požární odolnosti se vyjadřuje jednou z následujících hodnot:  
15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 360.

Pak lze definovat následující příslušné třídy:

REI 15, REI 30, REI 45, .... RE 15, RE 30, ... R 15, R 30, ... .

Stavební prvky s nosností 155 minut, celistvostí 80 minut a tepelnou izolací 42 minut jsou klasifikovány jako R 120/ RE 60/ REI 30 nebo stavební prvky s nosností 70 minut a celistvostí 35 minut jsou klasifikovány jako R 60/ RE 30. Pokud se používají součtové metody, může se čas naměřený pro každý výrobek a zaokrouhlený dolů na celé minuty pro stanovení příslušné klasifikace kombinovat.

### **3.4.2 Úspora energie a ochrana tepla**

Materiály pro hrubou stavbu jsou uvedeny ve většině národních norem, které stanoví způsoby výpočtu tepelných ztrát. Pro příklad je uveden neúplný přehled takových materiálů:

- materiály pro konečné povrchové úpravy,
- malty, omítky a hmoty pro povrchové úpravy,
- všechny druhy betonu,
- řezivo, materiály ze dřeva, prkna, přírodní kámen, cihly, tvárnice,
- štěrk, písek, zemina,
- sklo, plasty, kovy,
- tepelně izolační materiály.

U těchto výrobků je pro různé soubory podmínek stanovena řada obecně uznaných návrhových hodnot, které mohou projektanti používat bez dalších měření. Charakteristiky, které se mají uvažovat, pokud jsou přiměřené pro příslušný materiál, jsou uvedeny v následující tabulce. (Tab. 3)

U materiálů, pro něž jsou požadovány lepší návrhové hodnoty charakteristik než obecně uznané hodnoty uvedené v seznamu nebo v případech, kdy uživatel žádá o potvrzení dané hodnoty, se požadují harmonizované metody stanovení hodnot, aby bylo možno požadované lepší návrhové hodnoty ověřit. Podmínek použití dospěje k návrhové hodnotě.

Číslo	Charakteristiky
1	Objemová hmotnost, tvar, tvarová stálost
2	Tepelná vodivost nebo tepelný odpor při různých vlhkostech
3	Měrná tepelná kapacita
4	Součinitel teplotní roztažnosti
5	Difuzní odpor vodních par
6	Součinitel vlhkostní roztažnosti
7	Hygroskopický obsah vlhkosti pro různé relativní vlhkosti
8	Nasákavost
9	Průvzdušnost
10	Mechanické charakteristiky, např. pevnost v tlaku, pevnost v tahu, modul pružnosti, Poissonova konstanta
11	Intenzita vyzařování (emisivita) při dlouhovlnném záření
12	Propustnost dlouhovlnného záření
13	Propustnost a pohltivost slunečního záření

*Tab 3: Charakteristiky materiálů pro hrubou stavbu, které se mají v daném případě uvažovat*

Z pohledu tepelných vlastností ze zmiňovaných charakteristik jsou nejvíce důležité kategorie 1-4. Těmito charakteristikami se práce přesně nezabývá, ale mají pro tuto práci největší význam. Práce je zaměřena na 2 kategorie.

### 3.5 Vlastnosti dřeva

Základní vlastnosti dřeva odpovídají jeho chemické a anatomické stavbě. Ze stavby dřeva vyplývá jeho anizotropie, pórovitost, hygroskopicitu a nehomogenita. Tyto základní charakteristiky dřeva předurčují a limitují všechny následné mechanické a fyzikální vlastnosti dřeva. (Gandelová, Horáček 2009)

#### a) Anizotropie dřeva

Tři základní směry u anatomické stavby dřeva tj. příčný, radiální a tangenciální, mají za následek anizotropii dřeva. Anizotropii dřeva lze chápat jako rozdílné vlastnosti ve všech těchto směrech. Tyto vlastnosti jsou závislé jak na orientaci, tak i na směru. Anizotropní charakter se u dřeva nejvíce projevuje při rozměrových změnách spojených s příjmem a výdejem vody, pohybem vody a tepla, a zejména při mechanickém namáhání. Anizotropie vyplývá z orientace základních chemických stavebních sloučenin, respektive orientace vazebných sil mezi nimi.

### b) Pórovitost dřeva

Póry ve dřevě jsou vlastně lumeny buněk a mezibuněčné prostory. Jejich objem často převyšuje objem buněčných stěn. Tyto póry vytvářejí ve dřevě kapilární systém, který může být zaplněný tekutinou například vodou. Mnoho dřevin má svoji pórovitost redukovanou v důsledku přítomnosti doprovodných vyluhovatelných látek nebo thyly. Pórovitost dřeva vyplývá z optimalizace tvaru buňky tj. maximální snížení spotřeby stavebních látek při minimálním snížení pevnosti.

### c) Hygroskopicitata dřeva

Pod pojmem hygroskopický materiál je nutné si představit takový materiál, který má schopnost měnit svoji vlhkost v závislosti na vlhkosti okolního prostředí. Takový materiálem dřevo bezesporu je. Suché dřevo poutá kapaliny a plyny díky celulóze a hemicelulóze (buněčná stěna), protože jednotlivé elementy dřeva byly diferencovány v plně nasyceném vodním prostředí a přítomnost vody byla nezbytná. Nežádoucím důsledkem při změně vlhkosti jsou rozměrové změny (sesychání a bobtnání) a také změny pevnosti dřeva.

### d) Nehomogenita

Dřevo je nehomogenní materiál a jeho nehomogenitu lze pozorovat již na submikroskopické a mikroskopické úrovni (stavba pletiv, struktura zdřevnatělé buněčné stěny) dále na makroskopické úrovni (jádro, běl, jarní a letní dřevo nebo dřevňové paprsky). (Gandelová, Horáček 2009)

## 3.6 Fyzikální vlastnosti dřeva

### 3.6.1 Vlhkost

Přítomnost kapalin (vody) ve dřevě se nazývá vlhkostí dřeva. Vyjadřuje se podílem hmotnosti vody k hmotnosti dřeva v absolutně suchém stavu- vlhkost absolutní  $w_{abs}$ . Absolutní vlhkost se nejčastěji vyjadřuje v procentech a vypočítá se podle vztahu:

$$w_{abs} = \frac{m_w - m_o}{m_w} \quad (1)$$

$m_w$  – hmotnost vlhkého dřeva (kg, g)

$m_o$  – hmotnost absolutně suchého dřeva (kg, g)

V závislosti na podílu vody ve dřevě ve vztahu k sušině dřeva rozlišení při hraniční hodnotě:

1. Vlhkost suchého dřeva- ustálený poměr hmotnosti vody k hmotnosti sušiny při sušení dřeva teplotou  $103\pm 2$  °C to znamená, že se ve dřevě nenachází žádná voda vázaná ani volná. Tato vlhkost se vyjadřuje vlhkosti absolutně suchého dřeva ( $w = 0\%$ ).
2. Vlhkost při nasycení buněčných stěn- mikrokapilární systém v buněčné stěně zcela zaplněn vodou. Tato vlhkost se vyjadřuje mezi nasycení buněčných stěn MNBS nebo mezi hygroskopicity.
  - **Mez hygroskopicity** (dále MH) je hranice mezi vodou volnou a vázanou. Je to prakticky stav, do které je dřevo schopno přijímat vodu vázanou. MH je tedy stav kdy dřevo neobsahuje žádnou vodu volnou a maximum vody vázané. Teplota na MH má vliv a to takový, že s rostoucí teplotou MH klesá. Vlhkost se při MH u našich dřev pohybuje v rozmezí od 22-35% a závisí zejména na druhu dřeva, tj. na anatomické a chemické stavbě dřeva.
3. Vlhkost při nasycení dřeva- mikro- i makro kapilární systémy je plně nasycen vodou, dřevo obsahuje maximální množství vody. Tato vlhkost se vyjadřuje maximální vlhkostí dřeva ( $W_{max} = 80...400\%$ ), (Horáček 2008).

Druh dřeva	MH (%)
SM	30 – 34
BK	32 - 35

Tab. 4: Porovnání meze hygroskopicity mezi SM a BK (Matovič 1993)

### Rozdělení vody ve dřevě

Z hlediska uložení vody ve dřevě můžeme vodu v zásadě rozdělit na vodu volnou a vodu vázanou.

Volná voda nazývaná také jako kapilární vyplňuje ve dřevě pouze lumény případně mezibuněčné prostory, při čemž je poutána silami kapilární povahy. Ve dřevě je přítomna pouze tehdy, když jsou buněčné stěny zaplněné vázanou vodou. Množství volné vody ve dřevě se pohybuje od bodu nasycení vláken až do plného nasycení dřeva vodou. Množství vody může být vyšší, než 100%, závisí převážně od objemu lumenů buněk.

Vázaná voda, také nazývána jako hygroskopická, se nachází v buněčných stěnách a je vázána vodíkovými vazbami. Voda vázaná se ve dřevě nachází v rozmezí vlhkosti od 0% do bodu nasycení vláken, kterého průměrná hodnota vlhkosti se pro naše dřeviny udává 30 procent. (Horáček 2008)

## Navlhavost dřeva

Jelikož je dřevo hygrokopický materiál, tak mění svoji vlhkost podle vlhkosti okolního prostředí. Vlhkost dřeva, která se ustálí při daných podmínkách prostředí (relativní vlhkost vzduchu a teplota) se nazývá *rovnovážnou vlhkostí dřeva* (RVD). Stav, který je takto dosažen se potom nazývá *stavem vlhkostní rovnováhy* (SVR). Tento proces změny vlhkosti v závislosti na relativní vzdušné vlhkosti a teplotě prostředí je vratný, ale ne po stejné křivce. Pro stejnou relativní vlhkost vzduchu je vlhkost dřeva vyšší při absorpci než při desorpci. Závislost RVD na relativní vlhkosti vzduchu při konstantní teplotě se nazývá sorpční izotermou. Rozdíl sorpčních isoterm při adsorpci a desorpci se nazývá hysteréze sorpce. (Horáček 2008)

### 3.6.2 Bobtnání a sesychání dřeva

Dřevo jako hygrokopický materiál dokáže přijímat a odevzdávat vodu ve formě par. Hygrokopie vytváří podmínky a příjemné obytné klima dřevěného domu. Dřevo současně s přijímáním a odevzdáváním vlhkosti sesychá a bobtná. U většiny v současnosti používaných systémů dřevěných staveb se proto používá dřevo, které bylo již při zpracování vysušeno na vlhkost odpovídajícímu použití. Musí se však uvážit sesychání a bobtnání, které je rozdílné podle směru vláken. (Kolb 2008)

Mění-li se vlhkosti dřeva v rozsahu vody vázané, dřevo podléhá rozměrovým změnám. Snížení vlhkosti dřeva mokrého MH (odpaření vody volné) nemá vliv na změnu rozměrů. Sesychání a bobtnání je lokalizováno v buněčné stěně, kde dochází k oddalování či přibližování fibrilní struktury. Tím se mění rozměry jednotlivých elementů a dřeva jako celku. Velký vliv na velikosti sesychání a bobtnání má orientace fibrin v buněčné stěně. Vzhledem k tomu, že největší podíl z buněčné stěny připadá na S<sub>2</sub> vrstvu sekundární buněčné stěny (až 90%), kde se orientace fibril příliš neodklání od podélné osy (15-30°), dochází k maximálnímu sesychání a bobtnání napříč vláken. Malé rozměrové změny v podélném směru se vysvětlují tak, že molekuly vody nemohou vnikat mezi fibrily do valenčního řetězce v podélném spojení, takže nastává jejich rozestupování v tomto směru. (Horáček 2008)

#### a) Bobtnání

Bobtnání je schopnost dřeva zvyšovat svoje lineární rozměry, plochu nebo objem při přijímání vody vázané v rozsahu vlhkosti 0% - MH (MNBS). Bobtnání je rozděleno na bobtnání lineární (v jednotlivých anatomických směrech) plošné (změna plochy tělesa) a objemové (změna objemu tělesa).



Bobtnání dřeva od absolutně suchého stavu do meze hygroskopicity označujeme jako bobtnání celkové (maximální). Bobtnání dřeva v jakémkoliv menším intervalu nazýváme bobtnáním částečným.

Bobtnání se vyjadřuje podílem změny rozměru k původní hodnotě a uvádí se nejčastěji v %. Bobtnání dřeva roste se stoupající hustotou.

### b) Sesychání

Sesychání je nazýván proces, při kterém se zmenšují lineární rozměry, plocha nebo objem tělesa v důsledku ztráty vody vázané. Sesychání se řídí podobnými zákonitostmi jako bobtnání.

Hodnoty sesychání a bobtnání lze navzájem přepočítat podle následujícího vztahu:

$$\alpha_i = 100 \beta_i / (100 - \beta_i)$$

$$\beta_i = 100 \alpha_i / (100 - \alpha_i) \quad (2)$$

$\alpha_i$  - bobtnání

$\beta_i$  - sesychání

Na základě hodnot koeficientu objemového sesychání můžeme rozdělit dřeva do následujících skupin:

Dřeva málo sesychává	Koeficient objemového sesychání je menší než 0,4 -tis, olše, vrba, topol, limba, akát
Dřeva středně sesychává	Koeficient objemového sesychání je 0,4- 0,47 -borovice, smrk, jedle, dub, jilm, jasan, javor
Dřeva hodně sesychává	Koeficient objemového sesychání je větší než 0,47 - modřín, bříza, buk, habr, lípa

Tab. 5: Rozdělení dřev dle hodnoty koeficientu objemového sesychání

Druh dřeva	Koeficient bobtnání $\alpha$ (%/1%w)		
	$K_\alpha$ objemového	$K_\alpha$ radiálního	$K_\alpha$ tangenciálního
SM	0,50	0,17	0,31
BK	0,55	0,18	0,35

Tab. 6: Koeficienty bobtnání u SM a BK (Ugolev 1975)

### 3.6.3 Hustota

Dřevo vykazuje při nízké hustotě poměrně vysokou pevnost, na rozdíl od jiných materiálů. Podle strukturní stavby mají jednotlivé druhy dřeva různou hustotu. Tato přednost se při výrobě dřevostaveb využívá. Smrk představuje lehké a pevné dřevo, proto se používá pro výrobu statických elementů jako nosníky a sloupy, zatímco buk jako tvrdé a otěru odolné dřevo je vhodný pro schody a spojovací elementy.

Hustota dřeva může být charakterizována jako podíl hmotnosti dřeva a jeho objemu. Jednotkou pro vyjádření hustoty je  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  nebo  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Kvůli hygroskopicitě je určování hustoty u dřeva poměrně složité. Právě vlhkost dřeva má velmi velký vliv na jeho hmotnost a objem. Hustota dřeva je charakteristika, která velice významně ovlivňuje většinu fyzikálních a mechanických vlastností dřeva. Při určování hustoty jsou rozlišovány následující veličiny- hustota dřevní substance, hustotu dřeva a redukovanou hustotu dřeva.

**Hustota dřeva** bývá charakterizována nejčastěji těmito vlhkostními stavy:

- a) *Hustota dřeva v absolutně suchém stavu ( $w=0\%$ )* – Tento stav se používá zejména pro porovnání výsledků a při teoretických výpočtech. Hustota dřeva v suchém stavu je menší než hustota dřevní substance, protože jsou zde brány v potaz mikrokapiláry a lumény vyplněné vzduchem.
- b) *Hustota dřeva při vlhkosti 12%* - Tato hustota je uváděná v normách. Jedná se o speciální případ, uvádění hustoty při určité vlhkosti. Je-li dřevo dlouhodobě vystaveno běžným podmínkám v temperované místnosti, dosáhne vlhkosti právě 12%.
- c) *Hustota dřeva vlhkého ( $w>0\%$ )*- Tato hustota je charakterizována podílem hmotnosti a objemu dřeva při určité vlhkosti.

Hustota dřeva se zvyšuje s vlhkostí, ale hmotnost a objem dřeva nerostou stejným způsobem. Zatímco hmotnost dřeva roste se zvyšující se vlhkostí až do maximálního nasycení, objem se zvyšuje jen do meze hygroskopicity.

Druh dřeva	Hustota $\rho_0$ [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]	Hustota $\rho_k$ [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]	Hustota $\rho_{12}$ [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
SM	350-400	370	460
BK	680	720	730

Tab. 7: Srovnání různých hustot mezi SM- BK dle literatury (Požgaj et al. 1993)

Hustotu při 12% udávají platné normy, protože 12% vlhkosti je dosaženo dlouhodobějším vystavením dřeva běžným podmínkám temperované místnosti ( $T = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $\rho = 65\%$ ).

Vztah pro výpočet hustoty je definován:

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad 3$$

$m$ - hmotnost (kg, g)

$V$ - objem ( $\text{m}^3$ ,  $\text{cm}^3$ )

### Hustota SM

Hustota smrkového dřeva se pohybuje v rozmezí od 350-500  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  to znamená, že smrk lze zařadit do kategorie dřev s nízkou hustotou. Jeho nízká hustota je zapříčiněna stavbou jednotlivých buněčných elementů. Malá hustota smrkového dřeva je dána tím, že je tvořeno z 90% dlouhými elementy (tracheidy), které mají tenké buněčné stěny, ale také podílem jarního dřeva, který se pohybuje od 60-70%. V jarním dřevě jsou velké lumény, tudíž dřevo smrku má velkou pórovitost. Celkově se dá hovořit o tom, že dřevo jehličnatých dřevin se vykazuje nižší hustotou než dřevo listnáčů.

### Hustota BK

Hustota bukového dřeva se pohybuje od v rozmezí 680-770  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Všeobecně lze říci, že listnatá dřeva mají vyšší hustotu než dřeva jehličnatá. Příčinou vyšší hustoty je mnoho faktorů a jedním z nich je například častý výskyt jádra (ve kterém se nachází extraktivní látky a zvyšují jeho hustotu), větší podíl letního dřeva nebo menší pórovitostí.

#### 3.6.4 Tepelná vodivost

Pod pojmem tepelná vodivost si lze představit schopnost dřeva vést teplo. Tepelná vodivost představuje rychlost jakou se teplo šíří z teplejší části dřeva do chladnější části.

Vedení tepla ve dřevě ovlivňuje mnoho faktorů, největší vliv však mají anatomická stavba dřeva, hustota a vlhkost dřeva. Vliv anatomické struktury dřeva vyjádřený anizotropií se projevuje rozdílnou tepelnou a teplotní vodivostí v podélném a příčném směru ( $\lambda_L, \alpha_L \gg \lambda_R, \alpha_R > \lambda_T, \alpha_T$ ). Na rozdíl od pohybu vody ve dřevě se přenos tepla ve směru a napříč vláken tolik neliší a v podélném směru je 1,5 - 2,5 krát větší než ve směru příčném. Vysvětlení lze hledat v orientaci fibril v buněčné stěně, která kromě  $S_2$  vrstvy není příliš jednoznačná.

Hodnoty koeficientu teplotní vodivosti se ve směru radiálním a tangenciálním příliš neliší, rozdíl ( $\pm 15\%$ ) vzniká pouze u koeficientu tepelné vodivosti a to u dřev s vícevrstevnými dřevnými paprsky (dub, buk), kde  $\lambda_R > \lambda_T$ , a u jehličnanů s vysokým procentem letního dřeva (modřín), kde  $\lambda_R < \lambda_T$ . (Zejda, Tippner, Sebera 2009)

Tepelná vodivost závisí do značné míry na hustotě a vlhkosti dřeva. MacLean (1941) navrhl empirickou rovnici pro stanovení  $\lambda$  v příčném směru při teplotě  $30^\circ\text{C}$  ve tvaru, (Horáček 2008)

$$\lambda_{\perp} = \rho_k(0,217 + a \cdot w) + 0,024 P_w \quad (4)$$

$\rho_k$ - konvenční hustota ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )

$w$ - vlhkost dřeva (%)

$P_w$ - pórovitost (-)

$a$ - koeficient 0,0040 pro  $w < 40\%$  a 0,0055 pro  $w > 40\%$

$$\lambda_T = \lambda_{\perp} \cdot (1 + a \cdot (T - 30)) \quad (5)$$

$\lambda_{\perp}$ - tepelná vodivost při  $30^\circ\text{C}$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )

$a$ - koeficient 0,0040 pro  $w < 40\%$  a 0,0055 pro  $w > 40\%$

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

Druh dřeva	Směr	Tepelná vodivost $\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
SM	L	0,229
	R	0,133
	T	0,113
BK	L	0,360
	R	0,180
	T	0,170

Tab. 8: Příklady tepelné vodivosti vybraných druhů dřev ( $T = 20^\circ\text{C}$ ,  $w = 12\%$ ), (Regináč 1990)

### 3.6.5 Teplený odpor

Tepelný odpor vyjadřuje, jakou plochou konstrukce a při jakém rozdílu teplot na jejích površích dojde k přenosu 1 Wattu, čili k přenosu energie o velikosti 1 J za 1 sekundu.

Tepelný odpor je tepelně izolační vlastnost vrstvy materiálu, popř. nestejnorodé vrstvy materiálu, popř. stavební konstrukce dané tloušťky. Je-li známa hodnota součinitele tepelné vodivosti vrstvy materiálu a je-li konstantní, povrchy kolmé na směr tepelného toku jsou vzájemně rovnoběžné a vrstvou tak proudí rovnoměrný tepelný tok. (stavba.tzb-info- prostup tepla stavební konstrukcí)

Rovnice pro výpočet tepelného odporu:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (6)$$

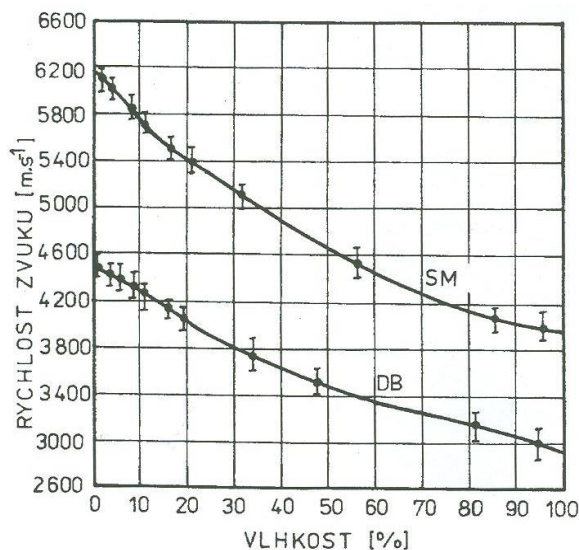
$d$ - tloušťka materiálu (stěny), (m)

$\lambda$ - součinitel tepelné vodivosti ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )

### 3.6.6 Rychlost šíření zvuku

V pružném prostředí – pevných látkách a tekutinách- jsou částice mezi sebou vázány nebo na sebe působí při vzájemných srážkách. Tyto vazby způsobují, že kmitání částic se v kontinuu přenáší a dochází k šíření mechanického vlnění, které je doprovázeno vznikem elastických vln.

Na rozdíl od řady technických materiálů je studium šíření vln ve dřevě výrazně složitější. Protože dřevo vykazuje anizotropní vlastnosti. Rychlost šíření zvuku klesá s rostoucí vlhkostí dřeva (Obr. 12) Rychlost šíření zvuku ve vodě je  $1485 \text{ m.s}^{-1}$ , proto zejména ve směru vláken se s rostoucí vlhkostí zvyšuje odpor prostředí proti šíření zvukové vlny.



Obr. 12 Závislost rychlosti šíření zvuku ve dřevě na vlhkosti dřeva (Požgaj et al. 1993)

Rychlost šíření zvuku ve dřevě lze vypočítat podle vztahu:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (7)$$

$E$ - modul pružnosti (Pa)

$\rho$ - hustota ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

Druh dřeva	Průměrná hustota [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]	Průměrný modul pružnosti [MPa]		Průměrná rychlost zvuku [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	
		s vlákny	⊥ na vlákna	s vlákny	⊥ na vlákna
SM	470	11 000	550	4 790	1070
BK	730	16 000	1500	4 640	1 420

Tab. 9: Průměrná rychlost šíření zvuku ve dřevě (Kollmann a Côté 1968), ( $w=12\%$ )

### 3.6.7 Modul pružnosti

Modul pružnosti vyjadřuje vnitřní odpor materiálu proti pružné deformaci. Čím je modul pružnosti větší, tím větší napětí je potřebné k vyvolání deformace.

Modul pružnosti představuje důležitou materiálovou konstantu při statických výpočtech dřevěných konstrukcí. Modul pružnosti v tlaku a tahu lze charakterizovat jako podíl mezi napětím a poměrnou deformací. Průměrná hodnota modulu pružnosti pro dřevo v tahu a tlaku ve směru vláken se pro domácí dřeviny udává v rozpětí 10 000- 15 000 MPa při průměrné absolutní vlhkosti 12%.

Druh dřeva	Modul pružnosti [MPa]
SM	12 000
BK	14 000

*Tab. 10: Průměrné hodnoty modulů pružnosti (Požgaj et al. 1993), ( $w = 12\%$ )*

## 4 Metodika

Tato kapitola obsahuje podrobný popis, jak byla naměřena a vypočítána potřebná data. Všechny hodnoty, kterých bylo dosaženo experimentem a teoretickými výpočty, budou porovnány s výše uvedenými hodnotami, které byly získány z odborné literatury.

### 4.1 Experiment

#### 4.1.1 Výroba panelů

Při zpracování této práce bylo zapotřebí vyrobit osm panelů z masivních smrkových prken, které byly spojeny za pomoci dřevěných bukových kolíků. Použité řezivo mělo rozdílné vlastnosti, podle kterých se určovala povaha jednotlivých panelů. Primární vlastnosti, podle kterých se panely dále rozdělovaly, byla především vlhkost jednotlivých prken a jejich tuhost.

#### 4.1.2 Vlhkostní rozdělení

První rozdělení spočívalo v rozdílné vlhkosti panelů. První čtyři panely byly vyrobeny ze dřeva, jehož vlhkost byla průměrně 16%. Takováto vlhkost odpovídá přibližně rovnovážné vlhkosti dřeva, což je vlhkost dřeva, které je dlouhodobě vystaveno okolním podmínkám, při RVV. Tahle vlhkost se uvažuje jako technologická vlhkost. Při takové vlhkosti již není ve dřevě obsažena voda volná, čili lumény buněk neobsahují vodu v kapalném skupenství. Další čtyři panely byly vyrobeny ze dřeva, jehož vlhkost byla nad mez hygroskopicity.

Průměrná hodnota vlhkosti u těchto desek byla kolem 40%. Nicméně po provedení přímé metody zjišťování vlhkosti a to konkrétně použitím gravimetrické metody, bylo statisticky zjištěno, že více než padesát procent vzorků mělo průměrnou vlhkost 28%, tudíž se dále uvažuje jako vlhkost vlhčích vzorků 28%.

#### 4.1.3 Třídění

Druhé rozdělení proběhlo na základě vizuálního třídění u sušších panelů a to podle výskytu a vad. U vlhčích panelů proběhlo rozdělení díky zjištění modulu pružnosti.

Při vizuálním rozdělení byly brány v potaz všechny vady dřeva a to především suky, trhliny, smolníky nebo odklon vláken a dále se bral velký zřetel na šířku letokruhů a podíl jarního a letního dřeva. Vizuální třídění mělo velký vliv především na hustotu, která má velký vliv na fyzikální vlastnosti.

Modul pružnosti byl zjišťován pomocí přístroje Arborsonic Decay Detector. (Obr. 13) Tento přístroj pracuje na principu šíření ultrazvukových vln.



Arborsonic měří čas, za který ultrazvukový impuls dosáhne snímací sondy. Při známé vzdálenosti neboli dráze, lze snadno spočítat rychlost šíření ultrazvuku. Rovnice pro přepočet rychlosti.

$$v = \frac{s}{t} \quad (8)$$

*s* - dráha pohybu (m)  
*t* - čas pohybu (s)



Obr. 13 *Arborsonic Decay Detector*

Po vypočítání rychlosti šíření ultrazvuku, je možné tyto hodnoty dosadit do rovnice pro výpočet modulu pružnosti. Nicméně v tomto vzorci je zapotřebí vypočítat ještě jednu neznámou a to hustotu. Výpočet hustoty proběhl pomocí jednoduché rovnice (1).

Výpočet modulu pružnosti:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (9)$$

$$E = c^2 \cdot \rho$$

*c* - rychlosti šíření zvuku (m. s<sup>-1</sup>)  
*ρ* - hustota (kg. m<sup>-3</sup>)

Po vypočítání modulu pružnosti bylo možné rozdělit jednotlivá prkna do dvou skupin a to dřeva s nižším a vyšším modulem pružnosti. Pokud má prkno vyšší modul pružnosti má i vyšší tuhost, tudíž se udělaly dvě skupiny prken

s nižším a vyšším modulem pružnosti. Tímto rozdělením byl připraven materiál na 8 panelů.

#### 4.1.4 Měření tepelných vlastností

Další vlastností, která se experimentálně zjišťovala, byla tepelná vodivost a tepelný odpor. Pro experimentální zjištění těchto hodnot byl použit přístroj Lambdametr. Tento přístroj dokáže vyhodnotit tepelnou vodivost, tepelný odpor a teplotní gradient při zadání několika základních parametrů jako například přibližná hustota, tloušťka měřeného vzorku, počáteční a konečná teplota testu. Při testování byla teplota nastavena na počáteční teplotu 20 °C a konečná 50°C. Při zadání těchto kritérií se spustí test. Přístroj se automaticky kalibruje a po kalibrování spustí test. Po ukončení testu se přístroj vypne a může se testovat další panel. Jeden test trvá různě dlouhou dobu, od dvou a půl až po šest hodin.

Poslední měřenou veličinou bylo měření hustoty celých panelů. Tímto měřením, které spočívalo v přeměření a zvážení hotových panelů, byla podle rovnice (3) získána hodnota hustoty. S touto hustotou se dále počítalo v následujícím teoretickém výpočtu. Samozřejmě do úvahy jsou brány vzniklé spáry i bukové kolíky, které byly použity na spojení jednotlivých desek.

## 4.2 Teorie

Zatímco v experimentální části se všechna data naměřila, v teoretické části byla data zčásti naměřena a následně dosazena do rovnic, ze kterých, vyšly výsledky, které mohly být porovnány s experimentálními hodnotami.

### 4.2.1 Výpočet tepelné vodivosti

Pro výpočet tepelné vodivosti neboli schopnosti dřeva vést teplo, potřebujeme znát jeho hustotu při nulové vlhkosti, konvenční hustotu a teplotu. Rovnice potřebná k výpočtu tepelné vodivosti je uvedena v kapitole 3.6.4. rovnice (4). Do rovnice (4) je potřeba zadat hustou konvenční:

$$\rho_k = \frac{\rho_0}{1 + 0,28 \cdot \rho_0} \quad (10)$$

$\rho_0$ - hustota při nulové vlhkosti ( $g \cdot cm^{-3}$ )

Do rovnice pro výpočet konvenční hustoty je zapotřebí zadat hustotu nulovou, kterou jsem získal z naměřené hustoty při dané vlhkosti. Rovnice pro přepočítání  $\rho_w$  na  $\rho_0$ :

$$\rho_w = \frac{1 + w}{1 + K_{\alpha V} \cdot w} \cdot \rho_0 \quad (11)$$

$w$  - vlhkost (-)

$K_{\alpha V}$  - koeficient objemového bobtnání (Horáček 2008, str. 39, tab. 5.1)

Po vypočítání nulové hustoty, všech panelů jsem dosadil hodnotu do rovnice (10) a vypočítal hustotu konvenční. Konvenční hustotu jsem následně dosadil do rovnice (4) pro výpočet tepelné vodivosti. V této rovnici byla však ještě jedna neznáma a to pórovitost. Pórovitost lze vypočítat pomocí následujícího vzorce:

$$P_w = [1 - \rho_k (0,653 + w)] \cdot 100 \quad (12)$$

$P_w$  - pórovitost (%)

$w$  - vlhkost ( $g \cdot g^{-1}$ )

$\rho_k$  - konvenční hustota ( $g \cdot cm^{-3}$ )

Tímto vzorcem byla vypočítána pórovitost daného panelu a zbývala poslední neznámá a to koeficient  $\alpha$ , který se volil podle hodnoty vlhkosti, jestliže je vlhkost menší než 40%, je zvolen koeficient 0,0040.

Po vypočítání tepelné vodivosti bylo nutno přepočítat tepelnou vodivost, která je závislá na dané teplotě, rovnice (5). Vypočítané hodnoty tepelné vodivosti se dále používaly ve výsledkové části pro srovnávání s experimentem.

#### 4.2.2 Výpočet tepelného odporu

Tepelný odpor byl vypočítán z rovnice (6) do, které byla dosazena tloušťka jednotlivých panelů a vypočítaná tepelná vodivost z rovnice (5). Vypočítané hodnoty tepelného odporu se dále používaly ve výsledkové části pro srovnávání s experimentem.

### **4.3 Vyhodnocení výsledků**

Všechny výsledky, které byly získány, musí být vhodně zpracovány do snadno interpretující podoby a to ať už do grafů nebo do tabulek. Data byla zpracována popisnou statistikou a dále byly provedeny variační analýzy v podobě krabicových diagramů. Získána byla především tepelná vodivost, tepelný odpor, rychlost šíření zvuku, modul pružnosti a hustota. Právě tyto hodnoty budou srovnávány ve výsledkové části, co se týče změřených a vypočítaných hodnot.

## 5 Materiál

### 5.1 Experiment

Bylo vyrobeno osm panelů, z nichž čtyři byly o vlhkosti 16% a čtyři o vlhkosti 28%. Čtyři panely byly vyrobeny z desek o vyšší pevnosti a čtyři panely byly vyrobeny z desek o nižší pevnosti, čili cíleně byly vyrobeny panely s lepšími a horšími vlastnostmi

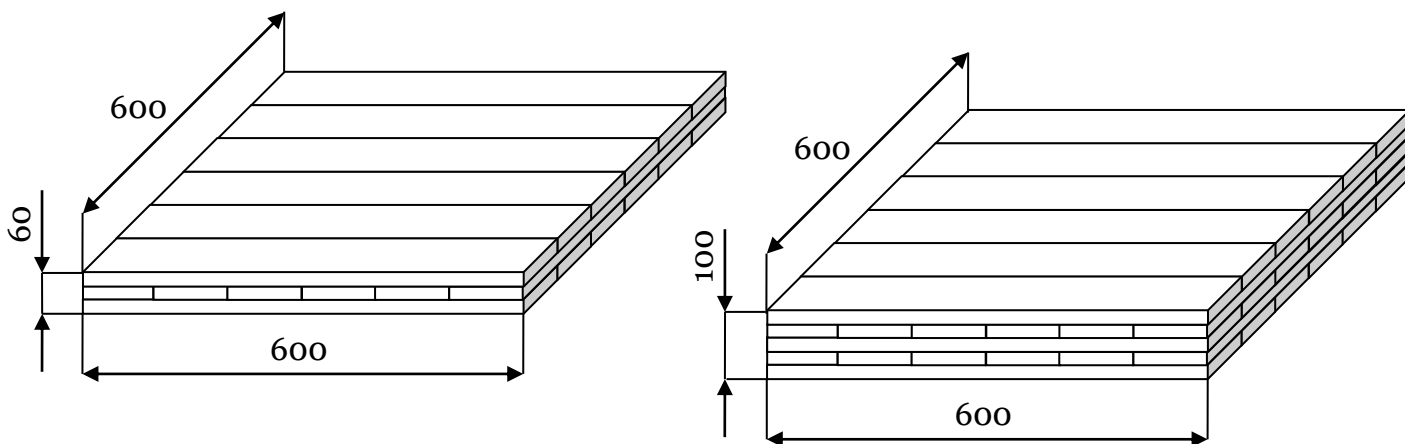
Dále se každý z těchto panelů vyrobil ve třívrstevném a pětivrstevném provedení, aby se prokázala závislost tloušťky materiálu na tepelných vlastnostech.

Vlhkost	16%				28%			
Třídění dle pevnosti	Ano		Ne		Ano		Ne	
Počet vrstev panelu	3	5	3	5	3	5	3	5

Tab. 11: Přehled vyrobených panelů

Na výrobu všech panelů bylo dohromady použito 192 prken. Každé bylo vyrobeno na přesné rozměry a to 600 x 100 x 20 mm. Celkový objem materiálu použitého na výrobu panelů činil 0,2304 m<sup>3</sup>.

Na obr. 14 jsou nakresleny varianty vyrobených panelů a na obr. 15- 20, je vidět výroba panelů



Obr. 14 Graficky načrtnuté panely



*Obr. 15 Prkna pro výrobu vlhkých panelů*



*Obr. 16 Prkna pro výrobu jednoho třívrstvého panelu*





*Obr. 17 Zjišťování rychlosti šíření zvuku, přístrojem Arborsonic*



*Obr. 18 Balení a převoz vlhkých prken zabalených do strečové fólie, která zamezila vlhkostním změnám*



*Obr. 19 Samotná výroba panelů (vrstvení prken, stáhnutí pro zajištění a vrtání otvorů pro kolíky)*



*Obr. 20 Vrtání otvorů pro kolíky*



### 5.1.1 Výroba kolíků

Bukové kolíky byly vyrobeny z kolíkové tyče o průměru 10 mm a následně byly zkráceny na požadovanou délku. Délka kolíku se odvíjela od tloušťky jednotlivých panelů. Pro třívrstvé panely byly kolíky zkráceny na 60 mm a u pětivrstevných panelů se musely kolíky zkrátit na 100 mm. Po délkovém krácení byly kolíky vloženy do horkovzdušné sušárny a byly vysušeny na nulovou vlhkost. S takto vysušenými kolíky se dále pracovalo (viz. kap. 5.1.3).

### 5.1.2 Výroba prken

Pro výrobu desek bylo použito dřevo smrku zteplého ve dvou různých vlhkostech. Z neomítaného řeziva o délce 3-5 metrů, bylo vybráno potřebné množství desek a následně byly zpracovány ve strojní dílně. Desky byly délkově zkráceny na 600 mm + nadmíra na vlhkostní vzorek, přičemž bylo snahou eliminovat velké suky a trhliny. Zkrácené přířezy byly následně omítnuty a nebyly přípustné žádné oblíny. Na rozmítací pile byly přířezy rozmítnuty na konečnou šířku a to přesně na 100 mm.

Následovalo sjednocení tloušťky těchto prken na 20 mm. Tato operace proběhla na protahovačce. Z těchto 100 mm širokých a 20 mm tlustých prken byly odebrány vlhkostní vzorky o rozměrech 100 x 20 x 20 mm.

Tyto vzorky byly očíslovány, zváženy a následně vysušeny na nulovou vlhkost. Opětovným zvážením se získala hmotnost absolutně suchých vzorků a gravimetrickou metodou se vypočítala počáteční vlhkost použitého řeziva.

Po výrobě prken byly zjišťovány jejich pevnostní vlastnosti. Díky těmto vlastnostem bylo možné prkna rozdělit podle jejich tuhosti, výskytu vad a pevnosti. Zjišťované vlastnosti byly: hustota, rychlost šíření ultrazvuku, modul pružnosti a u sušších vzorků šířka letokruhů, počet a stav suků, trhlín a smolníků.

Rychlost šíření ultrazvuku bylo prováděno přístrojem Arborsonic Decay Detector, (kap. 4.1.3) kdy se sondy umístily v podélném směru prkna a změřila se rychlost ultrazvukové vlny. Z této hodnoty byl vypočítán modul pružnosti každého prkna (kap. 4.1.3), rovnice (9).

Naměřené hodnoty a následné rozdělení prken do panelů je znázorněno v tabulce (Tab. 12-15).

Tyto tabulky sloužily pro rozdělení prken. Rozdělení proběhlo díky naměření rychlosti zvuku a následnému přepočtu na modul pružnosti. Se stoupajícím modulem pružnosti stoupá i pevnost dřeva, tudíž se vybrala prkna s vyšším modulem pružnosti a prkna s nižším modulem pružnosti.

V tabulce jsou znázorněna všechna data, která byla potřebná k výpočtům a k následnému rozdělení buď to do tříděných, nebo do netříděných prken. Panely jsou označeny názvem, ve kterém je zahrnuta jejich vlhkost (v tomto

případě 28%), tloušťka (60 nebo 100 mm – pro tří a pětivrstvé panely), a koncovka „bezzvad“ nebo „vady“ určuje, jestli je panel vyroben s tříděných prken či nikoli.

<b>SM_W28_60mm_tříděné</b>				
Číslo prkna	Hmotnost [g]	Rychlost šíření zvuku [m. s <sup>-1</sup> ]	Hustota [kg. m <sup>-3</sup> ]	Modul pružnosti [MPa]
<b>Povrchová vrstva 1</b>				
48	632	4412	527	10256
61	761	4478	634	12721
40	651	4688	543	11921
67	622	4478	518	10393
46	597	3681	498	6742
55	672	4545	560	11564
<b>Povrchová vrstva 2</b>				
51	587	4724	489	10924
1	664	4800	553	12741
13	607	4511	506	10291
25	750	4255	625	11324
56	616	4545	513	10602
68	680	4959	567	13939
<b>Středová vrstva</b>				
79	705	4167	587	10193
47	645	4615	538	11455
71	593	4615	494	10520
75	582	4580	485	10179
77	552	4959	460	11305
52	579	4878	483	11483

*Tab. 12: Základní naměřené vlastnosti prken a použití na konkrétní panel (w=28%, d= 60 mm, lepší pevnostní vlastnosti)*

<b>SM_W28_60mm_netříděné</b>				
Číslo prkna	Hmotnost [g]	Rychlost šíření zvuku [m. s <sup>-1</sup> ]	Hustota [kg. m <sup>-3</sup> ]	Modul pružnosti [MPa]
<b>Povrchová vrstva 1</b>				
10	608	3750	507	7125
26	598	3468	499	5999
28	572	4054	477	7836
30	565	4167	471	8181
87	738	3468	615	7400
73	588	3468	490	5898
<b>Povrchová vrstva 2</b>				
50	628	3636	523	6916
8	623	3947	520	8095
19	615	3922	512	7880
27	588	4225	490	8742
21	578	3061	482	4513
2	685	3261	571	6067
<b>Středová vrstva</b>				
12	606	3571	505	6442
24	564	3509	470	5788
23	629	3279	524	5636
20	706	3750	589	8278
39	555	4380	463	8877
64	666	3822	555	8103

*Tab. 13: Základní naměřené vlastnosti prken a použití na konkrétní panel ( $w=28\%$ ,  $d=60\text{ mm}$ , horší pevnostní vlastnosti)*

<b>SM_W28_100mm_netříděné</b>				
Číslo prkna	Hmotnost [g]	Rychlost šíření zvuku [m. s <sup>-1</sup> ]	Hustota [kg. m <sup>-3</sup> ]	Modul pružnosti [MPa]
<b>Povrchová vrstva 1</b>				
90	575	4317	479	8931
34	704	3550	587	7395
37	724	3226	604	6282
16	602	4444	502	9906
18	570	4444	475	9379
4	619	4110	515	8705
<b>Povrchová vrstva 2</b>				
9	536	4196	446	7858
14	655	4082	546	9099
70	717	3681	598	8098
57	673	3468	561	6743
43	553	4380	461	8842
15	639	4167	532	9240
<b>Středové vrstvy</b>				
38	698	3315	581	6389
58	744	3297	620	6735
66	561	3922	468	7192
84	632	4196	527	9276
92	714	3226	595	6189
62	568	3704	473	6491
76	559	4412	466	9061
80	648	3448	540	6423
96	571	4082	476	7926
88	606	4054	505	8299
74	611	4082	509	8484
81	546	4110	455	7678
69	643	3750	536	7541
54	739	3226	616	6407
82	729	3315	607	6675
95	648	3429	540	6345
97	557	4412	464	9037

Tab. 14: Základní naměřené vlastnosti prken a použití na konkrétní panel ( $w=28\%$ ,  $d=100\text{ mm}$ , horší pevnostní vlastnosti)

SM_W28_100mm_tříděné				
Číslo prkna	Hmotnost [g]	Rychlost šíření zvuku [m. s <sup>-1</sup> ]	Hustota [kg. m <sup>-3</sup> ]	Modul pružnosti [MPa]
<b>Povrchová vrstva 1</b>				
60	766	4082	639	10641
59	604	4511	504	10252
32	878	3822	731	10680
31	685	4615	571	12166
6	645	4317	538	10016
89	619	4580	516	10821
<b>Povrchová vrstva 2</b>				
98	767	4724	639	14272
83	663	4545	552	11414
22	748	4478	623	12496
99	629	4478	524	10513
17	657	4478	547	10975
85	591	4478	493	9880
<b>Středové vrstvy</b>				
3	650	4082	542	9023
85	591	4478	493	9880
49	662	3947	551	8591
78	579	3797	482	6953
53	744	3593	620	8002
11	560	4478	466	9350
35	615	4027	513	8315
45	709	3659	591	7904
36	575	4138	479	8203
5	624	4027	520	8438
7	552	4412	460	8955
65	620	4167	517	8969
41	745	3750	621	8727
44	688	3896	574	8709
42	557	4380	464	8903
63	645	4167	538	9335
93	568	3704	473	6492

Tab. 15: Základní naměřené vlastnosti prken a použití na konkrétní panel ( $w=28\%$ ,  $d=100\text{ mm}$ , lepší pevnostní vlastnosti)

### 5.1.3 Výroba panelů

Z takto vyříděných prken byly poskládány panely a to tak, že se pokládalo vždy šest prken vedle sebe do tří nebo pěti vrstev. Sousední vrstvy desek byly orientovány vždy kolmo na vrstvu předešlou.

Když byly panely správně poskládaný, bylo zapotřebí upnutí a zpevnění celého panelu, kvůli následnému vrtání otvorů pro kolíky. Panely se zpevnily svorkami. Pro vrtání otvorů byl použit vrták o průměru 9 mm. Mezi těmito otvory byla vždy vzdálenost 100 mm a to po celé ploše panelu. Od okraje v obvodové části panelu činila vzdálenost 50 mm.

Kolíky potřebné délky byly vytaženy ze sušárny a ihned vtlačeny do připravených otvorů. Po vtlačení všech kolíků byly svorky odtáhnuty a byla provedena kontrola soudržnosti celého panelu.

Takto vyrobené panely bylo potřeba zabalit do ovíjecí strečové fólie, kvůli změně vlhkosti. Změna vlhkosti byla nežádoucí. Zabalené panely byly následně testovány v Lambdametru. Princip a funkce přístroje jsou vysvětleny v kap. 4.1.4.

## 6 Výsledky

Ve výsledkové části budou uvedeny všechny hodnoty a budou zpracovány do grafu v logických závislostech. Díky grafickému vyjádření bude z naměřených a vypočítaných dat patrný rozdíl nebo naopak shoda mezi experimentem a teorií. Všechny grafy budou vhodně okomentovány a popsány.

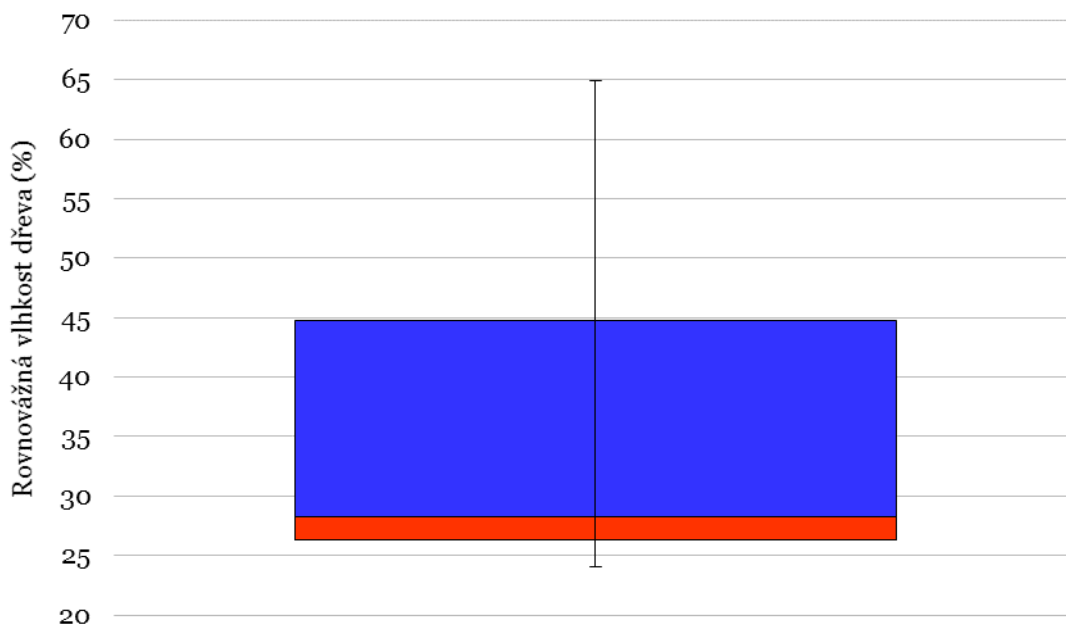
### 6.1 Fyzikální vlastnosti prken

Z fyzikálních vlastností prken byly zjišťovány především vlhkost, hustota, modul pružnosti a rychlost šíření zvuku. Všechny naměřené hodnoty jsou zde prezentovány v krabicových diagramech, ze kterých jsou jasně patrné základní statistické údaje.

#### 6.1.1 Vlhkost

Na grafu (Obr. 21) a v tabulce (Tab. 16) je vidět variabilita měřené veličiny a to konkrétně vlhkosti. Nejčastější hodnota je medián v tomto případě 28% a padesát procent naměřených dat se vyskytuje v relativně malém intervalu od 26% do 45%. Přesto jsou zde velké odchylky a z obrázku je vidět, že data mají levostranné rozložení.

Při rozdělení se občas objevují prkna, která měla výrazně větší hustotu. Tyto hodnoty jsou v grafu vyznačeny jako minimum 24% a maximum 65%



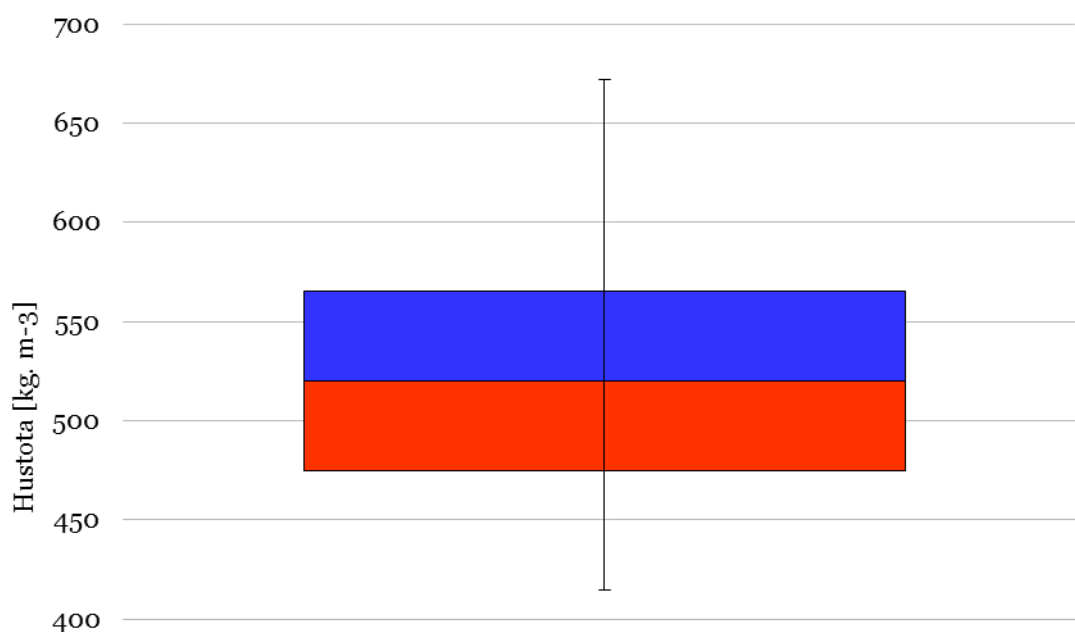
Obr. 21 Základní rozdělení dat pro rovnovážnou vlhkost prken

		Vlhkost (%)
SM	Maximum	64,955
	75% kvantil	45,275
	Medián	28,619
	25% kvantil	26,329
	Minimum	24,093

Tab. 16: Potřebné hodnoty k vytvoření krabicového diagramu pro vlhkost

### 6.1.2 Hustota

Na grafu (Obr. 22) a v tabulce (Tab. 17) jsou znázorněna data variability počítané hustoty. Hustota vykazovala relativně velkou variabilitu od minima 414 kg.m<sup>-3</sup> až do maxima 672 kg.m<sup>-3</sup>. Medián vychází 519 kg.m<sup>-3</sup>. Tato hodnota přibližně odpovídá hodnotám hustoty uváděných v literatuře (Požgaj et al. 1993). Graf má celkově levostranné rozložení.



Obr. 22 Základní rozdělení dat pro hustotu prken při  $w=28\%$



		Hustota (kg.m <sup>-3</sup> )
SM	Maximum	672,433
	75% kvantil	565,792
	Medián	519,867
	25% kvantil	476,017
	Minimum	414,333

Tab. 17: Potřebné hodnoty k vytvoření krabicového diagramu pro hustotu

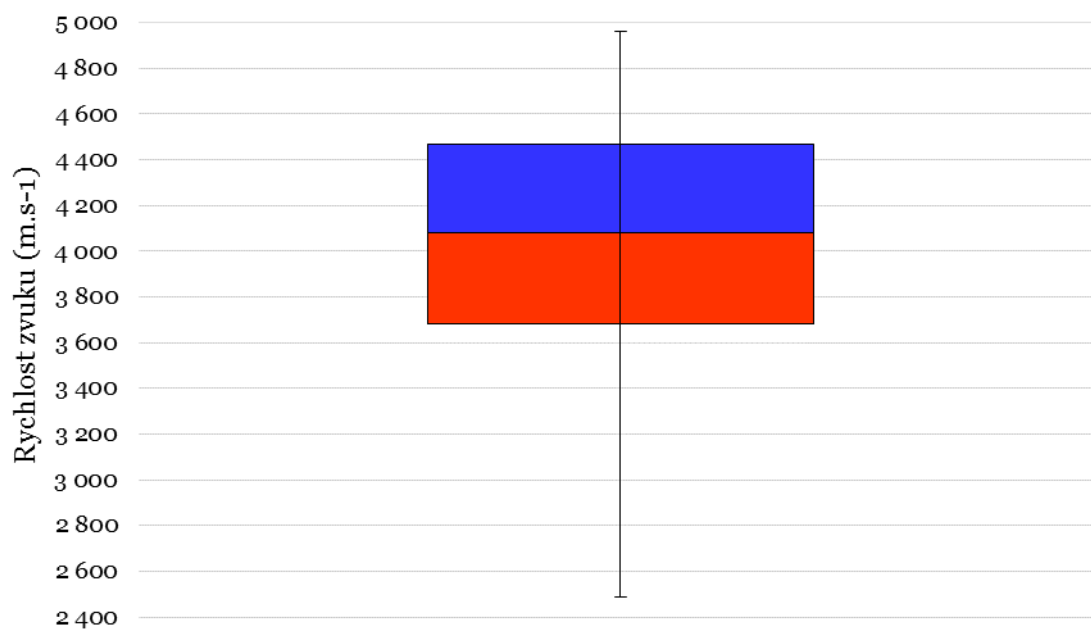
Panel	Hmotnost (kg)	Rozměry (m)				$\rho_w$ (kg.m <sup>-3</sup> )	$\rho_o$ (kg.m <sup>-3</sup> )
		a	b	c	V (m <sup>3</sup> )		
W16_60mm_bezvad	9,95	0,59	0,6	0,06	0,022	459	428
W16_60mm_vady	10,18	0,59	0,6	0,06	0,021	475	442
W16_100mm_bezvad	16,84	0,59	0,59	0,10	0,036	462	431
W16_100mm_vady	17,63	0,59	0,59	0,10	0,036	486	452
W28_60mm_tříděné	11,25	0,60	0,60	0,06	0,022	506	434
W28_60mm_netříděné	11,47	0,60	0,6	0,06	0,022	520	445
W28_100mm_tříděné	18,54	0,60	0,60	0,10	0,037	504	432
W28_100mm_netříděné	18,82	0,60	0,6	0,1	0,036	518	444

Tab. 18: Základní naměřené hodnoty panelů v experimentální části

### 6.1.3 Rychlost šíření zvuku

Na grafu (Obr. 23) a v tabulce (Tab. 19) je vidět variabilita měřené veličiny a to konkrétně rychlosti šíření zvuku. Nejčastější hodnota je medián v tomto případě 4081 m. s<sup>-1</sup> a padesát procent naměřených dat se vyskytuje v relativně malém intervalu od 3680 m. s<sup>-1</sup> do 4469 m. s<sup>-1</sup>. Přesto jsou zde velké odchylky a z obrázku je vidět, že data mají pravostranné rozložení.

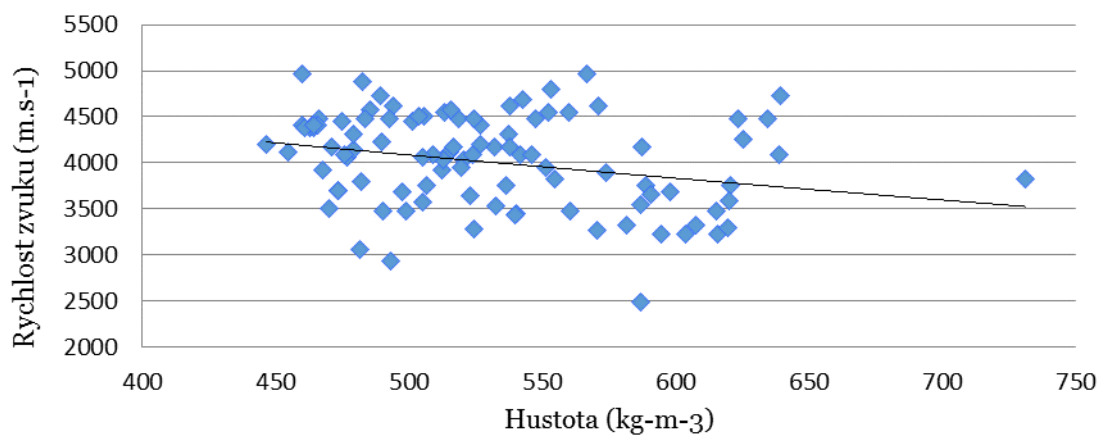
Při rozdělení se občas objevují prkna, která měla výrazně větší nebo menší hodnoty, která jsou v grafu vyznačena jako minimum 2489 m. s<sup>-1</sup> a maximum 4958 m. s<sup>-1</sup>.



Obr. 23 Základní rozdělení dat pro rychlost šíření zvuku v jednotlivých prken

		Rychlost zvuku (m. s <sup>-1</sup> )
SM	Maximum	4958
	75% kvantil	4469
	Medián	4081
	25% kvantil	3680
	Minimum	2489

Tab. 19: Potřebné hodnoty k vytvoření krabicového diagramu pro rychlost šíření zvuku

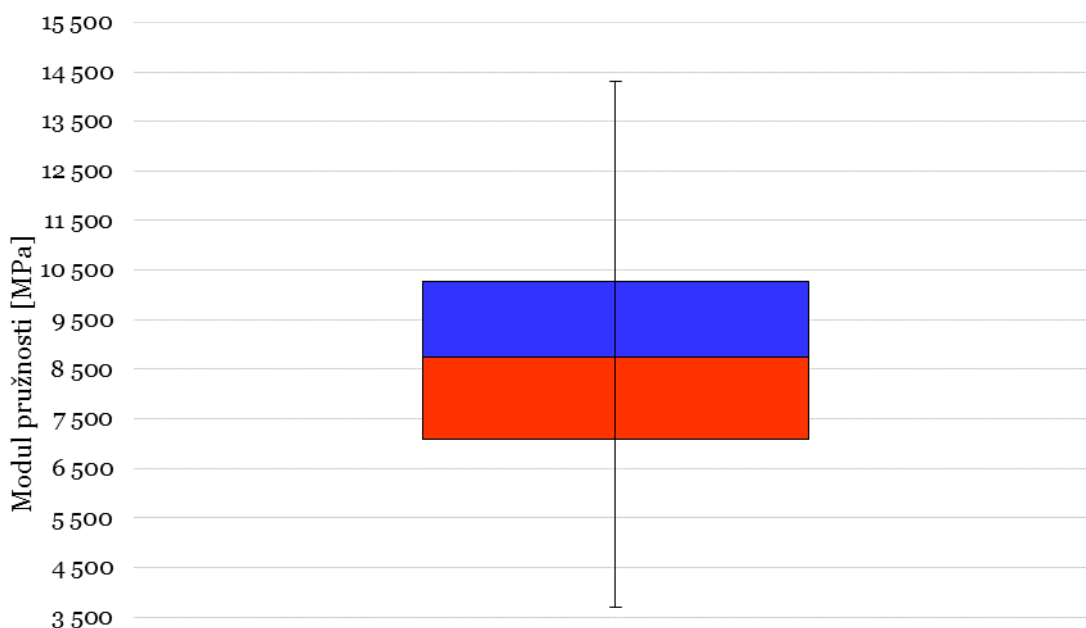


Obr. 24 Závislost rychlosti šíření zvuku na hustotě

Na tomto grafu (Obr. 24) je znázorněna závislost rychlosti šíření zvuku na hustotě. Z grafu je patrné, že pokud se hustota zvyšuje, rychlost šíření zvuku klesá. Literatura (Požgaj et al.) však udává opačný trend, ovšem desky, které byly měřené neměly konstantní vlhkost a z tohoto důvodu je pravděpodobná modifikace hodnot v grafu.

### 6.1.4 Modul pružnosti

Na grafu (Obr. 25) a v tabulce (Tab. 20) je vidět variabilita zjištěného modulu pružnosti. Modul pružnosti vykazoval velkou variabilitu od minima 3637 MPa až do maxima 14 272 MPa střední hodnota zhruba odpovídá teoretickému výpočtu (13), který je uveden pod grafem. Podle této teorie by měl být modul pružnosti někde okolo 9 500 MPa, což přibližně vychází.



Obr. 25 Základní rozdělení dat pro modul pružnosti jednotlivých prken

		Modul pružnosti (MPa)
SM	Maximum	14272
	75% kvantil	10222
	Medián	8708
	25% kvantil	7039
	Minimum	3637

Tab. 20: Potřebné hodnoty k vytvoření krabicového diagramu pro modul pružnosti

Modul pružnosti lze teoreticky snadno přepočítat pro jakoukoliv vlhkost. Přepočet, který je uveden níže, je konkrétně přepočítaný na vlhkost 30% z vlhkosti 12%, která je uvedena v tabulce. (Tab. 10)

$$E_{12\%} = 12\ 000\ \text{MPa}$$

$$\alpha = 0,01$$

$$\Delta w = 30 - 12$$

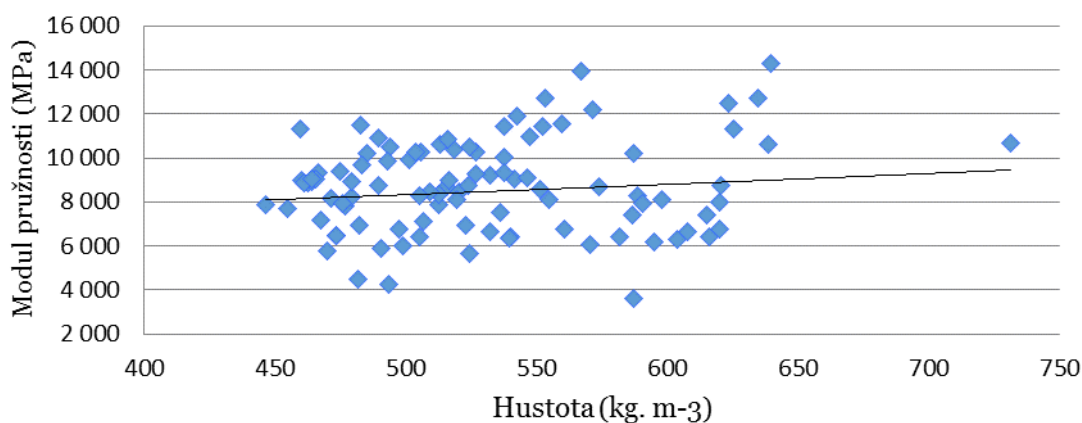
$$\Delta E = E \cdot \alpha \cdot \Delta w \tag{13}$$

$$\Delta E = 12\ 000 \cdot 0,01 \cdot 20$$

$$E_{30\%} = E_{12\%} - \Delta E$$

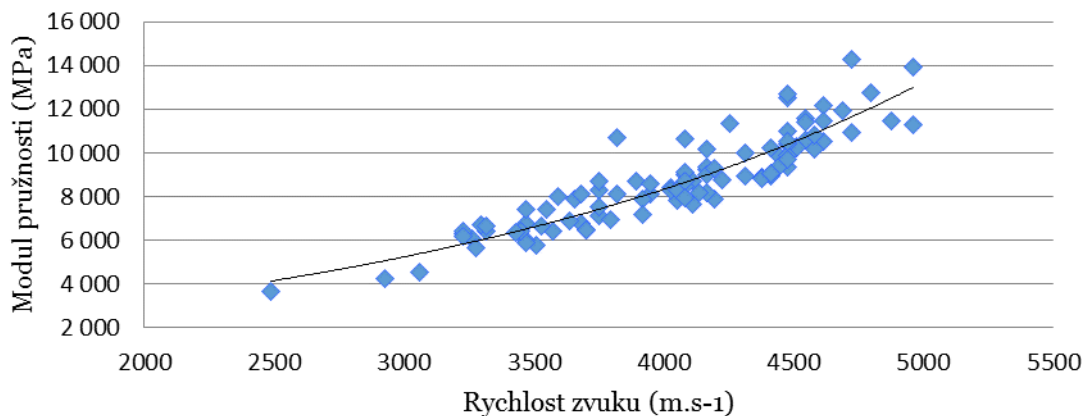
$$E_{30\%} = 12\ 000 - 2400$$

$$E_{30\%} = 9\ 600\ \text{MPa}$$



Obr. 26 Závislost modulu pružnosti na hustotě

Tento graf (Obr. 26) znázorňuje závislost modulu pružnosti na hustotě dřeva. Je zřejmé, že pokud se zvyšuje hustota, zvyšuje se i modul pružnosti. Závislost měla však vycházet poněkud extrémnější, protože vlhkost měřených desek nebyla konstantní.



Obr. 27 *Vzájemná závislost mezi modulem pružnosti a rychlosti šíření zvuku*

Na tomto graf (Obr. 27) je vidět závislost modulu pružnosti na rychlosti šíření zvuku. U tohoto grafu platí přímá úměra, protože čím větší byla naměřená rychlost šíření zvuku, tím byly vyšší výsledky modulu pružnosti a tedy i tuhost dřeva. Graf (Obr. 24) toto tvrzení popírá, ale pravděpodobná příčina bude vysvětlena v kapitole diskuze.

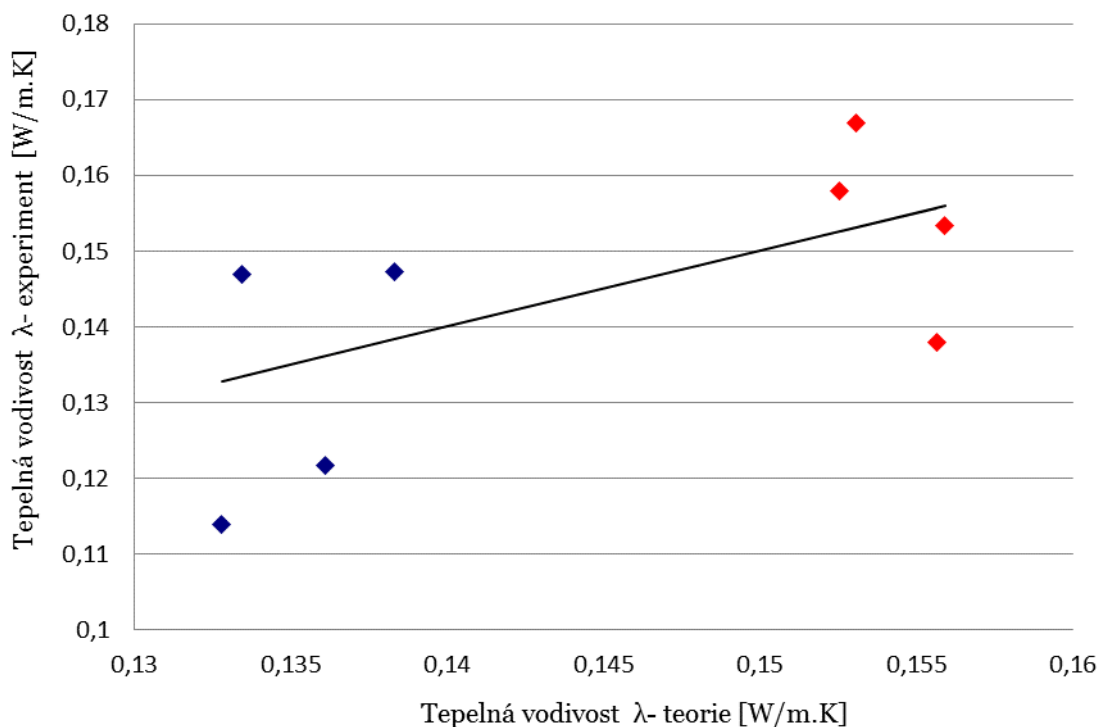
## 6.2 Tepelné vlastnosti

Z tepelných vlastností byly zjišťovány tepelné vodivosti a tepelné odpory vyrobených panelů. V následující tabulce (Tab. 21) jsou uvedeny konkrétní hodnoty, které byly experimentálně naměřeny i ty, které byly vypočítané teoreticky. Dále je zde spočítán procentový rozdíl mezi experimentálními a teoretickými hodnotami.

Panel	Tepelná vodivost (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )			Tepelný odpor (m <sup>2</sup> . K. W <sup>-1</sup> )		
	Exp.	Teorie	Rozdíl (%)	Exp.	Teorie	Rozdíl (%)
W16_60mm_bezvad	0,113901	0,132809	14	0,571791	0,459306	24
W16_60mm_vady	0,121655	0,136124	11	0,522321	0,4407745	19
W16_100mm_bezvad	0,146898	0,133474	10	0,730033	0,7641937	4
W16_100mm_vady	0,14732	0,13832	7	0,721878	0,7374204	2
W28_60mm_tříděné	0,166873	0,15307	9	0,65477	0,3985104	64
W28_60mm_netříděné	0,153452	0,15591	2	0,457202	0,3912513	17
W28_100mm_tříděné	0,157877	0,15255	3	0,4335566	0,6620780	35
W28_100mm_netříděné	0,138033	0,15566	11	0,768816	0,6424258	20

Tab. 21: Naměřené a teoreticky vypočítané hodnoty tepelné vodivosti a tepelného odporu

### 6.2.1 Tepelná vodivost



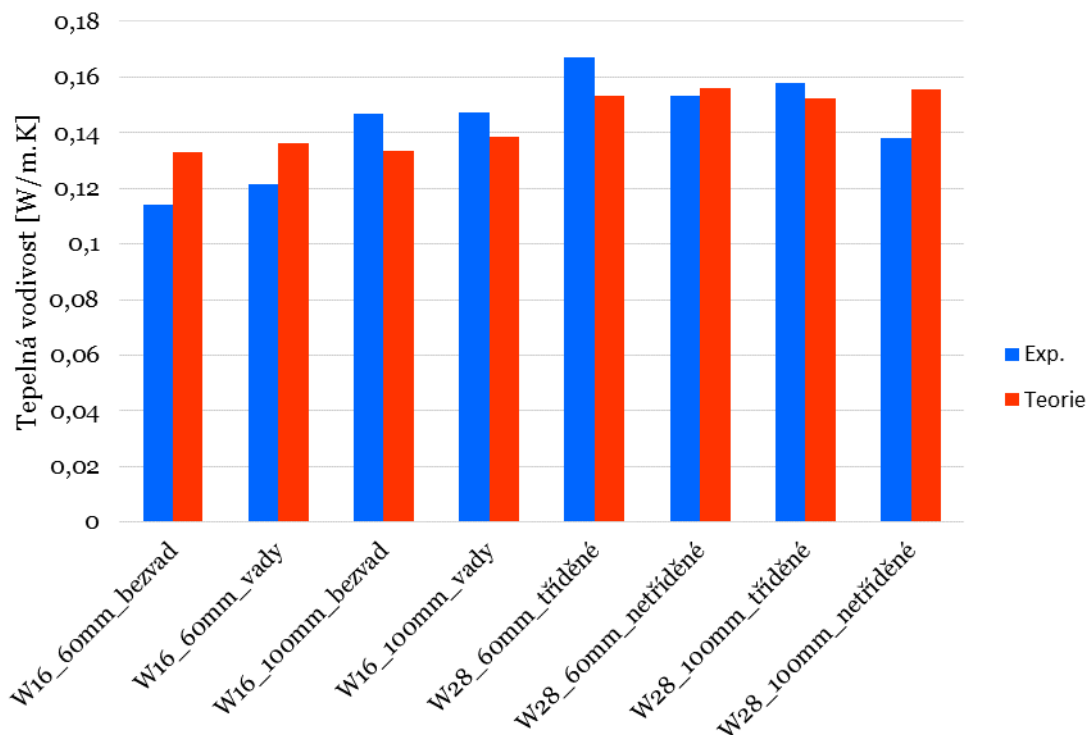
Obr. 28 Porovnání experimentálních hodnot a teoretický vypočítaných hodnot tepelné vodivosti

Na grafu (Obr. 28) jsou znázorněny získané hodnoty jako barevné body. Modré body představují hodnoty panelů o vlhkosti 16 % a červené body představují hodnoty panelů o vlhkosti 28%. Na ose x jsou hodnoty, které byly získány teoretickými výpočty a na ose y jsou hodnoty zjištěné experimentálně.

Na tomto grafu lze vidět odchylku mezi experimentem a teorií. Čím blíže jsou body umístěny k teoretické křivce, tím by byla větší shoda. Pokud by u měření a výpočtů byla stoprocentní shoda, všechny body by ležely na teoretické čáře.

Z grafu je patrné, že tepelná vodivost je vyšší s vyšší vlhkostí a to se potvrdilo jak výpočty, tak experimentální zkouškou. Na grafu je také vidět, že hodnoty tříděných panelů jsou u vlhkosti 28% nad teoretickou křivkou a netříděných pod teoretickou křivkou. U vlhkosti 16% se tyto hodnoty překrývají. Tato skutečnost bude vysvětlena v diskuzi.

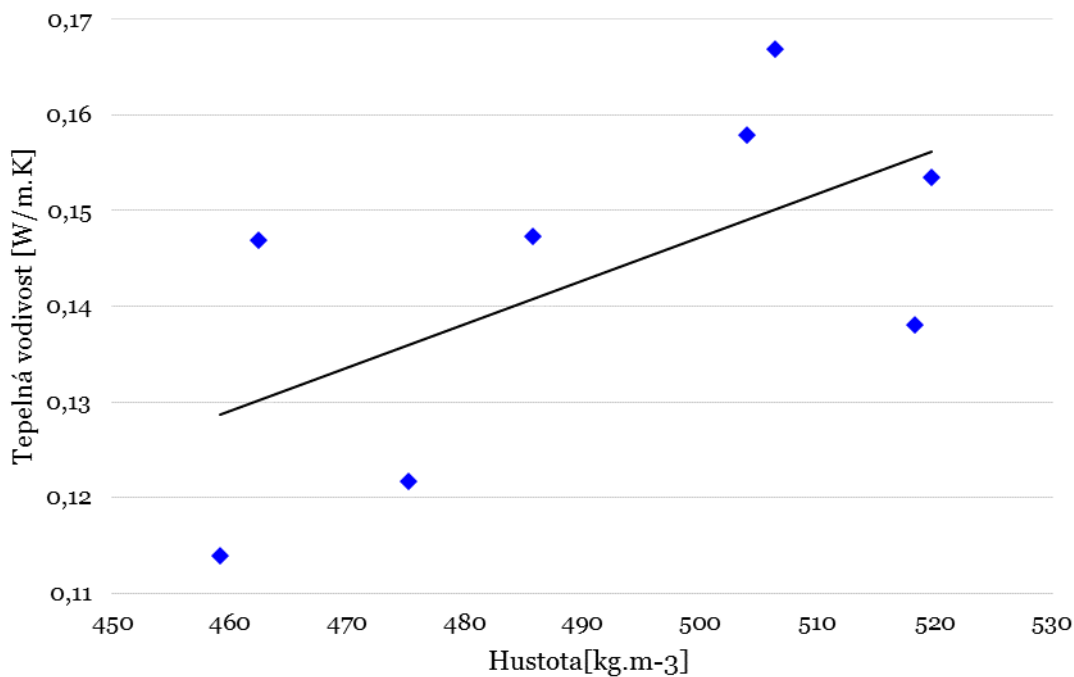




Obr. 29 Srovnání experimentálních dat a teoreticky vypočítaných dat tepelné vodivosti všech panelů

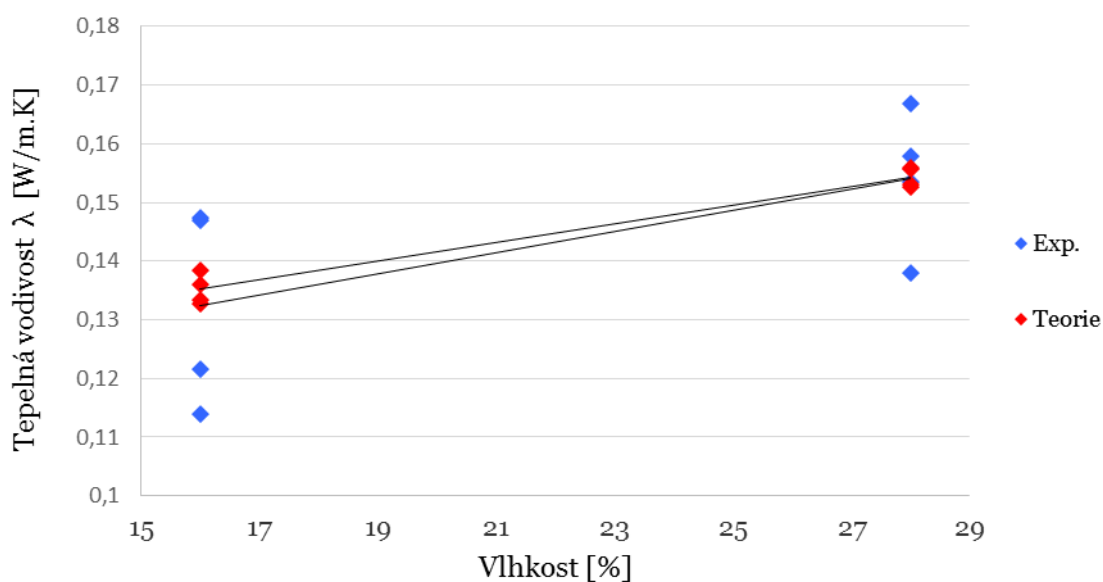
Na tomto grafu (Obr. 29) jsou znázorněny hodnoty tepelné vodivosti všech panelů. Hodnoty modré barvy byly získány experimentálně a hodnoty červené barvy byly získány pomocí teoretických výpočtů. U teoretických hodnot jde vidět jasná závislost mezi vlhkostí a tepelnou vodivostí, ale také lze pozorovat, že hodnoty tříděných panelů jsou o něco menší než netříděných a stejně tak hodnoty panelů bez vad jsou o něco menší než hodnoty panelů s vadami.

U experimentálních hodnot není tato tendence tak zřejmá, ale lze pozorovat podobné chování s menšími odchylkami.



Obr. 30 Závislost tepelné vodivosti na hustotě

Na grafu (Obr. 30) lze pozorovat závislost tepelné vodivosti na hustotě dřeva. Pro graf se používala data hustoty vlhkého dřeva z Tab. 18 a hodnoty experimentálně zjištěné tepelné vodivosti z Tab. 21. Je patrné, že se se zvyšující hustotou zvyšuje i tepelná vodivost dřeva.



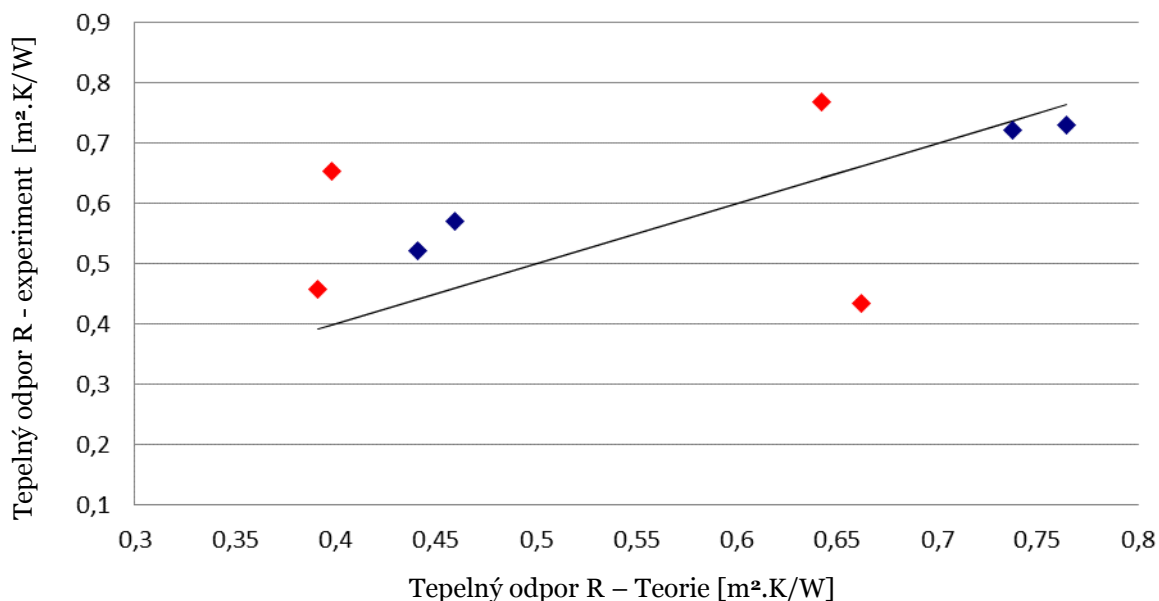
Obr. 31 Závislost tepelné vodivosti na vlhkosti srovnání experimentu a teorie

Na tomto grafu (Obr. 31) lze pozorovat závislost tepelné vodivosti na vlhkosti. Přesněji je zde srovnáván experiment s teorií. Červené body

představují hodnoty, které byly získány experimentálně a modré body představují hodnoty, které byly teoreticky vypočítané. Z grafu je na první pohled patrné, že hodnota tepelné vodivosti je vyšší s vyšší vlhkostí. Jsou zde uvažovány dvě vlhkosti a to 16% a 28%. Tyto hodnoty jsou brány jako přibližné jelikož není známa přesná vlhkost panelů. Vlhkost panelů je odvozena od vlhkosti použitých desek na jejich výrobu.

Dvě křivky, které jsou na grafu vidět, znázorňují spojnicí trendu mezi suššími a vlhčími panely. Jedna křivka představuje trend pro experiment a druhá pro teorii. Je jasně vidět, že křivky mají prakticky stejný sklon i hodnoty a tudíž se experiment shoduje s teoretickými výpočty.

### 6.2.2 Tepelný odpor

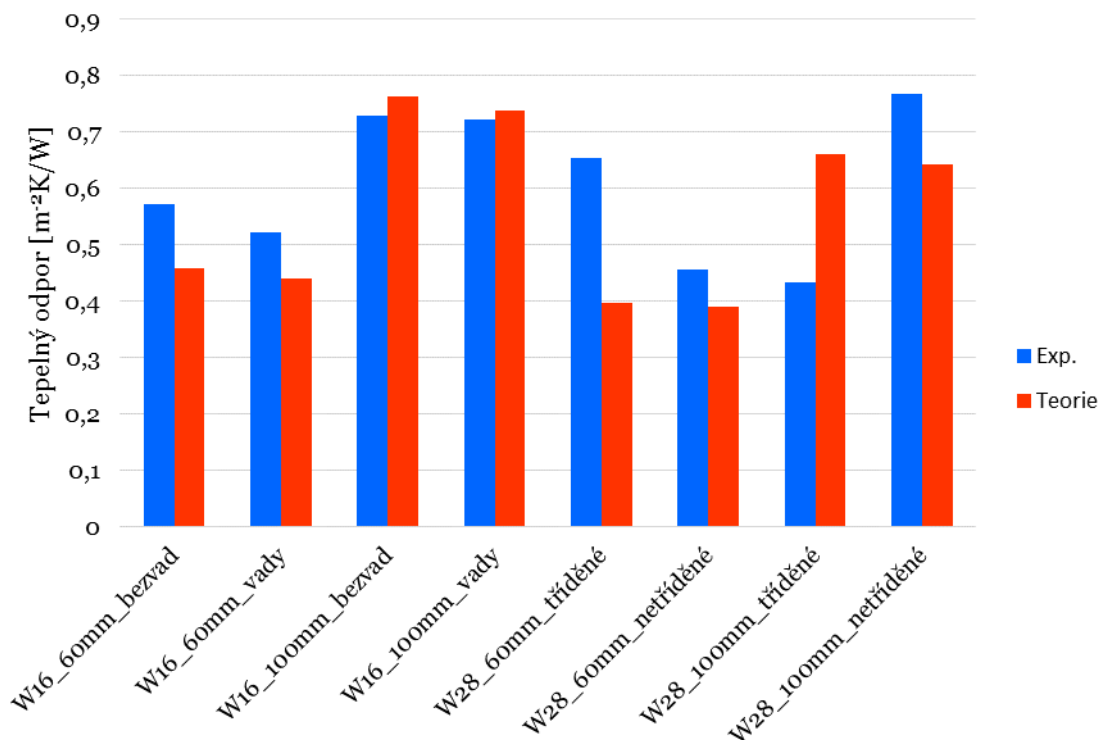


Obr. 32 Porovnání experimentálních hodnot a teoretický vypočítaných hodnot tepelného odporu

Na grafu (Obr. 32) jsou znázorněny získané data pro tepelný odpor jako barevné body. Modré body představují hodnoty panelů o vlhkosti 16 % a červené body představují hodnoty panelů o vlhkosti 28%. Na ose x jsou hodnoty, které byly získány teoretickými výpočty a na ose y jsou hodnoty zjištěné experimentálně

Na tomto grafu lze pozorovat odchylku mezi experimentem a teorií. Čím blíží jsou body umístěny k teoretické křivce, tím by byla větší shoda. Pokud by u měření a výpočtu byla stoprocentní shoda, všechny body by ležely na teoretické čáře.

Lze pozorovat, že hodnoty při vlhkosti 16 % přibližně odpovídají ideální teoretické křivce, ale hodnoty panelů, které měly vlhkost 28%, vykazují odchylky a leží mimo ideální křivku.



Obr. 33 Srovnání experimentálních dat a teoreticky vypočítaných dat tepelného odporu všech panelů

Na tomto grafu (Obr. 33) jsou znázorněny hodnoty tepelného odporu všech panelů. Červené sloupce představují hodnoty, které byly teoreticky vypočítány a modré sloupce představují hodnoty, které byly naměřeny experimentálně. Panely, které mají tloušťku 100 mm, vykazují zřetelně vyšší hodnoty tepelného odporu. Také je z těchto sloupců patrné, že panely, které byly vyrobeny ze tříděných prken, vykazují větší tepelný odpor než panely, které byly vyrobeny z netříděných prken.

U experimentálně zjištěných hodnot, které jsou značeny v grafu modrou barvou, jde vidět závislost na tloušťce pouze u panelů o 16% vlhkosti. U vlhčích panelů není zřejmá žádná závislost na tloušťce, vlhkosti ani na faktu jsou-li tříděné nebo netříděné. Možný důvod proč tomu tak je, bude vysvětlen v kapitole diskuze.

## 7 Diskuze

Jako inspirace pro tuto bakalářskou práci mi sloužila firma Thoma- Holz, která se zabývá stavbou domů panelové konstrukce a to výhradně z dřevěných materiálů. Tato myšlenka, používat výhradně dřeva jako stavební materiál, mě velice oslovila a proto jsem si jako předmět práce zvolil výrobu a testování panelů, které napodobují systémy firmy Thoma- Holz.

Firma Thoma- Holz udává ve svých materiálech a na svých webových stránkách pouze malé množství informací. Jednou ze zmiňovaných hodnot je hodnota tepelné vodivosti, kterou uvádí  $0,079 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Hodnoty, které jsem naměřil, však byly poněkud odlišné. Přibližná průměrná hodnota tepelné vodivosti, kterou jsem naměřil, byla  $0,14 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Tato hodnota je téměř jedenkrát větší než uvádí firma Thoma. Důvod je zřejmě ten, že průměrná hodnota je ze všech panelů, které jsem vyrobil. Tyto panely byly různě tříděné (vlhkostně, podle hustoty, podle vrstev) a to zapříčinilo nárůst průměrné hodnoty. Nejlepších výsledku dosáhly panely, které měly vlhkost 16%. Proto lze říci, že je lepší panely vyrábět z prken o vlhkosti pod mez hygroscopicity.

Co se týče tepelného odporu, ten firma na svých stránkách ani v materiálech neuvádí. Podle tloušťky stěny a známé tepelné vodivosti lze, ale snadno dopočítat. Hodnota, která vyšla je  $0,217 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ . Oproti mnou naměřeným a vypočítaným hodnotám je tento odpor poněkud nízký.

Pokud vezmu v úvahu všechny mnou naměřené hodnoty a srovnám je s literaturou, myslím, že hodnoty přibližně odpovídají. Při srovnání hodnot s literaturou bych chtěl začít srovnáním hustoty. Od zjištění této veličiny se odvíjely následné výpočty a zadávání parametrů pro měření tepelných vlastností. Průměrná hodnota hustoty, které jsem spočítal je  $520 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Tato hustota ovšem není při konstantní vlhkosti, jak udává literatura. Vlhkost měřených desek se měřila průměrně s vlhkostí 28%, ale některé desky měly vlhkost až 40%. Tento fakt hustotu dřeva zvyšuje oproti hodnotě udávané v literatuře. Hodnota v literatuře udává hustotu, která je měřena při 12% vlhkosti a je  $450 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Při přepočítání na hustotu při nulové vlhkosti uváděné hodnoty se příliš neliší. Mé hodnoty vycházejí přibližně  $400 - 440 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a hodnoty v literatuře uvádějí  $350 - 400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Samozřejmě při srovnání hustoty je nutno brát v potaz mnoho faktorů jako například klimatické podmínky, kde byla dřevina těžena, na čemž závisí podíl jarního a letního dřeva, délka výskyt reakčního dřeva a mnoho dalších.

Při srovnávání rychlosti šíření zvuku se hodnoty prakticky shodují. Literatura uvádí hodnotu  $4790 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  avšak opět při vlhkosti 12%. Má průměrná hodnota rychlosti šíření zvuku vyšla  $4081 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  při vlhkosti okolo MH. Naměřené hodnoty však měly velký rozptyl a velká většina všech z nich se nacházela okolo hodnoty, která je uváděna v literatuře.

Jak je uvedeno v kapitole metodika, z rychlosti šíření zvuku se dále spočítal modul pružnosti. Srovnám-li mnou vypočítané moduly pružnosti, průměrná hodnota 8708 MPa, lze konstatovat, že hodnoty jsou výrazně menší, než se uvádí v literatuře, kde se uvádí průměrně 12 000 MPa. To je ovšem hodnota při vlhkosti 12%. Dalším faktorem, který může tento rozdíl ovlivňovat je velký rozptyl dat, stejně jako tomu bylo u rychlosti šíření zvuku. Rozptyl dat byl od 3637 MPa do 14 272 MPa. Z grafu (Obr. 24) je patrné, že mezi rychlosti šíření zvuku a modulem pružnosti existuje přímá úměra, tudíž se dá předpokládat, že pokud je rychlost šíření zvuku vyšší bude i vyšší modul pružnosti. Pro příští měření, bych tedy navrhol, přepočítat modul pružnosti vyloučit. Hodnoty modulu pružnosti by mělo smysl počítat v tom případě, pokud by se jednotlivá prkna dělila do jednotlivých tříd pevnosti podle ČSN EN 338. Toto rozdělení nelze provést na základě rychlosti šíření zvuku.

Měření tepelných vlastností obnášelo měření tepelné vodivosti a tepelného odporu. Jelikož hodnota tepelného odporu závisí především na tloušťce testovaného materiálu, v literatuře jsem nenašel žádná vhodně použitelná data pro srovnání. Nicméně pro srovnání tepelné vodivosti jsou hodnoty v literatuře uvedené zcela jasně a uvádí  $0,133 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  při vlhkosti 12%. Já jsem naměřil hodnoty, které přibližně odpovídaly. Průměrná hodnota tepelné vodivosti byla  $0,14 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

Při srovnávání výsledků, jsem se dále soustředil na srovnání teoretické a experimentální části. V teoretické části jsem se řídil podle příslušných rovnic a výsledky by měly být tudíž přesné. V zásadě jsem teoreticky spočítal tepelnou vodivost a tepelný odpor. V tabulce 21 je uveden přehled naměřených a vypočítaných hodnot právě pro zmiňované vlastnosti.

Pokud se budeme nyní bavit o teoretických výpočtech pro tepelnou vodivost lze v tabulce pozorovat, že na tepelnou vodivost má vliv pouze vlhkost. Zatímco průměrná hodnota při vlhkosti 16% se pohybuje okolo  $0,135 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , při vlhkosti 28% se průměrná hodnota pohybuje okolo  $0,154 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Tato skutečnost je zapříčiněna tím, že voda obsažená ve dřevě je dobrým vodičem tepla a tudíž je lepší pro výrobu panelů použít sušší řezivo. S vypočítaných hodnot lze také pozorovat, že rozdělení podle modulu pružnosti ani podle vrstevnatosti nemá na tepelnou vodivost vliv. Nicméně na grafu (Obr. 28) je patrné jistá závislost na faktu, zda-li byly panely tříděné či nikoli. U vlhčích vzorků, které jsou na grafu znázorněny červenou barvou je zřetelné, že hodnoty panelů z netříděných prken se vyskytují pod teoretickou křivkou a hodnoty tříděných panelů, nad teoretickou křivkou. U sušších vzorků se toto rozdělení neprojevuje, hodnoty se překrývají. To že hodnoty tříděných panelů se vyskytují nad teoretickou křivkou, může být zapříčiněné skutečností, že pokud je větší modul pružnosti, tak může být teoreticky větší hustota vzorku. S vyšší hustotou se může zvyšovat vlhkost a s vlhkostí se zvyšuje tepelná kapacita. Tudíž se zvyšuje i tepelná vodivost. Srovnám-li tyto vypočítané hodnoty s hodnotami,

kteřé jsem naměřil experimentálně, zjistím, že se hodnoty shodují. Zejména v tom, že pokud se zvyšuje vlhkost panelu, zvyšuje se i jeho tepelná vodivost. Naopak se u experimentální části prokázal vliv tloušťky panelů na tepelnou vodivost. A to konkrétně při vlhkosti 16%. Tato závislost je, ale velice nepravděpodobná a hodnoty jsou ovlivněny faktory, které nám jsou doposud neznámé.

Při srovnávání tepelného odporu mezi teorií a experimentem není příliš velký rozdíl. Hodnoty se prakticky shodují až na menší rozdíly. Větší rozdíl lze pozorovat pouze u dvou panelů o vlhkosti 28%, kde se v experimentální části dosáhlo výrazně vyšších hodnot oproti teoretickým výpočtům.

Tato odchylka mohla být zapříčiněna kondenzací vody na strečové fólii, ve které byly panely zabaleny.

Kdyby se na povrchu panelů vyskytovalo větší množství zkondenzované vody tepelný odpor, neboli přenos energie za určitý čas, by mohl kolísat buď k vyšším, nebo nižším hodnotám v závislosti na tom v jaké části panelu se zkondenzovaná voda vyskytovala.

Jinak lze ale říci, že výpočet modulu pružnosti a následné třídění nemělo na tepelný odpor praktický žádný vliv ani v experimentální části. Vlhkost v tomto případě hrála také svoji roli. Zatímco vlhčí vzorky vykazoval menší tepelný odpor, sušší vzorky naopak vyšší. Pokud mají vlhčí panely vyšší tepelnou vodivost, musí mít menší tepelný odpor a naopak pokud mají sušší vzorky nižší tepelnou vodivost, musí mít vyšší tepelný odpor. Na rozdíl od hodnot tepelné vodivosti, má na hodnoty tepelného odporu poměrně velký vliv i tloušťka panelu. Panely s větší tloušťkou mají výrazně větší tepelný odpor.

Z tohoto srovnání a díky všem provedeným zkouškám, měřením a výpočtům, lze stanovit optimální skladba panelu, který bude mít nejlepší tepelné vlastnosti. Z důvodu, že modul pružnosti nemá na tepelné vlastnosti praktický žádný vliv nebo pouze minimální, není potřeba desky třídit a zjišťovat rychlost šíření zvuku. Tento fakt umožňuje použití i horších jakosti řeziva pro výrobu panelů. Výroba tím pádem bude ekonomičtější a lze použít i řezivo, které by se nemohlo použít například u staveb z masivního dřeva.

Dále by optimální panel měl být se suššího dřeva a to z toho důvodu, protože vlhčí dřevo má větší tepelnou vodivost a menší tepelný odpor což je v tomto případě nežádoucí.

Optimální tloušťka panelu se z tohoto měření nedá přesně stanovit, ale je patrná závislost mezi tloušťkou a tepelným odporem. Čím větší je tloušťka panelu, tím je vyšší tepelný odpor. U dřevostaveb je vyšší tepelný odpor žádoucí. Co se týče tepelné vodivosti, tak na ní tloušťka panelu nemá žádný vliv.



## 8 Závěr

Bylo vyrobeno celkem osm panelů, s tím že čtyři byly při vlhkosti 16% a čtyři byly při vlhkosti 28%. V každé z těchto variant bylo navíc testováno, zda-li jsou desky pro výrobu těchto panelů tříděné či netříděné podle pevnosti, respektive podle rychlosti šíření zvuku. Ve všech případech byla stejná vlhkost použitých bukových kolíků a to 0%.

Průměrná hustota vlhkých prken ( $w=28\%$ ), ze kterých byly panely vyrobeny, byla  $520 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Hustota panelů byla v průměru  $512 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Hustota se příliš nelišila ve variantách tříděné a netříděné desky. Větší hustotu vykazovaly však prkna netříděná.

Experimentálně změřené hodnoty tepelné vodivosti byly průměrně  $0,1324435 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , při vlhkosti 16% a  $0,15405875 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , při vlhkosti 28%. U teoreticky vypočítané tepelné vodivosti bylo dosaženo přibližně stejných výsledků. Při vlhkosti 16% byla průměrná hodnota  $0,13518175 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  a při vlhkosti 28% byla průměrná hodnota tepelné vodivosti  $0,1542975 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

Kromě vlhkostního rozdělení bylo provedeno rozdělení podle tloušťky, kde však nebyly tak markantní rozdíly tepelné vodivosti mezi naměřenými a vypočtenými daty. Průměrná hodnota u experimentálně získaných dat byla  $0,13897025 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , u tloušťky panelu 60 mm. U tloušťky panelu 100 mm byla průměrná hodnota  $0,147532 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Teoreticky vypočítaná data při tloušťce panelu 60 mm vycházela přibližně  $0,14447825 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  a u tloušťky 100 mm vycházela průměrná hodnota tepelné vodivosti  $0,145001 \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}$ . Průměrné hodnoty jsou brány orientačně z tabulky (Tab. 21)

Poslední rozdělení bylo, zdali byly panely z tříděných nebo naopak z netříděných prken. Hodnoty, které byly experimentálně zjištěny a týkají se tříděných panelů, vycházely průměrně  $0,140115 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  a hodnoty netříděných panelů  $0,14638725 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . U teoreticky vypočítaných hodnot vycházely přibližně stejné tepelné vodivosti. U tříděných panelů to bylo  $0,14297575 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  a u netříděných panelů  $0,1465035 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . U takto tříděných panelů lze konstatovat, že experimentálně zjištěné a teoreticky vypočítané hodnoty jsou prakticky stejné a ani rozdělení desek podle rychlosti šíření zvuku nemá příliš velký vliv na tepelnou vodivost.

Při měření tepelného odporu byly porovnávány naprosto stejné aspekty rozdělení. První rozdělení proběhlo na základě vlhkosti panelů. Průměrná hodnota tepelného odporu byla  $0,63650575 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$  při vlhkosti 16% a to konkrétně u experimentálně zjištěných hodnot. Pro experiment byla také průměrná hodnota  $0,57858615 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$  a to pro vlhkost 28%. U teoreticky vypočítaných hodnot vycházel tepelný odpor  $0,600423765 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$  pro vlhkost 16% a pro vlhkost 28%  $0,523566414 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ .

Druhé rozdělení podle tloušťky panelu probíhalo stejně jako u tepelné vodivosti. Pro experimentální část byly hodnoty průměrně  $0,551521 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$  u tloušťky 60 mm a  $0,6635709 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$  u tloušťky 100 mm. Teoreticky vypočítané hodnoty vycházely průměrně  $0,422460664 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$  u tloušťky 60 mm a  $0,701529514 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$  u tloušťky 100 mm.

Třídění podle pevnosti nemělo stejně, jako u tepelné vodivosti příliš velký význam hodnoty vycházely přibližně stejně. Průměrná hodnota všech panelů byla  $0,55 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ .

## 9 Summary

The aim was to produce a theoretically and experimentally determine the basic physical properties such as density and moisture. Further investigated the thermal properties of the panels and thermal conductivity and thermal resistance. Moisture panels was 16 and 28% and was calculated by gravimetric method. Density drier panels was about  $470 \text{ kg. m}^{-3}$  and the density of humid panels around  $515 \text{ kg. m}^{-3}$

Thermal properties were measured on LambdaMETR and theoretically calculated. The initial temperature was  $20^\circ \text{C}$  and the final temperature was  $50^\circ \text{C}$ . The results of these experimental tests amounted to theoretical calculations and the values reported in the literature. The approximate thermal conductivity was  $0.13 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$  at 16% moisture and  $0.15 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$  at a humidity of 28%. Thermal resistance was dependent on humidity and thickness. Moister panels showed a lower thermal resistance and drier panels conversely higher thermal resistance. Panels of higher thickness were higher heat approximately  $0.7 \text{ m}^2\text{.K.W}^{-1}$  resistance and panels of smaller thickness was smaller around  $0.4 \text{ m}^2\text{.K.W}^{-1}$ .

In conclusion we can say that the ideal composition of the panels is such that the lowest possible moisture adequate thickness and grading according to strength or defects is not necessary. It can be used lumber poorer quality.

## 10 Literatura

THOMA, Erwin. --*viděl jsem tě růst: o prastarém a novém životě se dřevem, lesem a Měsícem*. Vyd. 1. Ústí nad Labem: Paprsky, 2006, 182 s., viii s. barev. obr. příl. ISBN 80-903553-4-x

THOMA E. Bauteilkatalog. System ThomaHolz 100. 2014. 40 p.

POŽGAJ, A. -- CHOVANEC, D. -- KURJATKO, S. -- BABIAK, M. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. vyd. Bratislava: Príroda, 1993. 485 s. ISBN 80-07-00600-1.

ZOLLFRANK, Cordt, Wilfred A. CÔTÉ, R.J. LEICHTI, Franz F. P. KOLLMANN a Wilfred A. CÔTÉ. *Silylation of solid beech wood: Lumber and Other Solid Wood Processes*. ISBN 10.1007/978-3-642-87928-9.

HORÁČEK, Petr. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. 2.*, přeprac. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2008, ii, 124 s. ISBN 978-80-7375-169-2.

GANDELOVÁ, Libuše, Petr HORÁČEK a Jarmila ŠLEZINGEROVÁ. *Nauka o dřevě*. Vyd. 3., nezměn. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2009, iv, 176 s. ISBN 978-80-7375-312-2.

MATOVIČ, Anton. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva: určeno pro posl. lesnické fak., obor dřevařský a lesnický*. 1. vyd. Překlad Bohumil Koželouh. Brno: Vysoká škola zemědělská, 1993, 212 s. ISBN 80-715-7086-9.

REGINÁČ, L. *Nauka o dreve II*. Zvolen: Vysoká škola lesnicka a drevárska vo Zvolene, 1981.

UGOLEV, V. N.: *Drevesinovedenje s osnovami lesnovo tovarovedenia*, Moskva, 1975

KOLB, Josef. *Dřevostavby: systémy nosných konstrukcí, obvodové pláště*. 2., aktualiz. vyd. v České republice. Překlad Bohumil Koželouh. Praha: Grada, 2011, 317 s. ISBN 978-80-247-4071-3.

KUKLÍK, Petr, Anna KUKLÍKOVÁ. *Dřevěné konstrukce: určeno pro posl. lesnické fak., obor dřevařský a lesnický*. 1. vyd. Překlad Bohumil Koželouh. Praha: Vysoká škola zemědělská, 1993, 212 s. ISBN 978-80-01-04132-1.

ČSN EN 12667 (2001) *Tepelné chování stavebních materiálů a výrobků - Stanovení tepelného odporu metodami chráněné topné desky a měřidla tepelného toku - Výrobky o vysokém a středním tepelném odporu*.

ČSN EN 338 (2010). *Konstrukční dřevo - Třídy pevnosti*.

ČSN EN 384 (2010). *Konstrukční dřevo - Stanovení charakteristických hodnot mechanických vlastností a hustoty*.

ZEJDA, J., J. TIPPNER, V. SEBERA, E. KOŇASOVÁ a V. DÁNIEL. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva* [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/index.pl?opora=554>

*Sruby roubenky*. [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.srub.cz/fotogalerie-a-cenik/detail/kr-ku--/>

*Types of Framing Construction*. [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://insightfulservices.com/2012/12/2-types-of-framing-construction/>

*Dřevostavby*. [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/drevostavby>

*Montované dřevostavby z masivu. Moderní obdoba roubenek*. [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: [http://bydleni.idnes.cz/montovane-drevostavby-z-masivu-moderni-obdoba-roubenek-p2g-/stavba.aspx?c=A090223\\_153414\\_stavba\\_web](http://bydleni.idnes.cz/montovane-drevostavby-z-masivu-moderni-obdoba-roubenek-p2g-/stavba.aspx?c=A090223_153414_stavba_web)

*Tepelný odpor R*. [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/prostup-tepla-stavebni-konstrukci/312-tepelny-odpor-r>

*Pictures*. [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.nachi.org/>

*Dřevostavby*. [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.drevoastavby.cz/>

*Interiér a stavby*. [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.bydleni.cz/>

*Portál o stavbě, zahradě a bydlení*. [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.ceskestavby.cz/>

