

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



Lesnická
a dřevařská
fakulta

**Hodnocení vybraných elektrických vlhkoměrů
při měření vlhkosti dřeva**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2015/2016

Pavel Piňos

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci: Hodnocení vybraných elektrických vlhkoměrů při měření vlhkosti dřeva vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu

s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou *Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací*.

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

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity o tom, že 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:

.....

podpis

Poděkování

Rád bych chtěl touto cestou poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu doc. Ing. Hanuši Vavrčikovi, Ph.D. za ochotu, trpělivost a všechny rady, které mi během vypracování této práce poskytl. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Aleši Dejmalovi, Ph.D., který mi také poskytl drahocenné rady a jeden z měřicích přístrojů. Další použité měřicí přístroje byly od firmy AkzoNobel a. s., konkrétně od pana Ing. Lukáše Vranka, kterému také děkuji. Další poděkování patří panu Ing. Aleši Solařovi, Ph.D. i firmě Framoz a. s., od kterých byl získán měřený materiál. Velké poděkování patří celému Ústavu nauky o dřevě (LDF), bez kterého by tato práce vůbec nemohla vzniknout.

V neposlední řadě děkuji také své rodině a přítelkyni za trpělivost a podporu při mém studiu.

Abstrakt

Autor: Pavel Piňos

Název práce: Hodnocení vybraných elektrických vlhkoměrů při měření vlhkosti dřeva

Tato bakalářská práce je zaměřena na zjišťování rozsahu vlhkostí, ve kterém vybrané elektrické vlhkoměry měří spolehlivě a tím vhodnost jejich použití při měření vlhkosti dřeva. Práce je rozdělena do dvou hlavních částí, kterými jsou provedení samotného experimentu a statistické porovnání a vyhodnocení naměřených dat.

Měření vlhkosti bylo provedeno pomocí čtyř různých typů vlhkoměrů a následně porovnáváno se skutečnou (gravimetricky vypočítanou) vlhkostí dřeva. Testování bylo provedeno na smrkových vzorcích. Dalším cílem bylo stanovení vlivu hustoty dřeva na jeho skutečnou vlhkost. Pro prokázání spolehlivosti měření vlhkosti vybraných vlhkoměrů byly vzorky testovány celkem při pěti vlhkostních stavech.

Klíčové slova:

Hustota dřeva, měření vlhkosti dřeva, rovnovážná vlhkost dřeva, vlhkoměr, vliv vlhkosti na fyzikální vlastnosti dřeva.

Abstract

Author: Pavel Piños

Title of work: Evaluation of selected electrical moisturemeters in the measurement of the moisture content of wood

This bachelor thesis focuses on detecting a range of humidity, in which selected electric hygrometers measure reliably and also an appropriateness of its use for measuring moisture of wood. The thesis is divided into two main parts which are a realization of the experiment and a statistic comparison and evaluation of measured data.

The measuring of moisture was realized using four different types of hygrometers and then it was compared with the real (computed gravimetrically) moisture of wood. The testing was realized on spruce samples. The next target was determining an effect of a density of wood on its real moisture. For demonstrating reliability of measuring moisture of selected hygrometers, samples were tested during five humidity conditions.

Keywords:

Density of wood, measurement wood moisture, equilibrium moisture content of wood, hygrometer, moisture influence on physical properties of wood.

Obsah

1. Úvod	8
2. Cíl práce	10
3. Literární přehled	11
3.1 Hustota dřeva	11
3.1.1 Hustota dřevní substance	11
3.1.2 Hustota dřeva v závislosti na množství vlhkosti	12
3.1.3 Vliv vlhkosti na hustotu dřeva.....	13
3.2 Vlhkostní vlastnosti dřeva	14
3.2.1 Vlhkost dřeva.....	15
3.2.2 Rovnovážná vlhkost dřeva.....	18
3.2.3 Rozdělení vody ve dřevě	20
3.3 Elektrické vlastnosti dřeva.....	21
3.3.1 Elektrický odpor a elektrická vodivost.....	21
3.3.2 Vliv faktorů na měrný elektrický odpor a vodivost.....	22
3.3.3 Dielektrické vlastnosti	24
3.4 Metody zjišťování vlhkosti dřeva	26
3.4.1 Přímé metody měření vlhkosti dřeva.....	26
3.4.2 Nepřímé metody měření vlhkosti dřeva	29
3.4.3 Měření vlhkosti dřeva elektrickými vlhkoměry	29
3.4.5 Měření vlhkosti dřeva odporovými vlhkoměry	30
3.4.6 Měření vlhkosti dřeva dielektrickými vlhkoměry	33
3.4.7 Porovnání odporových a dielektrických vlhkoměrů.....	34
3.5 Návodů a zásady k použití měřicích přístrojů stanovené výrobcí	35
3.5.1 Měření přístrojem Merlin PM1-E.....	35
3.5.2 Měření přístrojem Gann Hydromette Compact A	36
3.5.3 Měření přístrojem Elbez WHT-740.....	37
3.5.4 Měření přístrojem Wagner L601-3.....	38
4. Materiál a metodika	40
4.1 Použitý materiál	40
4.2 Použité přístroje a zařízení.....	40
4.2.1 Merlin PM1-E.....	41

4.2.2 Gann Hydromette Compact A	42
4.2.3 Elbez WHT-740.....	43
4.2.4 Wagner L601-3	43
4.2.5 Ostatní použité přístroje a zařízení	44
4.3 Příprava zkušebních vzorků.....	44
4.4 Stanovení hustoty dřeva v absolutně suchém stavu.....	45
4.5 Klimatizování zkušebních vzorků	45
4.6 Stanovení vlhkosti zkušebních vzorků	46
4.6.1 Podmínky stanovení vlhkosti.....	46
4.6.2 Stanovení skutečné vlhkosti zkušebních vzorků	46
4.7 Statistické vyhodnocení	48
5. Výsledky.....	50
5.1 Hustota dřeva v absolutně suchém stavu	50
5.2 Měření vlhkosti při rovnovážné vlhkosti dřeva 5 %.....	51
5.3 Měření vlhkosti při rovnovážné vlhkosti dřeva 8 %.....	52
5.4 Měření vlhkosti při rovnovážné vlhkosti dřeva 12 %.....	54
5.5 Měření vlhkosti při rovnovážné vlhkosti dřeva 15 %.....	56
5.6 Měření vlhkosti při rovnovážné vlhkosti dřeva 18 %.....	57
5.7 Statistické vyhodnocení – vícenásobné porovnání výsledků.....	59
6. Diskuse	62
7. Závěr	67
8. Summary.....	69
9. Použitá literatura	71
10. Přílohy.....	74
10.1 Vstupní hodnoty.....	75
10.2 Statistické zpracování	81
10.2.1 Test normality (Shapiro-Wilkův test).....	81
10.2.2 Histogramy	83
10.2.3 Test vícenásobného porovnání	85
10.3 Vlastní snímky z průběhu experimentu	86

1. Úvod

Dřevo, jakožto materiál, je známo a využíváno již po tisíce let. Na světě je považováno za jeden z nejdokonalejších a nejuniverzálnějších materiálů vůbec.

K výhodám tohoto materiálu ve srovnání s konkurenčními materiály patří například to, že se jedná o obnovitelný zdroj, který roste téměř všude, a je na rozdíl od ostatních materiálů nevyčerpatelný. Je značně estetický s velkou přirozenou variabilitou barev a textur. Na pohled i na dotek působí dřevo na člověka velice příjemně a teple, čehož nejsou ostatní konkurenční materiály schopny. V porovnání se svou hmotností (hustotou) vykazuje dřevo vysokou pevnost a pružnost. Má velmi dobré tepelné a elektroizolační schopnosti, malou tepelnou roztažnost, výborné akustické vlastnosti, nekoroduje a je jej možno snadno opracovávat. Má jedinečnou schopnost držet spojovací prostředky a může být snadno lepeno. Dále je tento jedinečný materiál základním a hlavním zdrojem celulózy. Dřevo je ekologicky odbouratelné a recyklovatelné, a také je při přímém spalování zdrojem energie. To jsou jen některé vybrané z mnoha výhod tohoto nepřekonatelného materiálu.

Ale jak už to tak v životě bývá, vše má své výhody i nevýhody, a tedy i dřevo toho není výjimkou. Mezi některé nevýhody bych zařadil například to, že je dřevo materiál hygrokopický, který má schopnost měnit svoji vlhkost podle vlhkosti prostředí, ve kterém se nachází. S touto schopností, poutat kapaliny a plyny, souvisí nepříjemné rozměrové změny a také změny pevnosti a pružnosti. Jako jedinečný materiál vykazuje anizotropní charakter a jeho vlastnosti jsou tedy závislé právě na rovinné symetrii, což jeho použití značně omezuje. Jako další nevýhodu dřeva bych spatřoval v tom, že je hořlavé a podléhá vlivem jak abiotických, tak biotických činitelů degradaci. V poslední řadě je zde také otázka homogenity. Dřevo je biologicky rostlý materiál a vykazuje tak značnou nehomogenitu. Důsledkem toho je velká proměnlivost vlastností, které jsou navíc ovlivněny i faktory prostředí, během kterého se dřevo tvořilo.

Z uvedených kladů a záporů tohoto materiálu vyplývá jeho racionální využití, ke kterému je nutné dobře znát jak fyzikální, tak mechanické vlastnosti dřeva. Pokud se nám podaří tyto vlastnosti poznat a pochopit, můžeme následně některé nevýhody dřeva částečně eliminovat.

Tato bakalářská práce je zaměřena na stanovení přesnosti, spolehlivosti a vhodnosti použití vybraných elektrických vlhkoměrů při měření dřeva. Vznikla na základě toho,

že veškeré výrobky a předměty vyrobené z tohoto materiálu, ať už se jedná o konstrukční prvky staveb, nábytek či palivo, musí odpovídat své provozní vlhkosti.

Pro zjištění skutečné vlhkosti dřeva je nejpřesnější váhová, neboli gravimetrická metoda. Přece by ale nikdo vlhkost na veškerém dřevě nezjišťoval touto metodou. Bylo by to značně náročné a to jak ekonomicky, tak i časově. Z tohoto důvodu byly objeveny přístroje, které nám hodnotu vlhkosti sdělí také, a navíc i rychleji. Ovšem mnohem důležitější než čas je přesnost a ta nemusí být vždy stoprocentní. Každý výrobce takového přístroje tvrdí, že právě ten jeho je nejpřesnější a nejvhodnější.

Kde se ale skrývá pravda a který z přístrojů obstojí nejlépe, by měla částečně vyřešit tato bakalářská práce.

2. Cíl práce

Hlavním cílem této bakalářské práce je posoudit vhodnost pro použití testovaných elektrických vlhkoměrů.

Pro splnění tohoto hlavního cíle bylo nutné splnit několik cílů dílčích, a to:

- Zjistit chování vlhkoměrů při různých rovnovážných vlhkostech.
- Posoudit vliv vnějších podmínek při měření (například vliv podkladu).
- Pro kontrolu stanovit vlhkost vzorků gravimetrickou (váhovou) metodou.
- Stanovit potenciální přesnosti použitých vlhkoměrů.
- Stanovit zásady pro měření konkrétními vlhkoměry a porovnat je s doporučeními od výrobců vlhkoměrů.

3. Literární přehled

3.1 Hustota dřeva

Hustota dřeva, spolu s povrchovými a vzhledovými vlastnostmi, vlhkostí a vlastnostmi s ní související, patří do fyzikálních vlastností dřeva. Dále zde zařazujeme vlastnosti tepelné, elektrické, akustické a šíření záření ve dřevě (Matovič 1993).

Hustotu dřeva, starším výrazem objemová hmotnost, objemová váau či specifická váhá dřeva, je možné charakterizovat podílem hmotnosti dřeva v přirozeném stavu v jednotce objemu (Matovič 1993).

Nejpoužívanější jednotkou pro vyjádření hustoty dřeva je $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ případně $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Jde o jednu z nejvýznamnějších charakteristik dřeva a můžeme ji považovat za nejlepší kritérium pro hodnocení vlastností dřeva. Jedná se o veličinu, která výrazně ovlivňuje většinu jak fyzikálních, tak i mechanických vlastností dřeva (Gandelová et al. 2009).

Hustota dřeva může mít a také má značnou proměnlivost. Její hodnota závisí na celé řadě faktorů. Mezi ty nejdůležitější patří chemické složení dřeva, stavba dřeva a vlhkost. Dále to může být například poloha v kmeni, stanovištní podmínky a pěstební opatření (Horáček 1998).

Hustota dřeva nabývá na významu při jeho mechanickém a chemickém zpracování, kde je potřebné vědět, kolik dřevní hmoty obsahuje konkrétní objemová jednotka. Dále je hustota ukazovatelem vhodnosti použití dřeva pro různé účely. Například ve stavebnictví, kde je vyžadována nízká hmotnost při vysoké pevnosti a pružnosti, nebo při výrobě hudebních nástrojů (Požgaj et al. 1993).

3.1.1 Hustota dřevní substance

Tato hustota je charakterizována podílem hmotnosti a objemu dřevní substance. To znamená podílem buněčných stěn bez submikroskopických dutin. Je možné ji poté vyjádřit rovnicí:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}] \quad (1)$$

ρ_s – hustota dřevní substance [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],

m_s – hmotnost dřevní substance [kg],

V_s – objem dřevní substance [m^3].

3.1.2 Hustota dřeva v závislosti na množství vlhkosti

Hustotu dřeva v závislosti na množství vlhkosti je možné nejčastěji charakterizovat následnými vlhkostními stavy:

a) Hustota dřeva v suchém stavu ($w = 0 \%$)

Hustota dřeva v suchém stavu (ρ_0) je menší než hustota dřevní substance (ρ_s), a to z důvodu vyplněnosti mikrokapilár a lumenů vzduchem. Používá se pro porovnání výsledků a při teoretických výpočtech. Stanoví se následovně:

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} \quad [kg \cdot m^{-3}] \quad (2)$$

ρ_0 – hustota dřeva v suchém stavu [$kg \cdot m^{-3}$],

m_0 – hmotnost dřeva v suchém stavu [kg],

V_0 – objem dřeva v suchém stavu [m^3].

b) Hustota dřeva vlhkého ($w > 0 \%$)

Hustota dřeva vlhkého (ρ_w) je určena podílem hmotnosti a objemu dřeva při určité vlhkosti:

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad [kg \cdot m^{-3}] \quad (3)$$

ρ_w – hustota dřeva vlhkého [$kg \cdot m^{-3}$],

m_w – hmotnost dřeva při určité vlhkosti [kg],

V_w – objem dřeva při určité vlhkosti [m^3].

c) Hustota dřeva při vlhkosti 12 %

Jde o speciální případ hustoty dřeva vlhkého – ρ_w . Tuto hustotu udávají platné normy, protože právě 12% vlhkosti dřevo dosáhne, bude-li vystaveno dlouhodobějšímu působení při běžných podmínkách temperované místnosti (tj. $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ a $\varphi = 65 \%$):

$$\rho_{12} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \quad [kg \cdot m^{-3}] \quad (4)$$

ρ_{12} – hustota dřeva při vlhkosti 12 % [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],

m_{12} – hmotnost dřeva při vlhkosti 12 % [kg],

V_{12} – objem dřeva při vlhkosti 12 % [m^3].

Podle hustoty dřeva při vlhkosti 12 % můžeme naše domácí dřeviny rozdělit do tří skupin (tab. 1).

Tab. 1: Rozdělení dřev podle hustoty dřeva při $w = 12\%$ (podle Matoviče 1993)

Dřeva s nízkou hustotou ($\rho_{12} < 540 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	borovice, smrk, jedle, topol, lípa, vrba, olše, osika, kaštan jedlý, střemcha
Dřeva se střední hustotou ($\rho_{12} = 540\text{--}750 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	modřín, tis, bříza, buk, hruška, dub, ořešák vlašský, jilm, akát, platan, jabloň, jasan, jeřáb, třešeň, moruše
Dřeva s vysokou hustotou ($\rho_{12} > 750 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	habr, zimostřez, dřín

V (tab. 2) jsou uvedeny průměrné hodnoty pro hustotu dřeva v absolutně suchém stavu podle vybraných autorů.

Tab. 2: Průměrné hodnoty hustoty dřeva smrku při $w = 0\%$ dle některých vybraných autorů

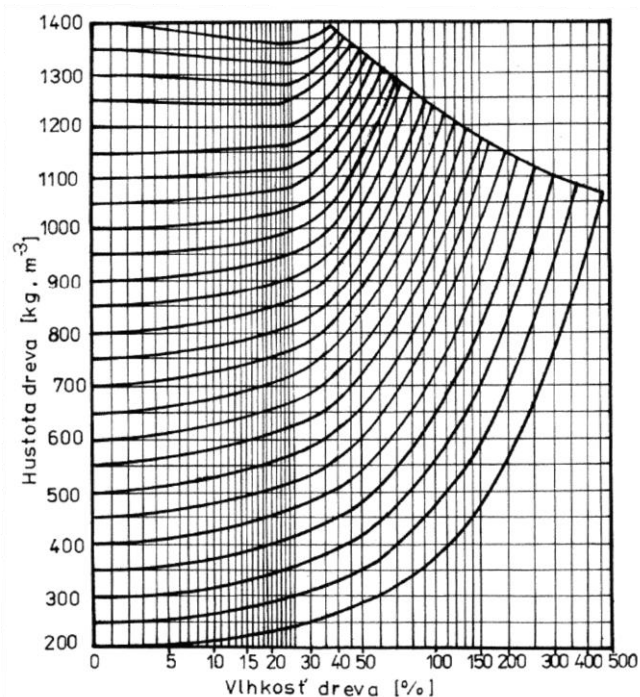
	Hustota dřeva smrku v absolutně suchém stavu – ρ_0 [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
Gandelová et al. 2009	420
Matovič 1993	420
Požgaj et al. 1993	350–400
Veselý 1999	467,49

3.1.3 Vliv vlhkosti na hustotu dřeva

Platí, že hustota dřeva se s rostoucí vlhkostí zvyšuje, nicméně hmotnost a objem dřeva se nezvyšují stejným teplem a rovnoměrně. Zatímco hmotnost dřeva (m) se zvyšuje se vzrůstající vlhkostí až do maximálního nasycení (w_{max}), objem dřeva se zvyšuje se vzrůstající vlhkostí pouze do bodu nasycení vláken. Při následném zvyšování vlhkosti nad tuto hodnotu objem dřeva dále zůstává již nezměněn.

Stanovení hustoty dřeva při určité vlhkosti je možné například za pomoci nomogramů. Pro jejich použití je důležité znát jedinou hodnotu, a to vlhkost dřeva v absolutně suchém stavu ($w = 0 \%$).

Jako příklad je zde uveden nomogram podle Kollmanna (obr. 1), podle kterého je možné určit hustotu při libovolné vlhkosti dřeva v rozsahu od 0–400 % (Požgaj et al. 1993).



Obr. 1: Nomogram pro stanovení hustoty dřeva při různé vlhkosti (Kollmann 1951)

3.2 Vlhkostní vlastnosti dřeva

Dřevo ve vztahu k prostředí, ve kterém se tento hygroskopický materiál vyskytuje, je schopné přijímat nebo naopak odevzdávat vodu, ať už v kapalném či plynném skupenství, a tím měnit svoji vlhkost. Pro existenci rostoucího stromu je nezbytné velké množství vody. Po skácení se obsah vody ve dřevě, podle dalšího použití, může dále snižovat i zvyšovat.

Ve většině případů přítomnost vody ve dřevě ovlivňuje i vlastnosti dřeva a velmi často způsobuje jejich zhoršení. Se změnou obsahu vody ve dřevě jsou spojeny změny hustoty dřeva, rozměrové změny, odolnost proti houbám a hmyzu, fyzikální a mechanické vlastnosti, technologické postupy při zpracování a další (Gandelová et al. 2009).

3.2.1 Vlhkost dřeva

Pod tímto pojmem si můžeme představit množství vody, které se ve dřevě vyskytuje. Vlhkost je možné vyjádřit dvěma různými způsoby. A to buď podílem hmotnosti vody k hmotnosti dřeva suchého, pak hovoříme o vlhkosti dřeva absolutní (w_{abs}), nebo podílem hmotnosti vody k hmotnosti dřeva mokrého – vlhkost dřeva relativní (w_{rel}).

Obě možná vyjádření vlhkosti jsou nejčastěji udávány v procentech, a je možné je vypočítat z následujících vztahů (Matovič 1993):

$$w_{abs} = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 = \frac{m_v}{m_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5)$$

$$w_{rel} = \frac{m_w - m_0}{m_w} \cdot 100 = \frac{m_v}{m_w} \cdot 100 \quad [\%] \quad (6)$$

w_{abs} – vlhkost absolutní [%],

w_{rel} – vlhkost relativní [%],

m_w – hmotnost vlhkého dřeva [kg, g],

m_0 – hmotnost suchého dřeva [kg, g],

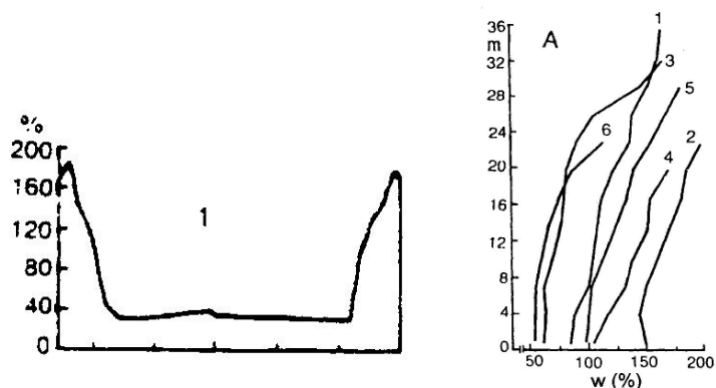
m_v – hmotnost vody [kg, g].

Vlhkost dřeva absolutní (w_{abs}) se používá pro charakteristiku fyzikálních a mechanických vlastností dřeva. Vlhkost dřeva relativní (w_{rel}) je použitelná tam, kde je nezbytné znát procentické zastoupení vody z celkové hmotnosti mokrého sortimentu.

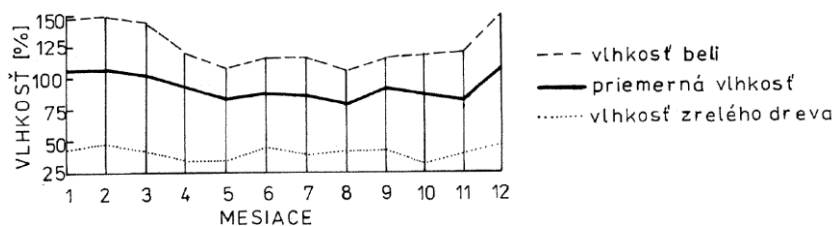
A to například při přejímkách dřeva, tj. při nákupu či prodeji dřeva podle jeho hmotnosti.

Rozložení vlhkosti není v rostoucím kmeni ve všech místech konstantní a je v něm rozložena nerovnoměrně. S výškou i po průměru kmene se mění (obr. 2 a 3). Nejvyšší vlhkosti po výšce stromu je dosahováno u jehličnanů v jeho koruně, kde je výskyt jádra či vyzrálého dřeva prakticky minimální a je zde zastoupena pouze běl. Největší rozdíl mezi vlhkostí jádra a bělí je u jehličnanů, kde běl může mít i 3–4 krát větší vlhkost než jádro či vyzrálé dřevo (Horáček 1998).

Proměnlivost vlhkosti uvnitř kmene se mění jak během celého roku (obr. 4), kde je největší vlhkosti dosaženo v zimních měsících, tak i během jediného dne (Gandelová et al. 2009).



Obr. 2 a 3: Rozložení vlhkosti dřeva po poloměru rostoucího stromu ve výšce 55 cm pro smrk a po výšce celého kmene pro jehličnany, 1 – smrk, 2 – jedle, 3–5 borovice, 6 – douglaska (Thoumis 1991)



Obr. 4: Průběh vlhkosti v kmeni rostoucího stromu smrku v průběhu roku (podle Perelygina 1965)

Podle vlhkosti se dřevo v praxi rozděluje do následujících skupin (Matovič 1993):

- dřevo mokré, dlouhodobě uložené ve vodě ($w > 100 \%$)
- dřevo čerstvě skáceného stromu ($w = 50\text{--}100 \%$, průměrně 75%)
- dřevo vysušené na vzduchu ($w = 15\text{--}22 \%$)
- dřevo vysušené na pokojovou teplotu ($w = 8\text{--}15 \%$)
- dřevo absolutně suché ($w = 0 \%$)

V praxi se někdy rozlišují následující stupně vlhkosti dřeva:

- dřevo na vzduchu vyschlé nebo uměle vysušené ($w < 22 \%$)
- dřevo polosuché ($w = 22\text{--}30 \%$)
- dřevo polosyrové ($w = 30\text{--}50 \%$)
- dřevo syrové ($w > 50 \%$)

Vlhkost uvnitř dřeva má značný význam při jeho zpracování a následném používání z něj zhotovených výrobků. Takováto vlhkost se označuje jako vlhkost technická. Technická vlhkost zahrnuje dvě vlhkosti: výrobní (vlhkost, při které je výrobek vyroben) a provozní (předpokládaná vlhkost, při které bude výrobek používán).

Za obecně správné pravidlo se považuje takové, že výrobní vlhkost se má rovnat vlhkosti provozní, resp. u některých druhů výrobků má být o 1–2 % nižší. Tím se předejde nežádoucím deformacím (trhlinám a prasklinám) v důsledku kolísání teploty a relativní vlhkosti prostředí, ve kterém bude výrobek použit (Matovič 1993).

Doporučená konečná vlhkost některých výrobků ze dřeva (Dejmal 1995):

- 5 % – dřevo určené pro elektricky nevodivé součásti, k elektrickým přístrojům
- 6 % – dýhy na vrtule pro letecký průmysl, dřevo na dýmky
- 7 % – hudební nástroje, laťovkové středy
- 8 % – násady, topora
- 9 % – parkety, dýhy pro konstrukční desky, nábytek do obývacích pokojů, vnitřní okna
- 10 % – stoly, židle, hračky, sportovní potřeby, obklady stěn v místnostech vytápěných kamny
- 11 % – podlahy pro běžné účely, nábytek do ložnice, kuchyňský nábytek
- 12 % – vnitřní dveře, zařízení prádelen, hole, kartáče, profilované lišty
- 13 % – dřevo do budov s pravidelným, ale periodickým vytápěním, venkovní okna, šindele
- 14 % – venkovní dveře, ložnicový nábytek pro místnosti s příležitostním vytápěním, zemědělské nářadí, železniční vagóny, bočnice aut a přívěsů, lešenářské desky
- 15 % – lepené vazníky, dřevo pro běžné stavební truhlářství, paluby lodí
- 16 % – zahradní nábytek, hospodářské stroje, přepravní bedny, palety
- 17 % – podlahy pro otevřené stavby, volné dřevěné konstrukce
- 18 % – dřevěné obaly pro běžné účely, sadařské dužiny, ostatní stavební dřevo
- 19 % – dřevo pro umístění do volné přírody, dřevo vhodné k déle trvajícimu transportu
- 20 % – hranice napadení dřevokaznými houbami
- 25 % – dřevo pro tlakovou impregnaci, dřevo před pařením
- 27 % – hranice pro objemové změny vlivem dalšího úbytku vlhkosti

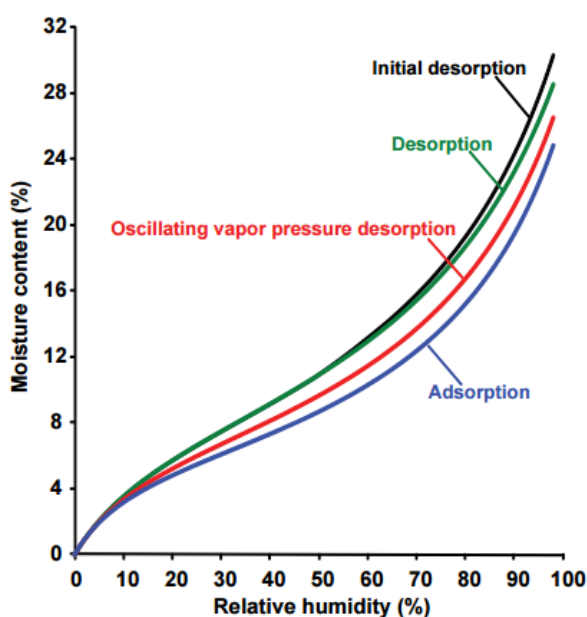
3.2.2 Rovnovážná vlhkost dřeva

Dřevo je navlhavý, hygroskopický materiál, který má tu vlastnost, že dokáže měnit svoji vlhkost v závislosti na tom, jaká je vlhkost okolního prostředí. Vlhkost dřeva, která se ustálí při daných podmínkách prostředí (teplota a relativní vzdušná vlhkost), se označuje jako rovnovážná vlhkost dřev (RVD). Stavem vlhkostní rovnováhy (SVR), je nazýván stav, který byl takto dosažen. S každou změnou nějakého parametru prostředí se změní také rovnovážná vlhkost dřeva.

Je-li vlhkost dřeva nižší než odpovídající SVR, bude dřevo vodu ve formě vodní páry z okolí přijímat. Tento děj se označuje jako adsorpce. Desorpce je označován děj opačný, kdy má dřevo naopak vlhkost vyšší než SVR a dřevo bude následně vodu ztrácet a odevzdávat svému okolí.

Tento proces změny vlhkosti dřeva v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu a teplotě prostředí je vratný, nicméně neběží po stejné křivce. Při rozpětí relativní vlhkosti vzduchu $\varphi = 30\text{--}90\%$ je vlhkost dřeva vyšší při desorpci přibližně o 2,5 až 3,5 %. Rozdíl mezi adsorpcí a desorpcí se při $\varphi < 30\%$ a $\varphi > 90\%$ zmenšuje na minimum.

Závislost RVD na relativní vzdušné vlhkosti při konstantní teplotě se nazývá sorpční izoterma. Rozdíl izotermy při adsorpci a izotermy při desorpci se nazývá hystereze sorpce a pro rozpětí relativní vzdušné vlhkosti $\varphi = 10\text{--}90\%$ je relativně konstantní (Gandelová et al. 2009).



Obr. 5: Závislost obsahu vlhkosti dřeva na relativní vlhkosti vzduchu – sorpční izoterma (Kretschmann et al. 1999)

Konkrétní hodnoty sorpční izoterm – stav vlhkostní rovnováhy v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu a jeho teplotě – můžeme buď určit z nomogramů, nebo výpočtem z některé rovnice sorpční izoterm, například podle Andersona McCarthyho (9). Obvyklým nomogramem pro stanovení RVD je například Keylwerth-Loughboroughův nomogram (obr. 6) (Kollmann a Côte 1968).

$$w = \frac{1}{B} \cdot \ln \frac{A}{\ln \frac{1}{\varphi}} \quad (7)$$

w – rovnovážná vlhkost dřeva, která odpovídá dané φ a T [%];

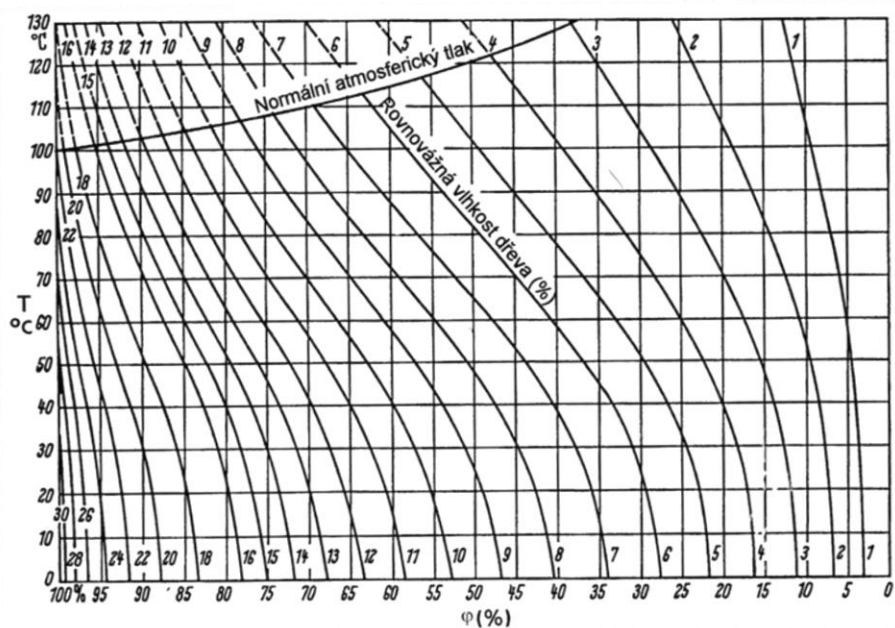
$$A = 7,731706 - 0,014348 \cdot T$$

$$B = 0,008746 + 0,000567 \cdot T$$

T – termodynamická teplota, při které určujeme sorpční izotermu [K];

$$(T = 273,15 + \text{°C})$$

φ – relativní vlhkost vzduchu [-].



Obr. 6: Nomogram pro stanovení rovnovážné vlhkosti dřeva v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu φ a teplotě T (Kollmann a Côte 1968)

3.2.3 Rozdělení vody ve dřevě

Podle toho, kde je voda ve dřevě uložena, rozlišujeme uvnitř tohoto materiálu tři typy vod (Gandelová et al. 2009):

a) Voda chemicky vázaná

Je součástí chemických sloučenin. Nelze ji ze dřeva odstranit sušením, pouze spálením. Zjišťuje se při chemických analýzách dřeva a její celkové množství představuje 1–2 % sušiny dřeva.

Při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností nemá žádný význam.

b) Voda vázaná (hygroskopická)

Je součástí buněčných stěn a je vázána vodíkovými můstky na hydroxylové skupiny OH amorfni části celulózy a hemicelulóz. Vyskytuje se ve dřevě v průměru při vlhkostech 0–30 %.

Při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností má největší a zásadní význam.

c) Voda volná (kapilární)

Vyplňuje lumeny buněk a mezibuněčné prostory. Je přítomna pouze za předpokladu výskytu vody vázané, to je od vlhkosti dřeva 30 % až do vlhkosti maximální (okolo 150–200 %).

Při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností má menší roli než voda vázaná.

Hranice mezi vodou vázanou a volnou se označuje pojmem mez nasycení buněčných stěn (MNBS). Jedná se o stav buňky, kdy je buněčná stěna plně nasycena vodou a lumen přitom neobsahuje vodu v kapalném stavu žádnou. Vlhkost dřeva při MNBS se u našich dřevin pohybuje v rozmezí 22–35 % (průměrně 30 %).

Vzhledem k obtížnému stanovení MNBS je vhodnější použít pro odlišení vody vázané a volné mez hygroskopicity (MH). Jde o takovou rovnovážnou vlhkost dřeva, kterou dřevo dosáhne, bude-li dlouhodobě vystavené prostředí (vzduchu), jehož relativní vlhkost se bude blížit nasycení ($\varphi = 0,995$ %).

Rozdíl mezi MNBS a MH je zejména v prostředí, ve kterém je dřevo vystaveno. U MNBS je to voda v kapalné podobě, u MH je to voda v podobě plynu. Při teplotě okolo 15–20 °C jsou obě veličiny přibližně stejné, průměrně kolem 30 %. Dalším rozdílem je fakt, že MH je na rozdíl od MNBS závislá na teplotě a s rostoucí teplotou klesá (Gandelová et al. 2009).

S klesajícím obsahem vlhkosti ve dřevě je voda vázaná ke dřevu poutána a držena stále pevněji. Její odstraňování je tím tedy s klesající vlhkostí dřeva čím dál více náročnější a složitější. Naopak vodu volnou je možné ze dřeva odstranit poměrně snadno a rychle. Kromě sušení ji lze ze dřeva odstranit i lisováním nebo odstředováním.

Rozdíl mezi vodou volnou a vázanou je také v tom, že přibližně do meze hygroskopicity může dřevo přijímat vodu ve formě vodní páry (navlhavost).

Pokud by mělo dřevo svoji vlhkost dále zvyšovat, muselo by být v přímém kontaktu s kapalinou (nasáklivost) (Dejmal 1995).

3.3 Elektrické vlastnosti dřeva

Dřevo nachází uplatnění také v elektrotechnice, kde je možné jej použít jako materiál pro sloupky elektrického vedení, jako izolační materiál (distanční podložky) a také na zhotovení pouzder, skříněk, rukojetí atd. V důsledku toho získávají praktický význam vlastnosti, určující vztah dřeva k elektřině (Perelygin 1965).

Vliv elektrického pole na dřevo je velice významný a výsledkem vzájemné interakce mezi elektrickým polem a dřevem je vznik elektrického proudu v materiálu.

Za nejdůležitější elektrofyzikální vlastnosti dřeva se považuje jednosměrná elektrická vodivost, elektrická pevnost a dielektrické vlastnosti.

3.3.1 Elektrický odpor a elektrická vodivost

Umístíme-li na protilehlé strany libovolného tělesa o daném průřezu dva zdroje o rozdílném napětí (elektrody), vznikne mezi nimi elektrický proud. Poměr mezi napětím (U) a proudem (I) vyjadřuje podle Ohmova zákona elektrický odpor (R) (Gandelová et al. 2009):

$$R = \frac{U}{I} \quad [\Omega] \quad (8)$$

Převrácená hodnota tohoto vztahu je nazývána elektrickou vodivostí s jednotkou Siemens:

$$G = \frac{I}{U} \quad [S = \Omega^{-1}] \quad (9)$$

Obě veličiny R i G jsou závislé na velikosti tělesa, jeho délce l , průřezu S , proto je celkový elektrický odpor tělesa dán vztahem:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad [\Omega], \quad (10)$$

kde ρ je měrný elektrický odpor [$\Omega \cdot m$] a převrácená hodnota měrného elektrického odporu je označována jako měrná elektrická vodivost γ [$S \cdot m^{-1}$]:

$$\gamma = \rho^{-1} \quad (11)$$

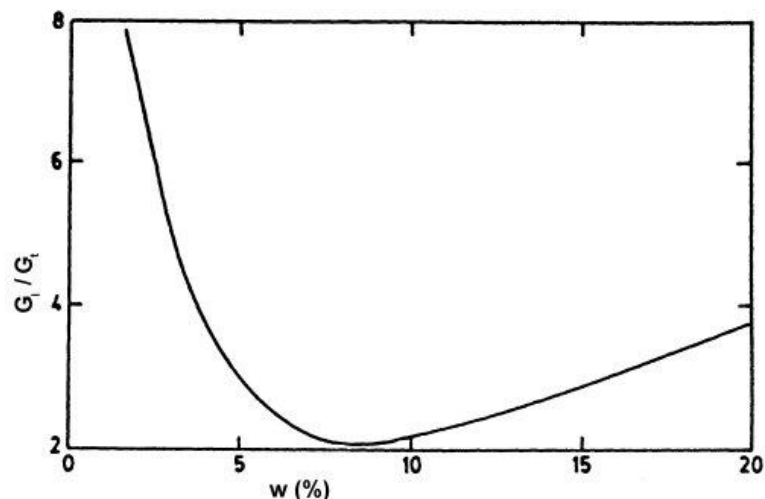
Praktické uplatnění elektrického odporu, respektive elektrické vodivosti, nalzáme při měření vlhkosti dřeva odporovými vlhkoměry (Horáček 1998).

3.3.2 Vliv faktorů na měrný elektrický odpor a vodivost

Na měrný elektrický odpor resp. vodivost mají vliv anatomická stavba, teplota, vlhkost, hustota dřeva a kontaminace dřeva chemickými látkami.

Měrný odpor dřeva má anizotropní charakter. Ve směru napříč vláken je ρ 2–8× větší než podél vláken, v radiálním směru je cca o 10 % vyšší než ve směru tangenciálním. U vodivosti jsou tyto poměry přesně naopak.

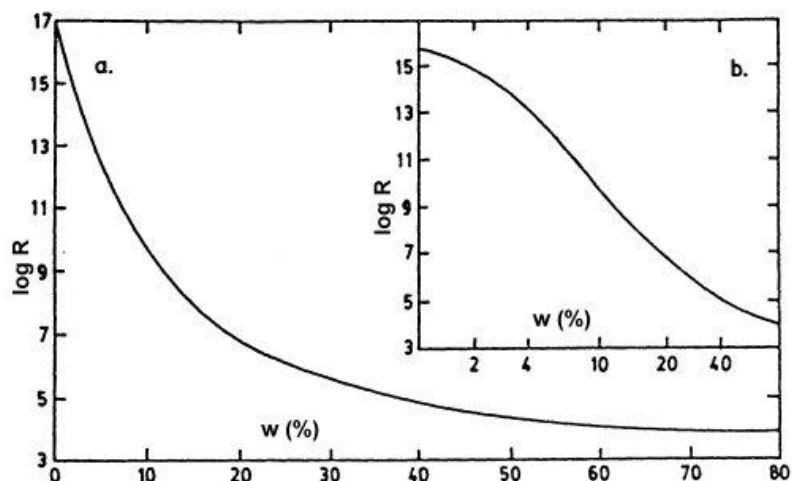
Při vlhkostech 0–7 % je γ podél vláken 4–8× větší než γ napříč vláken. Při vlhkostech v rozmezí 7–30 % je γ podél vláken už jen 2–4× větší než γ napříč vláken (obr. 7). Nad mezí hygroskopicity již není rozdíl mezi γ podél a γ napříč tak výrazný.



Obr. 7: Změna anizotropního charakteru elektrické vodivosti G v závislosti na vlhkosti dřeva (Skaar 1988)

Absolutně suché dřevo má měrný vnitřní odpor okolo 10^{14} – 10^{16} $\Omega\cdot\text{m}$, je tedy velmi dobrým izolantem. Se stoupající vlhkostí tento odpor prudce klesá (obr. 8).

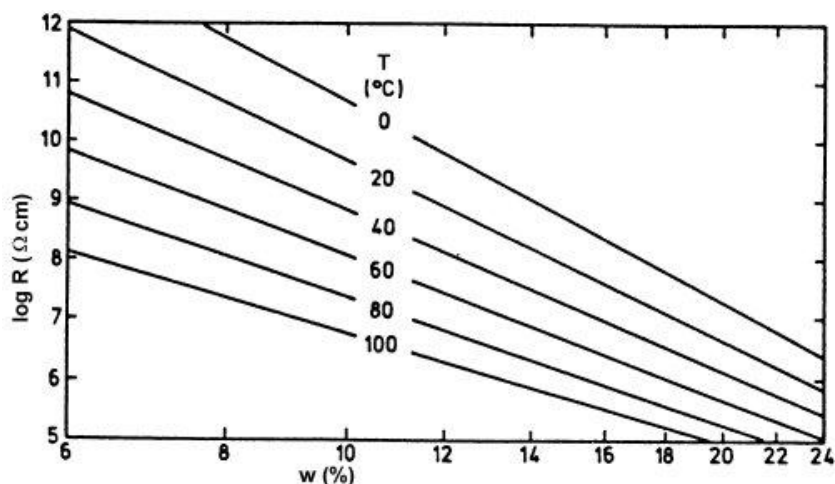
Změna vlhkosti z 0 % do meze hygroskopicity způsobí snížení měrného odporu přibližně o 10 řádů a hodnota měrného odporu při vlhkosti na mezi hygroskopicity se pohybuje kolem 10^4 – 10^5 $\Omega\cdot\text{m}$ (Horáček 1998).



Obr. 8: Závislost elektrického odporu dřeva R na vlhkosti dřeva (Siau 1995)

Se zvyšováním teploty měrný odpor dřeva také klesá (obr. 9). Velikost této změny závisí na vlhkosti dřeva. Nejvyšší je pro absolutně suché dřevo, se stoupající vlhkostí se velikost poklesu zmenšuje.

Závislost ρ na teplotě dřeva přináší nutnost odporové vlhkoměry korigovat na vliv teploty, protože rozdíl 1 °C změní měřenou vlhkost o 0,1 % (Horáček 1998).



Obr. 9: Vliv vlhkosti a teploty dřeva na měrný elektrický odpor dřeva (Skaar 1988)

3.3.3 Dielektrické vlastnosti

Vlastnosti dřeva jako dielektrika popisují dielektrické veličiny:

- permitivita ε'
- ztrátový činitel $\text{tg } \delta$
- ztrátové číslo ε''

Permitivita dřeva ε' charakterizuje velikost polarizace ve dřevě, to znamená natočení, resp. posunutí elektrických nábojů a jejich nosičů. Ve dřevě se mohou vyskytovat celkem čtyři druhy polarizace: elektronová, iontová, dipólová a migrační (Skaar 1988).

Poměr kapacity kondenzátoru s dielektrikem ke kapacitě kondenzátoru se vzduchem je roven relativní permitivitě ε' . Absorpce elektrické energie v dielektriku je úměrná ztrátovému číslu ε'' . Nejčastěji používanou mírou dielektrických ztrát je ztrátový činitel $\text{tg } \delta$, který je roven:

$$\text{tg } \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (12)$$

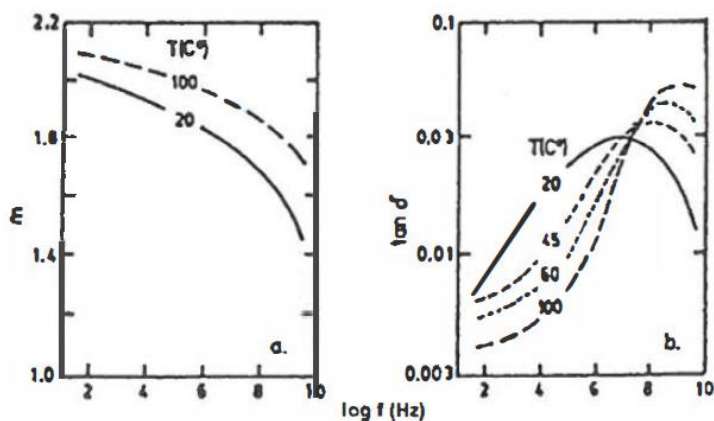
Úhel δ vyjadřuje fázový posun mezi napětím a proudem v důsledku dielektrických ztrát (Horáček 1998).

3.3.4 Vliv faktorů na dielektrické vlastnosti dřeva

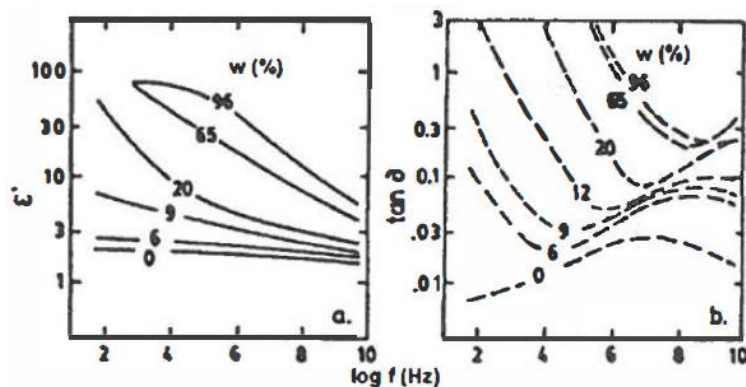
Dielektrické vlastnosti dřeva závisí zejména na frekvenci elektrického pole, druhu dřeva a jeho hustotě, anatomickém směru, teplotě a vlhkosti (obr. 10–12).

Závislost na frekvenci je dána podílem jednotlivých typů polarizace, které se ve dřevě vyskytují. Vlivem zvyšující se hustoty dielektrické vlastnosti rostou.

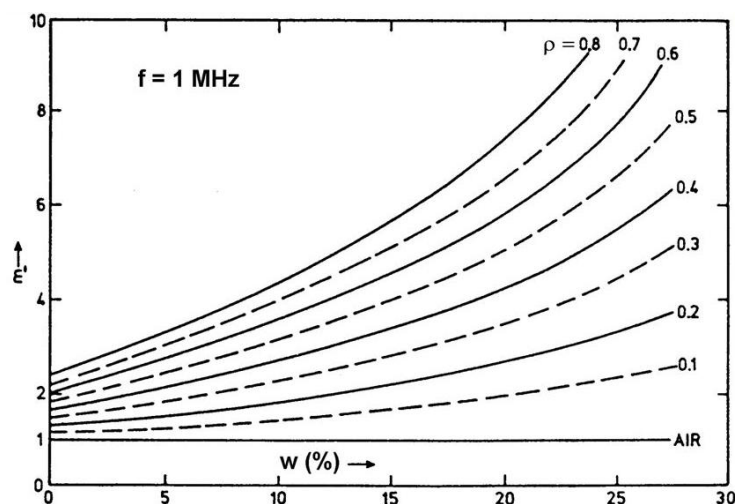
Dielektrické vlastnosti mají anizotropní charakter, nejvyšší hodnoty jsou vždy ve směru podél vláken. Teplota ovlivňuje pohyblivost polárních částic, proto s jejím zvyšováním rostou i hodnoty dielektrických veličin. Zvyšování vlhkosti dřeva způsobuje nárůst permitivity, protože se zvyšováním vlhkosti roste celkový počet polárních částí, a v důsledku toho se zvyšuje i polarizace. Ztrátový činitel se obecně s rostoucí vlhkostí zvyšuje (Horáček 1998).



Obr. 10: Vliv teploty dřeva a frekvence pole na dielektrické vlastnosti dřeva (Horáček 1998)



Obr. 11: Vliv vlhkosti dřeva a frekvence pole na dielektrické vlastnosti dřeva (Horáček 1998)



Obr. 12: Vliv hustoty a vlhkosti dřeva na relativní permitivitu dřeva ϵ' při frekvenci = 1 MHz (Skaar 1988)

3.4 Metody zjišťování vlhkosti dřeva

Ke zjišťování vlhkosti dřeva se používá celá řada metod, které se dělí na:

- a) přímé (absolutní) metody – zjišťujeme skutečný obsah vody ve dřevě
- b) nepřímé (relativní) metody – zde je obsah vody ve dřevě určen nepřímo prostřednictvím měření jiné veličiny, jejíž hodnota na obsahu vody ve dřevě závisí

K nejpraktičtějším a v současnosti nejpoužívanějším způsobům měření vlhkosti dřeva pro svoji jednoduchost a rychlost patří měření pomocí měřicích přístrojů – vlhkoměrů.

Trendem současného vývoje přístrojů jsou stále vlhkoměry elektrické (Gandelová et al. 2009).

3.4.1 Přímé metody měření vlhkosti dřeva

Jsou založené na přímém zjištění skutečného množství vody ve dřevě vážením. Mezi nejznámější přímé metody patří metoda gravimetrická, v praxi též nazývaná váhová.

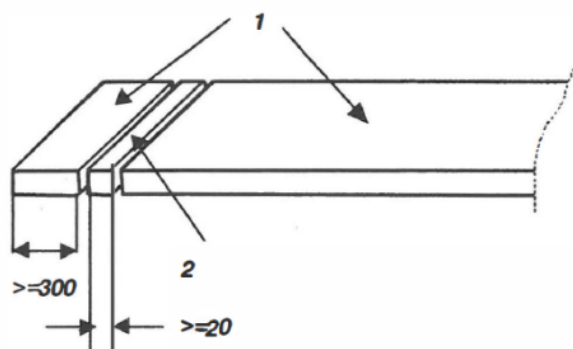
Dále do této skupiny patří metoda destilační a metoda založená na jodometrické titraci (Požgaj et al. 1993).

Gravimetrická (váhová) metoda měření vlhkosti dřeva

Tato metoda je nejpřesnější metodou pro stanovení vlhkosti dřeva a jde také o metodu referenční při posuzování přesnosti elektrických vlhkoměrů. Vychází z definičního vzorce vlhkosti (7) (Gandelová et al. 2009).

Přesné podmínky této metody předepisuje příslušná norma. Pracovní postup spočívá ve zjištění dvou hmotností, a to hmotnosti vlhkého dřeva (m_w) a absolutně suchého dřeva (m_o) po jeho vysušení při teplotě 103 ± 2 °C.

Sušení se kontroluje opakovaným vážením až do doby, dokud není rozdíl mezi dvěma po sobě jdoucími váženími v intervalu 2 hodin větší než 0,1 %. Výsledná hodnota vlhkosti dřeva se vyjádří s přesností na 0,1 % (ČSN EN 13183-1).



Legenda:

- 1 – zkušební vzorek
- 2 – zkušební těleso

Obr. 13: Pozice zkušební vzorku (ČSN EN 13183-1: Vlhkost vzorku řeziva – Část 1: Stanovení váhovou metodou)

V praxi má tato metoda svoje specifické zásady (obr. 13). Vždy je nutné dbát na to, aby byl vzorek vyříznut z místa bez vad a v takové vzdálenosti od čela, aby nedošlo k možnosti zkreslení výsledků, neboť konce výřezů nebo řeziva mají zpravidla rozdílnou vlhkost. Vážení je nutno zabezpečit ihned, případně dbát na to, aby nedošlo ke změně vlhkosti vzorku při transportu k vážení. Po vysušení je nutné vzorky vážit také okamžitě, aby neměly možnost opět vlhkost z okolního prostředí přijímat (Dejmal 1995).

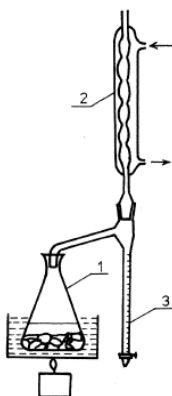
Tento způsob není přesný u dřevin s obsahem pryskyřice, která vlivem tepla vytéká ze dřeva, a rovněž není vhodný pro zjišťování množství vody ve dřevě ošetřeném impregnací (Matovič 1993).

Výhodou gravimetrické metody je její vysoká přesnost, k nevýhodám patří náročnost na čas, pracnost přípravy zkušebních vzorků a nemožnost kontinuálního měření vlhkosti (Horáček 1998).

Destilační metoda měření vlhkosti dřeva

Principem této metody je zjištění hmotnosti vody ve dřevě na základě jejího objemového množství. Používá se na stanovení vlhkosti dřeva impregnovaného olejovými látkami, kde by bylo použití gravimetrické metody problematické (Požgaj et al. 1993).

Dále se používá pro dřeva obsahující vyšší podíl prchavých nebo ochranných látek. Vlhkost dřeva se určuje ve speciálně sestaveném destilačním přístroji (obr. 14).



Obr. 14: Schéma aparatury pro stanovení vlhkosti dřeva destilační metodou xylenem: 1 – varná baňka, 2 – zpětný chladič, 3 – kalibrováná předloha (odměrný válec) (Perelygin 1965)

Princip metody spočívá v tom, že se zvážený vzorek ve formě pilin nebo třísek o dané hmotnosti (m_w) vloží do baňky se širokým hrdlem. Přidají se chemikálie (médium) nemísitelné s vodou (např. tetrachlorethylen, trichlorethylen, chloroform, xylen, toluen, benzen). Podle hustoty média se použije destilační zařízení. Baňka se zahřeje. Médium se po dosažení teploty bodu varu odpaří spolu s vodou. Po ochlazení ve zpětném chladiči stéká kondenzovaná voda a médium do odměrného válce. V důsledku rozdílných hustot a nemísitelnosti obou složek jsou v odměrném válci zřetelně od sebe odlišeny. Z odměrného válce se odečte objem vody, který se převede na její hmotnost. Vlhkost vzorku se vypočte dle vztahu (7).

Nevýhodou této metody je zdlouhavý postup, vyšší finanční náklady a zvýšené nebezpečí vzniku požáru (Matovič 1993).

3.4.2 Nepřímé metody měření vlhkosti dřeva

Jsou založené na měření jiných fyzikálních veličin, jejichž hodnoty se v závislosti na vlhkosti dřeva mění. Vyznačují se větší rychlostí měření než metody přímé, ale většinou i nižší přesností, která je však pro potřeby praxe v určitém rozmezí vlhkostí dostačující (Matovič 1993).

Z těchto metod jsou velice rozšířené metody (Horáček 1998):

- a) elektrofyzikální (odporová, dielektrická) – založené na vodivostních a dielektrických vlastnostech dřeva)
- b) radiometrická (založená na absorpci různých druhů záření)
- c) akustická (využití rychlosti šíření nebo absorpce zvuku a ultrazvuku)
- d) termofyzikální

V sušárenské praxi se také používá metoda zjišťování průměrné vlhkosti sušeného řeziva pomocí měření sesychání nebo ztráty hmotnosti hraně (Gandelová et al. 2009).

Mezi dále používané metody patří například metoda hygrometrická a metoda barevných proužků. Při všech těchto metodách není potřebné stanovovat hmotnost vody ani dřeva (Požgaj et al. 1993).

3.4.3 Měření vlhkosti dřeva elektrickými vlhkoměry

Vlhkost dřeva výrazně ovlivňuje všechny základní elektrofyzikální veličiny dřeva, proto je možné je všechny pro účely měření vlhkosti dřeva použít. Měření vlhkosti dřeva elektrickými vlhkoměry patří mezi metody nepřímé.

Definice elektrického vlhkoměru je jednoduchá. Jedná se o přístroj, jehož činnost spočívá v měření některé elektrické veličiny dřeva, která je výrazně ovlivňována vlhkostí dřeva.

Vlhkoměry tedy běžně měří některou elektrickou veličinu, která však přímo nepředstavuje materiálovou charakteristiku.

V tabulce (tab. 3) je znázorněn vztah mezi určitou elektrofyzikální charakteristikou dřeva a měřenou elektrickou veličinou.

Tab. 3: Přehled měřených elektrických veličin používaných u elektrických vlhkoměrů (Makovíny 1995).

Zjišťovaná veličina	Elektrofyzikální charakteristika dřeva	Měřená elektrická veličina
Vlhkost dřeva	Měrný odpor ρ , resp. Měrná vodivost γ	Odpor R
	Relativní permitivita ϵ'	Kapacita C
	Ztrátové číslo ϵ''	Vodivost G
	Ztrátový úhel $tg \delta$	Fázový posun δ
	Komplexní permitivita ϵ^*	Admitance Y

Elektrické vlhkoměry je možné rozdělit s ohledem na druh elektrického napětí na (Horáček 1998):

- a) odporové – napětí jednosměrné
- b) dielektrické – napětí střídavé

Konkrétní elektrická veličina, která slouží pro zjišťování vlhkosti je však ovlivňována i dalšími fyzikálními činiteli. Ty můžeme rozdělit na:

- a) vnitřní – dané vlastnostmi materiálu (druh, hustota, anizotropie, teplota, vady dřeva)
- b) vnější – tvořící podmínky měření (frekvence a intenzita elektrického pole, relativní vlhkost vzduchu, chemická kontaminace dřeva).

3.4.5 Měření vlhkosti dřeva odporovými vlhkoměry

Tento typ elektrických vlhkoměrů, někdy též nazývané konduktometrické, jsou i u nás v praxi nejrozšířenějším typem vlhkoměrů (Matovič 1993).

Jedná se o jednoduchou a rychlou metodu určování vlhkosti dřeva. Jejich princip je založen na rozdílnosti elektrického odporu v závislosti na měnícím se obsahu vlhkosti ve dřevě. Určování trvá krátce a prakticky nepoškozuje materiál. Je však méně přesné a používá se především pro určování vlhkosti dřeva v rozmezí 6–25 %. Pod uvedeným rozsahem je odpor příliš vysoký a dřevo se stává dielektrické. Nad tímto rozsahem je měření zpravidla méně přesné.

Při měření elektrickými odporovými vlhkoměry je nutno zohlednit i teplotu dřeva, při níž se měření provádí, a hustotu (druh) dřeva (Dejmal 1995).

Kontakt se dřevem v elektrickém obvodu vlhkoměru je zajištěn měřicími elektrodami (sondami). Ty jsou konstruovány buď jako samostatné, spojené s přístrojem kabelem, nebo jako fixované na měřicím přístroji. Používá se několik typů měřicích elektrod (obr. 16) (Gandelová et al. 2009).

Nejdůležitějším vnějším faktorem ovlivňující přesnost měření odporových vlhkoměrů je konfigurace elektrod. Protože je plocha elektrod zaražených do dřeva více méně konstantní, měří tyto vlhkoměry spíše elektrický odpor (R) než měrný elektrický odpor (ρ). Měření proto tedy závisí na hloubce, do které jsou elektrody do dřeva zaraženy. Při nerovnoměrném rozložení vlhkosti po průřezu můžeme určit průsečík skutečného rozložení vlhkosti a průměrné vlhkosti dřeva, který se nachází v 1/6 tloušťky materiálu. Tato hloubka zarážení je vhodná pro elektrody jehlové.

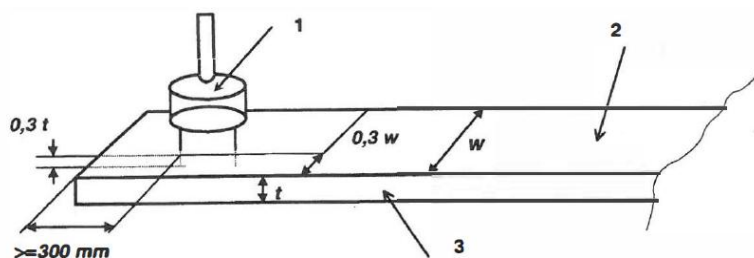
Pokud je vlhkost dřeva konstantní a rozložena rovnoměrně po průřezu materiálu, poté výsledek měření prakticky nezávisí na typu použitých elektrod. V zásadě však platí, že přítlačné elektrody jsou vhodné pro měření vlhkosti dých nebo povrchových vrstev dřeva. Zarážecí elektrody a elektrody s izolovanou vodivou špičkou umožňují zjišťovat vlhkost i při jejím nerovnoměrném rozložení po průřezu. Upínací elektrody jsou vhodné pro různé tloušťky materiálu (Horáček 1998).

Přesné požadavky a návody pro použití této metody předepisuje příslušná norma (ČSN EN 13183-2). V ní se uvádí, že je tento způsob měření vlhkosti vhodný pro řezivo o vlhkosti v intervalu 7–30 %. Elektrický odporový vlhkoměr musí být odstupňovaný až do 30 % vlhkosti dřeva po stupních maximálně 1 %. Měřidlo musí být nastavené, nebo vybavené tabulkami pro korekci na různá dřeva i teploty a před samotným zahájením každého měření musí být přístroj přezkoušen podle pokynů výrobce. Dále je v této normě uveden přesný postup měření:

Měření se zpravidla provádí ve směru vláken. Předepisuje-li to návod k měřidlu, měří se kolmo na směr vláken. Vzhledem k značnému vlivu povrchové vlhkosti a možným rozdílům vlhkosti v průřezu vzorku použijí se izolované elektrody s neporušenou izolací. Elektrody se zarazí na ploše vzorku řeziva ve vzdálenosti nejméně 300 mm od obou konců (nebo uprostřed, u vzorku kratšího než 600 mm) a ve vzdálenosti 0,3 násobku šířky od boku a tak, aby špička elektrody byla v hloubce 0,3 násobku tloušťky vzorku řeziva (obr. 15). Měřicí místo musí být bez vad, jako jsou např. kůra, suky a

smolníky. Vyskytují-li se tyto vady, měří se na nejbližším bezvadném místě směrem ke středu zkušebního vzorku.

Výsledek měření se odečte po 2–3 s po zapnutí měřicího okruhu.

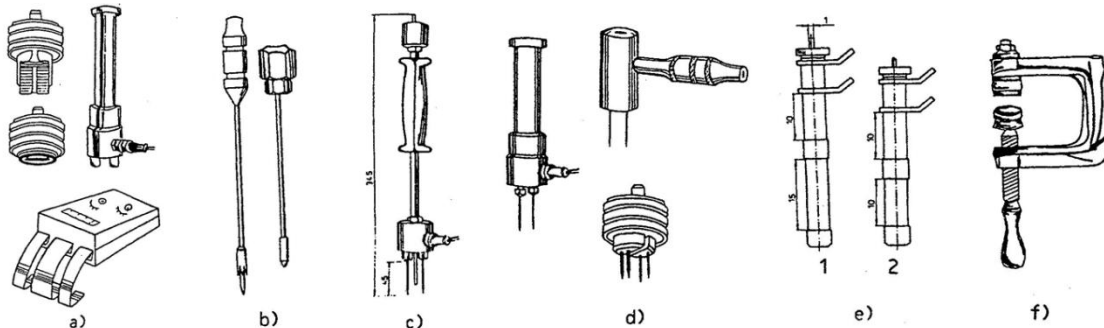


Legenda:

- 1 – zarážecí elektrody
- 2 – plocha
- 3 – bok
- t – tloušťka
- w – šířka

Obr. 15: Pozice pro měření (ČSN EN 13183-2: Vlhkost vzorku řeziva – Část 2: Odhad elektrickou odporovou metodou)

Při měření je důležité vždy zajistit spolehlivý kontakt mezi elektrodami a dřevem. V opačném případě by se uplatnil přechodový elektrický odpor a vlhkoměr by ukazoval hodnoty menší, než ve skutečnosti jsou (Horáček 1998).



Obr. 16: Přehled některých typů měřících elektrod; a – přitlačné (razítkové z vodivé gumy nebo kovové), b – hloubkové, c, d – zarážecí (jehlové), e – zvláštní (válcové, kombinované), f – upínací (svorkové) (Makovíny 1995)

V současné době je vyráběna celá řada vlhkoměrů založená na tomto principu. Tato metoda se pro svou rychlost používá zejména v praxi k rychlému zjištění vlhkosti dřeva. Vlhkoměry jsou konstruovány obvykle v rozsahu vlhkosti do 30 %.

Přesnost jejich měření je udávána na ± 1 %. Při měření vlhkosti nad 30 % je přesnost měření značně menší a pohybuje se v rozmezí ± 10 % (Matovič 1993).

3.4.6 Měření vlhkosti dřeva dielektrickými vlhkoměry

Dielektrické vlhkoměry je možné rozdělit podle měřené elektrické veličiny na:

- a) kapacitní,
- b) absorpční včetně mikrovlnných,
- c) admitační.

Toto dělení dielektrických vlhkoměrů však nevystihuje přesně princip činnosti jednotlivých typů, protože některé vlhkoměry měří elektrickou veličinu ovlivněnou různou mírou dalšími elektrofyzikálními charakteristikami. Například mikrovlnné vlhkoměry měří útlum elektromagnetického vlnění, přičemž konstanta útlumu je závislá nejen na ztrátovém čísle, ale i na permitivitě.

Z hlediska použitých frekvencí je možné dielektrické vlhkoměry rozdělit na:

- a) nízkofrekvenční (nf)
- b) vysokofrekvenční (vf)
- c) mikrovlnné (vvf)

Přenosné dielektrické vlhkoměry jsou převážně vysokofrekvenční a mikrovlnné. Pracují ve frekvencích v intervalu 1–10 MHz a 0,1–5 GHz. Mimo uvedené metody byly u vlhkoměrů použity i další, například metoda impedančního děliče elektrického napětí a metoda dvou rezonančních obvodů (Gandelová et al. 2009).

Přesné požadavky a návody pro použití této metody měření vlhkosti jsou uvedeny v příslušné normě (ČSN EN 13183-3). Popisuje vhodnost pro odhad vlhkosti kusu řeziva, který má vlhkost v rozmezí 7–30 %. Popisuje měřicí přístroj jako ruční kapacitní vlhkoměr s rovnou povrchovou plochou kondenzátorových desek, povrchovými pružinovými elektrodami nebo speciálními měřicími doteky, které nevnikají do dřeva, se stupnicí nejméně do vlhkosti 30 % dělenou nejvíce po 1 %.

Dále je zde uveden přesný postup při měření:

Před začátkem měření musí být kapacitní vlhkoměr přezkoušen podle údajů výrobce. Kapacitní vlhkoměr musí být nastaven podle hustoty měřeného dřeva. Není-li skutečná hustota známa, může být použita průměrná hustota měřeného druhu dřeva z návodu k

obsluze dodaného výrobcem. Musí být zajištěno, že použitý měřicí přístroj je způsobilý a patřičně přizpůsobený pro měřenou tloušťku. Musí být zabráněno vzduchové mezeře nebo špatnému kontaktu mezi deskami kondenzátoru a povrchem dřeva. Měřené místo musí být bez vad, jimiž by mohlo být měření ovlivněno, jako je např. kůra, suky, smolníky, mokrý povrch nebo trhliny. Měření se provede na ploše ve vzdálenosti 300 mm od jednoho ze dvou konců řeziva. Pokud toto místo vykazuje některou z výše uvedených vad, provede se měření na nejbližším místě bez vad ve směru ke středu prkna. Kusy řeziva kratší než 600 mm se měří ve středu délky.

3.4.7 Porovnání odporových a dielektrických vlhkoměrů

Oba dva typy elektrických vlhkoměrů mají své zvláštnosti. Rozsah vlhkosti, ve kterém se vlhkost dřeva může spolehlivě zjišťovat je u odporových vlhkoměrů přibližně v rozmezí 5–30 % a u dielektrických vlhkoměrů v intervalu od 0–30 %.

V zásadě je možné dielektrické vlhkoměry konstruovat při nezmenšené přesnosti měření na celý rozsah vlhkosti dřeva.

Dielektrické vlhkoměry jsou převážně vybaveny rovinnými elektrodami, které se umísťují na povrch materiálu. Jde tedy o nedestruktivní testování. Jejich údaje mají ovšem tendenci udávat vlhkost právě jen povrchu nebo povrchových vrstev (výjimkou jsou vlhkoměry kapacitní). Pro známé vlhkostní gradienty je možné tyto vlhkoměry kalibrovat, ale při neznámých gradientech nelze získat spolehlivé údaje.

Ze srovnání obou typů elektrických vlhkoměrů vyplývá, že přesnost měření pomocí odporového vlhkoměru při respektování teploty, druhu a anatomického směru dřeva je lepší. Chyba odporového vlhkoměru v důsledku nepřesnosti měření odporu se běžně považuje za zanedbatelnou, protože při přesnosti měření odporu $\pm 5 \%$ je chyba v údaji vlhkosti pouze $\pm 0,1 \%$.

Rozdíly v přesnosti jsou dány mimo jiné i tím, že dielektrické vlhkoměry je potřeba výrazněji korigovat na vliv teploty a hustoty dřeva. Chyby způsobené nerespektováním druhu dřeva jsou u odporových vlhkoměrů obvykle pod $\pm 4 \%$, u dielektrických může být chyba až $\pm 10 \%$.

Údaje dielektrických vlhkoměrů ukazují obecně větší variabilitu hodnot, než odpovídající údaje vlhkoměrů odporových. Vzhledem k této variabilitě se doporučuje měřit odporovými vlhkoměry 10 % materiálu, zatímco při použití dielektrických je to 20 %. V praxi našly největší uplatnění vlhkoměry odporové, a to až z 90 %.

Použití dielektrických vlhkoměrů je rozšířeno převážně v USA, v Evropě jen ojediněle. Za jednu z velkých výhod dielektrických vlhkoměrů se považuje jejich schopnost měřit vlhkost v celém rozsahu a navíc i kontinuálně (Horáček 1998).

3.5 Návod a zásady k použití měřicích přístrojů stanovené výrobcem

V této části jsou uvedeny základní pravidla, návody a zásady pro správné zacházení použitých měřicích přístrojů při měření vlhkosti dřeva.

3.5.1 Měření přístrojem Merlin PM1-E

Přístroj Merlin PM1-E (obr. 22) je vybaven volitelným třístupňovým menu, díky kterému je možné nastavovat skupinu dřeva nebo hustotu dřeva a jeho tloušťku.

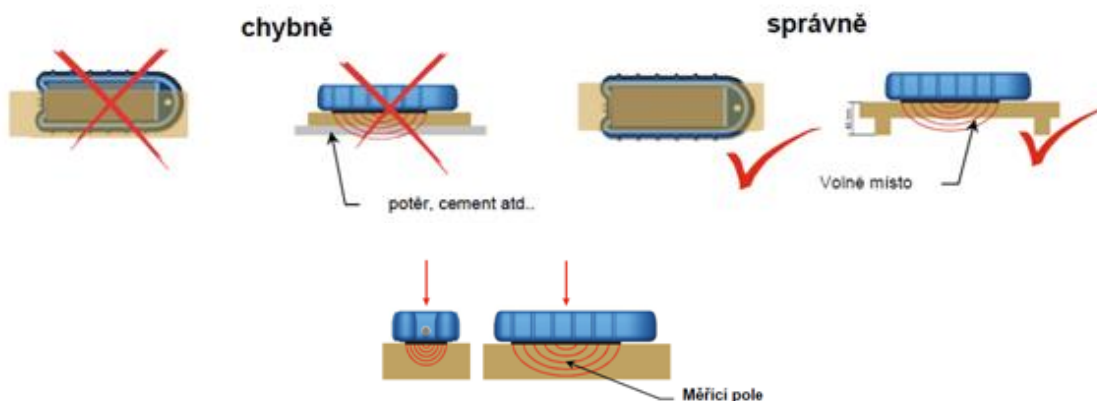
Aby bylo dosaženo správných výsledků měření, je nutné na přístroji nejprve provést dvě základní nastavení, a to buď: skupinu dřeva a tloušťku materiálu nebo hustotu dřeva a tloušťku materiálu.

Požadovaných skupin dřevin nám tento přístroj nabízí 20, respektive rozsah hustot od 300 kg.m^{-3} do 1100 kg.m^{-3} a rozsah tlouštěk materiálu od 2 mm do 40 mm.

Přístroj se po zapnutí sám nakalibruje, případně nastavíme patřičné parametry. Lehkým přitisknutím přitlačíme přístroj na měřený předmět, na kterém potřebujeme hodnotu vlhkosti zjistit. Nyní můžete na LCD displeji odečíst hodnotu vlhkosti dřeva měřeného předmětu. Doporučuje se provádět měření podélně ke směru vláken dřeva, neboť to zvyšuje přesnost měření. Není možné přesně změřit vlhkost materiálu, který má menší plochu než je celková plocha senzoru. Měřicí plocha senzor musí být celá zakryta a musí přiléhat na měřený předmět. Pod měřeným dřevem nesmí být žádná jiná média, jako například kovy či jiné materiály, což by následně ovlivňovalo naměřené výsledky.

Doporučuje se ponechat pod měřicím přístrojem mezeru minimálně 40 mm, případně jiný izolační materiál (kartónová krabice, polystyrén a jiné) (obr. 17).

Jakmile přitiskneme senzor na měřený předmět, změní se měřící pole. Tato změna je změřena a vyhodnocena mikroprocesorem, který ji poté zobrazí na displeji jako vlhkost dřeva v % (www.merlin-technology.com).



Obr. 17: Návodů správného a chybného použití přístroje Merlin PM1-E
(www.merlin-technology.com)

3.5.2 Měření přístrojem Gann Hydromette Compact A

Přístroj Gann Hydromette Compact A (obr. 23) je kapesní vlhkoměr pro rychlé a jednotlivé série měření. Pomocí nastavovacího zařízení je možné zvolit z deseti variant, které se liší od druhu dřeva a materiálu na bázi dřeva.

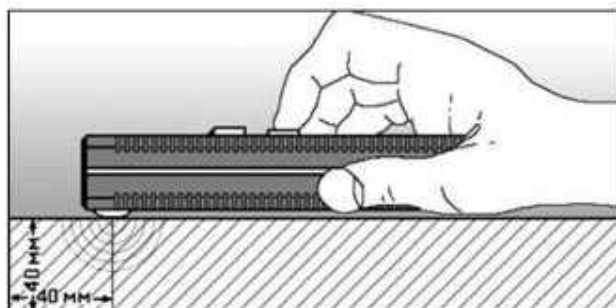
Ještě před samotným měřením je důležitá správná kalibrace přístroje. Chceme-li provést test funkčnosti, nastavíme volič druhů do pozice 1 a držíme jej ve vzduchu. Pokud se po stisknutí měřicího tlačítka na LCD displeji zobrazí hodnota v rozmezí 1.5–2.5 je přístroj nastaven pro měření. Pokud by byla hodnota mimo toto rozmezí, je nutné pomocí vhodně zvolené velikosti šroubováku poupravit jemný stavěcí šroub.

Pro provádění měření se přístroj jednoduše umístí měřicí sondou k materiálu, který má být změřen, a stiskne se měřicí tlačítko. Obsah vlhkosti ve dřevě lze ihned odečíst z displeje.

Během funkčního testu nebo při provádění měření nesmí být měřicí přístroj v žádném případě nikterak držen v blízkosti senzoru. Měření by nemělo probíhat v blízkosti suků, vad nebo přes kůru. Dále nesmí být měření prováděno na vodivém podkladu, jako je

například kov. V případě měření dřeva s tloušťkou menší než 40 mm doporučuje se podložit měřený materiál vhodným nevodivým materiálem, dokud se nedosáhne právě této minimální tloušťky (obr. 18). Nedodržení těchto pravidel může vést k závažným chybám měření.

Tento typ přístroje je zvláště použitelný pro lakýrníky, interiérové konstruktéry dřevěných podlah, truhláře pracující s nábytkem či tesaře (www.gann.de).



Obr. 18: Správné použití přístroje Gann Hydromette Compact A (www.gann.de)

3.5.3 Měření přístrojem Elbez WHT-740

Tento tester Elbez WHT-740 (obr. 24) pracuje na principu měření elektrického odporu mezi elektrodami (hroty) měřící sondy. Výsledná hodnota vlhkosti dřeva je přímo zobrazena v procentech na LCD displeji. Přístroj, díky vestavěné teplotní kompenzaci, umožňuje měření i při teplotách odlišných od 20 °C bez nutnosti použití korekční tabulky. Výhodou tohoto přístroje je i to, že odpadá nutnost jeho kalibrace před každým měřením. Proto je možné získat rychlé a velmi přesné informace o vlhkosti měřeného materiálu.

Před začátkem měření je nezbytné propojení mezi testrem a měřící sondou. Způsob propojení zajišťuje konektor BNC, který pracuje na bajonetovém principu, tím je možné připojení i jiných typů sond. Následně zarazíme měřící sondu do zkoušeného materiálu tak, aby osa spojnice obou hrotů sondy měla směr rovnoběžný s dřevními vlákny. Přitom je třeba dosáhnout takové hloubky zaražení, aby se vrcholy měřících hrotů nalézaly v hloubce předpokládané nejvyšší vlhkosti (zpravidla ve středu tloušťky materiálu). Pomocí přepínače nastavíme teplotní kompenzaci odpovídající teplotě dřeva. Tester začne měřit ihned po stisknutí tlačítka a na displeji se po ustálení hodnot zobrazí hodnota vlhkosti dřeva v %. Pokud se na displeji zobrazí symbol “1“, značí to,

že je vlhkost dřeva vyšší než 40 %. Po ukončení měření se přístroj vypne uvolněním tlačítka. Sondu vyjmeme z materiálu kývavým pohybem ve směru spojnice hrotů. Nikdy se nesmí kývat sondou ve směru kolmé na spojnici hrotů, hrozilo by totiž jejich ulomení.

Návod k obsluze přístroje je doplněn převodní tabulkou různých dřevin, ze které je možno rychle určit správnou vlhkost měřeného materiálu. První řádek tabulky SMRK je uváděn v celých číslech, to znamená, že je tento vlhkoměr cejchován právě pro tuto dřevinu.

Pokud má měřený materiál nízkou vlhkost (menší než 10 %), mohou se vyskytnout problémy s nestabilitou popřípadě s nečitelností údaje přístroje. Tento jev, zapříčiněný působením statické elektřiny, lze omezit následujícími způsoby:

- obsluha se nesmí během měření pohybovat
- přírodní šňůra měřicí sondy musí být v absolutním klidu
- před měřením se odvede náboj z měřeného materiálu jeho přiložením na kovovou desku odpovídajícího rozměru, která je uzemněna
- obsluha nesmí mít na sobě oděv ze syntetických vláken, který může způsobit další tvorbu elektrostatických nábojů

Hrotový vlhkoměr dřeva a stavebních materiálů Elbez WHT-740 je možné použít ve všech oblastech dřezozpracujícího a nábytkářského průmyslu pro pohotovou a spolehlivou kontrolu vlhkosti materiálu. Je zejména vhodný do výroby, pro podlaháře a do menších provozů (www.elbez.cz).

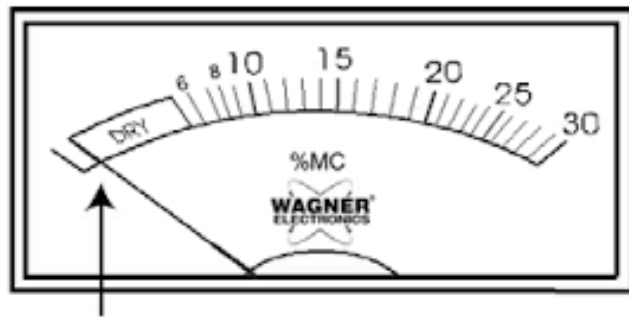
3.5.4 Měření přístrojem Wagner L601-3

Jedná se o dielektrický vlhkoměr zjišťující velmi rychle vlhkost materiálu (obr. 25). Přístroj je vybaven ručičkovou stupnicí, jejíž měřicí rozsah je v rozmezí 5–30 % vlhkosti dřeva. V případě hodnot pod 5 % ukazuje ručička přístroje do oblasti s označením DRY („suché“) (obr. 19).

Měření tímto přístrojem je velice snadné a jednoduché. Stačí přístroj přiložit svou měřicí plochou na měřený materiál a zahájit měření stiskem červeného tlačítka. Po uplynutí 60 sekund nečinnosti se přístroj sám vypne.

Aby nedocházelo k ovlivňování a zkreslování výsledků, je důležité nemít pod měřeným materiálem umístěn materiál, který by vedl elektrický proud, například kov. Pro zajištění dobrého kontaktu je důležité mít přístroj pevně přitisknut k měřicímu materiálu, zejména u hrubě řezaného dřeva. Přístroj by se neměl používat v oblasti suků a jiných vad vyskytujících se ve dřevě.

Důležitou poznámkou je i to, že tento přístroj je kalibrován pro Douglasku tisolistou (Douglas Fir Southern Yellow Pine) a je tedy nezbytné, pomocí převodní tabulky, provést korekci vlhkosti pro měřenou dřevinu (www.wagnermeters.com).



Obr. 19: Ručičková stupnice přístroje Wagner L601-3 (www.wagnermeters.com)

4. Materiál a metodika

4.1 Použitý materiál

Pro experimentální šetření bylo použito 41 vzorků. Jako dřevina byl zvolen smrk ztepilý (*Picea abies* (L.) Karst.)

Výběr vzorků byl proveden tak, aby byl získán co možno nejširší interval hustoty. Vzorky byly získány ze dvou podniků, aby byla pokryta co možná největší variabilita. Prvním z podniků byly školní dílny z areálu Mendelovy univerzity v Brně, kde byly vzorky připraveny panem Ing. Alešem Solařem. Druhým podnikem byla firma Framoz a. s. se sídlem ve Slavkově u Brna.

Veškeré vzorky byly vybírány a vyráběny z různých a zcela nahodilých prken z různých míst hrání. Následně byly vzorky od obou zdrojů smíchány a připravené tak k experimentu. Nami vybrané vzorky pokrývaly interval hustot v absolutně suchém stavu přibližně od $380 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ do $520 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

4.2 Použité přístroje a zařízení

Nejprve bylo nutné zkušební vzorky vysušit do absolutně suchého stavu, tedy na hodnotu, kdy je jeho vlhkost rovna 0 %. Vysušení zkušebních vzorků do absolutně suchého stavu proběhlo v laboratorní sušárně ústavu nauky o dřevě značky INCUCCELL 55 při teplotě $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.



Obr. 20: Laboratorní sušárna INCUCCELL 55 (www.geminibv.nl)

Zkušební vzorky bylo nutné vždy klimatizovat na příslušnou rovnovážnou vlhkost dřeva. Pro tento účel byla použita laboratorní klimatizační komora MEMMERT CTC

256, umístěná ve školním areálu v Útěchově. Tato klimatizační komora je schopna umožnit nastavení teplot v rozsahu 10–95 °C a relativní vzdušné vlhkosti 10–100 %.



Obr. 21: Laboratorní klimatizační komora MEMMERT CTC 256 (www.memmert.com)

Zjišťování přesnosti měření bylo provedeno na čtyřech elektrických vlhkoměrech. Z toho tři vlhkoměry byly dielektrické (kapacitní a kontinuální) a jeden vlhkoměr odporový (zarážecí):

Dielekterické:

- Merlin PM1-E
- Gann Hydromette Compact A
- Wagner L601-3

Odporové:

- Elbez WHT-740

4.2.1 Merlin PM1-E

Vlhkostní rozsah: 5–99 %

Hloubka pro měření: 2–40 mm (plynule nastavitelné)

Teplotní rozsah: –5–50 °C

Oblast hustoty: 300–1100 kg.m⁻³ (plynule nastavitelné)

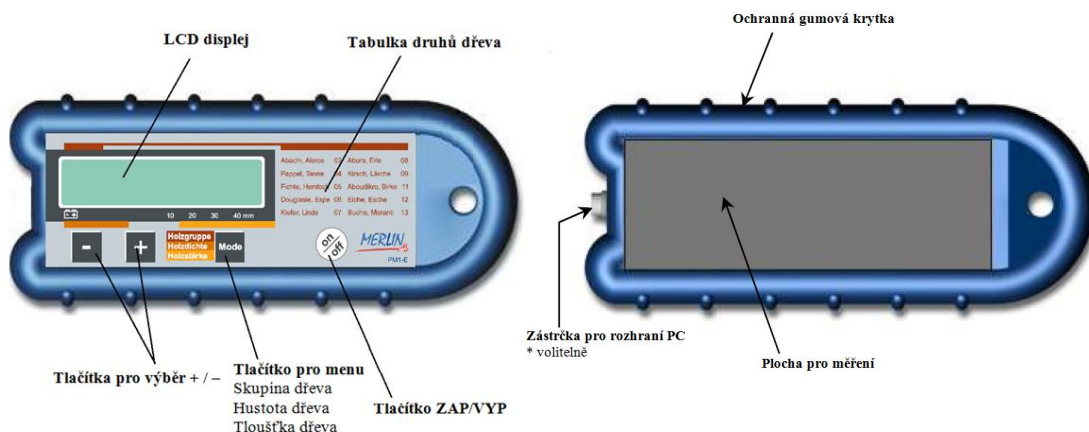
Druhy dřevin: předprogramováno do 20 skupin

Rozměry: 160 × 66 × 29 mm

Měřicí plocha: 106 × 41 mm

Hmotnost: 265 g (včetně baterie)

Napájení: 9V alkalická bloková (destičková) baterie



Obr. 22: Pohled a popis přístroje Merlin PMI-E (www.merlin-technology.com)

4.2.2 Gann Hydromette Compact A

Vlhkostní rozsah: 5–45 %

Hloubka pro měření: do 40 mm

Teplotní rozsah: 5–40°C (dočasně –10–60 °C)

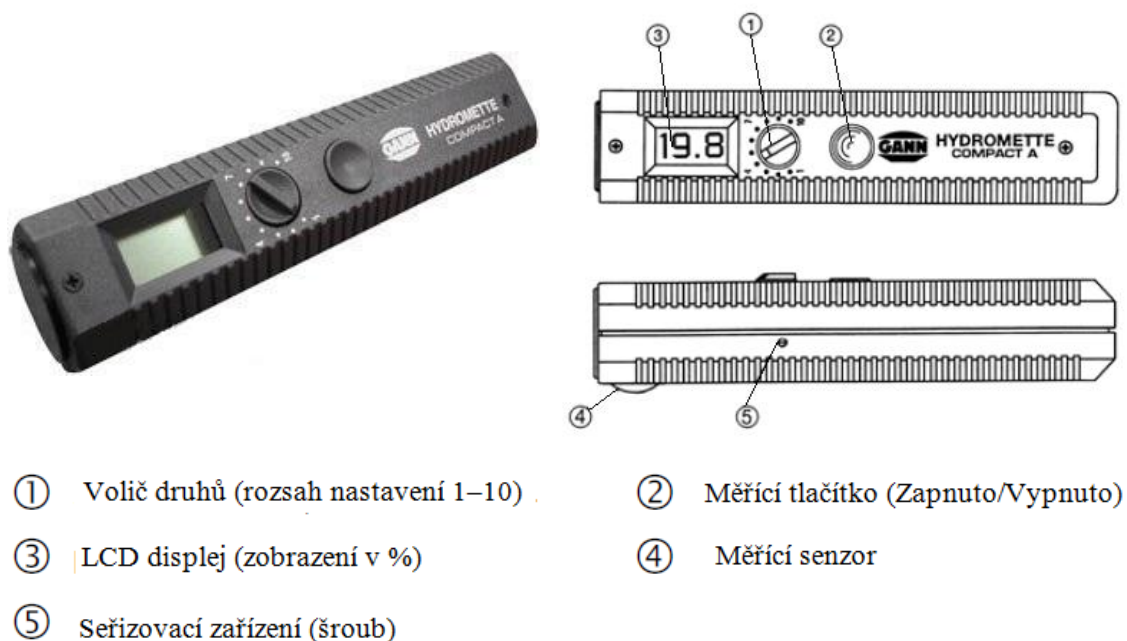
Druhy dřevin: předprogramováno do 10 skupin

Rozměry: 170 × 35 × 35 mm

Měřicí plocha: 106 × 41 mm

Hmotnost: 140 g (včetně baterie)

Napájení: 9V alkalická bloková (destičková) baterie



Obr. 23: Pohled a popis přístroje Gann Hydromette Compact A (www.gann.de)

4.2.3 Elbez WHT-740

Vlhkostní rozsah: 7–40 % (orientačně 5–40 %)

Teplotní rozsah: 0–40°C

Rozměry: tester 145 × 80 × 30 mm; sonda 200 × 47 mm; pouzdro 240 × 160 × 60 mm

Délka hrotů sondy: 25 mm

Hmotnost: 1,35 kg (včetně baterie a pouzdra)

Napájení: 9V alkalická bloková (destičková) baterie



Obr. 24: Pohled a popis přístroje Elbez WHT-740 (www.elbez.cz)

4.2.4 Wagner L601-3 (dřívější označení: L600)

Vlhkostní rozsah: 5–30 %

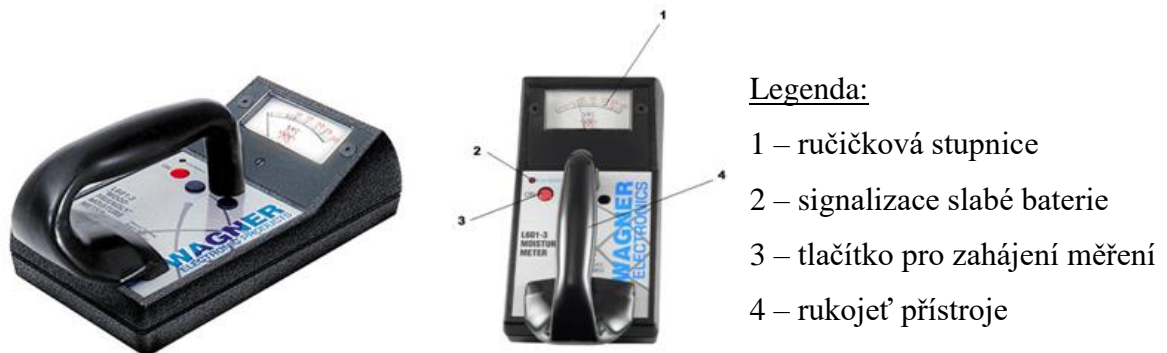
Hloubka pro měření: do 25 mm

Rozměry: 210 × 10 × 9,5 mm

Měřicí plocha: 106 × 41 mm

Hmotnost: 454 g (včetně baterie)

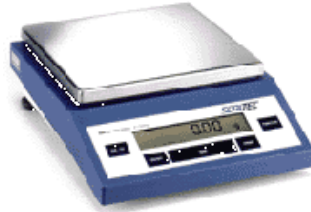
Napájení: 4 baterie typu AA



Obr. 25: Pohled a popis přístroje Wagner L601-3 (www.wagnermeters.com)

4.2.5 Ostatní použité přístroje a zařízení

Hmotnost zkušebních těles pro stanovení hustoty v absolutně suchém stavu a pro jednotlivé vlhkosti byla stanovena na digitální laboratorní váze SCALTEC SBC51 pracující s přesností na 0,01 g.



Obr. 26: Digitální laboratorní váha SCALTEC SBC51 (www.ldf.mendelu.cz)

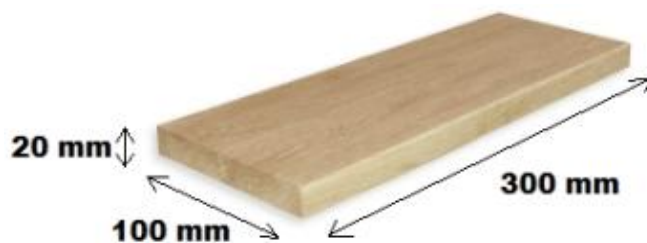
Pro stanovení objemu zkušebních vzorků bylo nutné změřit základní rozměry zkušebních vzorků. K tomuto účelu bylo použito pro zjištění tloušťky a šířky vzorků, posuvné měřidlo od firmy JIANGSU vybavené LCD displejem a ke zjištění délky byl využit skládací metr.



Obr. 27 a 28: Digitální posuvné měřidlo JIANGSU a skládací metr
(www.italian.alibaba.com)

4.3 Příprava zkušebních vzorků

Z masivního smrkového dřeva byly vyhotoveny zkušební vzorky určené k tomuto experimentu. Zkušební vzorky měly tvar pravoúhlého hranolu o daných rozměrech: délka 300 mm, šířka 100 mm a tloušťka 20 mm.



Obr. 29: Rozměry zkušební vzorku (vlastní knihovna)

Počet vzorků byl stanoven na 41 kusů. Veškeré plochy, kromě čelních, byly upraveny hoblováním na tloušťkovací frézce. Poslední operací při přípravě vzorků bylo jejich očíslování na hlavní ploše.

4.4 Stanovení hustoty dřeva v absolutně suchém stavu

Takto připravené a očíslované zkušební vzorky byly umístěny do laboratorní sušárny. Zde byly zkušební vzorky postupně vysoušeny až na jejich konstantní hmotnost, tedy na absolutně nulovou vlhkost, při teplotě 103 ± 2 °C.

Předpokládá se, že zkušební vzorek dosáhl konstantní hmotnosti tehdy, nepřekročil-li rozdíl v hmotnosti mezi dvěma po sobě jdoucími váženími v intervalu 2 hodin 0,1 %. (ČSN EN 13183-1).

Jakmile bylo konstantní hmotnosti dosaženo, následovalo zvážení každého zkušební vzorku na digitální laboratorní váze. Hmotnost vzorků byla stanovena s přesností na 0,01 g. Následovalo změření rozměrů: šířky a tloušťky zkušebních vzorků pomocí posuvného měřidla s přesností na 0,01 mm a délky za pomoci skládacího metru s přesností na 0,1 mm.

Z takto získaných hodnot byla pro každý zkušební vzorek stanovena hustota v absolutně suchém stavu. Výpočet byl stanoven pomocí vztahu (13).

$$\rho_0 = \frac{m_0}{a_0 \cdot b_0 \cdot l_0} = \frac{m_0}{V_0} \quad [kg \cdot m^{-3}] \quad (13)$$

ρ_0 – hustota zkušební vzorku v absolutně suchém stavu [$kg \cdot m^{-3}$],

m_0 – hmotnost zkušební vzorku v absolutně suchém stavu [kg],

a_0, b_0, l_0 – rozměry zkušební vzorku v absolutně suchém stavu [m],

V_0 – objem zkušební vzorku v absolutně suchém stavu [m^3].

4.5 Klimatizování zkušebních vzorků

Vysušené zkušební vzorky byly umístěny do klimatizační komory, kde probíhalo jejich dlouhodobé klimatizování vždy na příslušnou hodnotu rovnovážné vlhkosti dřeva.

Klimatizování bylo stanovováno pro různé rovnovážné vlhkosti dřeva, a to pro 5, 8, 12, 15 a 18 %.

Hlídány a kontrolovány byly parametry prostředí, konkrétně se jednalo o teplotu a relativní vlhkost vzduchu. Nastavení pokaždé odpovídalo průběhu dle sorpční izotermny pomocí nomogramu. Ke stanovení rovnovážné vlhkosti dřeva v závislosti na teplotě (T) a relativní vzdušné vlhkosti (φ) byl použit Keylwerth-Loughboroughův nomogram (obr. 6) (Kollmann a Côté 1968).

4.6 Stanovení vlhkosti zkušebních vzorků

4.6.1 Podmínky stanovení vlhkosti

Vysušené a změřené zkušební vzorky byly umístěny do laboratorní klimatizační komory. Pro jednotlivé klimatizování zkušebních vzorků na příslušné rovnovážní vlhkosti dřeva byly nastaveny vždy patřičné klimatizační parametry prostředí.

Klimatizační parametry prostředí pro stanovení jednotlivých rovnovážných vlhkostí dřeva jsou uvedeny v tabulce (tab. 4).

Tab. 4: Klimatizační parametry prostředí

Rovnovážná vlhkost dřeva [%]	Teplota vzduchu [°C]	Relativní vlhkost vzduchu [%]
5	30	25
8	30	45
12	40	70
15	40	80
18	20	85

4.6.2 Stanovení skutečné vlhkosti zkušebních vzorků

Po ukončení klimatizačního cyklu byly vzorky připravené k vlastnímu stanovení skutečné vlhkosti. Aby se předešlo, po ukončení klimatizace, nepříznivému vlivu vyšší teploty, byly vzorky vždy po každém ukončení klimatizace, vloženy na několik minut do igelitového sáčku, kde docházelo k jejich zhládnutí. Poté již následovalo měření hmotnosti (m_w) a výpočet skutečné rovnovážné vlhkosti (w).

Dalším bodem bylo změřit rovnovážná vlhkost dřeva pomocí čtyř měřících přístrojů. Ta byla měřena na každém vzorku vždy na třech místech a následně zprůměrována.

Na začátku vlastního měření vlhkostí zkušebních vzorků bylo nutno přizpůsobit měřicí přístroje měřenému materiálu, jeho tloušťce a teplotě.

Přístroj Merlin PM1-E umožňuje nastavení pro dřevinu, hustotu a tloušťku měřeného materiálu. Přístroj Gann Hydromette Compact A umožňuje nastavení pouze pro dřevinu. Vlhkoměr Elbez WHT-740 je schopný korekce na vliv teploty materiálu a přístroj Wagner L601-3 umožňuje korekci pro dřevinu.

Z důvodu, že elektromagnetické vlnění námi použitých měřících přístrojů, vycházející ze snímací plochy, proniká až do hloubky 40 mm, nesměl být umístěn pod zkušebním vzorkem v době měření vlhkosti žádný vodivý materiál. Aby se předešlo tomuto zkreslení, byly zkušební vzorky pokládány suchou kartonovou krabicí tloušťky cca 50 mm. Tím se zajistilo, že měřená vlhkost nebyla zkreslena vlhkostí a vodivostí podkladu.

Dielektrické vlhkoměry značek Merlin, Gann a Wagner jsou konstruovány jako kontaktní. Pro stanovení vlhkosti zkušebních vzorků stačilo pouhé přiložení snímací plochy vlhkoměrů na hlavní plochu zkušebních vzorků. Vlhkost byla zjišťována a stanovována s přesností na 0,1 %.

Aby se zajistily pro všechny měřené rovnovážné vlhkosti stejné podmínky, bylo měření vlhkosti prováděno vždy na jedné z hlavních ploch zkušebních vzorků. Po zjištění vlhkostí a hmotností všech zkušebních vzorků následovalo jejich opětovné vložení do klimatizační komory pro klimatizování na následující rovnovážnou vlhkost. Postupně následovalo celkem pět měřících fází (tab. 4).

Hmotnost zkušebních vzorků byla ve všech měřících fázích stanovována na laboratorní digitální váze s přesností na 0,01 g.

Z jednotlivých fází měření bylo možné získat hodnoty hmotnosti zkušební vzorku po ustálení vlhkosti dle klimatizačních parametrů (m_w). Pomocí této hodnoty a hodnoty hmotnosti v absolutně suchém stavu (m_0) bylo možné vypočítat gravimetrickou (váhovou) metodou skutečnou rovnovážnou vlhkost dřeva. Výpočet byl proveden podle normy ČSN EN 13183-1 dle rovnice (14).

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (14)$$

w – skutečná vypočtená vlhkost zkušebních vzorků [%],

m_0 – hmotnost zkušebního vzorku v absolutně suchém stavu [g],

m_w – hmotnost zkušebního vzorku po ustálení vlhkosti dle klimatizačních parametrů [g].

Cílem celého tohoto postupu bylo získat veškeré a potřebné hodnoty pro statistické zpracování a vyhodnocení. Těmito hodnotami byly: hustota v absolutně suchém stavu, skutečná vypočtená vlhkost a vlhkost zjištěná pomocí měřicích přístrojů.

4.7 Statistické vyhodnocení

Statistické vyhodnocení bylo nejprve provedeno pomocí popisné statistiky v programu Microsoft Excel. Použitými statistickými charakteristikami byly: aritmetický průměr, minimální a maximální hodnota, medián, směrodatná odchylka a variační koeficient.

Na základě směrodatné odchylky je možno spočítat chybu Δx vymezující kolem aritmetického průměru interval spolehlivosti (IS). Skutečná střední hodnota měřené veličiny leží s pravděpodobností $P = 1 - \alpha$ v intervalu $(\bar{x} - \Delta x; \bar{x} + \Delta x)$. Výpočet chyby Δx byl proveden dle vztahu (15):

$$\Delta x = t_{\alpha}(f) \cdot \frac{S_x}{\sqrt{n}} \quad (15)$$

$t_{\alpha}(f)$ – koeficient Studentova rozdělení = 2,021

α – zvolená hladina významnosti (riziko) = 0,05

$f = n - 1$ – počet stupňů volnosti = 40

n – počet měření = 41

S_n – směrodatná odchylka

P – pravděpodobnost = 0,95

V další části vyhodnocování bylo využito programu Dell Statistica. Pomocí Bartlettova testu byla prokázána neshoda rozptylů. Z tohoto důvodu musela být použita Kruskal-Wallisova neparametrická analýza rozptylu (Anova) s následným vícenásobným porovnáním výsledků (Šmelko, Wolf 1977; Meloun, Militký 2004).

V programu Dell Statistica byl proveden i Shapiro-Wilkův test normality a sestaveny histogramy (příloha).

5. Výsledky

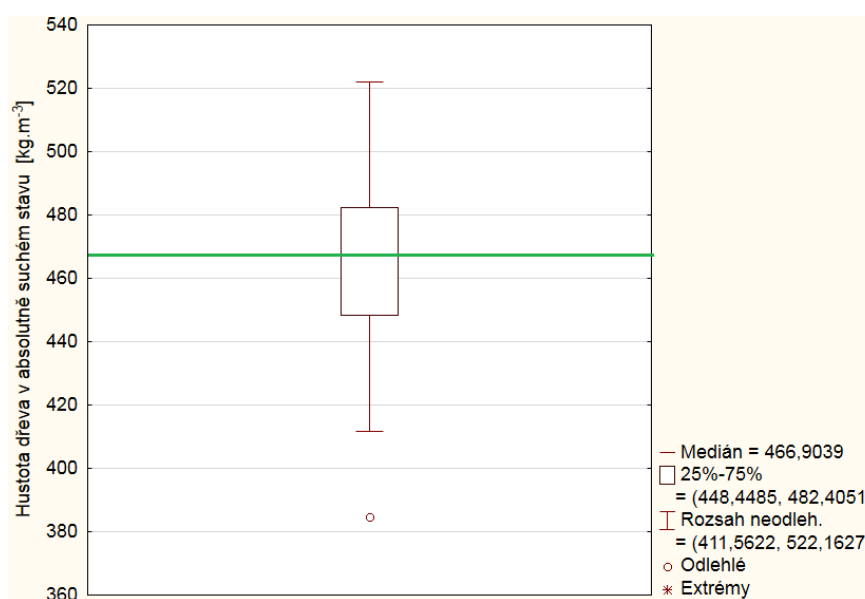
V této kapitole jsou uvedeny veškeré dosažené výsledky, které byly získány během prováděných měření.

5.1 Hustota dřeva v absolutně suchém stavu

Zde je uvedena tabulka (tab. 5) popisné statistiky pro výpočet hustoty v absolutně suchém stavu. Průměrná hodnota této hustoty činí $464,16 \text{ kg.m}^{-3}$ a variabilita hodnot je $6,56 \%$. Interval spolehlivosti (IS), ve kterém se nachází s 95% pravděpodobností, skutečná hodnota je od $454,56$ – $473,77 \text{ kg.m}^{-3}$. Na krabicovém grafu (obr. 30) můžeme následně vidět toto rozložení hodnot pro hustotu dřeva v absolutně suchém stavu.

Tab. 5: Tabulka popisné statistiky pro vzorky v absolutně suchém stavu

	Hmotnost v suchém stavu m_0 [g]	Tloušťka a_0 [cm]	Šířka b_0 [cm]	Délka l_0 [cm]	Objem V_0 [cm ³]	Hustota dřeva v suchém stavu ρ_0 [kg.m ⁻³]
Arit. průměr + IS	237,58	1,95	8,76	29,95	512,36	464,16 (454,56–473,77)
Minimum	193,76	1,91	7,76	29,75	453,55	384,72
Maximum	269,48	2,01	9,3	30,25	540,19	522,16
Medián	235,65	1,96	8,58	29,91	512,23	466,9
Směr. odchylka	15,57	0,02	0,44	0,11	22,45	30,43
Variační koef.	6,55	1,06	5,04	0,38	4,38	6,56



Obr. 30: Krabicový graf hustoty dřeva v absolutně suchém stavu

5.2 Měření vlhkosti při rovnovážné vlhkosti dřeva 5 %

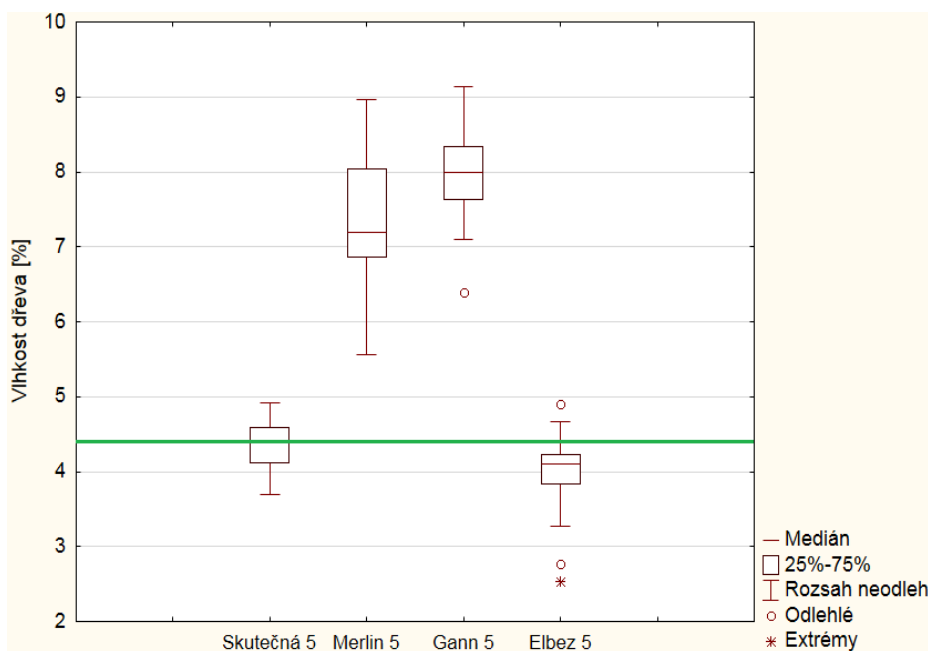
Z tabulky (tab. 6) je možné vyčíst výsledky pro měření vlhkosti při rovnovážném stavu 5 %. Krabicový graf (obr. 31), mimo jiné, udává, jak jsou naměřené hodnoty rozptýleny bez ohledu na hustotu dřeva.

Nejblíže se skutečné hodnotě vlhkosti přiblížil přístroj Elbez, jehož variabilita byla poměrně vysoká. Vlhkoměr Gann vykazoval menší rozptyl hodnot než Merlin, byť průměrná hodnota z měření přístrojem Merlin byla bližší skutečnému průměru.

Měřicí přístroj Wagner při tomto rovnovážném stavu (5 %) neukazoval žádné hodnoty, proto nebyl vůbec hodnocen.

Tab. 6: Tabulka popisné statistiky pro vzorky při jejich měření 5 % vlhkosti

	Vlhkost dřeva [%]				Wagner
	Skutečná	Merlin	Gann	Elbez	
Arit. průměr	4,34	7,33	7,99	4,01	Nehodnoceno
Interval spolehlivosti	4,25–4,44	7,04–7,63	7,81–8,17	3,87–4,15	
Minimum	3,7	5,57	6,4	2,53	
Maximum	4,92	8,97	9,13	4,9	
Medián	4,38	7,2	8	4,1	
Směr. odchylka	0,31	0,93	0,57	0,45	
Variační koef.	7,02	12,74	7,15	11,15	

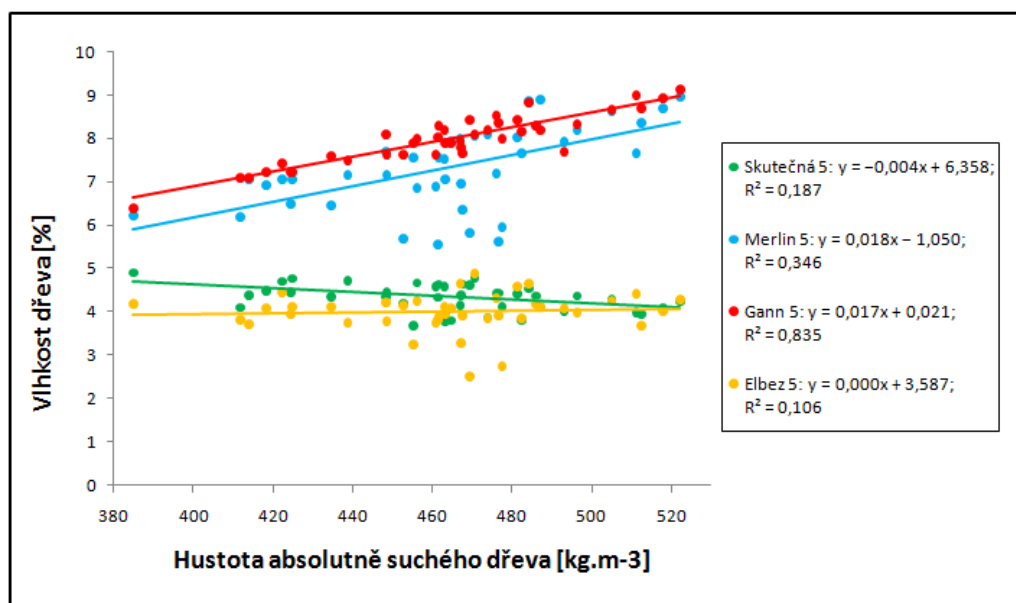


Obr. 31: Krabicový graf při měření 5% vlhkosti dřeva. Zelená přímka – skutečná vlhkost dřeva

Z následného grafu (obr. 32) můžeme vidět závislost vlhkosti dřeva při měření vlhkosti 5 % na hustotě dřeva v absolutně suchém stavu. I z tohoto vyjádření je patrné, že největší rozptyl hodnot byl zaznamenán u přístroje Merlin (modré body).

Dále můžeme vyčíst, že skutečná vlhkost s rostoucí hustotou klesala, přístrojů Merlin a Gann nám vlhkost rostla a u vlhkoměru Elbez byla s rostoucí hustotou konstantní, o čemž svědčí i rovnice přímek (jejich směrnice). Nejtěsnější závislost vykazoval přístroj Gann, jeho koeficient determinace činil 83,5 %.

Dále zde můžeme vidět, že se u přístrojů Merlin a Gann s rostoucí hustotou zvyšuje odchylka naměřené vlhkosti od vlhkosti skutečné.



Obr. 32: Závislost vlhkosti dřeva na hustotě absolutně suchého dřeva při měření 5% vlhkosti

5.3 Měření vlhkosti při rovnovážné vlhkosti dřeva 8 %

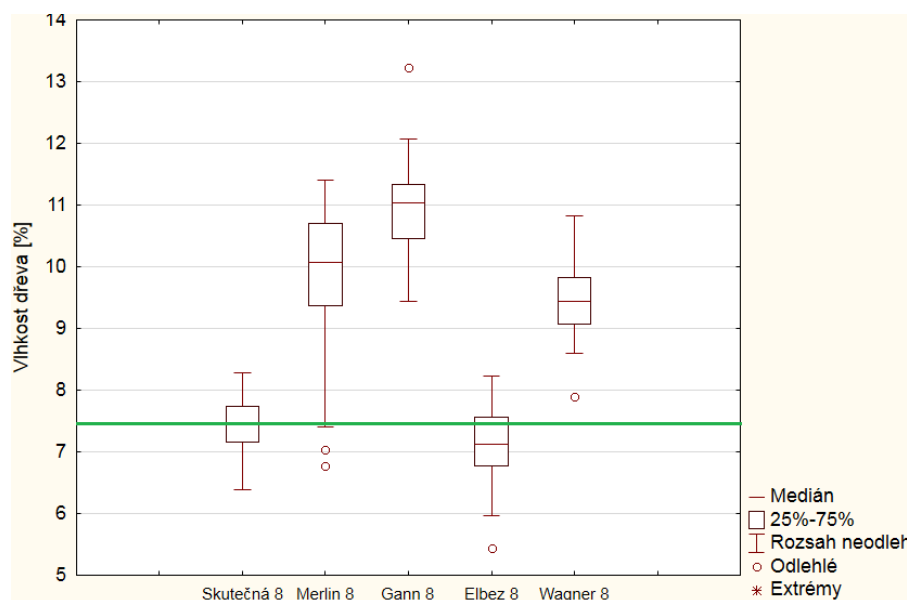
V tabulce (tab. 7) jsou uvedeny hodnoty pro měření vlhkosti pro rovnovážný stav 8 %. Jak je vidět z krabicového grafu (obr. 33), nejbližší se skutečné vlhkosti přiblížil opět přístroj Elbez, jehož průměrná hodnota byla pouze o 0,3 % pod skutečnou hodnotou vlhkosti. Jeho interval spolehlivosti se překrývá s intervalem vlhkosti skutečné.

Zbylé tři měřicí přístroje vykazovaly hodnoty oproti skutečné vlhkosti vyšší. Nejdále z nich byl od skutečné vlhkosti přístroj Gann, nicméně vykazoval o něco menší rozptyl hodnoty než přístroj Merlin. Ten měl průměrnou hodnotu blíže, ovšem ještě blíže byl

vlhkoměr Wagner, který pro tento rovnovážný stav již měřil správně a bylo možné jej porovnat s ostatními.

Tab. 7: Tabulka popisné statistiky pro vzorky při jejich měření 8 % vlhkosti

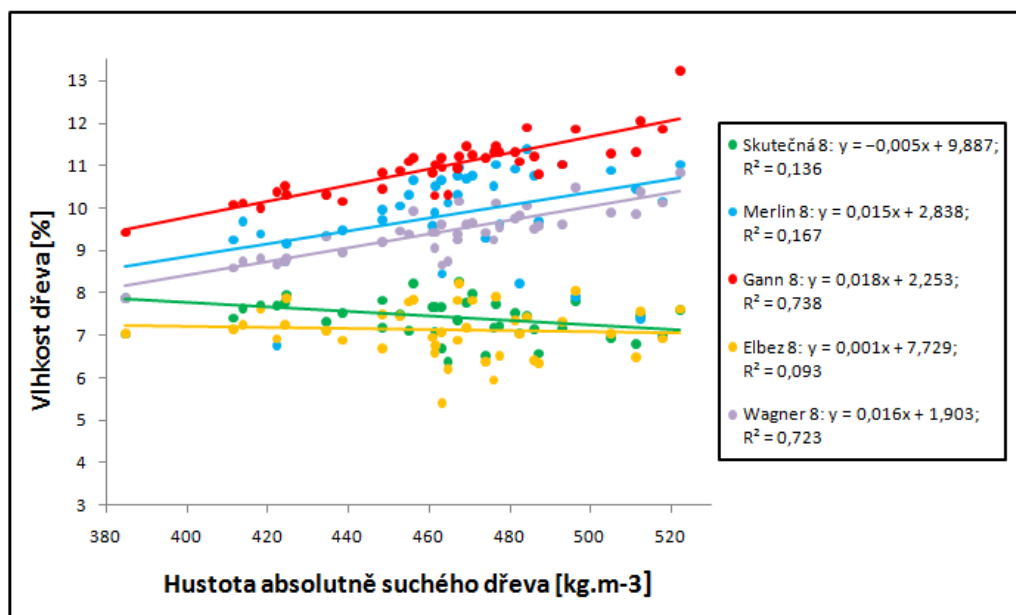
	Vlhkost dřeva [%]				
	Skutečná	Merlin	Gann	Elbez	Wagner
Arit. průměr	7,42	9,83	11	7,13	9,45
Interval spolehlivosti	7,29–7,56	9,48–10,18	10,79–11,21	6,94–7,32	9,27–9,63
Minimum	6,39	6,77	9,43	5,43	7,9
Maximum	8,29	11,4	13,23	8,23	10,83
Medián	7,48	10,07	11,03	7,13	9,43
Směr. odchylka	0,44	1,12	0,67	0,6	0,58
Variační koef.	5,88	11,39	6,06	8,4	6,16



Obr. 33: Krabicový graf při měření 8% vlhkosti dřeva. Zelená přímka – skutečná vlhkost dřeva

Ze závislosti vlhkosti dřeva na hustotě dřeva v absolutně suchém stavu při měření vlhkosti 8 % (obr. 34) je možné vyzorovat obdobné výsledky jako při měření vlhkosti předcházející.

Skutečná vlhkost s rostoucí hustotou dřeva klesá, zatímco u všech měřicích přístrojů roste. U přístroje Elbez je téměř trend konstantní a opět je tento přístroj nejbliže vlhkosti skutečné. U zbylých přístrojů (Merlin, Gann i Wagner) platí, že se s rostoucí hustotou dřeva zvyšuje odchylka vlhkosti od skutečné. Nejvíce je tomu tak u přístroje Gann.



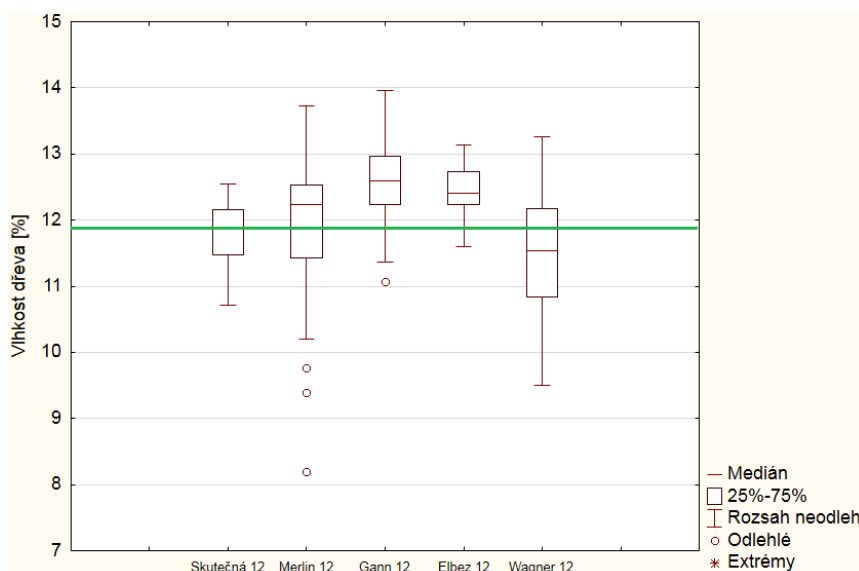
Obr. 34: Závislost vlhkosti dřeva na hustotě absolutně suchého dřeva při měření 8% vlhkosti

5.4 Měření vlhkosti při rovnovážné vlhkosti dřeva 12 %

Z výsledků dosažených při měření vlhkosti pro rovnovážný stav 12 % (tab. 8) a (obr. 35) je zřejmé, že při tomto rovnovážném stavu bylo dosaženo pro všechny přístroje nejvyrovnanějších výsledků. Z krabicového grafu (obr. 34) je vidět, že nejbliže skutečné vlhkosti byl vlhkoměr Wagner. Nejdále od skutečné vlhkosti byl přístroj Gann a největšího rozptylu i s velkým počtem odlehlých hodnot bylo dosaženo u měřicího přístroje Merlin. Naproti tomu přístroj Elbez naměřil hodnoty s nejmenší variabilitou.

Tab. 8: Tabulka popisné statistiky pro vzorky při jejich měření 12 % vlhkosti

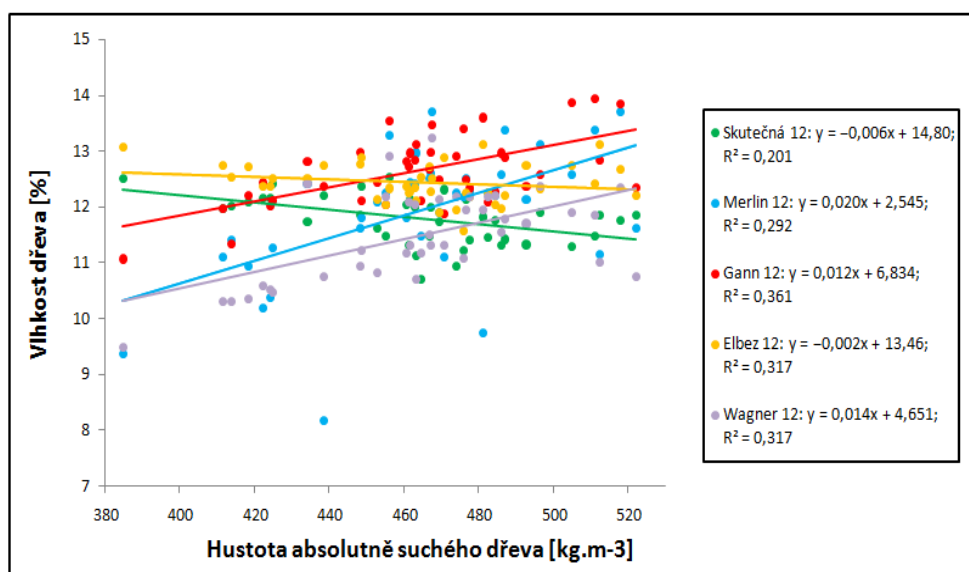
	Vlhkost dřeva [%]				
	Skutečná	Merlin	Gann	Elbez	Wagner
Arit. průměr	11,81	11,94	12,66	12,45	11,49
Interval spolehlivosti	11,67–11,95	11,58–12,3	12,46–12,86	12,35–12,56	11,24–11,74
Minimum	10,72	8,2	11,07	11,6	9,5
Maximum	12,55	13,73	13,97	13,13	13,27
Medián	11,87	12,23	12,6	12,4	11,53
Směr. odchylka	0,44	1,14	0,63	0,34	0,8
Variační koef.	3,72	9,54	5,01	2,75	6,93



Obr. 35: Krabicový graf při měření 12% vlhkosti dřeva. Zelená přímka – skutečná vlhkost dřeva

Z grafu (obr. 36) můžeme vidět závislost vlhkosti dřeva při měření vlhkosti 12 % na hustotě dřeva v absolutně suchém stavu. Zde se již přímky (trendy) přístrojů Merlin, Gann a Wagner protínají s vlhkostí skutečnou. Rovnoběžný a navíc i klesající trend vykazuje jako jediný přístroj Elbez.

Z takto propojených trendů můžeme vyčíst u každého přístroje hustotu dřeva v absolutně suchém stavu, pro kterou daný přístroj měří s největší přesností. Jde o hodnotu hustoty, kde se přímky protínají. Pro přístroj Merlin je to hustota přibližně 460 kg.m^{-3} , pro Gann je to hodnota 420 kg.m^{-3} a pro přístroj Wagner dokonce až 480 kg.m^{-3} .



Obr. 36: Závislost vlhkosti dřeva na hustotě absolutně suchého dřeva při měření 12% vlhkosti

5.5 Měření vlhkosti při rovnovážné vlhkosti dřeva 15 %

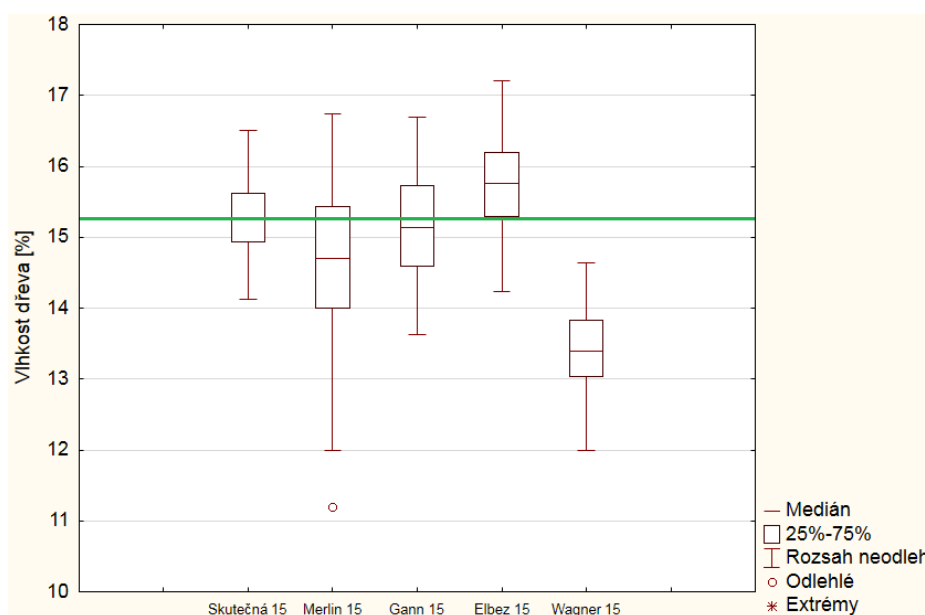
Z dosažených výsledků pro měření vlhkosti dřeva při rovnovážném stavu 15 %, které jsou uvedeny v tabulce (tab. 9), a z krabicového grafu (obr. 37), můžeme vidět, relativně vyrovnané výsledky u přístrojů Merlin, Gann a Eblez. Jediný z přístrojů Wagner vykazoval hodnoty přibližně o 2 % nižší, než byla vlhkost skutečná.

Největší rozptyl byl zaznamenán u přístroje Merlin, poté Gann, Wagner a naprosto shodnou velikost rozptylu vykazoval přístroj Elbez. Ten ovšem při měření vlhkosti při tomto rovnovážném stavu naměřil hodnoty vlhkosti nejdále od skutečné.

Naopak nejbliže se jevil přístroj Gann, jehož průměrná hodnota vlhkosti byla o pouhých 0,16 % nižší než vlhkost skutečná.

Tab. 9: Tabulka popisné statistiky pro vzorky při jejich měření 15 % vlhkosti

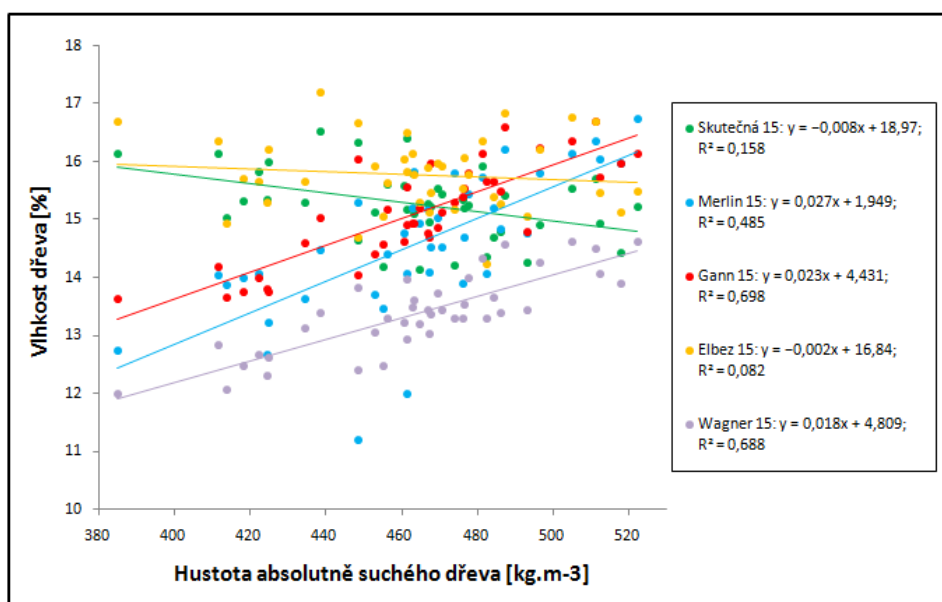
	Vlhkost dřeva [%]				
	Skutečná	Merlin	Gann	Elbez	Wagner
Arit. průměr	15,28	14,6	15,12	15,78	13,39
Interval spolehlivosti	15,08–15,47	14,22–14,98	14,85–15,38	15,59–15,98	13,17–13,6
Minimum	14,13	11,2	13,63	14,23	12
Maximum	16,51	16,73	16,7	17,2	14,63
Medián	15,28	14,7	15,13	15,77	13,4
Směr. odchylka	0,61	1,19	0,84	0,63	0,68
Variační koef.	3,99	8,16	5,54	3,99	5,06



Obr. 37: Krabicový graf při měření 15% vlhkosti dřeva. Zelená přímka – skutečná vlhkost dřeva

Na nadcházejícím grafu (obr. 38) je možné vidět závislost vlhkosti dřeva na hustotě dřeva v absolutně suchém stavu pro rovnovážný stav 15 %. Opět je zde patrné, že pouze naměřená vlhkost u jediného přístroje (Elbez) s rostoucí hustotou dřeva mírně klesá, stejně jako vlhkost skutečná.

Průsečíky přímek měřících přístrojů s přímkou skutečnou nás informují o hustotě dřeva v absolutně suchém stavu, pro kterou daný vlhkoměr měřil nejpřesněji. Pro vlhkoměr Merlin je to hustota 480 kg.m^{-3} , Gann 470 kg.m^{-3} a přístroj Wagner by skutečnou vlhkost protnul někde na hodnotě 530 kg.m^{-3} .



Obr. 38: Závislost vlhkosti dřeva na hustotě absolutně suchého dřeva při měření 15% vlhkosti

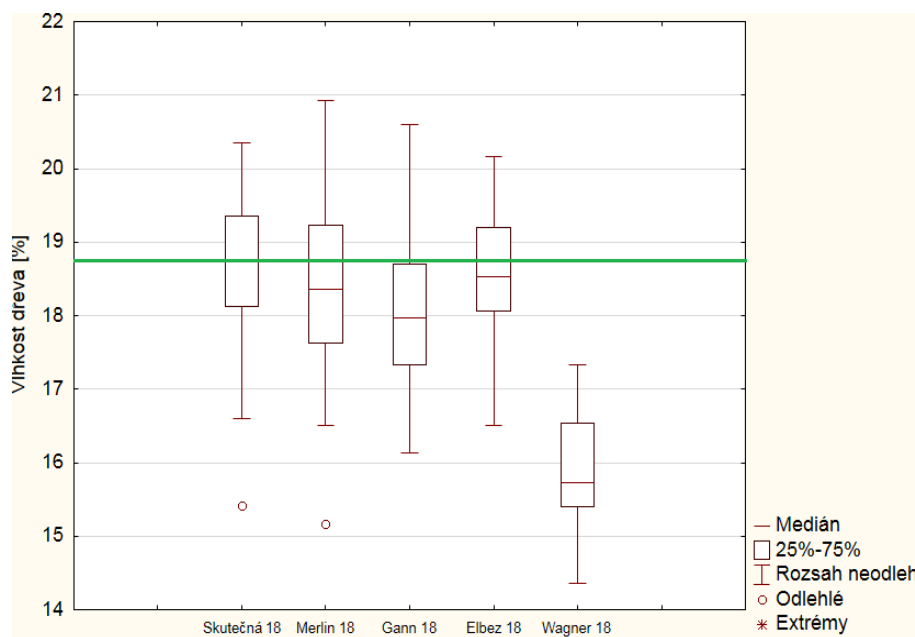
5.6 Měření vlhkosti při rovnovážné vlhkosti dřeva 18 %

Z tabulky (tab. 10) je možné vyčíst výsledky pro měření vlhkosti při rovnovážném stavu 18 %. Krabicový graf (obr. 39), nám udává, jak jsou naměřené hodnoty rozptýleny bez ohledu na hustotu dřeva v absolutně suchém stavu.

Všechny naměřené vlhkosti, dokonce i vlhkost skutečná vykazovaly poměrně velkou variabilitu. Všechny vlhkoměry měly průměrnou vlhkost pod hodnotou skutečné vlhkosti. Nejbližše se skutečné hodnotě vlhkosti přiblížil přístroj Elbez, poté Merlin a hned vzápětí Gann. Měřicí přístroj Wagner byl pro tento vlhkostní stav vyhodnocen jako nejméně přesný, jelikož byla jeho naměřená vlhkost od skutečné přibližně o 2,5 % nižší.

Tab. 10: Tabulka popisné statistiky pro vzorky při jejich měření 18 % vlhkosti

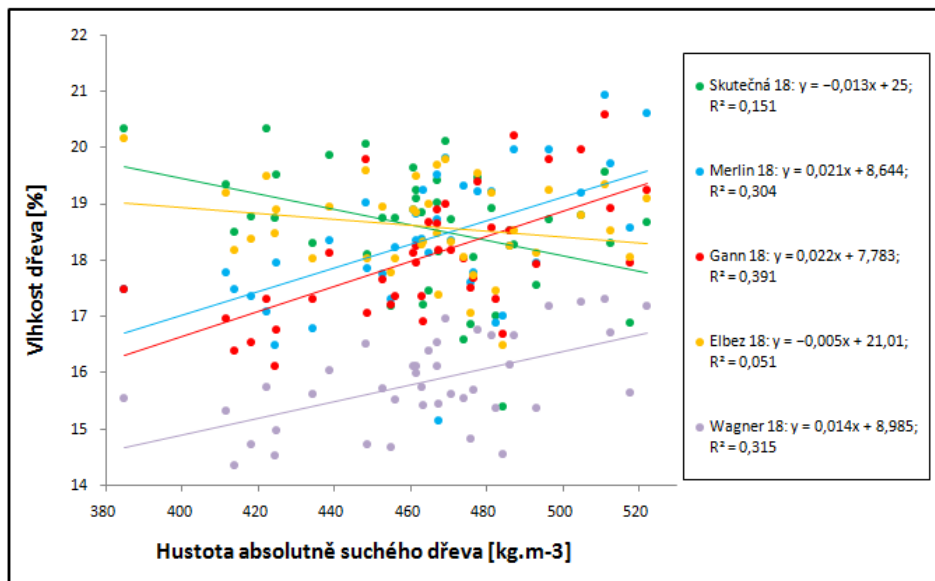
	Vlhkost dřeva [%]				
	Skutečná	Merlin	Gann	Elbez	Wagner
Arit. průměr	18,58	18,37	18,08	18,6	15,85
Interval spolehlivosti	18,23–18,92	18–18,73	17,74–18,42	18,38–18,84	15,6–16,11
Minimum	15,42	15,17	16,13	16,5	14,37
Maximum	20,36	20,93	20,6	20,17	17,33
Medián	18,75	18,37	17,97	18,53	15,73
Směr. odchylka	1,08	1,16	1,08	0,77	0,8
Variační koef.	5,84	6,29	5,96	4,16	5,05



Obr. 39: Krabicový graf při měření 18% vlhkosti dřeva. Zelená přímka – skutečná vlhkost dřeva

Ze závislosti vlhkosti dřeva na hustotě dřeva v absolutně suchém stavu při měření vlhkosti 18 % (obr. 40) je možné vypočítat obdobné výsledky, jako při měření vlhkostí 12 % a 15 %.

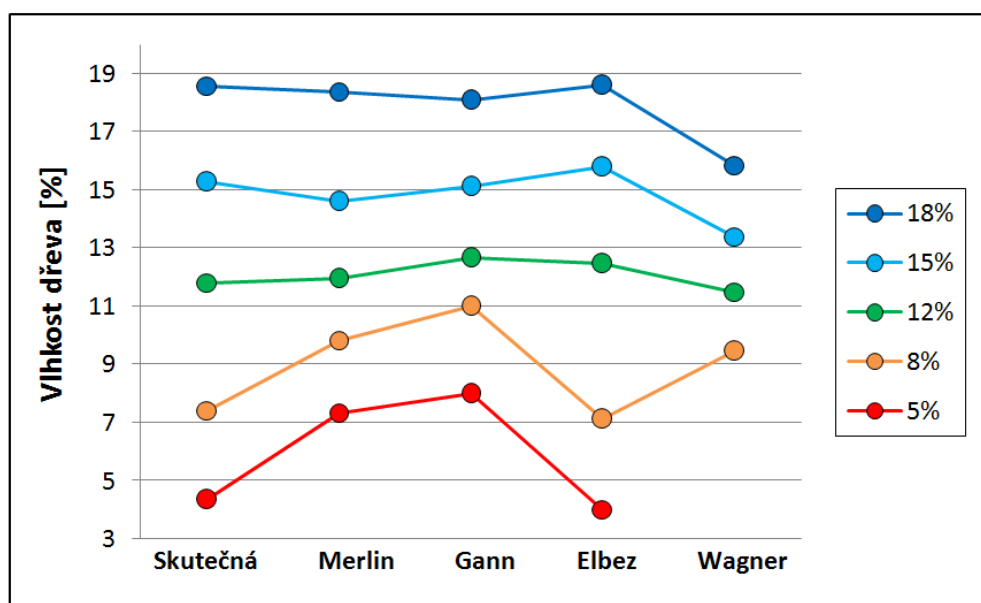
Skutečná vlhkost a vlhkost naměřená přístrojem Elbez s rostoucí hustotou dřeva klesá, zatímco u zbylých měřicích přístrojů roste. Pro přístroj Merlin je ideální hustota dřeva okolo 470 kg.m^{-3} , Gann 480 kg.m^{-3} , Elbez 460 kg.m^{-3} a přístroj Wagner by se protnul se skutečnou hustotou někde na hodnotě okolo 540 kg.m^{-3} .



Obr. 40: Závislost vlhkosti dřeva na hustotě absolutně suchého dřeva při měření 18% vlhkosti

5.7 Statistické vyhodnocení – vícenásobné porovnání výsledků

Nejprve byl vytvořen graf (obr. 41) na kterém jsou souhrnně vidět průměrné naměřené hodnoty pro všechny měřicí přístroje při všech rovnovážných vlhkostech. Z tohoto grafu je krásně vidět, že nejvyrovnanějších výsledků bylo dosaženo při rovnovážném stavu 12 %. Přístroj Wagner při 5 % vlhkosti nebyl hodnocen.



Obr. 41: Souhrnné porovnání průměrných hodnot pro všechny přístroje při všech rovnovážných vlhkostech

Pro statistické vyhodnocení naměřených dat bylo nutné provést test, zda jsou naše rozptyly hodnot shodné, či nikoli. K tomuto účelu byl použit Bartlettův test, který nám určil, že mezi testovanými rozptyly existuje pro každý rovnovážný stav významný rozdíl.

V tuto chvíli bylo nutné zjistit už pouze to, mezi kterými testovanými soubory tento významný rozdíl je a mezi kterými nikoli. Pro toto zjištění byla využita Kruskal-Wallisova neparametrická analýza rozptylu (Anova) s vícenásobným porovnáním výsledků (Šmelko, Wolf 1977; Meloun, Militký 2004).

V tabulkách (tab. 11–15) jsou uvedeny výsledky z vícenásobného porovnání:

Tab. 11: Výsledek testu vícenásobného porovnání pro měření vlhkosti 5 %.

Testované soubory	Výsledek testu
Skutečná 5 / Merlin 5	Významný rozdíl – H_0 zamítnuta
Skutečná 5 / Gann 5	Významný rozdíl – H_0 zamítnuta
Skutečná 5 / Elbez 5	Nevýznamný rozdíl – H_0 nezamítnuta
Skutečná 5 / Wagner 5	Nehodnoceno

Tab. 12: Výsledek testu vícenásobného porovnání pro měření vlhkosti 8 %.

Testované soubory	Výsledek testu
Skutečná 8 / Merlin 8	Významný rozdíl – H_0 zamítnuta
Skutečná 8 / Gann 8	Významný rozdíl – H_0 zamítnuta
Skutečná 8 / Elbez 8	Nevýznamný rozdíl – H_0 nezamítnuta
Skutečná 8 / Wagner 8	Významný rozdíl – H_0 zamítnuta

Tab. 13: Výsledek testu vícenásobného porovnání pro měření vlhkosti 12 %.

Testované soubory	Výsledek testu
Skutečná 12 / Merlin 12	Nevýznamný rozdíl – H_0 nezamítnuta
Skutečná 12 / Gann 12	Významný rozdíl – H_0 zamítnuta
Skutečná 12 / Elbez 12	Významný rozdíl – H_0 zamítnuta
Skutečná 12 / Wagner 12	Nevýznamný rozdíl – H_0 nezamítnuta

Tab. 14: Výsledek testu vícenásobného porovnání pro měření vlhkosti 15 %.

Testované soubory	Výsledek testu
Skutečná 15 / Merlin 15	Nevýznamný rozdíl – H_0 nezamítnuta
Skutečná 15 / Gann 15	Nevýznamný rozdíl – H_0 nezamítnuta
Skutečná 15 / Elbez 15	Nevýznamný rozdíl – H_0 nezamítnuta
Skutečná 15 / Wagner 15	Významný rozdíl – H_0 zamítnuta

Tab. 15: Výsledek testu vícenásobného porovnání pro měření vlhkosti 18 %.

Testované soubory	Výsledek testu
Skutečná 18 / Merlin 18	Nevýznamný rozdíl – H_0 nezamítnuta
Skutečná 18 / Gann 18	Nevýznamný rozdíl – H_0 nezamítnuta
Skutečná 18 / Elbez 18	Nevýznamný rozdíl – H_0 nezamítnuta
Skutečná 18 / Wagner 18	Významný rozdíl – H_0 zamítnuta

6. Diskuse

Z výše uvedených grafů v kapitole výsledky (obr. 32, 34, 36, 38 a 40) je patrné, že hodnoty vlhkosti zjištěné pomocí měřících přístrojů závisí na hustotě dřeva. Z tohoto důvodu je velmi důležité a zásadní znát správnou hodnotu hustoty dřeva v absolutně suchém stavu (ρ_0) pro výslednou přesnost naměřených hodnot vlhkosti dřeva. Máme k dispozici dvě možnosti jak hustotu dřeva v absolutně suchém stavu zjistit.

První z nich je výpočet průměrné hustoty dřeva v absolutně suchém stavu podle ČSN EN 13183-1 a následně je za potřebí tuto hodnotu hustoty použít při provádění korekcí. Tato metoda podstatně prodlužuje ovšem celé měření.

Druhou z variant je vyhledání průměrné hustoty dřeva v absolutně suchém stavu pro měřené druhy dřev v odborné literatuře. Zde ovšem nastává problém. A to takový, že nikdy nebudeme přesně vědět, zda hodnoty průměrné hustoty dřeva v absolutně suchém stavu (ρ_0), nalezené v dostupných odborných literaturách skutečně odpovídají průměrným hodnotám námi měřených vzorků.

Pokud by byly zvoleny a použity nesprávné hodnoty hustoty dřeva v absolutně suchém stavu (ρ_0) při korekcích, mohlo by tak následně dojít k nežádoucím chybám při stanovení výsledné hodnoty vlhkosti.

Průměrné hodnoty hustoty dřeva v absolutně suchém stavu (ρ_0) nalezené v odborné literatuře dle různých autorů pro smrk jsou uvedeny v kapitole literární přehled (tab. 2).

Při porovnání námi zjištěné průměrné hodnoty hustoty dřeva smrku, která činí 464,16 kg.m⁻³ s průměrnou hodnotou, naměřenou panem Karlem Veselým byla prokázána téměř dokonalá shoda. Jeho průměrná hodnota hustoty absolutně suchého dřeva činila 467,49 kg.m⁻³ (Veselý, 1999). Lze tedy usuzovat, že naše stanovení hustoty dřeva smrku bylo provedeno shodným a správným způsobem.

Pokud by byly porovnány tyto hodnoty s průměrnou hodnotou hustoty dřeva v absolutně suchém stavu (ρ_0) získané statistickým zpracováním naměřených hodnot (tab. 5), zjistilo by se, že námi získaná průměrná hodnota je přibližně o 45–110 kg.m⁻³ vyšší (v závislosti na autorovi). To ovšem neznamená hned, že námi naměřené průměrné hodnoty nejsou možné. Z porovnání vyplývá, že námi použité dřevo smrku nebylo typické, což lze například vysvětlit odlišnými růstovými podmínkami. Dalším faktorem je také zastoupení jarního a letního dřeva ve vzorcích. Pro smrk platí hustota v absolutně suchém stavu (ρ_0) jarního dřeva 350 kg.m⁻³ a pro letní dřevo dokonce až

870 kg.m⁻³ (Požgaj et al. 1995). Dále také nejsme schopni určit, z jaké části stromu byly vzorky získány. Jelikož víme, že hustota dřeva je po výšce stromu proměnlivá. Variační rozptyl hustot dřeva v absolutně suchém stavu u evropských dřevin dosahuje dokonce 15–20 % (Kollmann 1951). Jedním z dalších vlivů na hustotu dřeva by mohl být také i věk stromu, ze kterého byly vzorky použity. Hustota dřeva se stoupajícím věkem stromu klesá, i když u smrku je tento klesající trend podstatně nižší, než je tomu u ostatních dřevin. U smrku klesá hustota dřeva přibližně až od 140 let věku stromu (Požgaj et al. 1995).

Z nomogramu (obr. 1) je vidět, že s rostoucí hustotou dřeva se zvyšuje vlhkost. Zatímco z námi dosažených výsledků (obr. 32, 34, 36, 38 a 40) vyplývá, že pro každý rovnovážný stav je tato závislost opačná. A tedy že s rostoucí hustotou dřeva jeho vlhkost klesá. Tento jev je možné si vysvětlit tím, že při zvyšování hustoty dřeva klesá počet sorpčních míst, tedy míst pro možné navázání vody a tím vlhkost klesá (Dejmal 1995).

Pokud se podíváme na jednotlivé výsledky a vzájemné porovnání měřících přístrojů se skutečnou vlhkostí, můžeme vidět, že ani jeden z přístrojů neměřil spolehlivě v celém rozsahu vlhkostí (tedy pro všechny rovnovážné stavy 5–18 %). Z tabulek (tab. 11–15) je možné vyzorovat, že s rostoucí vlhkostí se zvyšuje i počet přístrojů, které vyhověly statistickému porovnání. Pro rovnovážné stavy vlhkostí 5 % a 8 % vyhověl pokaždé přístroj pouze jeden. Dokonce pro rovnovážný stav 5 % vlhkoměr Wagner L601-3 neměřil vůbec. U rovnovážného stavu vlhkosti 12 % to už byly přístroje dva a pro rovnovážné stavy 15 % a 18 % nevyhověl porovnání ze čtyř přístrojů pouze jeden.

Například vlhkoměry Merlin PM1-E a Gann Hydromette Compact A jsou konstruovány pro měřicí rozsah vlhkostí již od 5 %, nicméně spolehlivé výsledky ukazoval přístroj Merlin až od vlhkosti 12 % a vlhkoměr Gann dokonce až od vlhkostního stavu 15 %.

Přístroj Elbez WHT-740 obstál dle porovnání se skutečnou vlhkostí téměř ve všech vlhkostních stavech. Jedinou vlhkostí, kde se jeho výsledky neshodovaly, byly pouze při vlhkostním stavu 12 %. Přesně naopak tomu bylo u přístroje Wagner L601-3, kde obstál při porovnání se skutečnou vlhkostí pouze při vlhkostním stavu právě 12 %.

Z takto vyhodnocených výsledků to vypadá, jako by každý z měřících přístrojů měřil spolehlivě a ukazoval zde spolehlivé výsledky právě pro dané vlhkostní stavy. Pro

měření vlhkostí o nižších hodnotách by se pro pořízení spolehlivých údajů jevil přístroj Elbez WHT-740. Zatímco pro hodnoty vyšší by to byly přístroje Merlin PM1-E, Gann Hydromette Compact A a Elbez WHT-740.

Za úplně nejpřesnější z použitých měřicích přístrojů, který vyhověl ve čtyřech z pěti vlhkostních stavů, by byl zvolen vlhkoměr Elbez WHT-740, jehož velkou výhodou je fakt, že se jedná o vlhkoměr záražecí (odporový). A tudíž je schopen přesněji stanovit hodnotu vlhkosti uvnitř měřeného materiálu, oproti vlhkoměrům dielektrickým, které měří vlhkost pouze do určité vzdálenosti od povrchu a jsou silně ovlivněny vlhkostí právě povrchových vrstev.

Za nejméně přesné vlhkoměry by byly vybrány přístroje dva, a to přístroj Gann Hydromette Compact A a Wagner L601-3. První zmíněný vykazoval při vlhkostech 5–12 % pokaždé o několik procent vyšší hodnoty oproti skutečným. Druhý z nejméně přesných vlhkoměrů vykazoval při vlhkostních stavech 8 % také vyšší hodnoty, zatímco při 15 % a 18 % hodnoty skutečné vlhkosti značně o několik procent podhodnocoval. Dokonce při rovnovážném stavu 5 % nebylo možné hodnoty odečíst, a tudíž jej nebylo pro tuto vlhkost vůbec možné hodnotit.

Na přesnost naměřených hodnot vlhkosti od měřicích přístrojů nemá ovšem vliv pouze hustota dřeva. Další faktory, které ovlivňují přesnost, jsou tloušťka měřeného materiálu a nerovnosti měřicí plochy.

Nejpřesnějších hodnot je dosahováno při měření materiálu s dokonale rovným povrchem. Vlivem vysušení na nulovou vlhkost a následným zvlhčováním měřeného materiálu dochází k tvarovým změnám, které nerovnosti povrchu způsobí.

Vlivem nerovností měřeného povrchu následně dochází k tomu, že měřicí plocha nedoléhá ve všech místech stejně, a tedy v těchto částech přístroj zaznamenává vlhkost vzduchu nad tímto povrchem a ne vlhkost samotného materiálu. Tento jev způsobí to, že vlhkoměr následně ukazuje vlhkost o něco vyšší, než je v měřeném materiálu.

Důležitým faktorem, který by mohl výsledky měření negativně ovlivnit, je nesprávně zvolený způsob a nedodržení zásad při měření. Dle dostupných pravidel od výrobců vlhkoměrů je pro měření přitlačnými vlhkoměry důležitá tloušťka měřeného materiálu a vzdálenost od podložky, která by mohla zkreslit výsledné hodnoty. Takovéto negativní ovlivnění bylo vyřešeno podložením měřeného materiálu nevodivým materiálem (kartónovou krabicí). Dalším faktorem je i velikost měřicí plochy, která musí být celá

přítlačena na měřeném materiálu a měla by ve všech místech dokonale přiléhat (www.merlin-technology.com; www.gann.de; www.wagnermeters.com).

Dle zásad pro měření dřeva zarážecím vlhkoměrem jsou důležitá dvě pravidla. Pro dosažení přesnějších hodnot naměřené vlhkosti by měly hroty sond směřovat podél vláken a druhou věcí je hloubka zaražení, která by měla být taková, aby celá sonda byla zaražená až po gumové konce (www.elbez.cz).

Náš experiment byl proveden se sondami zaraženými rovnoběžně s vlákny dřeva, ale z důvodu malé tloušťky měřeného materiálu nemohlo být zaražení sond tak hluboko z důvodu případného rozštípnutí měřeného vzorku.

Pokud bychom nějak shrnuli výhody a nevýhody, které vyplývají z měření vlhkosti dřeva pomocí elektrických vlhkoměrů, pak mezi výhody vlhkoměrů dielektrických (přítlačných) jednoznačně patří rychlost, způsob měření a jednoduchost ovládání. Velkou výhodou zůstává fakt, že se jedná o nedestruktivní způsob měření vlhkosti ve dřevě. Do nevýhod by byla poté zařazena poměrně vysoká pořizovací cena těchto přístrojů, velká závislost naměřených hodnot vlhkosti na hustotě dřeva. Další nevýhodou je závislost na tloušťce měřeného materiálu a do jisté míry i rovinnost plochy, na které je měření prováděno.

U měřicího přístroje odporového (zarážecího) je výhodou cenová dostupnost, přesnost měření, hloubka zaražení, nezávislost na tvaru měřeného materiálu a rovinnosti jeho povrchu případně korekce na vliv teploty. Takovou menší nevýhodou je vznik otvorů, které po měřících sondách v měřeném materiálu zůstávají, a časově náročnější měření oproti vlhkoměrům přítlačným.

Zda použít vlhkoměry přítlačné nebo zarážecí také souvisí s tím, na jakém materiálu chceme vlhkost dřeva stanovit. Jedná-li se o materiál jakožto už přímo hotový výrobek nebude možné použít vlhkoměr zarážecí, jelikož by po jeho použití zůstaly na viditelných plochách otvory po měření. Ovšem pokud se bude jednat o materiál, který není konečným produktem a bude se následně ještě nějak upravovat, nebo zda by otvory zůstaly na ploše materiálu, která ve výsledku nepůjde vidět, zde je možné zarážecí vlhkoměr použít.

Pokud bychom měli na závěr navrhnout vhodný způsob praktického použití elektrických vlhkoměrů, pak bychom vlhkoměry dielektrické (přítlačné) doporučili zejména pro zjišťování vlhkosti dých a tenčích materiálů. A to z důvodu toho, že jsou

zde podstatně eliminovány nepříznivé vlivy vznikající v důsledku vyšší tloušťky měřeného materiálu. Ovšem za předpokladu dodržení všech zásad pro měření.

Navíc dýhy vykazují konstantnější a pravidelnější rovinnost měřené plochy. Při měření vlhkosti materiálů ze dřeva o větších tloušťkách je vhodnější použít vlhkoměry odporové (zarážecí), z důvodu stanovení přesnější vlhkosti uvnitř měřeného materiálu, nikoli pouze na jeho povrchu.

7. Závěr

Tato bakalářská práce popsala na základě správně zvolených postupů přesnost použitých vlhkoměrů a tím i jejich vhodnost pro měřený rozsah vlhkostí při použití v praxi.

Experimentálním šetřením byla u zkušebních vzorků smrku ztepilého (*Picea abies* (L.) Karst.) prokázána závislost mezi hodnotami vlhkostí, které byly naměřeny měřicími přístroji, a hustotou dřeva v absolutně suchém stavu. Průměrná hustota dřeva při nulové vlhkosti pro námi použité vzorky dřeva smrku byla $464,16 \text{ kg.m}^{-3}$.

Byly použity celkem čtyři měřicí přístroje. Jejich hodnoty vlhkostí, které při experimentu vykazovaly, byly porovnávány se skutečnými (gravimetricky vypočítanými) hodnotami vlhkosti. Toto porovnávání bylo provedeno při pěti rovnovážných stavech.

Z jednotlivých výsledků, intervalů spolehlivostí a mnohonásobného porovnání lze stanovit pro každý rovnovážný stav následující závěry:

Rovnovážný stav 5 %

Pro ten rovnovážný stav je nejlépe hodnocen a doporučen měřicí přístroj Elbez WHT-740 (semi-destruktivní). Dále pak Merlin PM1-E a nakonec vlhkoměr Gann Hydromette Compact A. Přístroj Wagner L601-3 pro tento rovnovážný stav neměřil a nebylo jej do hodnocení zařadit.

Rovnovážný stav 8 %

Zde nejlepších výsledků dosáhl opět odporový vlhkoměr Elbez WHT-740 (semi-destruktivní). Za ním následují přístroje Wagner L601-3, Merlin PM1-E a nejnižší hodnocení si odnáší znovu vlhkoměr Gann Hydromette Compact A.

Rovnovážný stav 12 %

Pro rovnovážný stav 12 % byly výsledky a hodnocení velmi těsné. Nejlépe si vedl přístroj Wagner L601-3, dále pak Merlin PM1-E, za ním Elbez WHT-740 (semi-destruktivní) a na posledním místě skončil opět vlhkoměr Gann Hydromette Compact A.

Rovnovážný stav 15 %

Pro ten rovnovážný stav byl vyhodnocen jako nejlepší měřicí přístroj Gann Hydromette Compact A, na druhém místě pak Elbez WHT-740 (semi-destruktivní), následuje Merlin PM1-E a nejméně přesně měřil vlhkoměr Wagner L601-3.

Rovnovážný stav 18 %

Zde je nejlépe hodnocen přístroj Elbez WHT-740 (semi-destruktivní), následuje přístroj Merlin PM1-E, za ním vlhkoměr Gann Hydromette Compact A a na posledním místě se pro tento rovnovážný stav umístil vlhkoměr Wagner L601-3.

Tyto výsledky ovšem nelze považovat za stoprocentní a konečné. Pro získání věrohodnějších a závaznějších výsledků by bylo zapotřebí dalších a důkladnějších výzkumů. Například vyšší počet vzorků, více dřevin a z více lokalit. Dále zvolení většího počtu rovnovážných stavů a také většího počtu měření na každém vzorku.

8. Summary

This bachelor thesis described accuracy of used hygrometers by virtue of right chosen processes, which led to detection of its appropriateness for the measured moisture in practical use.

The experimental inquiry has found that there is dependence between values of moisture of tested samples of Sitka spruce (*Picea abies* (L.) Karst.), which were measured with measuring equipment, and density of wood in absolutely dry state. An average density of wood with zero moisture for used samples was $464,16 \text{ kg.m}^{-3}$.

Four measuring instruments were used altogether. The values of moisture, which they revealed, were compared with real (computed gravimetrically) values of moisture. This comparison was carried out during five steady states.

Following conclusions can be determined from individual results, intervals of reliabilities and multiple comparison:

Steady state 5 %

The measuring instrument Elbez WHT-740 (semi-destructive) has the best rating and recommendation for this steady state. Also Merlin PM1-E should be mentioned as well as a hygrometer Gann Hydromette Compact A. Finally, Wagner L601-3 was not able to measure for this steady state, so it was not possible to use it for rating.

Steady state 8%

A resistance hygrometer Elbez WHT-740 (semi-destructive) reached the best result here again, followed by Wagner L601-3, Merlin PM1-E and the worst rating has Gann Hydromette Compact A again.

Steady state 12%

The results and rating for steady state 12% were very close. The best result was reached by Wagner L601-3 followed by Merlin PM1-E, then Elbez WHT-740 (semi-destructive) and the last place belongs to the hygrometer Gann Hydromette Compact A again.

Steady state 15%

For this steady state the measuring instrument Gann Hydromette Compact A was evaluated as the best one, the second place belongs to Elbez WHT-740 (semi-destructive) followed by Merlin PM1-E and the less precise was the hygrometer Wagner L601-3.

Steady state 18%

The best evaluation here has the instrument Elbez WHT-740 (semi-destructive), followed by the instrument Merlin PM1-E and then the hygrometers Gann Hydromette Compact A and the last place for this steady state has the hygrometer Wagner L601-3.

These results naturally cannot be considered as wholly and final. For gaining more trustworthy and obligatory results it would be needed to make more and more elaborate researches. For example higher amount of samples, more types of wood from more different locations. Further higher amount of steady states as well as higher amount of measuring for every sample.

9. Použitá literatura

DEJMAL, A. *Základy hydrotermické úpravy a ochrany dřeva*. 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 1995. 192 s. ISBN 80-7157-163-6.

GANDELOVÁ, L. – ŠLEZINGEROVÁ, J. – HORÁČEK, Petr. *Nauka o dřevě*. 3. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2009. 176 s. ISBN 978-80-7375-312-2.

HORÁČEK, P. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva 1*, Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 1998. 124 str. ISBN 978-80-7375-169-2

KOLLMANN, F. *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. 2. vyd. Berlin: Springer-Verlag, 1951. 1050 s.

KOLLMANN, F. – CÔTÉ, A. *Principles of Wood Science and Technology. I. Solid Wood*. Berlin - Heidelberg - New York, 1968. 592 s.

KRETSCHMANN, D. E. – GREEN D. W. – WINANDY J. E. *Wood Handbook. Chapter 3: Physical Properties and Moisture Relations of Wood*. Forest Products Laboratory, USDA Forest Service, Madison, Wisconsin, 1999

MAKOVÍNY, I. *Meranie vlhkosti dreva*, Matematické vzdelávacie centrum Zvolen, 1995, 111 s.

MATOVIČ, A. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálu na bázi dřeva*, VŠZ Brno, 1993, ISBN 80-7157-086-9.

MELOUN, M. – MILITKÝ, J. *Statistická analýza experimentálních dat*. 2. vyd. Praha: Academia, 2004. 953 s. ISBN 80-200-1254-0.

PERELYGIN, L. *Náuka o dreve*. 2. vyd. Bratislava: SVTL, 1965.

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

SIAU, J. F. *Transport Processes in Wood*. Springer Verlag. Berlin - Heidelberg - New York 1984. 245 s. ISBN: 3-504-12574-4

SKAAR, C. *Wood-Water Relations*. Springer Verlag 1988. 283 str. ISBN: 3-540-19258-1

ŠMELKO, Š. – WOLF, J. *Štatistické metódy v lesníctve*. 1. vyd. Bratislava: Príroda, 1977. 330 s.

THOUMIS, G. *Science and technology of Wood: Structure, Properties, Utilization*. Chapman&Hall 1991. 494 s.

VESELÝ, K. *Měření vlhkosti dřeva elektrickými vlhkoměry, hodnocení vlhkoměrů dielektrických*. Diplomová práce. MZLU v Brně, 1999.

Normy

ČSN EN 13183-1: *Vlhkost vzorku řeziva – Část 1: Stanovení váhovou metodou*. 2002

ČSN EN 13183-2: *Vlhkost vzorku řeziva – Část 2: Odhad elektrickou odporovou metodou*. 2002

ČSN EN 13183-3: *Vlhkost vzorku řeziva – Část 3: Odhad kapacitní metodou*. 2005

Internetové zdroje

www.merlin-technology.com

www.gann.de

www.wagnermeters.com

www.elbez.cz

www.geminibv.nl

www.memmert.com

www.ldf.mendelu.cz

www.italian.alibaba.com

10. Přílohy

Přílohy jsou rozděleny celkem do tří částí.

V první části této kapitoly jsou umístěny veškeré tabulky naměřených hodnot, které byly potřebné pro stanovení výsledků experimentu. První část příloh obsahuje hodnoty hmotnosti, hustoty, rozměry a objemy vzorků v absolutně suchém stavu. Dále hmotnosti, skutečné vlhkosti zjištěné váhovou metodou a veškeré vlhkosti naměřené měřicími přístroji pro všechny fáze měřených vlhkostí.

Ve druhé části je možné nalézt kompletní Shapiro-Wilkův test normality, histogramy a Kruskal-Wallisovu neparametrickou Anovu s testem vícenásobného porovnání.

V poslední části je umístěno několik vlastních fotografií pořízených v průběhu experimentu.

10.1 Vstupní hodnoty

Tab. 16: Vstupní změřené a vypočítané hodnoty pro vzorky po vysušení na vlhkost 0 %.

Číslo vzorku	Hmotnost m_0 (g)	Tloušťka a_0 (cm)	Šířka b_0 (cm)	Délka l_0 (cm)	Objem V_0 (cm ³)	Hustota ρ_0 (kg/m ³)
1	240,76	1,957	9,067	29,82	529,1296	455,01
2	255,67	1,953	9,076	29,9	529,9903	482,41
3	259,93	1,954	9,055	29,8	527,2654	492,98
4	240,48	1,958	9,09	29,85	531,2769	452,65
5	224,69	1,971	9,113	29,91	537,2351	418,23
6	216,85	1,962	8,246	29,9	483,7417	448,28
7	243,88	1,979	8,857	29,8	522,3345	466,9
8	193,76	2,012	8,4	29,8	503,6438	384,72
9	269,48	1,922	9,287	29,9	533,7035	504,92
10	230,53	1,958	8,473	30	497,704	463,19
11	251,49	1,928	9,281	29,95	535,9184	469,27
12	254,57	1,934	9,234	29,95	534,8638	475,95
13	237,65	1,974	8,469	30	501,5342	473,85
14	224,07	1,971	8,569	30,25	510,9073	438,57
15	231,45	1,969	8,504	29,75	498,1452	464,62
16	221,02	1,947	9,174	29,9	534,0672	413,84
17	234,12	1,953	8,45	30,15	497,5609	470,54
18	222,7	1,913	9,177	29,9	524,9125	424,26
19	231,84	1,948	7,761	30	453,5528	511,16
20	260,03	1,935	9,266	29,95	536,9948	484,23
21	257,93	1,946	9,284	29,9	540,1933	477,48
22	260,11	1,922	9,299	29,95	535,2867	485,93
23	265,36	1,935	9,226	29,95	534,6767	496,3
24	240,27	1,958	8,427	29,9	493,352	487,02
25	257,99	1,921	9,303	30	536,1319	481,21
26	218,94	1,94	9,171	29,9	531,973	411,56
27	242,34	1,918	9,176	29,85	525,3471	461,30
28	221,35	1,92	9,147	29,85	524,2329	422,24
29	215,03	1,965	8,576	30,05	506,3978	424,63
30	232,18	1,979	8,432	30,15	503,1109	461,49
31	229,71	1,978	8,575	30,2	512,2328	448,45
32	248,55	1,971	8,077	29,9	476,001	522,16
33	241,87	1,96	8,041	29,95	472,0228	512,41
34	235,65	1,961	7,775	29,85	455,1162	517,78
35	236,09	1,961	8,557	30,1	505,0863	467,43
36	228,07	1,974	8,459	29,95	500,1071	456,04
37	231,6	1,963	8,565	29,9	502,7115	460,7
38	232,02	1,957	8,433	30,1	496,7518	467,07
39	234,46	1,977	8,498	30,15	506,5365	462,87
40	236,16	1,953	8,457	30	495,4956	476,61
41	229,98	1,961	9,045	29,85	529,4568	434,37

Tab. 17: Vstupní změřené a vypočítané hodnoty vzorků pro RVD 5 %.

Číslo vzorku	Hmotnost m_5 (g)	Skutečná vlhkost w_5 (%)	Merlin 5 (%)	Gann 5 (%)	Elbez 5 (%)	Wagner 5 (%)
1	249,67	3,7	7,57	7,9	3,27	nehodnoceno
2	265,42	3,81	7,67	8,17	3,87	
3	270,38	4,02	7,93	7,7	4,1	
4	250,62	4,22	5,7	7,63	4,17	
5	234,81	4,5	6,93	7,23	4,1	
6	226,32	4,36	7,7	8,1	4,23	
7	254,04	4,17	8	7,93	4,67	
8	203,29	4,92	6,23	6,4	4,2	
9	281,04	4,29	8,63	8,67	4,27	
10	239,29	3,8	7,07	7,9	3,97	
11	263,14	4,63	5,83	8,43	2,53	
12	265,89	4,44	7,2	8,53	4,33	
13	246,86	3,88	8,1	8,2	3,87	
14	234,68	4,74	7,17	7,5	3,77	
15	240,28	3,81	7,93	7,9	4,1	
16	230,76	4,4	7,07	7,1	3,73	
17	245,35	4,8	8,07	8,1	4,9	
18	232,64	4,46	6,5	7,23	3,97	
19	241,1	3,99	7,67	9	4,43	
20	271,86	4,55	8,87	8,83	4,67	
21	268,58	4,13	5,97	8	2,77	
22	271,49	4,38	8,3	8,3	4,2	
23	276,98	4,38	8,2	8,33	4	
24	250,14	4,11	8,9	8,2	4,13	
25	269,41	4,43	8,03	8,43	4,6	
26	227,96	4,12	6,2	7,1	3,83	
27	252,87	4,35	5,57	8,03	3,83	
28	231,79	4,72	7,07	7,43	4,47	
29	225,32	4,79	7,07	7,23	4,13	
30	242,98	4,65	7,57	8,3	3,9	
31	239,95	4,46	7,17	7,63	3,8	
32	259,12	4,25	8,97	9,13	4,3	
33	251,43	3,95	8,37	8,7	3,7	
34	245,32	4,1	8,7	8,93	4,03	
35	247,07	4,65	6,37	7,67	3,93	
36	238,75	4,68	6,87	8	4,27	
37	242,25	4,6	6,9	7,63	3,77	
38	242,25	4,41	6,97	7,8	3,3	
39	245,25	4,6	7,53	8,2	4,13	
40	246,66	4,44	5,63	8,37	3,93	
41	240,03	4,37	6,47	7,6	4,13	

Tab. 18: Vstupní změřené a vypočítané hodnoty vzorků pro RVD 8 %.

Číslo vzorku	Hmotnost m_8 (g)	Skutečná vlhkost w_8 (%)	Merlin 8 (%)	Gann 8 (%)	Elbez 8 (%)	Wagner 8 (%)
1	257,94	7,13	10,33	11,1	7,8	9,4
2	273,77	7,08	8,23	11,1	7,03	9,83
3	278,58	7,17	11,03	11,03	7,33	9,63
4	258,56	7,52	10,07	10,9	7,47	9,47
5	242,07	7,74	9,4	10	7,63	8,83
6	232,45	7,19	9,73	10,83	6,7	9,2
7	261,88	7,38	10,77	10,97	7,83	9,4
8	209,04	7,88	7,03	9,43	7,07	7,9
9	288,19	6,94	10,9	11,3	7,07	9,9
10	246,02	6,72	8,47	10,97	5,43	8,67
11	271,04	7,77	10,7	11,47	7,2	9,63
12	272,89	7,2	10,53	11,33	5,97	9,27
13	253,2	6,54	9,3	11,2	6,4	9,43
14	240,98	7,55	9,5	10,17	6,9	8,97
15	246,24	6,39	10,13	10,33	6,23	8,77
16	237,92	7,65	9,7	10,13	7,27	8,77
17	252,82	7,99	10,77	11,27	7,83	9,67
18	240,05	7,79	8,77	10,53	7,27	8,77
19	247,65	6,82	10,47	11,33	6,5	9,87
20	279,47	7,47	11,4	11,9	7,43	10,07
21	276,6	7,24	9,63	11,33	6,53	9,57
22	278,75	7,17	10,77	11,23	6,43	9,53
23	286,14	7,83	7,93	11,87	8,07	10,5
24	256,11	6,59	9,7	10,8	6,37	9,6
25	277,42	7,53	10,93	11,33	7,37	9,77
26	235,2	7,43	9,27	10,1	7,17	8,6
27	259,55	7,1	9,9	10,3	6,6	9,07
28	238,41	7,71	6,77	10,4	6,93	8,67
29	232,18	7,97	9,17	10,33	7,9	8,83
30	250	7,67	10,53	11,03	6,77	9,43
31	247,7	7,83	9,97	10,47	7,5	9,23
32	267,45	7,6	11,03	13,23	7,63	10,83
33	259,95	7,48	7,4	12,07	7,57	10,4
34	252,15	7	10,17	11,87	6,93	10,13
35	255,66	8,29	10,97	11,23	8,23	10,17
36	246,86	8,24	10,67	11,2	7,87	9,93
37	249,37	7,67	9,6	10,83	6,97	9,43
38	249,12	7,37	10,33	10,93	6,9	9,27
39	252,46	7,68	10,67	11,2	7,1	9,63
40	254,46	7,75	11,03	11,47	7,93	10,13
41	246,86	7,34	9,37	10,33	7,13	9,33

Tab. 19: Vstupní změřené a vypočítané hodnoty vzorků pro RVD 12 %.

Číslo vzorku	Hmotnost m_{12} (g)	Skutečná vlhkost w_{12} (%)	Merlin 12 (%)	Gann 12 (%)	Elbez 12 (%)	Wagner 12 (%)
1	268,43	11,49	12,27	12,07	12,07	12,2
2	285,02	11,48	12,27	12,1	12,27	12,2
3	289,37	11,32	12,17	12,4	12,77	11,7
4	268,46	11,64	12,1	12,47	12,17	10,83
5	251,89	12,11	10,97	12,23	12,73	10,37
6	242,6	11,88	11,63	13	12,8	10,97
7	271,95	11,51	12,53	12,7	12,73	11,53
8	218,03	12,52	9,4	11,07	13,1	9,5
9	299,94	11,3	12,6	13,9	12,77	11,93
10	256,22	11,14	12,97	13,13	12,13	10,73
11	281,08	11,77	11,93	12,5	11,93	12,17
12	283,21	11,25	12,2	13,43	11,6	11,1
13	263,7	10,96	12,27	12,93	11,97	12,2
14	251,46	12,23	8,2	12,4	12,77	10,77
15	256,25	10,72	11,5	12,13	12,57	11,2
16	247,65	12,05	11,43	11,37	12,57	10,33
17	262,94	12,31	11,13	11,9	12,9	11,33
18	249,83	12,18	10,4	12,03	12,4	10,53
19	258,48	11,49	13,4	13,97	12,43	11,87
20	290,68	11,79	12,23	12,3	12,07	12,23
21	287,4	11,43	12,3	12,33	12,2	12,2
22	289,58	11,33	12,6	12,97	12	11,57
23	296,98	11,91	13,13	12,6	12,33	12,4
24	267,71	11,42	13,4	12,9	12,23	11,8
25	288,48	11,82	9,77	13,6	13,13	11,97
26	245,22	12	11,13	12	12,77	10,33
27	269,81	11,34	12,37	12,73	12,27	12,1
28	248,31	12,18	10,2	12,47	12,4	10,6
29	241,75	12,43	11,3	12,13	12,53	10,5
30	260,41	12,16	12,47	12,97	12,3	11,33
31	258,17	12,39	11,83	12,13	12,9	11,23
32	278,07	11,88	11,63	12,37	12,23	10,77
33	270,59	11,87	11,17	12,87	13,13	11,03
34	263,41	11,78	13,73	13,87	12,7	12,37
35	265,6	12,5	13,73	13,5	12,53	13,27
36	256,7	12,55	13,3	13,57	12,33	12,93
37	259,55	12,07	11,83	12,83	12,4	11,2
38	259,88	12,01	12,63	13	12,3	11,33
39	262,61	12,01	12,43	12,87	12,37	12,07
40	264,87	12,15	12,53	12,5	12,27	11,97
41	257,03	11,76	12,43	12,83	12,53	12,43

Tab. 20: Vstupní změřené a vypočítané hodnoty vzorků pro RVD 15 %.

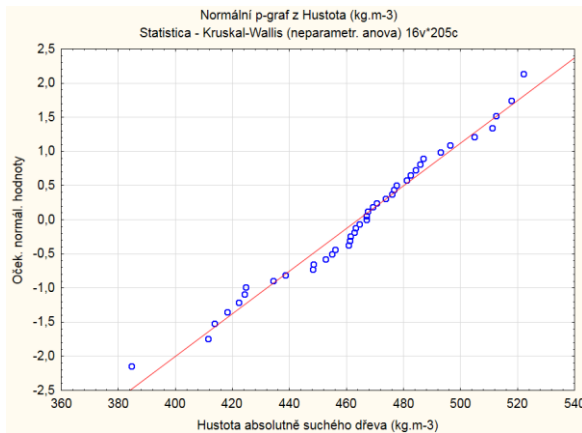
Číslo vzorku	Hmotnost m_{15} (g)	Skutečná vlhkost w_{15} (%)	Merlin 15 (%)	Gann 15 (%)	Elbez 15 (%)	Wagner 15 (%)
1	274,9	14,18	13,47	14,57	15,07	12,47
2	292,37	14,35	14,07	15,67	14,23	13,3
3	297,01	14,26	14,77	14,8	15,07	13,43
4	276,86	15,13	13,7	14,4	15,93	13,07
5	259,09	15,31	14	13,77	15,7	12,47
6	252,29	16,34	15,3	16,03	16,67	13,83
7	281,14	15,28	15,17	14,77	15,9	13,43
8	225,05	16,15	12,73	13,63	16,7	12
9	311,34	15,53	16,13	16,37	16,77	14,63
10	265,36	15,11	15,83	14,93	15,77	13,6
11	290,58	15,54	15,03	14,87	15,97	13,73
12	293,64	15,35	13,9	15,4	15,53	13,3
13	271,45	14,22	15,8	15,3	15,17	13,3
14	261,07	16,51	14,47	15,03	17,2	13,4
15	264,16	14,13	14,93	15,20	15,3	13,2
16	254,27	15,04	13,87	13,67	14,93	12,07
17	270,3	15,45	14,53	15,13	15,93	13,43
18	256,89	15,35	12,67	13,8	15,3	12,3
19	268,25	15,7	16,37	16,7	16,7	14,5
20	298,23	14,69	15,2	15,67	15,4	13,67
21	297,26	15,25	15,43	15,8	15,77	14
22	298,55	14,78	14,83	15,5	15,27	13,4
23	304,9	14,9	15,8	16,23	16,2	14,27
24	277,3	15,41	16,2	16,6	16,83	14,57
25	299,09	15,93	15,73	16,13	16,37	14,33
26	254,27	16,14	14,03	14,2	16,37	12,83
27	279,09	15,17	14,07	14,9	15,83	12,93
28	256,38	15,82	14,07	14	15,67	12,67
29	249,41	15,99	13,23	13,77	16,2	12,63
30	270,27	16,41	12	15,57	16,5	13,97
31	263,36	14,65	11,2	14,03	14,7	12,4
32	286,37	15,22	16,73	16,13	15,5	14,63
33	278,01	14,94	16,03	15,73	15,47	14,07
34	269,68	14,44	15,97	15,97	15,13	13,9
35	272	15,21	14,53	15,97	15,47	13,37
36	263,68	15,61	14,4	15,17	15,63	13,3
37	267,71	15,59	14,77	14,63	16,03	13,23
38	266,73	14,96	14,1	14,7	15,13	13,03
39	271,51	15,8	15,2	14,93	16,13	13,5
40	272,03	15,19	14,7	15,53	16,07	13,53
41	265,14	15,29	13,63	14,6	15,67	13,13

Tab. 21 : Vstupní změřené a vypočítané hodnoty vzorků pro RVD 18 %.

Číslo vzorku	Hmotnost m_{18} (g)	Skutečná vlhkost w_{18} (%)	Merlin 18 (%)	Gann 18 (%)	Elbez 18 (%)	Wagner 18 (%)
1	282,17	17,2	17,33	17,23	17,8	14,7
2	299,18	17,02	16,9	17,33	17,47	15,4
3	305,63	17,58	17,97	17,93	18,13	15,4
4	285,57	18,75	17,77	17,67	18,97	15,73
5	266,92	18,8	17,37	16,57	18,4	14,73
6	260,38	20,07	19,03	19,8	19,6	16,53
7	291,27	19,43	19,53	18,9	19,7	16,57
8	233,19	20,35	17,5	17,5	20,17	15,57
9	320,21	18,82	19,2	19,97	18,8	17,27
10	270,21	17,21	19,27	16,93	18,33	15,43
11	302,1	20,13	19,83	19	19,8	16,97
12	297,52	16,87	17,63	17,53	17,07	14,83
13	277,11	16,6	19,33	18,03	18,07	15,57
14	268,61	19,88	18,37	18,13	18,97	16,07
15	271,86	17,46	18,13	18,7	19	16,4
16	261,94	18,52	17,5	16,4	18,2	14,37
17	277,98	18,73	18,37	18,2	18,33	15,63
18	264,47	18,76	16,5	16,13	18,5	14,53
19	277,22	19,57	20,93	20,6	19,37	17,33
20	300,13	15,42	17,03	16,7	16,5	14,57
21	308,2	19,49	19,23	19,4	19,57	16,77
22	308,32	18,53	18,27	18,53	18,27	16,17
23	315,11	18,75	19,97	19,80	19,27	17,2
24	284,23	18,3	19,97	20,23	18,53	16,67
25	306,87	18,95	19,23	18,6	19,2	16,67
26	261,33	19,36	17,8	16,97	19,2	15,33
27	288,66	19,11	18,37	18,27	19,5	16
28	266,41	20,36	17,1	17,33	19,5	15,77
29	257,02	19,53	17,97	16,77	18,9	15
30	276,87	19,25	18,83	17,97	18,87	16,13
31	271,35	18,13	17,87	17,07	18,03	14,73
32	294,99	18,69	20,63	19,27	19,1	17,2
33	286,17	18,31	19,73	18,93	18,53	16,73
34	275,46	16,89	18,6	17,97	18,07	15,67
35	278,99	18,17	15,17	18,2	17,4	15,47
36	270,86	18,76	18,23	17,37	18,03	15,53
37	277,12	19,66	18,9	18,13	18,9	16,13
38	276,21	19,04	18,73	18,67	18,5	16,13
39	278,68	18,86	18,4	17,37	18,3	15,77
40	278,8	18,06	17,8	17,7	17,73	15,7
41	272,09	18,31	16,8	17,33	18,03	15,63

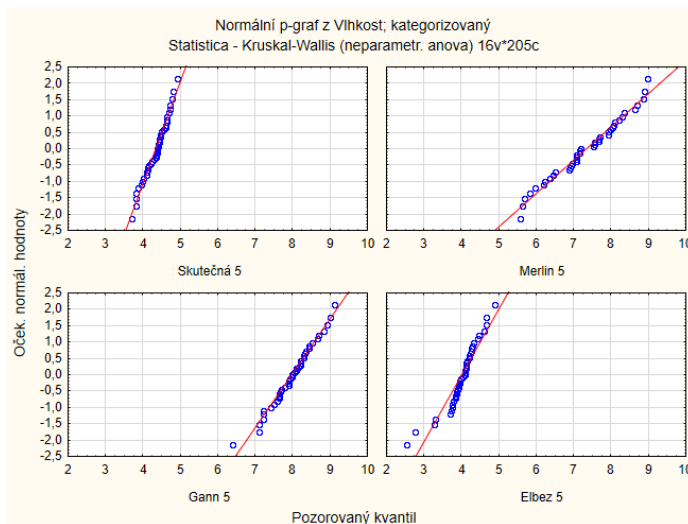
10.2 Statistické zpracování

10.2.1 Test normality (Shapiro-Wilkův test)



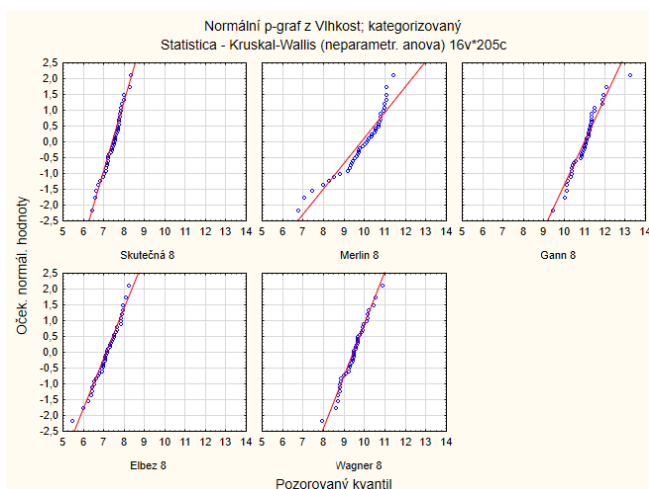
Hustota (kg.m-3): SW-W = 0,9766; p = 0,5508

Obr. 42: Normální pravděpodobnostní grafy a Shapiro-Wilkův test pro hustotu dřeva



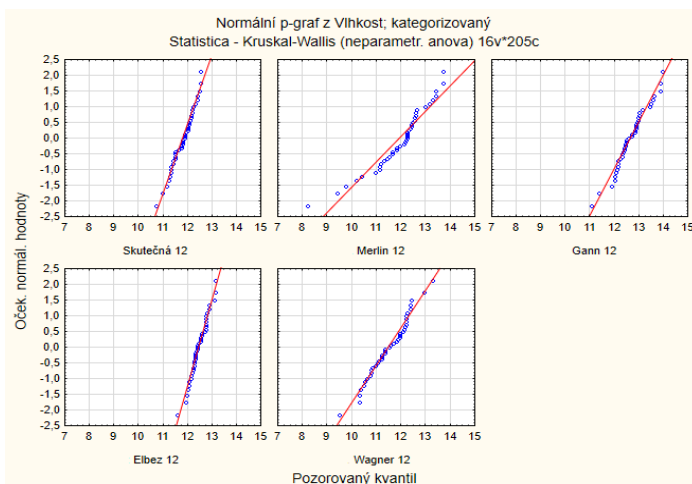
Skutečná 5 Vlhkost: SW-W = 0,9705; p = 0,3578
 Merlin 5 Vlhkost: SW-W = 0,9692; p = 0,3254
 Gann 5 Vlhkost: SW-W = 0,9857; p = 0,8785
 Elbez 5 Vlhkost: SW-W = 0,9053; p = 0,0024

Obr. 43: Normální pravděpodobnostní grafy a Shapiro-Wilkův test pro 5% vlhkost dřeva



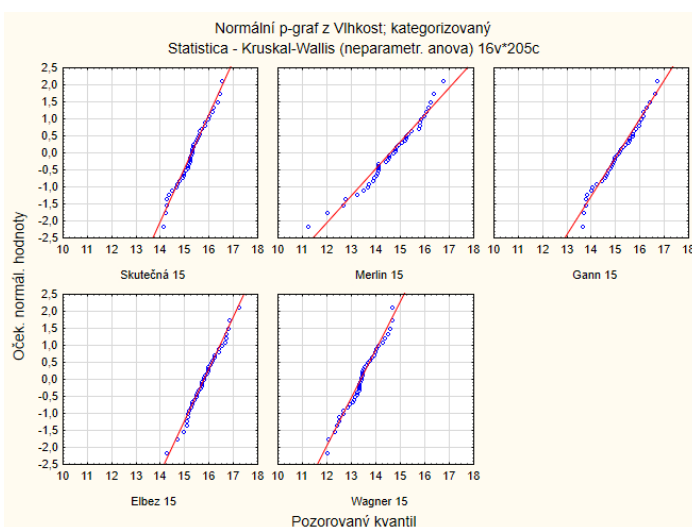
Skutečná 8 Vlhkost: SW-W = 0,9776; p = 0,5867
 Merlin 8 Vlhkost: SW-W = 0,9003; p = 0,0017
 Gann 8 Vlhkost: SW-W = 0,9507; p = 0,0740
 Elbez 8 Vlhkost: SW-W = 0,9795; p = 0,6551
 Wagner 8 Vlhkost: SW-W = 0,9865; p = 0,9014

Obr. 44: Normální pravděpodobnostní grafy a Shapiro-Wilkův test pro 8% vlhkost dřeva



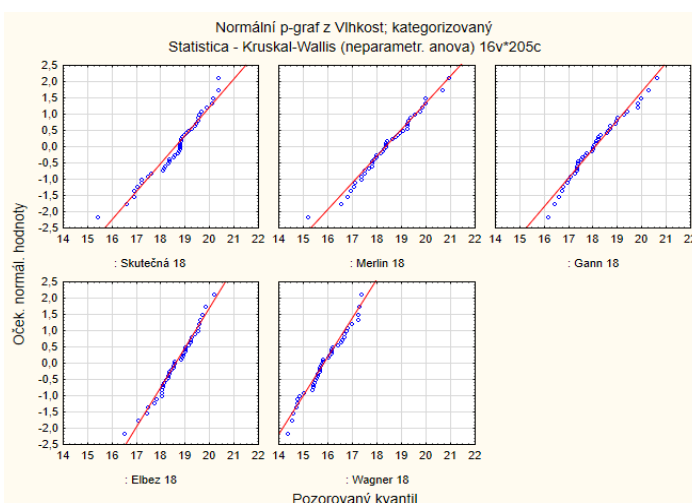
Skutečná 12 Vlhkost: SW-W = 0,9751; p = 0,4974
 Merlin 12 Vlhkost: SW-W = 0,9234; p = 0,0088
 Gann 12 Vlhkost: SW-W = 0,9727; p = 0,4201
 Elbez 12 Vlhkost: SW-W = 0,9784; p = 0,6148
 Wagner 12 Vlhkost: SW-W = 0,9774; p = 0,5786

Obr. 45: Normální pravděpodobnostní grafy a Shapiro-Wilkův test pro 12% vlhkost dřeva



Skutečná 15 Vlhkost: SW-W = 0,9758; p = 0,5212
 Merlin 15 Vlhkost: SW-W = 0,9693; p = 0,3268
 Gann 15 Vlhkost: SW-W = 0,9702; p = 0,3504
 Elbez 15 Vlhkost: SW-W = 0,99; p = 0,9721
 Wagner 15 Vlhkost: SW-W = 0,9738; p = 0,4555

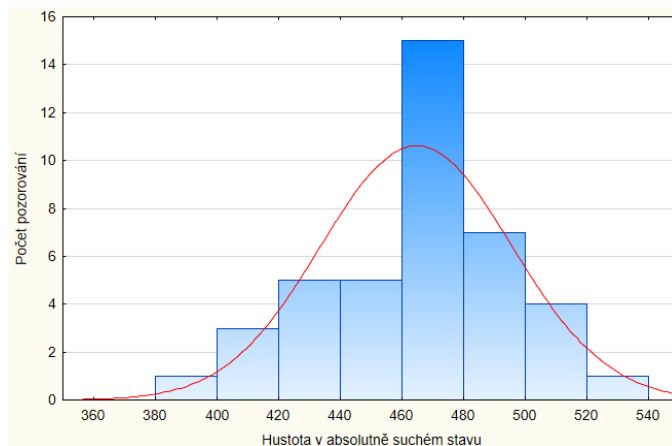
Obr. 46: Normální pravděpodobnostní grafy a Shapiro-Wilkův test pro 15% vlhkost dřeva



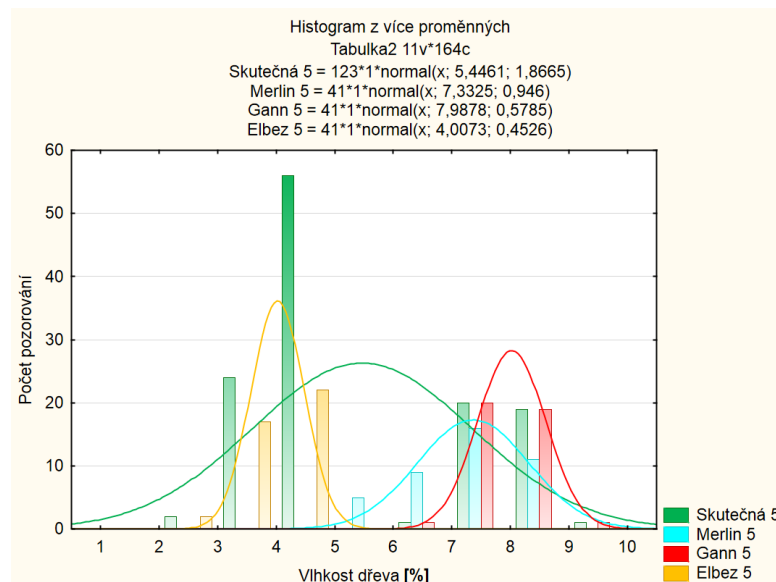
Skutečná 18 Vlhkost: SW-W = 0,9578; p = 0,1314
 Merlin 18 Vlhkost: SW-W = 0,9896; p = 0,9665
 Gann 18 Vlhkost: SW-W = 0,9731; p = 0,4326
 Elbez 18 Vlhkost: SW-W = 0,9835; p = 0,8044
 Wagner 18 Vlhkost: SW-W = 0,9664; p = 0,2615

Obr. 47: Normální pravděpodobnostní grafy a Shapiro-Wilkův test pro 18% vlhkost dřeva

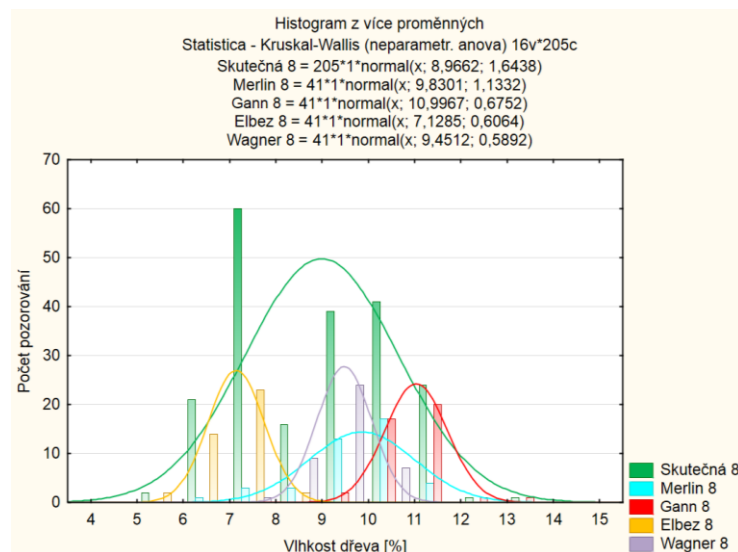
10.2.2 Histogramy



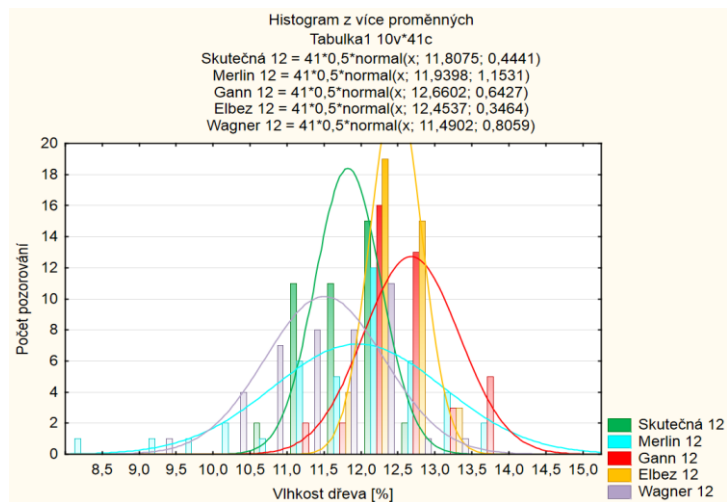
Obr. 48: Histogram hustoty dřeva v absolutně suchém stavu



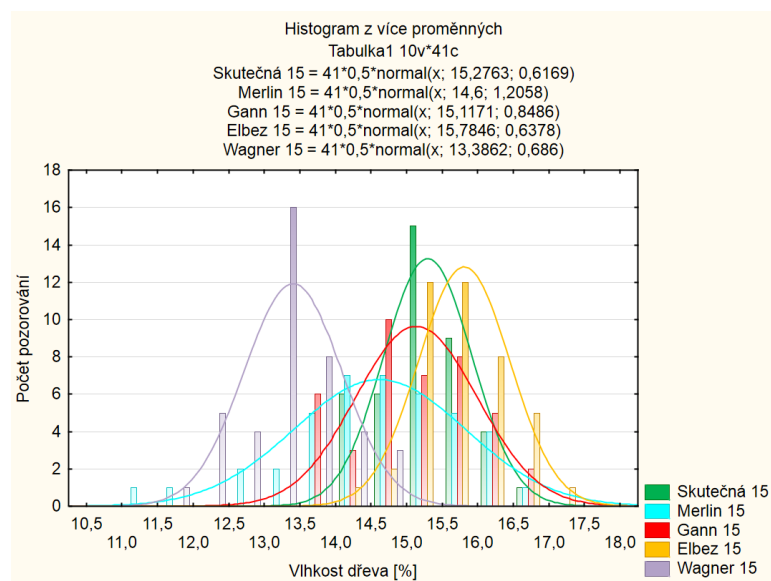
Obr. 49: Histogram pro měření 5% vlhkosti dřeva



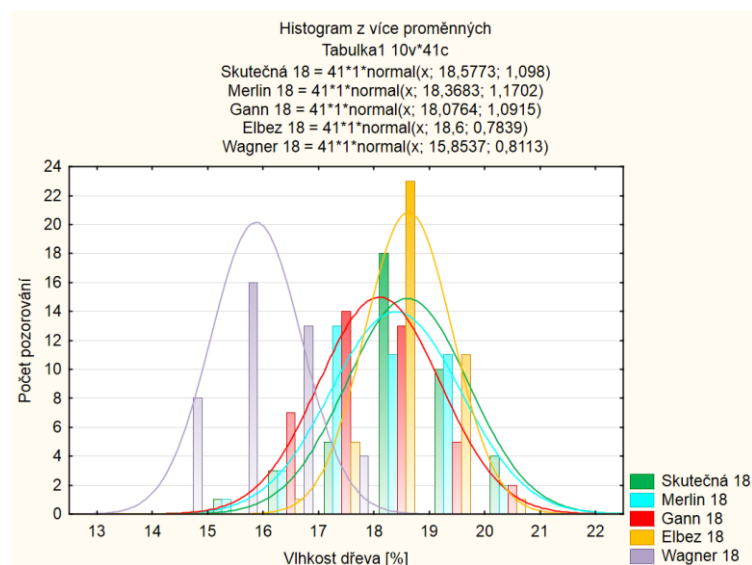
Obr. 50: Histogram pro měření 8% vlhkosti dřeva



Obr. 51: Histogram pro měření 8% vlhkosti dřeva



Obr. 52: Histogram pro měření 15% vlhkosti dřeva



Obr. 53: Histogram pro měření 18% vlhkosti dřeva

10.2.3 Test vícenásobného porovnání

Pro vícenásobné porovnání byla použita Kruskal-Wallisova neparametrická Anova.

Tab. 22: Test vícenásobného porovnání pro měření 5% vlhkosti dřeva

Vícenásobné porovnání p hodnot (oboustr.); Vlhkost (Statistica - Kruskal-Wallis (neparametr. anova))						
Nezávislá (grupovací) proměnná : V1						
Kruskal-Wallisův test: H (3, N= 164) =128,5199 p =0,050						
Závislá: Vlhkost	Skutečná 5 R:51,220	Merlin 5 R:114,70	Gann 5 R:132,30	Elbez 5 R:31,780		
Skutečná 5		0,000000	0,000000	0,382917		
Merlin 5	0,000000		0,558884	0,000000		
Gann 5	0,000000	0,558884		0,000000		
Elbez 5	0,382917	0,000000	0,000000			

Tab. 23: Test vícenásobného porovnání pro měření 8% vlhkosti dřeva

Vícenásobné porovnání p hodnot (oboustr.); Vlhkost (Statistica - Kruskal-Wallis (neparametr. anova))						
Nezávislá (grupovací) proměnná : V1						
Kruskal-Wallisův test: H (4, N= 205) =159,2963 p =0,050						
Závislá: Vlhkost	Skutečná 8 R:50,122	Merlin 8 R:133,32	Gann 8 R:176,65	Elbez 8 R:37,280	Wagner 8 R:117,63	
Skutečná 8		0,000000	0,000000	1,000000	0,000003	
Merlin 8	0,000000		0,009429	0,000000	1,000000	
Gann 8	0,000000	0,009429		0,000000	0,000067	
Elbez 8	1,000000	0,000000	0,000000		0,000000	
Wagner 8	0,000003	1,000000	0,000067	0,000000		

Tab. 24: Test vícenásobného porovnání pro měření 12% vlhkosti dřeva

Vícenásobné porovnání p hodnot (oboustr.); Vlhkost (Statistica - Kruskal-Wallis (neparametr. anova))						
Nezávislá (grupovací) proměnná : V7						
Kruskal-Wallisův test: H (4, N= 205) =66,64817 p =0,050						
Závislá: Vlhkost	Skutečná 12 R:72,268	Merlin 12 R:101,00	Gann 12 R:146,11	Elbez 12 R:135,62	Wagner 12 R:60,000	
Skutečná 12		0,283147	0,000000	0,000013	1,000000	
Merlin 12	0,283147		0,005755	0,082306	0,017525	
Gann 12	0,000000	0,005755		1,000000	0,000000	
Elbez 12	0,000013	0,082306	1,000000		0,000000	
Wagner 12	1,000000	0,017525	0,000000	0,000000		

Tab. 25: Test vícenásobného porovnání pro měření 15% vlhkosti dřeva

Vícenásobné porovnání p hodnot (oboustr.); Vlhkost (Statistica - Kruskal-Wallis (neparametr. anova))						
Nezávislá (grupovací) proměnná : V10						
Kruskal-Wallisův test: H (4, N= 205) =98,32318 p =0,050						
Závislá: Vlhkost	Skutečná 15 R:123,88	Merlin 15 R:91,817	Gann 15 R:114,63	Elbez 15 R:153,63	Wagner 15 R:31,037	
Skutečná 15		0,144051	1,000000	0,231420	0,000000	
Merlin 15	0,144051		0,816006	0,000024	0,000035	
Gann 15	1,000000	0,816006		0,029146	0,000000	
Elbez 15	0,231420	0,000024	0,029146		0,000000	
Wagner 15	0,000000	0,000035	0,000000	0,000000		

Tab. 26: Test vícenásobného porovnání pro měření 18% vlhkosti dřeva

Vícenásobné porovnání p hodnot (oboustr.); Vlhkost (Statistica - Kruskal-Wallis (neparametr. anova))						
Nezávislá (grupovací) proměnná : V13						
Kruskal-Wallisův test: H (4, N= 205) =92,24662 p =0,050						
Závislá: Vlhkost	Skutečná 18 R:131,59	Merlin 18 R:119,85	Gann 18 R:105,26	Elbez 18 R:132,41	Wagner 18 R:25,890	
Skutečná 18		1,000000	0,444803	1,000000	0,000000	
Merlin 18	1,000000		1,000000	1,000000	0,000000	
Gann 18	0,444803	1,000000		0,381882	0,000000	
Elbez 18	1,000000	1,000000	0,381882		0,000000	
Wagner 18	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000		

10.3 Vlastní snímky z průběhu experimentu



Obr. 54 a 55: Zjišťování hmotností a rozměrů vzorků v absolutně suchém stavu.



Obr. 56 a 57: Laboratorní sušárna INCUCELL 55 a uložení vzorků pro dosažení nulové vlhkosti.



Obr. 58 a 59: Měření vlhkosti přístroji Merlin PMI-E a Gann Hydromette Compact A



Obr. 60 a 61: Měření vlhkosti přístroji Elbez WHT-740 a Wagner L601-3



Obr. 62, 63 a 64: Klimatizační komora MEMMERT CTC 256, ovládací panel klimatizační komory a uložení vzorků pro klimatizování.