



Česká zemědělská univerzita v Praze

**Technická
fakulta**

Metody zjišťování vlhkosti dřevěných materiálů

Bakalářská práce

Autor práce: Jan Čapek

Katedra: Katedra mechaniky a strojnictví

Obor: Zemědělská technika

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Neuberger, Ph.D.

PRAHA 2022

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jan Čapek

Zemědělské inženýrství
Zemědělská technika

Název práce

Metody zjišťování vlhkosti dřevěných materiálů

Název anglicky

Methods for determining the moisture content of wooden materials

Cíle práce

Vypracování rešerše o metodách zjišťování vlhkosti dřevěných materiálů, provedení a vyhodnocení srovnávacích měření.

Metodika

1. Struktura práce by se co nejvíce měla přiblížit schématu:

A. Úvod

B. Materiál a metody

C. Výsledky

D. Diskuse

E. Závěr

V práci lze připustit sloučení bodů diskuse a závěru.

2. V bakalářské práci by měly být popsány metody zjišťování vlhkosti dřevěných materiálů a sestaven přehledu senzorů, které tyto principy využívají. Dostupnými přístroji by měly být provedeny srovnávací měření různých materiálů a jejich výsledky by měly být vyhodnoceny.

3. Práci je vhodné doplnit fotografiemi, schématy, grafy a tabulkami. Jednotlivé kapitoly a podkapitoly práce, rovnice, tabulky a obrázky je nutno číselně označovat a na toto značení se v textu odkazovat. Nedílnou součástí práce je i obsah, abstrakt, seznam použitých zkratk a symbolů, obrázků, tabulek a literatury.

Práce může být doplněna přílohami.

4. Při vypracování bakalářské práce je nutno dbát na respektování citačních pravidel dle ČSN ISO 690:2011.

5. Vedoucího práce je nutno čtvrtletně seznamovat s postupem zpracování zadaného tématu.

Doporučený rozsah práce

40 stran

Klíčová slova

vlhkost dřeva, senzor,

Doporučené zdroje informací

ČSN EN 13183-1. Vlhkost vzorku řeziva – Část 1: Stanovení váhovou metodou. Praha: Český normalizační institut, 2002.

ČSN EN 13183-2. Vlhkost vzorku řeziva – Část 2: Odhad elektrickou odporovou metodou. Praha: Český normalizační institut, 2004.

HORÁK, J. at al. Jak si doma stanovit vlhkost a výhřevnost dřeva? TZB-info. [online]. Topinfo s.r.o. 19.11.2012, ISSN 1801-4399. [cit. 31.01.2021]. Dostupné z:

<https://vytapani.tzb-info.cz/9300-jak-si-doma-stanovit-vlhkost-a-vyhrevnost-dreva>

JOHANSSON, J., BLOM, Å., DVINSKIKH, S. NMR-measurements for determination of local moisture content of coated wood. J Coat Technol Res 10, 601–607 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11998-013-9484-4>

Předběžný termín obhajoby

2021/2022 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Pavel Neuberger, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra mechaniky a strojnictví

Elektronicky schváleno dne 1. 2. 2021

doc. Ing. Pavel Neuberger, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2021

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 26. 03. 2022

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Metody zjišťování vlhkosti dřevěných materiálů" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 30. 3. 2022

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu doc. Ing. Pavlu Neubergerovi Ph.D. za ochotu, trpělivost, obětovaný čas a odborné vedení při psaní bakalářské práce. Poděkovat by chtěl také své rodině za podporu při studiu.

Metody měření vlhkosti dřevěných materiálů

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá popisem metod použitelných k měření vlhkosti dřeva. V teoretické části je popsáno rozložení a chování vody ve dřevě a její vliv na fyzikální vlastnosti dřeva. Cílem práce bylo popsat přímé a nepřímé metody měření vlhkosti dřevěných materiálů, rozebrat jejich výhody a nevýhody, porovnat je mezi sebou a určit vhodnou oblast jejich použití. Měření proběhlo na celkem čtyřiceti vzorkách vyrobených ze čtyř různých dřevin (jasan, modřín, borovice a smrk) pomocí metody odporové, kapacitní a sorpční. Vzorky byly měřeny pětikrát v intervalu dvou měsíců, aby mohlo být porovnáno chování vlhkoměrů za různých podmínek. Naměřené hodnoty byly statisticky zpracovány a zobrazeny pomocí grafů a tabulek. Následné šetření vedlo ke zjištění, že hodnoty vlhkosti naměřené různými metodami se od sebe mohou výrazně lišit.

Klíčová slova: vlhkost dřeva, vlhkoměr, fyzikální vlastnosti dřeva, odporová metoda, kapacitní metoda, sorpční metoda

Methods for determining the moisture content of wooden materials

Abstract

This bachelor thesis deals with the description of methods applicable to the measurement of wood moisture. The theoretical part describes the distribution and behaviour of water in wood and its influence on the physical properties of wood. The aim of the thesis was to describe the direct and indirect methods of moisture measurement of wood materials, to discuss their advantages and disadvantages, to compare them with each other and to determine the appropriate area of their application. The measurements were carried out on a total of forty samples made of four different wood species (ash, larch, pine, and spruce) using resistance, capacitance, and sorption methods. The samples were measured five times in an interval of two months so that the behaviour of the moisture meters could be compared under different conditions. The measured values were statistically processed and displayed using graphs and tables. Subsequent investigations have led to the discovery that the moisture values measured by different methods can differ significantly from each other.

Keywords: wood moisture, moisture meter, physical properties of wood, resistance method, capacitance method, sorption method

Obsah

1. Úvod	10
2. Vlhkostní vlastnosti dřeva	11
2.1. Vlhkost dřeva	11
2.2. Rozložení vody ve dřevě	13
2.2.1. Mez nasycení buněčných stěn a mez hygroskopicity	14
2.2.2. Schnutí dřeva	15
2.2.3. Rozložení vlhkosti v kmeni stromu	16
2.3. Důsledky změn vlhkosti dřeva	16
2.3.1. Sesychání dřeva	17
2.3.2. Bobtnání dřeva	18
2.3.3. Borcení dřeva	18
3. Metody měření vlhkosti dřeva	20
3.1. Přímé metody měření vlhkosti dřeva	20
3.1.2. Gravimetrická metoda	20
3.1.3. Destilační metoda	21
3.2. Nepřímé metody měření vlhkosti dřeva	23
3.2.1. Odporová metoda	23
3.2.2. Kapacitní metoda	26
3.2.3. Mikrovlnná metoda	27
3.2.4. Sorpční metoda	28
3.2.5. Blízká infračervená spektroskopie (NIR)	28
3.2.6. Nukleární magnetická rezonance a neutronové záření	29
3.2.7. Metoda indikátorových papírků	29
4. Materiál a metody	30
4.1. Použité vzorky	30

4.1.1. Výběr dřevin.....	30
4.1.2. Průmyslové využití vybraných dřevin.....	30
4.1.3. Rozměry a vlastnosti vzorků	31
4.1.4. Příprava vzorků	33
4.2. Postup měření.....	34
4.3. Použité přístroje	35
4.3.1. Odporový vlhkoměr Testo 606-2	35
4.3.2. Kapacitní vlhkoměrná sonda Testo 0636 6160	38
4.3.3. Vlhkoměrná sonda Testo 0636 2135.....	39
4.3.4. Měřicí ústředna Testo 635-2.....	40
4.4. Statistické vyhodnocení	41
5. Výsledky.....	42
5.1. Porovnání dat naměřených odporovou a kapacitní metodou	42
5.2. Porovnání dat naměřených metodou odporovou, kapacitní a sorpční	43
5.3. Testování normality a shody metody odporové a kapacitní	44
5.4. Testování normality a shody v rámci stejné metody.....	48
6. Diskuze.....	50
7. Závěr	54
Seznam použitých zdrojů	56
Seznam obrázků.....	59
Seznam tabulek	60
Přílohy.....	61

1. Úvod

Dřevo je jedním z nejhojněji používaných materiálů. Je jedním z prvních materiálů, který člověk začal ke svým účelům používat a používá ho dodnes. K výhodám dřeva patří jeho nemalá pevnost, pružnost a univerzálnost využití. Dřevo lze snadno opracovávat a vzhledem k jeho přírodní textuře, barvě a vůni je hojně užíváno k estetickým účelům. Uplatnění nalézá také díky schopnosti dobře izolovat teplo a elektrický proud. Nelze opomenout ani výborné akustické vlastnosti a také fakt, že se jedná o udržitelný a obnovitelný zdroj, který lze získávat lokálně.

Jako hygrokopický materiál je dřevo po celou dobu své životnosti ovlivňováno okolní vlhkostí. Přijímání a odevzdávání vody má za následek změnu rozměrů a struktury dřeva, což může vést až k popraskání a porušení konstrukce. Z toho důvodu je při zpracovávání dřeva a výrobě dřevěných výrobků nutno brát v potaz prostředí, do kterého bude finální výrobek umístěn a tomu přizpůsobit výrobní vlhkost. S vlhkostí souvisí také riziko napadení dřeva dřevokaznými houbami. Ty napadají dřevo s vyšší vlhkostí a narušují jeho mechanické vlastnosti. Další nevýhodou dřeva, kterou je třeba brát v potaz zejména ve stavebnictví je jeho nižší odolnost vůči požáru v porovnání se silikátovými materiály (beton, cement).

V bakalářské práci jsou nejprve popsány základní termíny využívané při určování vlhkosti materiálů. Poté se práce zabývá rozložením vody obsažené ve dřevě a důsledky změn vlhkosti dřeva. Následně jsou popsány metody měření vlhkosti dřeva přímými a nepřímými metodami. Podrobněji se práce věnuje metodě gravimetrické, odporové a kapacitní, jelikož ty jsou v místních podmínkách nejčastěji používané. Dále je popsána příprava měřených vzorků použitých k experimentálnímu měření.

Cílem práce bylo porovnat mezi sebou různé metody měření vlhkosti dřeva. Pro účely měření byly připraveny vzorky jasanu, modřínu, borovice a smrku. Poté je popsán postup při měření metodou odporovou, kapacitní a sorpční pomocí přístrojů od společnosti Testo. Naměřené hodnoty absolutní vlhkosti byly následně statisticky zpracovány a zobrazeny pomocí tabulek a grafů. Diskuze se poté věnuje interpretaci výsledků, porovnání jednotlivých přístrojů a doporučení pro jejich konkrétní využití na základě získaných znalostí.

2. Vlhkostní vlastnosti dřeva

Dřevo je hygroskopický materiál, proto je schopné přijímat a odevzdávat vodu z okolí v plynném či kapalném skupenství. Dřevo je schopné přijímat i jiné kapaliny a plyny než vodu, ovšem obsah vody je z hlediska posuzování jeho fyzikálních vlastností nejdůležitější. (Gandelová et al., 2002)

2.1. Vlhkost dřeva

Pojmem vlhkost dřeva je označováno množství vody, které se v něm nachází. Vlhkost jakéhokoli materiálu lze vyjádřit absolutně nebo relativně a obvykle se vyjadřuje v %. Absolutní vlhkost w_a se vyjadřuje jako poměr hmotnosti vody ve vzorku k hmotnosti bezvodého vzorku. Relativní vlhkost w_r se vyjadřuje poměrem mezi hmotnostmi vody ve vzorku k hmotnosti celého vzorku. (Horáček, 1998)

$$w_a = \frac{m_v}{m_0} \cdot 100 = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 (\%) \quad (1)$$

$$w_r = \frac{m_v}{m_w} \cdot 100 = \frac{m_w - m_0}{m_w} \cdot 100 (\%) \quad (2)$$

Kde:

w_a – absolutní vlhkost (%),

w_r – relativní vlhkost (%),

m_v – hmotnost obsažené vody (g),

m_0 – hmotnost absolutně suchého dřeva (g),

m_w – hmotnost vlhkého dřeva (g).

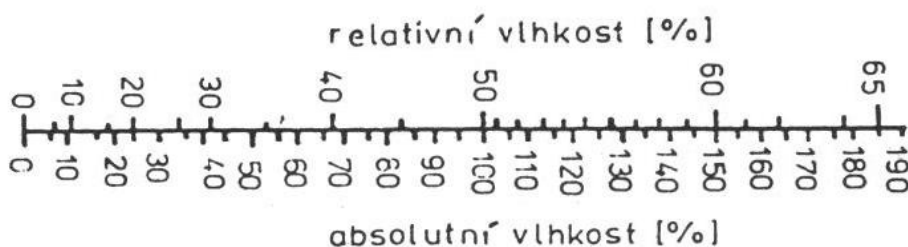
Pro přesné určení absolutní vlhkosti musí být vzorek dokonale vysušen. Za absolutně suchý je považován vzorek, který byl sušen v odvětrávané sušárně při teplotě 103 ± 2 °C až do doby, kdy přestal být patrný úbytek jeho hmotnosti (ČSN EN 844). Hlavní oblastí, kde se používá vyjádření obsahu vody v materiálu pomocí absolutní vlhkosti je dřevozpracující průmysl. Z toho důvodu bývá nazývána dřevařskou vlhkostí (Horák et al., 2012). Absolutní vlhkost také bývá užívána při popisu fyzikálních a mechanických vlastností dřeva (Horáček, 1998).

Relativní vlhkost se používá v případech, kdy je třeba znát poměrové zastoupení vody z celkové hmotnosti mokrého dřeva, tedy například při obchodu se dřevem pro účely spalování. Z toho důvodu bývá relativní vlhkost nazývána také energetickou vlhkostí (Horák et al., 2012).

Přepočet mezi absolutní a relativní vlhkostí lze provést pomocí následujících rovnic (Požgaj et al., 1993):

$$w_a = \frac{100 \cdot w_r}{100 - w_r} (\%) \quad (3)$$

$$w_r = \frac{100 \cdot w_a}{100 + w_a} (\%) \quad (4)$$



Obrázek 1 Nomogram pro vzájemný přepočet absolutní a relativní vlhkosti dřeva (Vanin, 1955)

Pro život a růst stromu je obsah vody ve dřevě nezbytný. Po skácení stromu je přílišná vlhkost dřeva nežádoucí a může způsobovat různé problémy při jeho dalším zpracování. Mezi záporné jevy spojené s obsahem vody ve dřevě patří například sesychání, bobtnání, borcení, růst plísní a hnilob a zapaření (Požgaj et al., 1993). V praxi bývá dřevo dle absolutní vlhkosti rozdělováno na tyto skupiny (Škára, 1996):

- Mokré dřevo ($w_a > 100 \%$) – dřevo dlouhodobě uložené ve vodě
- Syrové dřevo ($w_a = 50$ až 100%) – vlhkost čerstvě poraženého stromu
- Dřevo proschlé pro dopravu ($w_a < 25 \%$) – dřevo dostatečně proschlé pro zamezení tvorby plísní a hnilob
- Sušené dřevo – venkovní ($w_a = 15$ až 20%) – dlouhodobě sušené ve venkovních prostorech
- Sušené dřevo – vnitřní ($w_a = 8$ až 10%) – sušené ve vytápěných místnostech
- Absolutně suché dřevo ($w_a = 0 \%$) – vysušené v sušárnách při teplotách $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$

Při zpracovávání dřeva je třeba brát v potaz vlhkost prostředí, ve kterém bude finální výrobek používán. Proto byla zavedena technická vlhkost, která se u různých dřevěných výrobců liší v závislosti na účelu a prostředí jejich použití. Technickou vlhkost

lze dělit na výrobní vlhkost, která udává vlhkost prostředí, ve kterém byl výrobek vyroben a provozní vlhkost, což je předpokládaná vlhkost, ve které bude výrobek používán. Z důvodu předcházení nežádoucím deformačním změnám (sesychání a bobtnání) během užívání dřevěného výrobku by se výrobní vlhkost měla rovnat té provozní nebo být nepatrně nižší (přibližně o 1 až 2 %). (Matovič, 1993)

Provozní vlhkost [%]	Výrobek
5	dřevo určené pro elektricky nevodivé součásti, k elektrickým přístrojům
6	dýhy na vrtule pro letecký průmysl, dřevo na dýmky
7	dřevo pro hudební nástroje
8	násady, topora
9	parkety, dýhy pro konstrukční desky, nábytek obývacích pokojů, vnitřní okna
10	stoly, židle, hračky, sportovní potřeby, obklady stěn ve vytápěných místnostech
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 periodickým vytápěním, venkovní okna, šindele
14	venkovní dveře, zemědělské nářadí, železniční vagóny, bočnice aut a přívěsů
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 delšímu transportu
20	hranice napadení dřevokaznými houbami
25	dřevo pro tlakovou impregnaci, dřevo před pařením
27	hranice pro objemové změny vlivem dalšího úbytku vlhkosti

Tabulka 1 Provozní vlhkost některých dřevěných výrobků (Dejmal, 1995)

2.2. Rozložení vody ve dřevě

Vodu obsaženou ve dřevě můžeme dělit na chemicky vázanou, vázanou – hygrokopickou a volnou (Horáček, 1998; Požgaj et al., 1993):

a) Voda chemicky vázaná

Je součástí chemických sloučenin. Ve dřevě zůstane obsažena i po úplném vysušení, tedy i při nulové absolutní vlhkosti dřeva. Ze dřeva ji lze odstranit pouze spálením. Na fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva nemá takřka žádný vliv.

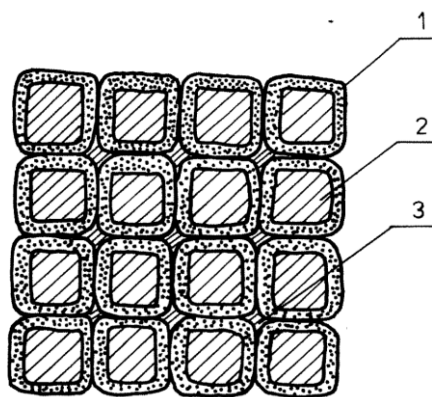
b) Voda vázaná – hygrokopická

Nachází se v buněčných stěnách. Je vázána vodíkovými můstky na hydroxylové skupiny -OH amorfni části celulózy a hemicelulóz. Ve dřevě je obsažena při absolutních

vlhkostech v rozmezí 0 až 30 % a zásadně ovlivňuje fyzikálních a mechanické vlastnosti dřeva.

c) Voda volná – kapilární

Je vázána silami kapilární povahy a vyplňuje lumény (buněčné dutiny) a mezibuněčné prostory. Předpokladem pro obsah volné vody ve dřevě je výskyt vody vázané, kterou je již zaplněn prostor buněčných stěn. Obsah volné vody se tak pohybuje od bodu nasycení vláken až po úplné nasycení dřeva vodou. Ve dřevě se začíná vyskytovat přibližně od absolutní vlhkosti 30 %, v závislosti na objemu lumenů buněk a mezibuněčných prostorů dřeviny (Gandelová et al., 2002). Na vlastnosti dřeva má podstatně menší vliv než voda vázaná.



Obrázek 2 Schéma uložení vody ve dřevě (Kurjatko, 1990)

*1 – voda vázaná – hygroscopická v buněčné stěně; 2 – voda volná v lumeně;
3 volná voda v mezibuněčném prostoru*

2.2.1. Mez nasycení buněčných stěn a mez hygroscopicity

Při hledání hranice mezi vodou volnou a vázanou a při pokusech tyto dvě skupiny odlišit je možné se řídit mezi nasycení buněčných stěn a mezi hygroscopicity (Gandelová et al., 2002).

Mez nasycení buněčných stěn MNBS je stav, ke kterému dochází při plném nasycení buněčné stěny vodou (Tiemann, 1906). V lumenech (buněčných dutinách) při MNBS není obsažena žádná voda v kapalném skupenství. Tento stav lze také popsat jako maximální vlhkost buněčných stěn dřeva, které bylo delší dobu ponořeno do vody. Absolutní vlhkost u nás rostoucích dřevin při MNBS se pohybuje v rozmezí 22 až 35 %, v závislosti na dřevině a roční době. Tuto veličinu nejvíce ovlivňuje anatomická a chemická stavba dřeva. Vliv teploty okolí je minimální. (Horáček, 1998)

Přesné určení MNBS je poměrně problematické, proto se při sledování hranice mezi vodou volnou a vázanou častěji používá mez hygroskopicity MH. Hodnota MH se na rozdíl od MNBS silně závislá na prostředí, do kterého je dřevo umístováno. Již to není voda v kapalném stavu, ale vzduch s relativní vlhkostí, která se blíží vlhkosti nasyceného vzduchu ($\varphi = 0,995 \%$). MH je hodnota rovnovážné vlhkosti, kterou dřevo dosáhne po dlouhodobém vystavení tomuto vzduchu. Z této vlastnosti plyne druhý rozdíl mezi veličinami a sice, že MH je silně ovlivňována teplotou prostředí. (Horáček, 1998)

MH [%]	Druh dřeva
22 - 24	jádrové dřevo jehličnanů s vysokým obsahem pryskyřice: <i>borovice, modřín, douglaska, vejmutovka, limba</i>
23 - 25	jádrové dřevo listnáčů s kruhovitě a polokruhovitě pórovitou stavbou dřeva: <i>akát, kaštanovník, dub, jasan, ořešák, třešeň</i>
26 - 28	jádrové dřevo jehličnanů s nižším obsahem pryskyřice: <i>borovice, modřín, douglaska</i>
30 - 34	jehličnatá dřeva s bělí a vyzrálým dřevem: <i>smrk, jedle</i>
32 - 35 a více	bělové dřevo jehličnatých dřevin s vyzrálým jádrem: <i>borovice, modřín listnatá</i> dřeva s roztroušeně pórovitou stavbou: <i>lípa, vrba, topol, olše, bříza, buk</i> bělové dřevo listnáčů s kruhovitě a polokruhovitě pórovitou stavbou: <i>akát, kaštanovník, dub, jasan, ořešák, třešeň</i>

Tabulka 2 Mez hygroskopicity u různých druhů dřev (Matovič, 1993)

2.2.2. Schnutí dřeva

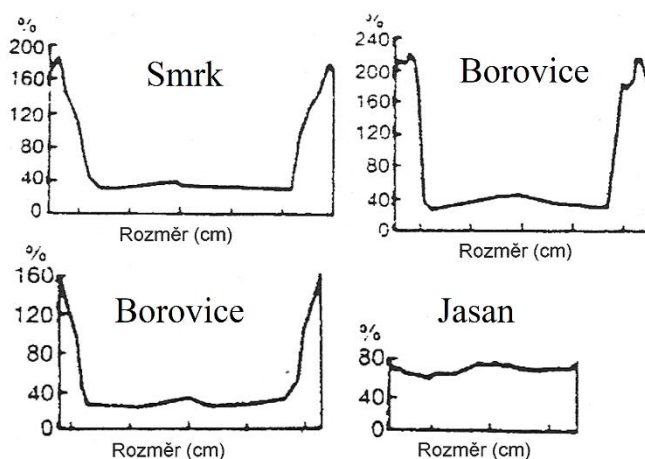
Obsah vody ve dřevě se začne snižovat ihned po skácení stromu. Nejprve se odpařuje volná voda, která se nachází v lumenech. V živém stromu tato voda obstarávala dopravu živných látek. Během odpařování volné vody nedochází k žádným změnám rozměrů či mechanických vlastností dřeva. Výpar volné vody pokračuje až k mezi nasycení buněčných stěn, což je stav, který nastává při vypaření veškeré volné vody. Od této hranice se začíná z buněčných stěn vypařovat voda vázaná. Tento proces je doprovázen změnami vlastností dřeva. Vázaná voda se vypařuje tak dlouho, dokud se vlhkost dřeva neustálí na rovnovážné vlhkosti. Její hodnota je daná v závislosti na vlhkosti a teplotě okolí.

Rychlost, jakou bude dřevo stromu vysychat, závisí na mnoha faktorech. Obecně se uvažuje platnost těchto pravidel (Brumovský a Rada, 1991):

- čím vyšší je teplota okolí, tím rychleji bude dřevo vysychat
- čím více hodnota vlhkosti dřeva vzdálena od rovnovážné vlhkosti, tím rychleji bude vysychat
- čím vyšší je objemová hmotnost dřeva, tím pomaleji vysychá
- čím větší je spád vlhkosti ve dřevě (rozdíl vlhkosti mezi dvěma místy ve vzdálenosti 1 cm), tím rychleji dřevo vysychá

2.2.3. Rozložení vlhkosti v kmeni stromu

V kmeni rostoucího stromu je obsah vody rozdělen nerovnoměrně. Mezi jehličnany a listnáči existují v rozložení vody pozorovatelné rozdíly. Ve dřevě jehličnanů je rozdíl v rozložení vlhkosti zvláště mezi jádrem (zralým dřevem) a bělí (vnější část dřeva). Běl jehličnanů zpravidla obsahuje 3–4krát více vody než jádro. Například běl smrku a borovice má průměrnou roční absolutní vlhkost v rozmezí 112 až 132 %, zatímco jejich jádro pouze 33 až 38 %. Také s rostoucí výškou se vlhkost kmene jehličnanů mění, zpravidla stoupá.



Obrázek 3 Rozložení vlhkosti dřeva rostoucího stromu v příčném řezu ve výšce 55 cm (Tsoumis, 1991)

U listnáčů, zvláště u těch bez jádra, nelze pozorovat tak markantní rozdíly ve vlhkosti po příčném řezu kmene. Obsah vody je ve dřevě listnatých stromů rozdělen mnohem rovnoměrněji. Absolutní vlhkost kmene listnáčů se pohybuje v rozmezí 70 až 90 %. S rostoucí výškou zůstává, narozdíl od jehličnanů, obsah vody ve dřevě takřka neměnný.

Obecně se vlhkost dřeva mění také s denní dobou. Například běl dubu může mít ráno absolutní vlhkost 68 %, v poledne 72 % a večer 66 %. U jehličnanů je kolísání způsobené vlivem denní doby ještě znatelnější. Na vlhkost dřeva má vliv také roční období, kdy během zimy dosahuje vlhkost kmene svého maxima a v létě je nejnižší.

2.3. Důsledky změn vlhkosti dřeva

Při změnách vlhkosti dřeva v intervalu od meze nasycení buněčných stěn do úplného vyschnutí nastávají změny v rozměrech, struktuře a vlastnostech dřeva.

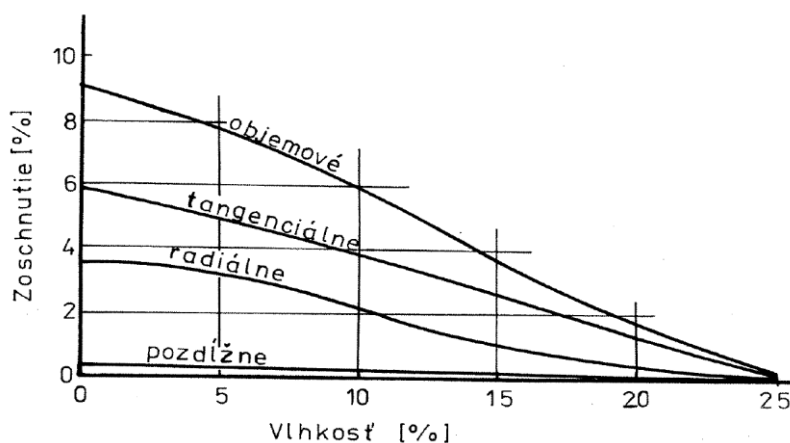
2.3.1 Sesychání dřeva

Při vysychání dochází k úbytku vody ze dřeva vypařováním. V důsledku úbytku vázané vody z prostoru buněčných stěn se mění rozměry dřeva. Při sesychání dochází ke zmenšení lineárních rozměrů a objemu. V praxi bývá sledováno celkové sesychání, které udává celkovou změnu rozměrů při vysychání od meze nasycení buněčných stěn až po absolutní vyschnutí. Lineární sesychání je nejlépe pozorovatelné v tangenciálním směru, kde dochází k úbytku 3 až 6 %. V menší míře se rozměry mění ve směru radiálním a takřka neregistrovatelná je změna ve směru podélném. V letním dřevě není rozdíl mezi tangenciálním a radiálním sesycháním tak výrazný, jako ve dřevě jarním. U objemového sesychání dochází ke zmenšení celkového objemu dřeva o 12 až 15 % (Pecina a Pecina, 2006). Zmenšení rozměrů vlivem sesychání lze v % vyjádřit vztahem (Požgaj et al., 1993):

$$\alpha_i = \frac{\alpha_{iw1} - \alpha_{iw2}}{\alpha_{iw1}} \cdot 100 (\%) \quad (5)$$

Kde:

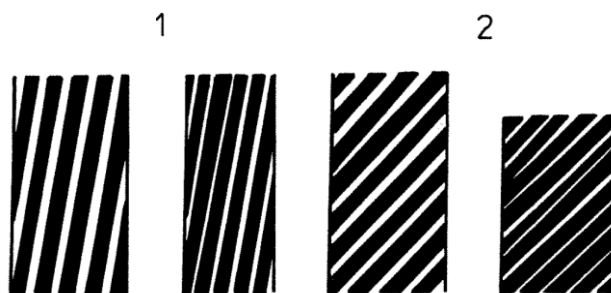
α_{iw1} – lineární rozměr v libovolném směru, plocha, či objem před sesycháním,
 α_{iw2} – stejná veličina jako α_{iw1} po vyschnutí.



Obrázek 4 Míra sesychání v jednotlivých směrech v závislosti na vlhkosti dřeva
(Panshin a Zeeuw, 1970)

Na základě objemového sesychání se dřeviny dělí do tří následujících skupin (Horáček, 1998):

- Dřeva málo sesýchavá – tis, olše, vrba, topol, kaštanovník, limba, akát
- Dřeva středně sesýchavá – borovice, smrk, jedle, dub, jilm, jasan, javor, ořešák, osika
- Dřeva velmi sesýchavá – modřín, bříza, buk, habr, lípa



Obrázek 5 Zmenšení rozměrů dřeva vlivem sesychání (Perelygin, 1965)

1 - po směru vláken; 2 - napříč směru vláken; černé pásy - mikrofibrily; bílé pásy - vrstvy

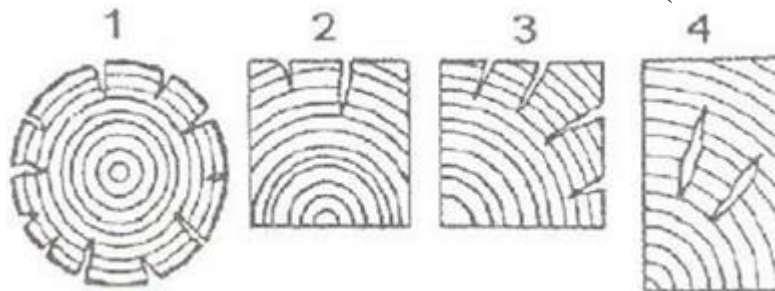
2.3.2. Bobtnání dřeva

Opačný proces k sesychání dřeva je bobtnání. Tento děj nastává, když dřevo přijímá okolní vodu a ukládá ji jako vodu vázanou. To je doprovázeno zvětšením rozměrů dřeva, obdobně jako při sesychání, ve třech základních směrech a objemově. Bobtnání může probíhat v intervalu od absolutně suchého dřeva do stavu nasycení buněčných stěn, další přijímání vody žádnou změnu rozměrů nevyvolá, jelikož veškerá další voda je dále ukládána do lumenů. (Pecina a Pecina, 2006)

Nežádoucí rozměrovou nestálost lze eliminovat například tepelným ošetřením dřeva. Toto opatření bývá často užíváno při stavbě dřevěných podlah. Dalšími způsoby stabilizace rozměrů dřeva může být napouštění olejem, pryskyřicí či kyselinou octovou. Redukovat rozměrovou nestálost lze také lepením dřeva do kříže nebo lepením na dřevěný podklad. (Artisan s.r.o.)

2.3.3. Borcení dřeva

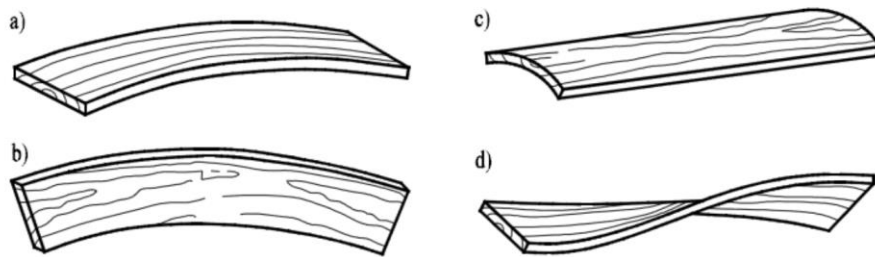
Při nerovnoměrném vypařování vázané vody vzniká vnitřní napětí. To lze dělit na dvě složky – vlhkostní a zbytkové. Vlhkostní napětí je pružné, má dočasný charakter a po vyrovnání vlhkosti ve dřevě zaniká. Zbytkové napětí vzniká při příliš rychlém sesychání, je trvalého charakteru a může mít za následek vznik trhlin ve dřevě. (Pecina a Pecina, 2006)



Obrázek 6 Praskliny ve dřevě způsobené vnitřním napětím (Perelygin, 1965)

1,2,3 – povrchové trhliny; 4 – vnitřní trhliny

Vznikající vnitřní napětí vyvolané anizotropním charakterem sesychání dřeva má za následek změnu jeho tvarů. Tento děj se nazývá borcení dřeva a lze ho pozorovat v příčném i podélném směru řeziva. V příčném směru je dřevo borceno z důvodu rozdílného tangenciálního a radiálního sesychání za vzniku žlábkovité prohnutí. V podélném směru vzniká borcení kvůli rozdílnému sesychání bělového a jádrového dřeva za vzniku prohnutí či stočení řeziva. (Gandelová et al., 2002)



Obrázek 7 Typy borcení dřeva (Svoboda, 2018)

a – podélné plošné; b – podélné boční; c – příčné; d - šroubovitě

3. Metody měření vlhkosti dřeva

Metody zjišťování vlhkosti dřeva jsou děleny do dvou skupin na přímé a nepřímé. Přímé metody, taktéž označovány jako absolutní, fungují na principu zjišťování skutečného obsahu vody ve dřevě, nejčastěji vážením. Oproti tomu nepřímé metody, zvané taktéž relativní, spočívají v měření jiné veličiny, jejíž hodnota na vlhkosti dřeva závisí (například elektrický odpor nebo relativní permitivita).

3.1 Přímé metody měření vlhkosti dřeva

Při měření vlhkosti přímými metodami je třeba oddělit vodu obsaženou ve vzorku od pevné fáze. Nejčastěji používané metody jsou gravimetrická a destilační.

3.1.2. Gravimetrická metoda

Měření gravimetrickou metodou spočívá ve zjištění hmotnosti vzorku před a po vysušení do absolutně suchého stavu. Z tohoto důvodu bývá metoda v praxi často označována jako váhová. Metoda má destruktivní charakter. Měření vlhkosti gravimetrickou metodou je velmi přesné, proto se používá jako referenční metoda při zkoušení přesnosti elektrických vlhkoměrů (Gandelová et al., 2002).

Postup měření gravimetrickou metodou popisuje norma ČSN EN 13183-1 z roku 2002. Z kusu měřeného řeziva je třeba vyříznout zkušební těleso, které musí být bez vad. Následně je třeba těleso zvážit. Vážení by mělo proběhnout co nejdříve po vyříznutí vzorku, aby nedošlo ke zkreslení výsledků. Zvážený vzorek je poté umístěn do sušárny, která by měla disponovat vnitřní cirkulací vzduchu. V sušárně je vzorek sušen při teplotě 103 ± 2 °C. V intervalu 2 h je vzorek vážen do té doby, dokud rozdíly ve dvou váženích po sobě nejsou menší než 0,1 %. Po vysušení vzorku do absolutně suchého stavu lze vypočítat absolutní vlhkost řeziva podle následujícího vzorce (ČSN EN 13183-1):

$$w_a = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100 (\%) \quad (6)$$

Kde:

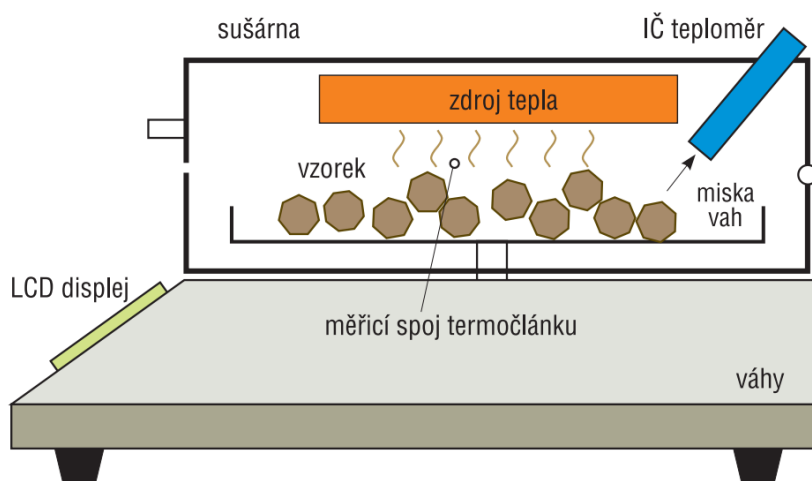
w_a – absolutní vlhkost (%),

m₁ – hmotnost vzorku před sušením (g),

m₂ – hmotnost vzorku po vysušení (g).

Hodnoty zjištěné pomocí gravimetrické metody jsou považovány za velmi přesné a lze je použít k potvrzení hodnot naměřených elektrickými vlhkoměry a k jejich kalibraci (Dietsch et al., 2014). Nevýhodou gravimetrické metody je časová náročnost, zapříčiněná dlouhou dobou sušení vzorků. Mezi další nevýhody lze zařadit nemožnost kontinuálního měření (Horáček, 1998). Příprava vzorků je pracná. Při měření vlhkosti například dřevěných krovů je zkušební těleso vyřezáno přímo z konstrukce, což může negativně ovlivnit její únosnost. Při měření je třeba mít přístup k sušárně, z tohoto důvodu nelze provádět měření in-situ (na místě). Další problémy při měření se mohou vyskytnout, pokud byly vzorky ošetřené impregnací nebo mají vyšší obsah pryskyřice, která má při sušení tendenci vytékat ze dřeva.

Měření gravimetrickou metodou využívají i některé přístroje. Pro měření vlhkosti dřeva lze využít halogenové a infračervené sušicí váhy. Sušicí váha je zařízení, která kombinuje funkci sušárny a váhy. U klasické sušárny probíhá sušení pomocí horkého vzduchu, zatímco například halogenové sušicí váhy využívají záření, které proniká dovnitř zkušebního tělesa a mění se v tepelnou energii. Díky tomu dochází k ohřevu vzorku směrem zevnitř ven, což má za následek kratší dobu sušení. Ta se tak může pohybovat mezi 20 až 70 minutami. (Baláš a Moskalík, 2009)

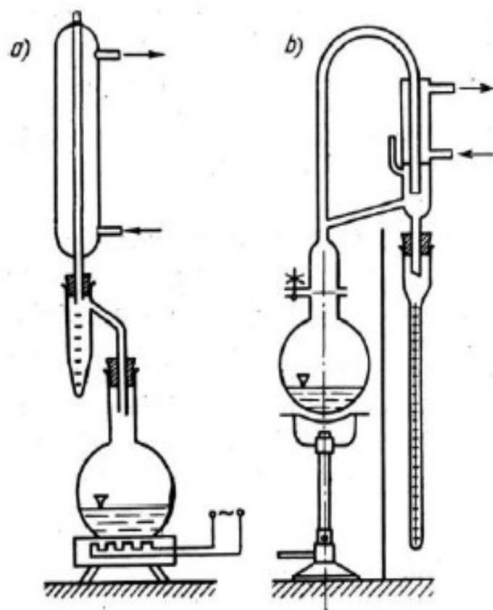


Obrázek 8 Schéma sušicí váhy (Kopecký a Kadlec, 2019)

3.1.3. Destilační metoda

Principem destilační metody je zjištění vlhkosti na základě změřeného objemu vody odděleného ze vzorku při destilaci. Svě uplatnění nachází zejména jako náhrada za metodu gravimetrickou při zjišťování vlhkosti dřeva ošetřeného impregnací (Požgaj et al., 1993).

Separace probíhá ve speciálně sestavené destilační aparatuře a jako rozpouštědlo bývá používán xylen. Z toho důvodu je v praxi destilační metoda často nazývána jako xylenová.



Obrázek 9 Destilační aparatura ke stanovení vlhkosti (Bašus, 1965)
a) s otevřenou chladicí předlohou; b) s uzavřenou chladicí předlohou

Měřený vzorek musí být nejprve zvážen a poté ve formě pilin či třísek vložen do baňky s rozpouštědlem. Hmotnost vzorku se pohybuje v rozmezí 20 až 50 g. Rozpouštědlo musí být nemísitelné s vodou, nejčastěji bývá používán xylen či toluen. Baňka je následně zahřívána ve vodní lázni a ze vzorku se vypařuje obsažená voda. Páry xyleny strhávají páry vodní a poté kondenzují v chladiči. Kondenzát se následně hromadí v destilační předloze, ze které se po skončení destilace odečte množství vody vypařené ze vzorku. Díky odlišné hustotě vody a rozpouštědla se voda drží u dna destilační předlohy, a je tak možný odečet jejího množství. Výsledná absolutní vlhkost vzorku se dopočítá dosazením do vzorce pro výpočet absolutní vlhkosti (1). (Dietsch et al., 2014)

Výhodou použití destilační metody pro zjištění vlhkosti dřeva je její vysoká přesnost. Mezi nevýhody patří časová náročnost zkoušky, vyšší finanční náklady a potřeba zručné obsluhy s vybavenou laboratoří (Matovič, 1993). Při provádění měření hrozí riziko vzniku požáru. Metoda má destruktivní charakter a nelze ji použít ke kontinuálnímu měření. Destilační metodou lze měřit vlhkost pouze malých vzorků, díky čemuž vznikají nepřesnosti při měření vlhkosti nehomogenních materiálů (Baláš a Moskalík, 2009).

3.2 Nepřímé metody měření vlhkosti dřeva

Přístroje využívající nepřímých metod měření vlhkosti neměří obsah vody v materiálu, ale určují ho na základě jiné naměřené veličiny. Pro zjištění vlhkosti materiálu je tedy třeba užít již dříve zjištěných korelací mezi měřenou veličinou a vlhkostí vzorku. Vztahy mezi vlhkostí dřeva a jinými veličinami je třeba dopředu zjistit teoreticky nebo empiricky. (Požgaj et al., 1993)

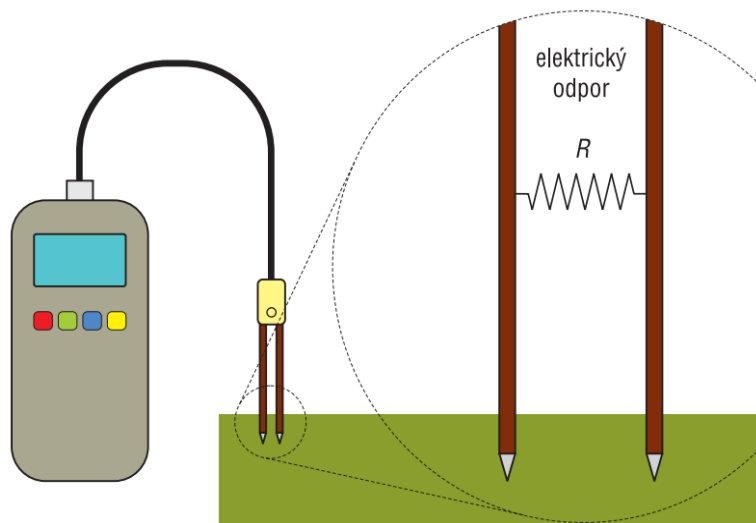
Výhodou většiny nepřímých metod je rychlost měření. Nepřímé metody bývají také použitelné pro kontinuální měření. Nejčastěji jsou používané elektrické vlhkoměry, užívající odporovou a kapacitní metodu měření. Ty vynikají rychlostí měření, jednoduchou konstrukcí a s ní spojenou nižší pořizovací cenou. Nevýhodou elektrických vlhkoměrů bývá jejich přesnost, která je v porovnání s metodami přímými nižší.

3.2.1. Odporová metoda

Elektrické odporové vlhkoměry jsou nejběžněji používané přístroje na měření vlhkosti dřevěných materiálů. Vyznačují se jednoduchou konstrukcí a z ní plynoucí nízkou pořizovací cenou. Tyto klady jsou ovšem vykoupeny nižší přesností měření v porovnání s ostatními metodami. Měření odporovou metodou funguje na principu zjištění elektrického odporu R_{vz} vzorku, který je pomocí integrovaných charakteristik přepočítáván na absolutní vlhkost. (Baláš a Moskalík, 2009)

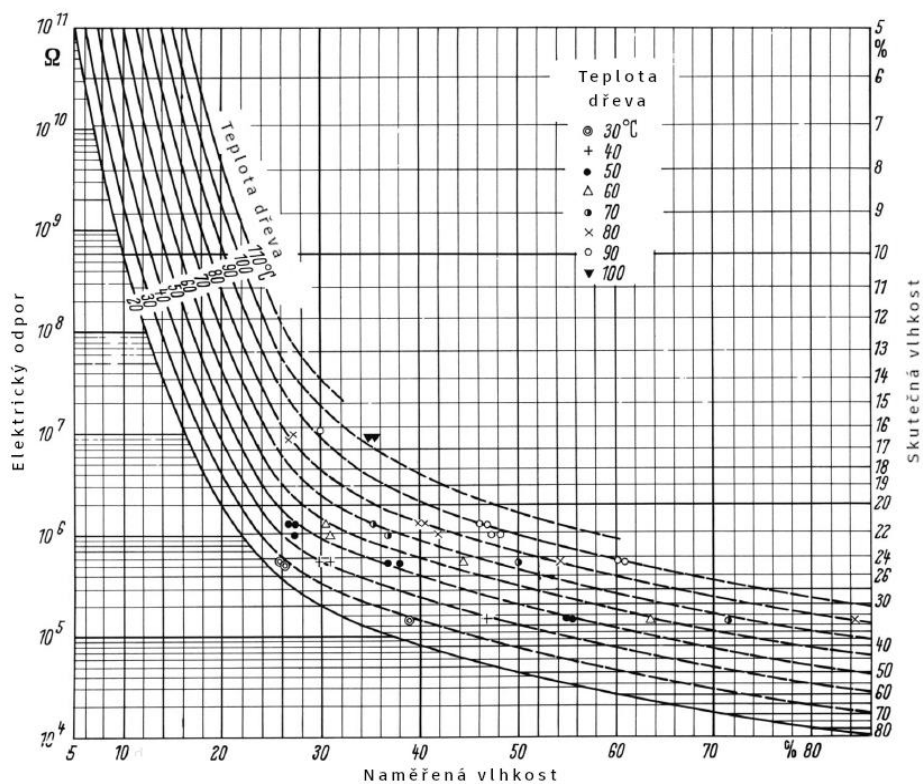
Odhadem vlhkosti dřevěného vzorku se zabývá norma ČSN EN 13183-2 z roku 2002. Slovo odhad v názvu normy naznačuje skutečnost, že odporová metoda má znatelně nižší přesnost než metoda gravimetrická. Norma předepisuje, že před začátkem měření musí být vlhkoměr zkalibrován dle pokynů výrobce a seřízen podle druhu měřené dřeviny a jeho teploty.

Měření probíhá pomocí měřicích elektrod, které se nejčastěji skládají ze dvou kovových hrotů, přibližně 10 až 25 mm dlouhých a několik desítek milimetrů od sebe vzdálených. Pro změření je nutno elektrody zabodnout do měřeného vzorku dřeva, a to zpravidla po směru vláken. Mezi zabodnutými elektrodami prochází elektrický proud I_{vz} a měří se elektrické napětí U_{vz} . Odporové vlhkoměry pracují se stejnosměrným proudem a díky tomu lze použitím Ohmova zákona dopočítat elektrický odpor R_{vz} (Kopecký a Kadlec, 2019). Měření má bodový charakter a při měření větších kusů řeziva je třeba ho opakovat na různých místech.



Obrázek 10 Měření vlhkosti odporovým vlhkoměrem (Kopecký a Kadlec, 2019)

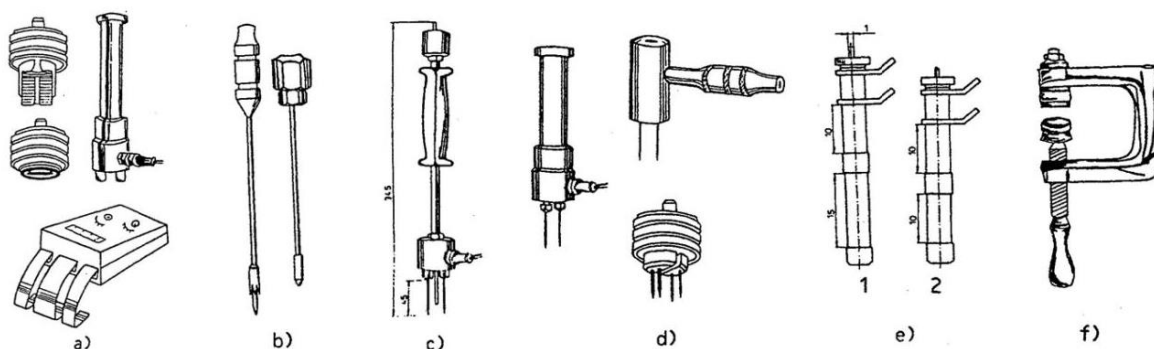
Elektrický odpor klesá s rostoucí vlhkostí vzorku díky tomu, že obsažená voda má mnohem vyšší vodivost než dřevo. Odpor klesá také s rostoucí teplotou vzorku. Díky znalosti těchto korelací může vlhkoměr pomocí integrovaných charakteristik přepočítat odpor na vlhkost vzorku. Některé vlhkoměry těmito charakteristikami nedisponují a přepočet je nutno dělat pomocí konverzních tabulek. (Dietsch et al., 2014)



Obrázek 11 Vliv vlhkosti a teploty na elektrický odpor dřeva
(upraveno podle Keylwerth a Noack, 1956)

Důvodem nižší přesnosti odporových vlhkoměrů je skutečnost, že dřevo je velmi dobrý izolant. Elektrický odpor dřeva se v závislosti na vlhkosti vzorku pohybuje v intervalu od několika stovek $k\Omega$ až po desítky $G\Omega$ (James, 1988). Takto vysoké hodnoty elektrického odporu jsou obtížně měřitelné, proto přesnost odporových vlhkoměrů prudce klesá při měření vzorků s absolutní vlhkostí nižší než 6 %. Znatelné zhoršení přesnosti nastává také při vlhkostech vyšších, než je stav nasycení buněčných stěn (Dietsch et al., 2014). Příslušná norma ČSN EN 13183-2 proto doporučuje měření odporovou metodou pro řezivo s absolutní vlhkostí v rozmezí 7 až 30 %.

Pro zaručení relevantních výsledků měření je důležitý spolehlivý kontakt měřících elektrod se dřevem. V opačném případě se uplatňuje přechodový elektrický odpor a vlhkoměr ukazuje menší než reálné hodnoty. Existuje několik typů měřících elektrod, které se liší svojí konstrukcí. Například zarážecí elektrody nacházejí své uplatnění při měření méně homogenních kusů řeziva, u kterých je vlhkost rozdělena nerovnoměrně. Za to přitlačné elektrody jsou vhodné pro měření vlhkosti dřevěných dých, jelikož měří vlhkost v menší hloubce (Gandelová et al., 2002). Podle konstrukce lze měřící elektrody dělit na:



Obrázek 12 Typy měřících elektrod elektrických odporových vlhkoměrů (Makovíny, 1995)

- a) přitlačné; b) hloubkové; c) d) zarážecí (jehlové);
e) zvláštní (válcové, kombinované); f) upínací (svorkové)

Výrobou odporových vlhkoměrů se zabývají například firmy Ahlborn, GANN, Greisinger, Testo, Elbez a další. Cena odporových vlhkoměrů se v závislosti na provedení pohybuje v rozmezí přibližně 500 až 10 000 Kč.

3.2.2. Kapacitní metoda

Další nepřímou metodou využívající elektrické vlastnosti dřeva je metoda kapacitní. V praxi jsou kapacitní vlhkoměry používány hlavně v USA, v Evropě je možné se s kapacitním vlhkoměrem setkat ojediněle a převládá zde používání odporových vlhkoměrů (Gandelová et al., 2002).

Při měření kapacitní metodou se využívá vysoké relativní permitivity vody ($\epsilon_r = 80$), díky které mají vzorky s vyšší a nižší vlhkostí odlišné dielektrické chování (Kopecký a Kadlec, 2019). Kapacitní vlhkoměr měří místo elektrického odporu (který je pro svou vysokou hodnotu zvláště u sušších vzorků obtížně měřitelný) čas t (s) potřebný k nabití kondenzátoru C (F) přes rezistor R (Ω). Rezistor v tomto případě tvoří měřený vzorek. Metoda vychází ze vztahu pro napětí na kondenzátoru $u(t)$ (V) nabíjeném přes odpor s napájecím napětím U (V) (Mlejnek et al., 2015):

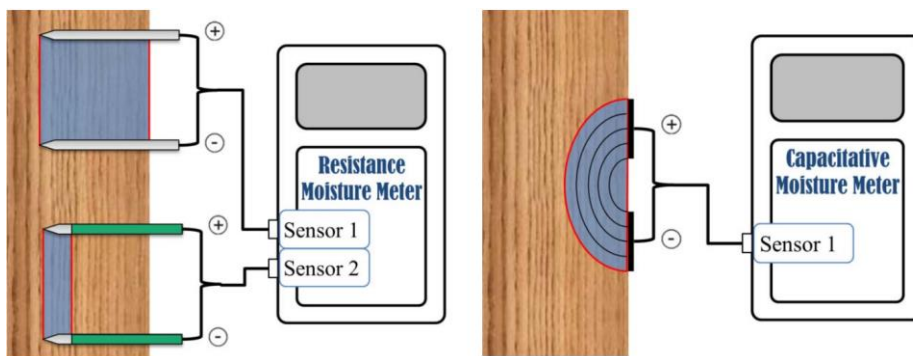
$$u(t) = U \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (7)$$

V případě kapacitního vlhkoměru je známo napájecí napětí U (V), čas t (s), napětí na kondenzátoru v tomto čase $u(t)$ (V) a velikost kondenzátoru C (F), tudíž lze vyjádřit měřený odpor pomocí vzorce:

$$R = - \frac{t}{C \cdot \ln \left(1 - \frac{u(t)}{U} \right)} \quad (8)$$

Měřením vlhkosti dřeva kapacitní metodou se zabývá norma ČSN EN 13183-3 z roku 2005. Norma uvádí, že kapacitním měřením se provádí pouze odhad vlhkosti řeziva. Dále doporučuje použití kapacitních vlhkoměrů k měření vzorků s absolutní vlhkostí v rozmezí přibližně 7 až 30 %. Před začátkem měření musí být kapacitní vlhkoměr nastaven dle hustoty měřeného dřeva. Mezi měřeným materiálem a kondenzátorovou deskou vlhkoměru musí být zajištěn dobrý kontakt bez vzduchových mezer.

Elektrické kapacitní vlhkoměry mohou používat dva typy elektrod. Pro měření vlhkosti vzorků s rovným povrchem jsou používány elektrody s kondenzační deskou. Kondenzační deska je plochá elektroda, která se nachází přímo na vlhkoměru. Pokud je použita na jiný než hladký povrch, vznikají mezi měřeným vzorkem a elektrodou vzduchové bubliny. Pro členitější povrch jsou tak vhodnější vlhkoměry s povrchovými pružinovými elektrodami, které se lépe přizpůsobí povrchu a zajišťují lepší kontakt s měřeným materiálem (Kloiber a Drdácký, 2015).



Obrázek 13 Schéma měření vlhkosti odporovou a kapacitní metodou (Dietsch et al., 2014)

Na našem trhu lze zakoupit kapacitní vlhkoměry od výrobců Voltcraft, Testo, Laserliner, Greisinger, Ahlborn a dalších. Jejich cena se pohybuje v rozmezí přibližně 1 000 až 8 000 Kč.

3.2.3. Mikrovlnná metoda

Měření vlhkosti materiálu mikrovlnnou metodou se podobá metodě kapacitní, užívá však elektromagnetických vln s vyšší frekvencí. Mikrovlny mívají frekvenci v rozmezí 1 až 100 GHz s rozsahem vlnových délek 1000 až 1 nm. Voda obsažená ve dřevě absorbuje procházející mikrovlnné záření mnohem silněji než samotné vysušené dřevo. Mikrovlnné záření se tak mnohem lépe šíří v dielektriku a dielektrické vlastnosti dřeva závisí na jeho vlhkosti. (Požgaj et al., 1993)

Míra, ve které je elektromagnetické mikrovlnné záření pohlcováno, je tím větší, čím je prostředí ve vytvořeném mikrovlnném poli hustější. Útlum také roste se schopností molekul v poli se natáčet a deformovat. Molekuly vody obsažené ve dřevě se mohou natáčet velmi snadno, proto vzorek s vyšší vlhkostí pohlcuje mikrovlnné záření intenzivněji. (Baláš a Moskalík, 2009)

Mikrovlnný vlhkoměr se obvykle skládá z generátoru mikrovlnného záření, detektoru pohlcení a měřicí jednotky. Výhodou mikrovlnné metody je schopnost měřit vlhkost v hloubce desítek centimetrů (Testo s. r. o., 2015), což je nesrovnatelně hlouběji, než dokáží metody odporové a kapacitní. Další výhodou mikrovlnné metody je vyšší přesnost. Nevýhodou zůstává daleko vyšší pořizovací cena v porovnání s ostatními elektrickými vlhkoměry.

Mikrovlnné vlhkoměry se používají spíše pro měření vlhkosti stavebních materiálů. Cena mikrovlnných vlhkoměrů se pohybuje mnohem výše, než častěji používaných přístrojů

na bázi odporové a kapacitní. Výrobou mikrovlnných vlhkoměrů se zabývají například firmy Trotec a Moist a jejich cena se pohybuje v rozmezí 20 000 až 100 000 Kč.

3.2.4. Sorpční metoda

Měření vlhkosti materiálů sorpční metodou využívá charakteristiky sorpční izoterm, která při konstantní teplotě popisuje vztah mezi relativní vzdušnou vlhkostí a rovnovážnou vlhkostí dřeva.

Před začátkem měření vlhkosti sorpční metodou je třeba do měřeného vzorku navrtat otvor a do něj následně vložit měřicí sondu. Vrchol otvoru je poté třeba utěsnit například plastickou hmotou. Relativní vlhkost v dutině se poté začne přizpůsobovat vlhkosti materiálu díky hygroskopičnosti dřeva. Po vyrovnání rovnovážné vlhkosti v dutině je uvnitř měřicí sonda schopna změřit relativní vlhkost, kterou je poté možno použitím sorpční izoterm přepočítat na absolutní vlhkost materiálu. (Dietsch et al., 2014)

Sorpční metodou lze měřit i jiné materiály, často bývá použita k měření vlhkosti betonu. Díky příznivým hygroskopickým vlastnostem dřeva je ale nejlépe uplatnitelná právě pro měření dřevěných materiálů, u kterých dochází k podstatně rychlejšímu vyrovnání rovnovážné vlhkosti (Niemz, 2003).

Výrobou sorpčních vlhkoměrů se zabývají například firmy Proceq a Testo. Cena sondy Testo 0636 2135, která byla použita k experimentálnímu měření se pohybuje okolo 10 000 Kč.

3.2.5. Blízká infračervená spektroskopie (NIR)

Při měření metodou NIR (near infrared spectroscopy) je na měřený vzorek posíláno záření o vlnové délce 800 až 2500 nm. Záření o těchto vlnových délkách je schopno projít do materiálu hlouběji než záření infračervené (až několik centimetrů). Část záření materiál absorbuje, zbytek jím projde nebo se odrazí. Odražené záření zachycuje detektor a ze získaných hodnot vytváří přístroj infračervené spektrum daného materiálu. Z vytvořeného spektra lze vyčíst informace o chemickém složení, hustotě a vlhkosti měřeného materiálu. (Nyström a Dahlquist, 2004)

3.2.6. Nukleární magnetická rezonance a neutronové záření

Mezi další metody používané k měření vlhkosti materiálů patří nukleární magnetická rezonance. Touto metodou lze zjistit počet atomů vodíků obsažených v měřeném materiálu a z něj určit jeho absolutní vlhkost (Johansson et al., 2013). Na podobném principu funguje metoda neutronového záření, při které se pro zjištění počtu atomů vodíků nepoužívá magnetické pole, ale proudy rychlých neutronů. Ty jsou vodíkovými jádry zpomalovány a množství přítomných atomů vodíku se poté přepočítá pomocí hodnot naměřených detektorem pomalých neutronů (Baláš a Moskalík, 2009). Naměřené hodnoty vlhkosti obou metod mohou být ovlivněny přítomností atomů vodíku, které ale tvoří molekuly vody.

3.2.7. Metoda indikátorových papírků

Vlhkost dřeva lze měřit také užitím indikátorových papírků, které se po ponoření chloridu kobaltnatého vloží do vyvrtaného otvoru ve dřevě. Papírek poté změní svou barvu v závislosti na vlhkosti měřeného řeziva. Tuto metodu lze užít pro řezivo s absolutní vlhkostí v rozmezí 6 až 20 %. (Dietsch et al., 2014)

4. Materiál a metody

4.1. Použité vzorky

Pro účely zkušebního měření bylo připraveno čtyřicet vzorků ze čtyř různých dřevin.

4.1.1. Výběr dřevin

Hlavním požadavkem při výběru dřevin, ze kterých budou zkušební vzorky vyrobeny, bylo zastoupení alespoň jednoho jehličnanu a jednoho listnáče. Rovněž byla snaha přizpůsobit měření místním provozním podmínkám. Nejrozšířenější jehličnany dle plochy v ČR jsou smrk, borovice a modřín (Ministerstvo zemědělství). Při zjišťování přesnosti kapacitních vlhkoměrů na dřevo se jako zkušební materiál používá smrk, borovice a libovolný listnáč (ČSN EN 13183-3). Po přihlédnutí k těmto faktům byly pro účel přípravy zkušebních vzorků vybrány tyto dřeviny: smrk ztepilý (*Picea abies*), borovice lesní (*Pinus sylvestris*), modřín opadavý (*Larix decidua*) a jasan ztepilý (*Fraxinus excelsior*). Tímto výběrem bylo zaručeno zastoupení jak jehličnanu a listnáče, tak i měkkého a tvrdého dřeva, což rozšiřuje podmínky, pro které může být přesnost vlhkoměru zkoušena.

4.1.2. Průmyslové využití vybraných dřevin

Smrk

Nejdostupnější dřevo v České republice je smrkové. Lze ho považovat za pevný a pružný materiál, který se řadí mezi měkké dřeviny. Tyto vlastnosti se uplatňují v nadzemních a podzemních stavbách, truhlářství a nábytkářství. Ze smrku je také vyráběn papír a je zdrojem rezonančního dřeva pro výrobu některých hudebních nástrojů. Smrkové dřevo bývá považováno za méně trvanlivé. Tuto zápornou vlastnost lze ovlivnit například vhodnou impregnací. (Vavrčík, 2004)

Borovice

Druhá nejrozšířenější dřevina na našem území je borovice. Její dřevo je tvrdší, než smrkové a lze ho využít ke konstrukčním účelům. Borové dřevo má výraznou kresbu, a proto bývá často používáno v truhlářství a k výrobě nábytku. Obsahuje větší množství pryskyřice, což znesnadňuje opracování povrchu a obrábění, ale přináší uplatnění v chemickém průmyslu, například při výrobě terpentýnu. (Vavrčík, 2004)

Modřín

Dřevo modřínu je považováno za jedno z nejkvalitnějších mezi jehličnany. Je trvanlivé a velice odolné a bývá tak využíváno pro konstrukční účely v exteriérech, vodních stavbách či stavbách lodí. Díky zřetelnému přechodu mezi jarním a letním dřevem bývá modřínové dřevo využíváno též pro výrobu nábytku či dekorativních obkladů. (Vavrčík, 2004)

Jasan

Jasan poskytuje vysoce kvalitní dřevo s výbornými mechanickými vlastnostmi. Vyniká svojí pružností a tvrdostí, ale zároveň také houževnatostí. Uplatňuje se v nábytkářství, pro výrobu dých a sportovních potřeb – například saní a hokejek. Jasanové dřevo lze velmi dobře obrábět, brousit i lepit. (Vavrčík, 2004)

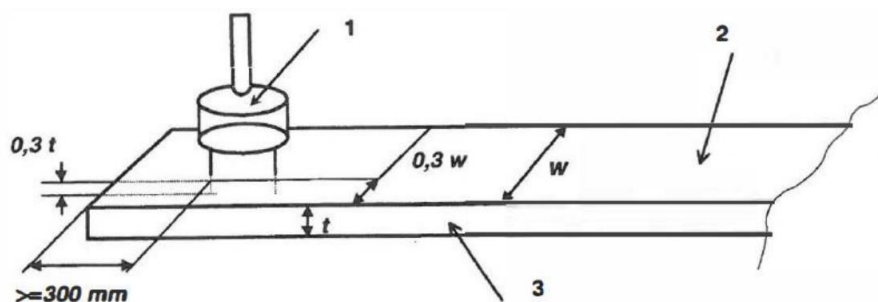
4.1.3. Rozměry a vlastnosti vzorků

Výběr správných rozměrů zkušebních vzorků je stěžejní pro zaručení relevantních výsledků měření. Každá metoda měření má jiné nároky na rozměry zkušebního vzorku. Ty předepisuje jak příslušná norma, tak přímo výrobce v návodu k obsluze.

Nároky odporového vlhkoměru

Testo 606-2 je odporový vlhkoměr. Dle příslušné normy ČSN EN 13183-2 je pro zdárné zjištění vlhkosti vzorku odporovou metodou nutno zarazit měřicí elektrody ve vzdálenosti nejméně 300 mm od obou okrajů vzorku a ve vzdálenosti 0,3 násobku jeho šířky. Špičky elektrod by měly být zaraženy do hloubky odpovídající 0,3 násobku tloušťky vzorku. Norma nepředepisuje žádné zvláštní nároky na povrch vzorku, jen vyžaduje, aby měřicí místo bylo bez prosmolu a vad. Prosmolem se rozumí poranění stromu vyplněné pryskyřicí, které vzniká mechanickým poškozením například při těžbě či činnosti zvěře (ČZU FLD, 2010). Za vadu je považována kůra, suky či smolníky. Pokud jsou na vzorku vady přítomny, musí se měřit na nejbližším bezvadném místě směrem ke středu vzorku.

Manuál k obsluze od výrobce vlhkoměru žádné požadavky na rozměry zkoušeného vzorku nenáročuje.



Obrázek 14 Schéma měření vlhkosti odporovou metodou (ČSN EN 13183-2)

1 – zarážecí elektrody; 2 – plocha měřeného vzorku; 3 – bok vzorku;

t – tloušťka; w - šířka

Nároky kapacitního vlhkoměru

Zástupcem kapacitní metody měření vlhkosti je sonda Testo 0636 6160. Dle příslušné normy ČSN EN 13183-3 se při měření kontaktní desky vlhkoměru přiloží na místo, které je ve vzdálenosti 300 mm od jednoho ze dvou konců vzorku. Při měření kusů řeziva kratších než 600 mm se měření provede ve středu délky. Při výskytu vad se měří na nejbližším bezvadném místě směrem ke středu vzorku. Za vadu považuje norma nejen kůru, suky a smolníky, ale i mokřý povrch či trhliny.

Manuál k obsluze sondy stanovuje požadavek na tloušťku měřeného materiálu a to alespoň 50 mm. Dále požaduje co nejrovnější povrch, který by měl být rovněž homogenní a bez vzduchových bublin, aby byl zaručen co nejtěsnější dotyk kontaktních desek s měřeným materiálem (Testo s.r.o.).

Nároky sorpčního vlhkoměru

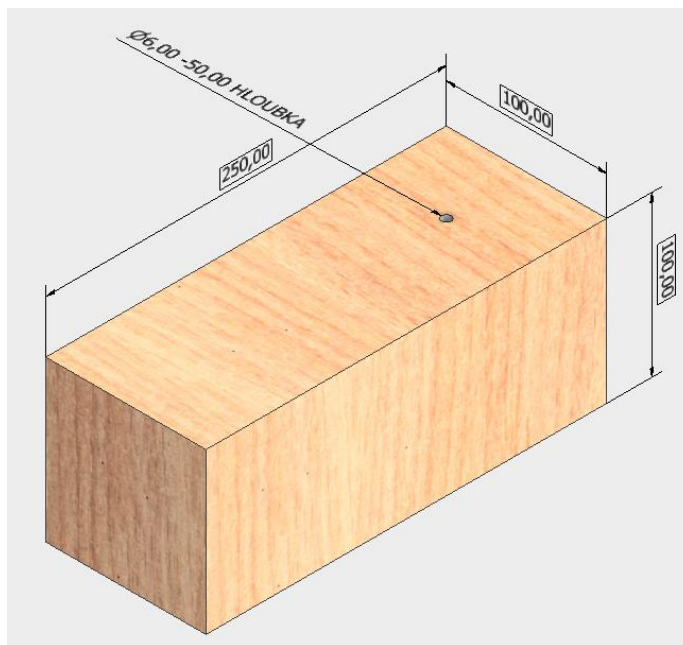
Třetí přístroj použitý při měření je sonda Testo 0636 2135. Ta měří rovnovážnou vlhkost v předem vyvrtané díře ve vzorku. Sorpční metoda není v České republice příliš rozšířena a není popsána žádnou normou.

Při přípravě vzorků lze ale čerpat z manuálu k obsluze. Ten sice neuvádí žádné přímé požadavky na rozměry vzorku, ale předepisuje, že před měřením je třeba vyvrtat alespoň 40 mm hlubokou díru o průměru 6 až 6,5 mm (Testo s.r.o.).

Výsledné rozměry vzorků

Při rozhodování o rozměrech vzorků byly vzaty v potaz nároky jednotlivých norem a návodů k obsluze a požadavek, aby se měření blížilo provozním podmínkám. Jako ideální

kandidát, který uspokojuje většinu požadavků byl zvolen hranol o rozměrech 100×100×250 mm. Hranol o rozměrech 100×100 mm je hojně využíván, levný stavební materiál používaný například na konstrukce krovů či příhradových vazníků. Použity budou nesusušené a nehoblované kusy konstrukčních hranolů. V praxi se takové řezivo často označuje třídou S10.



Obrázek 15 Rozměry použitých vzorků (v mm)

4.1.4. Příprava vzorků

Smrkové, borové a modřínové hranoly byly dodány pilou Písek. Od pily Vráž byly převzaty hranoly z jasanu. Všechny hranoly byly převzaty již ohoblované a nařezané na délku 50 cm. Následně byly rozříznuty v půli, čímž vznikly dvojice hranolů, které pocházejí ze stejného řeziva a lze tedy u nich předpokládat podobné fyzikální vlastnosti. Drobné povrchové vady byly srovnány brusným papírem. Tímto postupem byl vytvořen plochý povrch, což je základní předpoklad pro úspěšné měření kapacitní metodou. Následně byla do každého vzorku vyvrtána díra o hloubce 50 mm a o průměru 6 mm. Střed vyvrtané díry byl vytvořen ve vzdálenosti 50 mm od krátké strany hranolu a rovněž 50 mm od jeho dlouhých stran. Vyvrtaný otvor bude použit k měření sorpční metodou. Je situován tak, aby zanechal dost prostoru na měření metodou kapacitní. Při použití kratšího vzorku by byla naměřená hodnota kapacitním vlhkoměrem ovlivňována vzduchovou bublinou tvořenou vyvrtanou dírou. Otvory byly následně očištěny a utěsněny, aby v nich nedocházelo ke zvýšenému vysychání. Od každé dřeviny bylo pro účely měření takto připraveno 10 vzorků.

Každý vzorek byl následně označen dvěma písmeny a jednou číslicí. První písmeno značí dřevinu, ze které je vzorek vyroben. Písmeno J pro jasan, M pro modřín, S pro smrk a B pro borovici. Druhé písmeno (A až E) značí, ze kterého kusu řeziva byl vzorek vyroben a číslem (1 či 2) jsou od sebe rozlišeny jednotlivé vzorky ze stejného kusu řeziva. Například vzorky S-B1 a S-B2 jsou zhotoveny ze smrku a oba pocházejí ze stejného kusu řeziva.

4.2. Postup měření

Měření probíhalo ve vytápěné místnosti Technické fakulty na České zemědělské univerzitě v Praze. Zde byly všechny vzorky uskladněny. V místnosti byla konstantně udržována teplota 22 ± 1 °C a relativní vlhkost vzduchu 36 ± 3 %. V tomto prostředí ve dnech od 26.11.2021 do 21.1.2022 vzorky postupně vysychaly. Pro zajištění rovnoměrného vysychání ze všech stran byly vzorky postaveny na proklady o profilu 15×40 mm. Prokladem se rozumí lat' pokládaná pod řezivo za účelem vytvoření horizontálního proudění vzduchu, který odvádí vlhkost a snižuje riziko vzniku houbových nákaz (Vlková et al., 1994). Mezi jednotlivými měřeními byl vždy odstup alespoň jeden týden, během kterého docházelo k poklesu vlhkosti vzorků.



Obrázek 16 Skladování dřevěných vzorků

Před měřením odporovým vlhkoměrem Testo 606-2 byly na každém vzorku definovány 4 plochy a to: „horní“, „dolní“, „levá“ a „pravá“. Na každé ploše byla vlhkost zjišťována 2krát. Celkově tak bylo během jednoho měření na jednom vzorku zjištěno 8 hodnot. Takto byla zjišťována vlhkost všech 40 vzorků. Stejný postup byl zvolen i pro měření kapacitní sondou Testo 0636 6160. Při měření sondou Testo 0636 2135 byl zvolen postup odlišný, a to vzhledem k časové náročnosti měření tímto přístrojem. Naměření jedné hodnoty touto sondou může trvat až 30 minut, proto byla během jednoho měření vlhkost každého vzorku zjišťována pouze jednou.

Výše popsané měření proběhlo v období dvou měsíců celkem 5krát. Kvůli riziku nedostatečného počtu získaných dat pro sondu Testo 0636 2135 bylo provedeno ještě měření šesté, které bylo vedeno odlišným způsobem. Pro účely šestého měření byly vybrány 4 vzorky – od každé dřeviny jeden. Vlhkost každého ze 4 čtyř vzorků byla následně zjišťována 10krát.

4.3. Použité přístroje

4.3.1. Odporový vlhkoměr Testo 606-2

Přístroj Testo 606-2 dokáže dle výrobce změřit vlhkost různých materiálů. Měřit může také teplotu a vlhkost vzduchu. Výrobce ho doporučuje k měření zbytkové vlhkosti dřeva a stavebních materiálů a k posouzení, zda je zkoušený materiál již dostatečně vysušen například pro účely spalování. Přístroj je vybaven senzory na měření elektrického odporu, vlhkostním senzorem a NTC termistorem pro měření teploty. Výrobce Testo nabízí i levnější variantu přístroje označovanou jako Testo 606-1, které však chybí funkce měření teploty a vlhkosti vzduchu.

Vlhkoměr Testo 606-2 udává absolutní vlhkost materiálu v %. Dle výrobce měří přístroj vlhkost materiálu při 25 °C s přesností ± 1 % a s rozlišením 0,1 %. Teplotu je přístroj schopen měřit ve °C a °F s rozlišením 0,1 °C a 0,1 °F a přesností $\pm 0,5$ °C a $\pm 0,9$ °F (Testo s.r.o.) Testo 606-2 se dá rovněž využít k měření teploty rosného bodu a teploty vlhkého teploměru. Teplota vlhkého teploměru závisí na teplotě a vlhkosti okolního vzduchu a zpravidla se nachází mezi teplotou vzduchu a teplotou rosného bodu (Infomet).



Obrázek 17 Popis odporového vlhkoměru Testo 606-2

- 1 – ochranný kryt; 2 – měřicí elektrody; 3 – vlhkostní senzor a NTC termistor;
 4 – displej; 5 – ovládací tlačítka; 6 – uložení baterie (na zadní straně);
 7 – kontakty pro test funkce přístroje

Ovládání vlhkoměru je jednoduché a intuitivní. Přístroj lze zapnout dvěma způsoby. Po krátkém stisknutí tlačítka pro spuštění je vlhkoměr ihned připraven měřit vlhkost materiálu. Druhou možností je přidržení tlačítka pro spuštění po dobu delší, než 2 sekundy. Při spuštění tímto způsobem nabídne přístroj rozšířené možnosti nastavení a uživatel si může zvolit, v jakých jednotkách chce měřit teplotu vzduchu (°C nebo °F), zda chce měřit vlhkost materiálu, rosný bod nebo teplotu vlhkého teploměru. Také nabídne možnost použití funkce automatického vypnutí, která přístroj vypne 10 minut po posledním stisku libovolného tlačítka. Po zapnutí přístroje se opětovným stiskem tlačítka pro spuštění zapne podsvícení displeje. Poslední funkce tlačítka pro spuštění je vypnutí přístroje, které se provede dlouhým podržením tlačítka.

Dále má přístroj další dvě tlačítka. Tlačítko se symbolem šipky vzhůru slouží k výběru měřeného materiálu. Přístroj dělí materiály do 7 skupin. První dvě skupiny popisují charakteristiku dřevin. Do 1. skupiny patří: buk, smrk, modřín, bříza, třešeň a ořešák, jejichž vlhkost je dle výrobce přístroj schopen měřit v rozsahu 8,8 až 54,8 %. 2. skupinu tvoří: dub, borovice, javor, jasan, douglaska a meranti. Výrazem meranti se označuje tvrdé dřevo stromů z rodu Shorea (The wood database). Vlhkost dřevin 2. skupiny dokáže vlhkoměr měřit v rozsahu 7,0 až 47,9 %. Zbýlých pět skupin patří stavebním materiálům, mezi které spadá například beton, sádra, cementová omítka, cihly a další. Vlhkost každé skupiny stavebních materiálů dokáže vlhkoměr měřit v jiném rozsahu. Opakovaným stiskem tlačítka vzhůru je možné spustit test funkčnosti přístroje. Pro provedení testu funkčnosti je třeba

přiložit měřicí elektrody na kontakty umístěné na horní straně odnímatelné krytky přístroje. Funkce přístroje je v pořádku, pokud se na displeji rozsvítí nápis „ok“. V případě, že se nepodaří úspěšně provést test funkce přístroje je třeba vyčistit měřicí elektrody, popřípadě zaslat přístroj do servisu výrobce.

Posledním ze tří tlačítek na těle přístroje je tlačítko „Mode“, kterým je možné měnit jednotlivá zobrazení. První režim zobrazení je „Hold“, při kterém zůstane naměřená hodnota zobrazena na displeji. Dále disponuje přístroj režimy „Max“ a „Min“, které zobrazí maximální či minimální hodnotu naměřenou od zapnutí přístroje nebo od jeho vynulování. Vynulování přístroje se provede dlouhým přidržením tlačítka „Mode“.

K tomu, aby se naměřená hodnota co nejvíce blížila skutečné vlhkosti materiálu je třeba dodržovat několik pravidel. Měření jednoho kusu řeziva by mělo být opakováno na několika místech. Výrobce upozorňuje, že naměřené hodnoty se mohou lišit při měření po směru vláken a ve směru příčném k vláknům. Dále uvádí, že jednotlivé naměřené hodnoty se mohou lišit vzhledem k nehomogenosti dřeva a jeho různému odporu při zapichování měřicích elektrod. Elektrody by měly být při měření zapíchnuty co nejhlouběji, ideálně 4 až 5 mm. Také by mělo být dbáno na to, aby teplota a vlhkost ruky obsluhy neovlivňovala teplotní a vlhkostní senzory přístroje. Pokud je vlhkost měřeného materiálu mimo rozsah přístroje, zobrazí se na displeji chybová hláška „Hi“ – pro příliš vysokou vlhkost, nebo „Lo“ – pro příliš nízkou vlhkost.

Přístroj je napájen dvěma mikrotužkovými bateriemi typu AAA, pro které výrobce deklaruje životnost až 130 hodin při provozu bez podsvíceného displeje. Přístroj je skladný, jeho rozměry jsou 119×46×25 mm a hmotnost činí 90 g (Testo s.r.o.).



Obrázek 18 Měření odporovým vlhkoměrem Testo 606-2

4.3.2. Kapacitní vlhkoměrná sonda Testo 0636 6160

Sonda Testo 0636 6160 slouží k rychlému a nedestruktivnímu měření vlhkosti dřeva a stavebních materiálů. Výrobce upozorňuje, že naměřené hodnoty jsou pouze orientační a nemohou plně nahradit referenční metody, jako například metodu gravimetrickou. Sondu je před použitím nutné připojit k měřicí ústředně Testo 635. Sonda využívá schopnosti vody v materiálu měnit vlastnosti elektromagnetického pole. Silnou stránkou sondy Testo 0636 6160 oproti konkurenčním kapacitním vlhkoměrům je schopnost reagovat na obsah vody až do vzdálenosti 5 cm pod povrchem materiálu.

Sonda je schopna měřit absolutní vlhkost dřevěných materiálů v rozsahu 0 až 50 % a absolutní vlhkost stavebních materiálů v rozsahu 0 až 20 %. Rozlišení sondy je 0,1 % a pracovní teplota 5 až 40 °C. Dřevěné materiály sonda dělí na měkké a tvrdé. Výrobce však nikde neuvádí, která z těchto dvou charakteristik popisuje tu kterou dřevinu. Ze stavebních materiálů dokáže sonda měřit například beton, vápenec, anhydritový potěr, pórobeton a další. Měřený materiál by měl mít tloušťku alespoň 5 cm, neměl by obsahovat vzduchové bubliny a kovové předměty a jeho povrch by měl být co nejrovnější, aby byl zajištěn dobrý kontakt mezi měřicími deskami sondy a měřeným materiálem.

Obsluha sondy se provádí přes měřicí ústřednu Testo 635. Po spuštění proběhne kalibrace, po které je sonda připravena měřit. Pro změření materiálu je třeba přiložit měřicí desky k povrchu materiálu a pomalu zvyšovat přítlak, dokud se na displeji ústředny neustálí naměřená hodnota. Pro získání relevantního výsledku je třeba měření opakovat vícekrát na několika různých místech.



Obrázek 19 Kapacitní vlhkoměrná sonda Testo 0636 6160

4.3.3. Vlhkoměrná sonda Testo 0636 2135

Tato sonda využívá schopnosti hygroskopických materiálů snadno pohlcovat a udržovat vzdušnou vlhkost. Měří tedy na principu sorpční metody. Pro měření je třeba sondu vložit do předvrtaného otvoru v měřeném materiálu a následně utěsnit otvor těsnícím tmelem. Po ustálení mikroklima v otvoru je v něm sonda schopna změřit rovnovážnou vlhkost. Přepočtení rovnovážné vlhkosti na absolutní vlhkost materiálu obstarává měřicí ústředna Testo 635, ke které musí být sonda během měření připojena.



Obrázek 20 Detail sondy Testo 0636 2135

Výrobce uvádí, že sonda dokáže měnit relativní vlhkost v rozsahu 0 až 100 %, s rozlišením po 0,1 % a přesností ± 2 %. Teplotu dokáže sonda měřit v rozsahu 0 až 40 °C, s rozlišením po 0,1 °C a přesností $\pm 0,2$ °C. Výrobce udává, že sonda může být použita pro měření tvrdého a měkkého dřeva a stavebních materiálů, mezi které patří: beton, pórobeton, cihly a další. Měřený materiál musí mít tloušťku alespoň 50 mm, v opačném případě by nebylo možné do něj navrtat dostatečně hluboký otvor. (Testo s.r.o.)

Před samotným začátkem měření je nutno provést přípravu měřeného vzorku, do kterého je nutné navrtat otvor o hloubce alespoň 40 mm a průměru 6 až 6,5 mm. Otvor je poté nutné očistit a zbavit prachu, případně pilin. Poté je nutné připojit sondu k měřicí ústředně Testo 635, na které se nastaví konkrétní měřený materiál. Před vložením sondy do otvoru je třeba na ni nasadit teflonovou krytku, která je součástí balení a chrání sondu před nečistotami. Krytka musí být čistá, v opačném případě je třeba ji vyčistit stlačeným vzduchem či vyměnit za novou. Poté je možné vložit sondu do otvoru, který je následně nutné shora utěsnit těsnícím tmelem či jinou plastickou hmotou. Po vložení sondy je třeba počkat, dokud se neustálí mikroklima v otvoru a sonda bude moci změřit rovnovážnou

vlhkost, což může dle výrobce v závislosti na měřeném materiálu trvat až 30 minut. Rovnovážnou vlhkost poté přepočítá měřicí ústředna Testo 635 na jejíž displeji se zobrazí obsah vody v měřeném materiálu.



Obrázek 21 Měření sondou Testo 0636 2135 s použitím přístroje Testo 635-2

4.3.4. Měřicí ústředna Testo 635-2

Přístroj Testo 635-2 umožňuje současné připojení 2 násuvných a 3 rádiových sond, se kterými je schopen měřit relativní vlhkost vzduchu, absolutní vlhkost materiálů, teplotu tlakového bodu v systémech stlačeného vzduchu, teplotu vzduchu, součinitel prostupu tepla a další veličiny.

Při měření nabízí mimo zobrazení aktuálně naměřené hodnoty také režimy zobrazení minimální, maximální a průměrné hodnoty. Ovládání přístroje je jednoduché, navigace v menu se provádí tlačítky na těle přístroje. Displej nabízí možnost podsvícení. Výrobce deklaruje ochranné krytí IP54, které udává, že přístroj je chráněn proti stříkající vodě a částečně chráněn proti vniknutí prachu (IEC).

Výrobce nabízí i levnější variantu přístroje značenou Testo 635-1, která ovšem postrádá funkci paměti. Ta u dražšího modelu Testo 635-2 dovoluje uložení až 10 000 naměřených hodnot a po propojení přístroje USB kabelem s počítačem i jejich následnou analýzu.

4.4. Statistické vyhodnocení

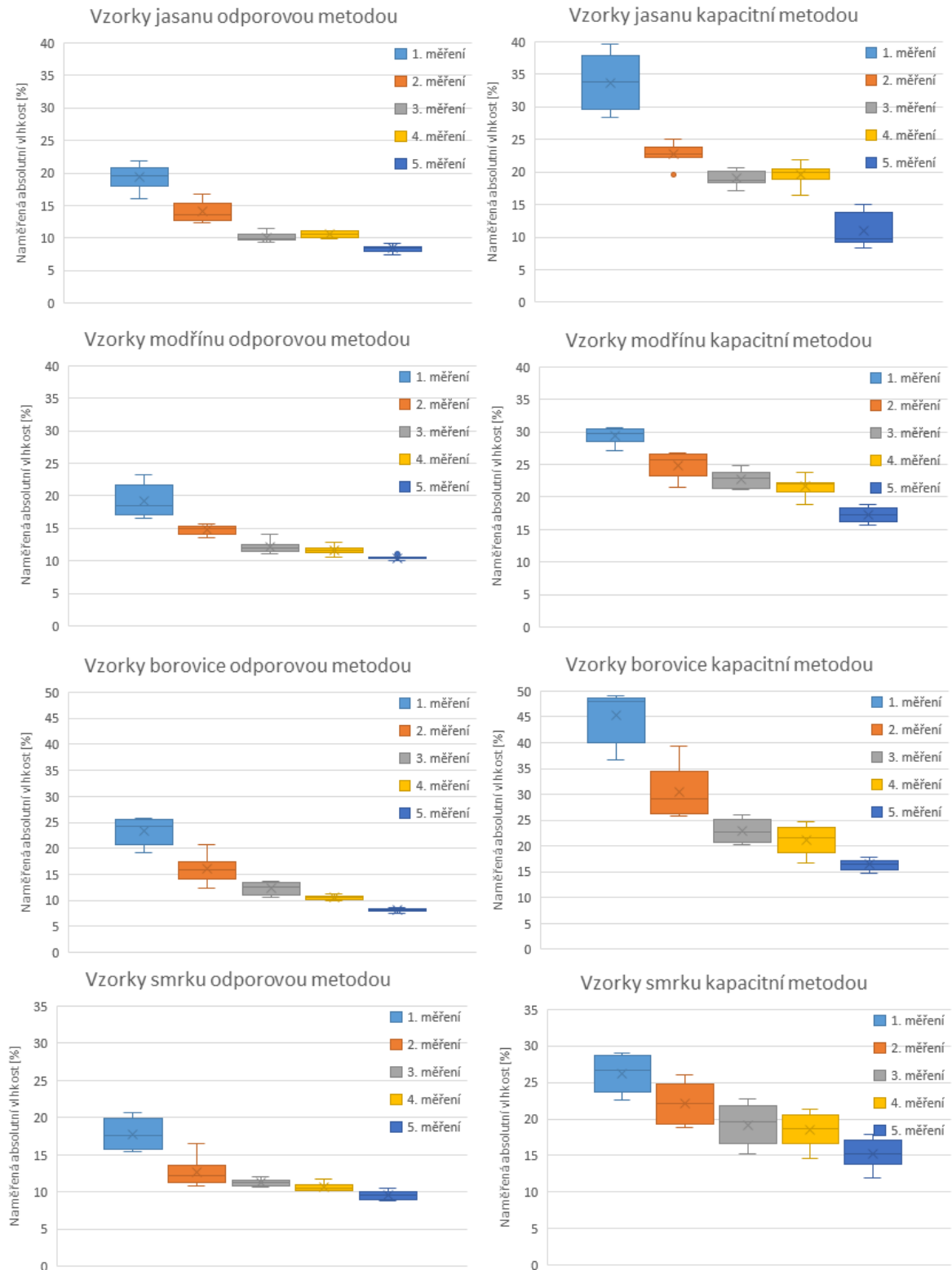
Naměřené hodnoty absolutní vlhkosti byly průběžně zapisovány do tabulkového procesoru Microsoft Excel a dále zpracovány ve statistickém a analytickém softwaru Statgraphics 19. K následné vizualizaci byly použity krabicové grafy vytvořené v programu Microsoft Excel.

Zjišťována byla shoda výběrů naměřených na stejném vzorku odporovou metodou vlhkoměrem Testo 606-2 a kapacitní metodou sondou Testo 0636 6160. Shoda výběrů byla posuzována dvouvýběrovým t-testem na 5 % hladině významnosti. Předpokladem pro použití t-testu je normální rozdělení obou souborů. Normalita byla ověřována pomocí šikmosti a špičatosti (Šimonová, 2006). V případě, že nebyl splněn požadavek normality byl místo dvouvýběrového t-testu použit neparametrický Kolmogorovův–Smirnovův test.

Obdobným způsobem byla zkoumána shoda mezi soubory dat naměřených vlhkoměry dvou různých výrobců používajících vždy stejnou metodu. Hodnoty naměřené odporovým vlhkoměrem Testo 606-2 byly porovnávány s odporovým vlhkoměrem Ahlmemo FH A636-MF. Srovnávané kapacitní vlhkoměry byly Testo 0636 6160 a Ahlmemo FH A696-MF.

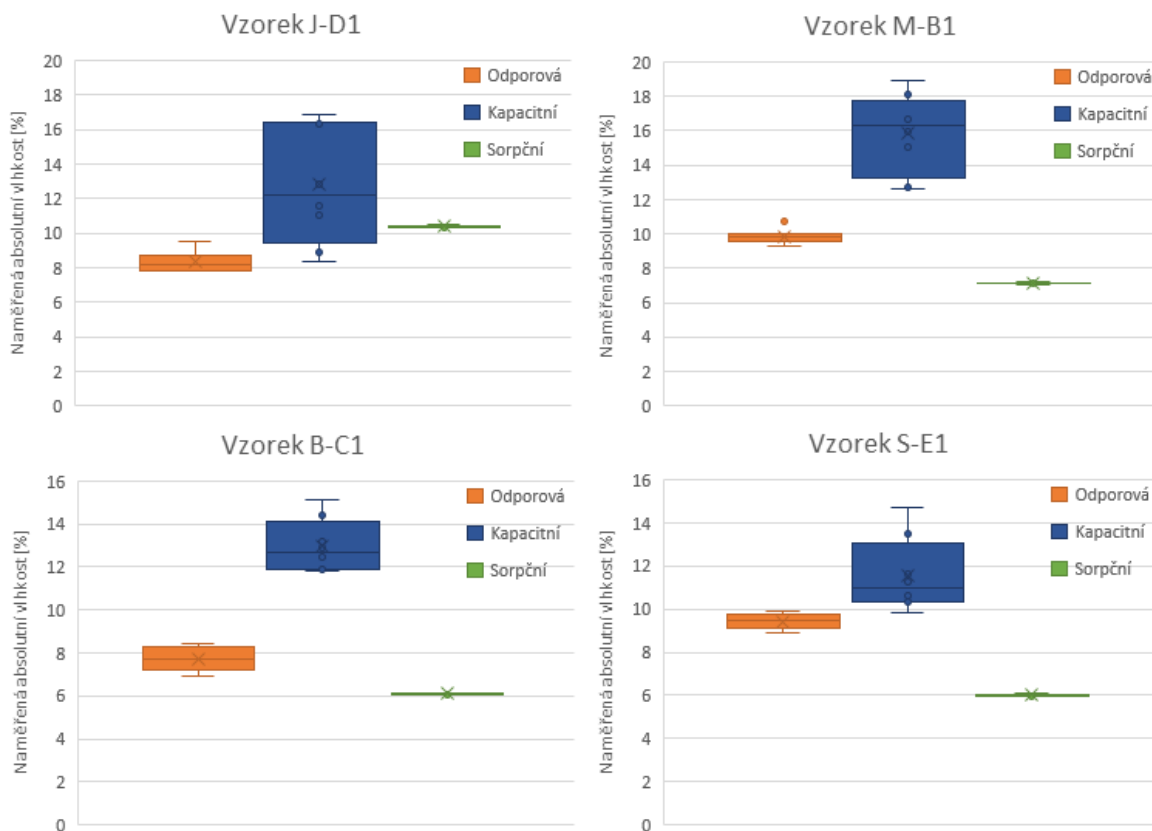
5. Výsledky

5.1. Porovnání dat naměřených odporovou a kapacitní metodou



Obrázek 22 Krabicové grafy naměřených hodnot odporovou a kapacitní metodou

5.2. Porovnání dat naměřených metodou odporovou, kapacitní a sorpční



Obrázek 23 Krabicové grafy naměřených hodnot metodou odporovou, kapacitní a sorpční

Vzorek	Metoda	Var. Koef.
J-D1	Sorpční	0,61%
M-B1	Sorpční	0,61%
B-C1	Sorpční	0,41%
S-E1	Sorpční	0,76%
J-D1	Odporová	7,08%
M-B1	Odporová	4,21%
B-C1	Odporová	7,48%
S-E1	Odporová	3,84%
J-D1	Kapacitní	26,74%
M-B1	Kapacitní	14,56%
B-C1	Kapacitní	9,46%
S-E1	Kapacitní	14,90%

Tabulka 3 Variační koeficienty naměřených hodnot

5.3. Testování normality a shody metody odporové a kapacitní

Vzorek	Šikmost	Špičatost	Norm. roz.	P-hodnota	Shoda	Vzorek	Šikmost	Špičatost	Norm. roz.	P-hodnota	Shoda
J-A1 I. Odp	-0,83	0,03	Ano	0,000	Zamítnuta	J-C2 III. Odp	-0,09	-0,79	Ano	0,000	Zamítnuta
J-A1 I. Kap	0,16	-1,04	Ano			J-C2 III. Kap	-0,27	-0,37	Ano		
J-A2 I. Odp	-0,98	-0,10	Ano	0,000	Zamítnuta	J-D1 III. Odp	1,28	0,61	Ano	0,000	Zamítnuta
J-A2 I. Kap	0,18	-1,24	Ano			J-D1 III. Kap	0,83	-0,62	Ano		
J-B1 I. Odp	0,36	-1,12	Ano	0,000	Zamítnuta	J-D2 III. Odp	1,15	0,39	Ano	0,000	Zamítnuta
J-B1 I. Kap	0,06	-1,47	Ano			J-D2 III. Kap	1,25	0,26	Ano		
J-B2 I. Odp	0,49	-0,70	Ano	0,000	Zamítnuta	J-E1 III. Odp	0,83	-0,75	Ano	0,000	Zamítnuta
J-B2 I. Kap	0,35	-1,01	Ano			J-E1 III. Kap	1,33	-0,01	Ano		
J-C1 I. Odp	1,17	-0,16	Ano	0,005	Zamítnuta	J-E2 III. Odp	-0,21	-0,32	Ano	0,000	Zamítnuta
J-C1 I. Kap	1,25	-0,32	Ano			J-E2 III. Kap	0,10	-0,62	Ano		
J-C2 I. Odp	1,15	-0,41	Ano	0,000	Zamítnuta	J-A1 IV. Odp	-0,31	-0,81	Ano	0,000	Zamítnuta
J-C2 I. Kap	0,67	-0,54	Ano			J-A1 IV. Kap	-1,18	1,26	Ano		
J-D1 I. Odp	0,03	-1,39	Ano	0,000	Zamítnuta	J-A2 IV. Odp	0,83	-0,15	Ano	0,000	Zamítnuta
J-D1 I. Kap	-0,01	-1,36	Ano			J-A2 IV. Kap	0,25	-0,91	Ano		
J-D2 I. Odp	0,03	-1,27	Ano	0,000	Zamítnuta	J-B1 IV. Odp	1,29	-0,19	Ano	0,000	Zamítnuta
J-D2 I. Kap	0,03	-1,55	Ano			J-B1 IV. Kap	0,37	-0,13	Ano		
J-E1 I. Odp	0,32	-0,61	Ano	0,000	Zamítnuta	J-B2 IV. Odp	0,16	-0,92	Ano	0,000	Zamítnuta
J-E1 I. Kap	0,51	-0,86	Ano			J-B2 IV. Kap	1,41	-0,14	Ano		
J-E2 I. Odp	-0,23	0,41	Ano	0,000	Zamítnuta	J-C1 IV. Odp	-0,45	-0,48	Ano	0,001	Zamítnuta
J-E2 I. Kap	0,12	-1,43	Ano			J-C1 IV. Kap	-0,26	-0,58	Ano		
J-A1 II. Odp	0,69	-0,60	Ano	0,000	Zamítnuta	J-C2 IV. Odp	-0,60	-0,46	Ano	0,000	Zamítnuta
J-A1 II. Kap	-1,08	1,21	Ano			J-C2 IV. Kap	-0,62	-0,44	Ano		
J-A2 II. Odp	-0,29	-0,94	Ano	0,000	Zamítnuta	J-D1 IV. Odp	-0,44	-0,56	Ano	0,000	Zamítnuta
J-A2 II. Kap	0,71	-0,68	Ano			J-D1 IV. Kap	0,47	-0,13	Ano		
J-B1 II. Odp	1,38	0,14	Ano	0,000	Zamítnuta	J-D2 IV. Odp	-0,83	-0,26	Ano	0,000	Zamítnuta
J-B1 II. Kap	1,80	1,09	Ano			J-D2 IV. Kap	-1,40	1,23	Ano		
J-B2 II. Odp	1,58	-0,04	Ano	0,000	Zamítnuta	J-E1 IV. Odp	-0,05	-1,44	Ano	0,000	Zamítnuta
J-B2 II. Kap	1,38	-0,21	Ano			J-E1 IV. Kap	0,11	-0,74	Ano		
J-C1 II. Odp	1,65	0,06	Ano	0,016	Zamítnuta	J-E2 IV. Odp	0,43	-0,98	Ano	0,000	Zamítnuta
J-C1 II. Kap	1,20	0,03	Ano			J-E2 IV. Kap	-0,88	-0,59	Ano		
J-C2 II. Odp	0,80	-0,27	Ano	0,001	Zamítnuta	J-A1 V. Odp	-0,84	0,17	Ano	0,016	Zamítnuta
J-C2 II. Kap	0,93	-0,08	Ano			J-A1 V. Kap	0,86	-0,73	Ano		
J-D1 II. Odp	1,36	-0,01	Ano	0,000	Zamítnuta	J-A2 V. Odp	-1,23	-0,44	Ano	0,000	Zamítnuta
J-D1 II. Kap	0,28	-0,96	Ano			J-A2 V. Kap	0,43	-0,67	Ano		
J-D2 II. Odp	1,78	0,68	Ano	0,001	Zamítnuta	J-B1 V. Odp	1,02	0,09	Ano	0,000	Zamítnuta
J-D2 II. Kap	0,58	-0,81	Ano			J-B1 V. Kap	0,43	-0,90	Ano		
J-E1 II. Odp	0,32	-1,03	Ano	0,000	Zamítnuta	J-B2 V. Odp	-0,16	-0,91	Ano	0,000	Zamítnuta
J-E1 II. Kap	-0,35	-0,35	Ano			J-B2 V. Kap	-0,29	-1,06	Ano		
J-E2 II. Odp	-1,08	-0,25	Ano	0,000	Zamítnuta	J-C1 V. Odp	1,15	-0,28	Ano	0,000	Zamítnuta
J-E2 II. Kap	-1,16	-0,15	Ano			J-C1 V. Kap	-0,12	-1,01	Ano		
J-A1 III. Odp	1,78	1,16	Ano	0,000	Zamítnuta	J-C2 V. Odp	-0,35	-0,10	Ano	0,000	Zamítnuta
J-A1 III. Kap	0,05	-0,13	Ano			J-C2 V. Kap	1,40	0,88	Ano		
J-A2 III. Odp	0,13	0,95	Ano	0,000	Zamítnuta	J-D1 V. Odp	1,29	0,54	Ano	0,003	Zamítnuta
J-A2 III. Kap	0,41	-0,85	Ano			J-D1 V. Kap	0,06	-1,04	Ano		
J-B1 III. Odp	-0,10	-0,90	Ano	0,000	Zamítnuta	J-D2 V. Odp	0,06	0,31	Ano	0,001	Zamítnuta
J-B1 III. Kap	-0,09	-0,96	Ano			J-D2 V. Kap	1,43	-0,16	Ano		
J-B2 III. Odp	-0,33	-0,24	Ano	0,000	Zamítnuta	J-E1 V. Odp	0,89	-0,48	Ano	0,000	Zamítnuta
J-B2 III. Kap	0,21	-1,05	Ano			J-E1 V. Kap	1,41	-0,05	Ano		
J-C1 III. Odp	0,57	-0,68	Ano	0,000	Zamítnuta	J-E2 V. Odp	0,04	-1,02	Ano	0,001	Zamítnuta
J-C1 III. Kap	0,48	-0,81	Ano			J-E2 V. Kap	0,66	-0,41	Ano		

Tabulka 4 Testování normality a shody mezi odporovou a kapacitní metodou na vzorkách jasanu

Vzorek	Šikmost	Špičatost	Norm. roz.	P-hodnota	Shoda	Vzorek	Šikmost	Špičatost	Norm. roz.	P-hodnota	Shoda
M-A1 I. Odp	0,98	-0,21	Ano	0,000	Zamítnuta	M-C2 III. Odp	-0,10	-0,33	Ano	0,000	Zamítnuta
M-A1 I. Kap	-1,18	0,01	Ano			M-C2 III. Kap	0,03	-0,75	Ano		
M-A2 I. Odp	1,28	-0,22	Ano	0,000	Zamítnuta	M-D1 III. Odp	0,13	-0,45	Ano	0,000	Zamítnuta
M-A2 I. Kap	-0,69	-0,48	Ano			M-D1 III. Kap	0,58	-0,70	Ano		
M-B1 I. Odp	0,32	-1,25	Ano	0,001	Zamítnuta	M-D2 III. Odp	-1,06	0,59	Ano	0,000	Zamítnuta
M-B1 I. Kap	1,03	-0,25	Ano			M-D2 III. Kap	0,57	-0,91	Ano		
M-B2 I. Odp	0,23	-1,25	Ano	0,000	Zamítnuta	M-E1 III. Odp	0,44	-0,21	Ano	0,001	Zamítnuta
M-B2 I. Kap	0,47	-0,88	Ano			M-E1 III. Kap	2,84	3,78	Ne		
M-C1 I. Odp	-0,07	-0,03	Ano	0,001	Zamítnuta	M-E2 III. Odp	0,67	0,37	Ano	0,000	Zamítnuta
M-C1 I. Kap	-0,82	-0,59	Ano			M-E2 III. Kap	-1,03	-0,16	Ano		
M-C2 I. Odp	-0,79	-0,34	Ano	0,000	Zamítnuta	M-A1 IV. Odp	0,22	0,77	Ano	0,000	Zamítnuta
M-C2 I. Kap	-1,04	-0,21	Ano			M-A1 IV. Kap	-1,08	0,85	Ano		
M-D1 I. Odp	-0,72	-0,28	Ano	0,000	Zamítnuta	M-A2 IV. Odp	0,08	-0,88	Ano	0,000	Zamítnuta
M-D1 I. Kap	-0,49	-0,34	Ano			M-A2 IV. Kap	-0,09	-1,37	Ano		
M-D2 I. Odp	-1,20	-0,05	Ano	0,000	Zamítnuta	M-B1 IV. Odp	-0,13	-0,12	Ano	0,000	Zamítnuta
M-D2 I. Kap	0,08	-1,39	Ano			M-B1 IV. Kap	-0,98	-0,41	Ano		
M-E1 I. Odp	-1,52	-0,09	Ano	0,000	Zamítnuta	M-B2 IV. Odp	1,47	0,01	Ano	0,000	Zamítnuta
M-E1 I. Kap	-0,35	-0,75	Ano			M-B2 IV. Kap	0,54	-0,38	Ano		
M-E2 I. Odp	-1,06	-0,38	Ano	0,003	Zamítnuta	M-C1 IV. Odp	-0,70	0,26	Ano	0,000	Zamítnuta
M-E2 I. Kap	-1,22	-0,23	Ano			M-C1 IV. Kap	-0,80	-0,46	Ano		
M-A1 II. Odp	-0,60	-0,57	Ano	0,000	Zamítnuta	M-C2 IV. Odp	-1,37	0,18	Ano	0,000	Zamítnuta
M-A1 II. Kap	-0,98	-0,37	Ano			M-C2 IV. Kap	-0,16	-0,29	Ano		
M-A2 II. Odp	1,01	-0,25	Ano	0,000	Zamítnuta	M-D1 IV. Odp	0,90	0,97	Ano	0,001	Zamítnuta
M-A2 II. Kap	0,33	-0,17	Ano			M-D1 IV. Kap	2,36	2,67	Ne		
M-B1 II. Odp	1,49	0,25	Ano	0,002	Zamítnuta	M-D2 IV. Odp	-0,47	-0,09	Ano	0,000	Zamítnuta
M-B1 II. Kap	1,03	-0,28	Ano			M-D2 IV. Kap	0,69	0,19	Ano		
M-B2 II. Odp	1,07	-0,35	Ano	0,000	Zamítnuta	M-E1 IV. Odp	0,90	-0,08	Ano	0,000	Zamítnuta
M-B2 II. Kap	0,75	-0,18	Ano			M-E1 IV. Kap	1,78	1,36	Ano		
M-C1 II. Odp	-0,05	-0,91	Ano	0,000	Zamítnuta	M-E2 IV. Odp	-0,69	-0,39	Ano	0,000	Zamítnuta
M-C1 II. Kap	-0,01	-1,25	Ano			M-E2 IV. Kap	-0,48	-0,03	Ano		
M-C2 II. Odp	0,15	-0,87	Ano	0,000	Zamítnuta	M-A1 V. Odp	1,01	1,11	Ano	0,000	Zamítnuta
M-C2 II. Kap	-0,36	-0,85	Ano			M-A1 V. Kap	-0,08	-0,67	Ano		
M-D1 II. Odp	0,25	-1,23	Ano	0,000	Zamítnuta	M-A2 V. Odp	-0,77	-0,34	Ano	0,000	Zamítnuta
M-D1 II. Kap	0,38	-0,47	Ano			M-A2 V. Kap	0,14	-0,27	Ano		
M-D2 II. Odp	1,58	-0,05	Ano	0,000	Zamítnuta	M-B1 V. Odp	1,43	1,52	Ano	0,000	Zamítnuta
M-D2 II. Kap	0,59	-0,56	Ano			M-B1 V. Kap	-0,42	-0,57	Ano		
M-E1 II. Odp	1,18	-0,35	Ano	0,000	Zamítnuta	M-B2 V. Odp	2,12	2,48	Ne	0,001	Zamítnuta
M-E1 II. Kap	0,79	-0,29	Ano			M-B2 V. Kap	1,16	0,14	Ano		
M-E2 II. Odp	0,57	-0,27	Ano	0,000	Zamítnuta	M-C1 V. Odp	-1,65	1,12	Ano	0,000	Zamítnuta
M-E2 II. Kap	1,22	-0,32	Ano			M-C1 V. Kap	-1,08	-0,24	Ano		
M-A1 III. Odp	1,31	1,08	Ano	0,000	Zamítnuta	M-C2 V. Odp	-0,16	-0,29	Ano	0,000	Zamítnuta
M-A1 III. Kap	0,12	-0,84	Ano			M-C2 V. Kap	-1,50	0,05	Ano		
M-A2 III. Odp	1,31	1,08	Ano	0,000	Zamítnuta	M-D1 V. Odp	-0,15	0,19	Ano	0,000	Zamítnuta
M-A2 III. Kap	0,12	-0,84	Ano			M-D1 V. Kap	-0,23	-0,66	Ano		
M-B1 III. Odp	-1,42	1,78	Ano	0,000	Zamítnuta	M-D2 V. Odp	0,35	-0,23	Ano	0,000	Zamítnuta
M-B1 III. Kap	0,69	-0,65	Ano			M-D2 V. Kap	0,72	-0,21	Ano		
M-B2 III. Odp	-0,21	-0,15	Ano	0,001	Zamítnuta	M-E1 V. Odp	-0,07	0,62	Ano	0,000	Zamítnuta
M-B2 III. Kap	2,02	2,11	Ne			M-E1 V. Kap	-0,13	-1,11	Ano		
M-C1 III. Odp	-2,04	1,70	Ne	0,001	Zamítnuta	M-E2 V. Odp	0,08	-1,26	Ano	0,000	Zamítnuta
M-C1 III. Kap	-0,75	-0,49	Ano			M-E2 V. Kap	0,65	-0,47	Ano		

Tabulka 5 Testování normality a shody mezi odporovou a kapacitní metodou na vzorkách modřínu

Vzorek	Šikmost	Špičatost	Norm. roz.	P-hodnota	Shoda	Vzorek	Šikmost	Špičatost	Norm. roz.	P-hodnota	Shoda
S-A1 I. Odp	0,12	-1,40	Ano	0,000	Zamítnuta	S-C2 III. Odp	2,06	2,78	Ne	0,001	Zamítnuta
S-A1 I. Kap	-1,40	-1,28	Ano			S-C2 III. Kap	0,74	-0,43	Ano		
S-A2 I. Odp	1,49	1,57	Ano	0,002	Zamítnuta	S-D1 III. Odp	0,92	-0,22	Ano	0,000	Zamítnuta
S-A2 I. Kap	-1,47	-0,06	Ano			S-D1 III. Kap	-1,06	-0,14	Ano		
S-B1 I. Odp	0,70	-0,05	Ano	0,045	Zamítnuta	S-D2 III. Odp	1,00	-0,17	Ano	0,000	Zamítnuta
S-B1 I. Kap	1,08	0,04	Ano			S-D2 III. Kap	0,08	-0,63	Ano		
S-B2 I. Odp	-1,80	1,17	Ano	0,000	Zamítnuta	S-E1 III. Odp	1,03	0,11	Ano	0,000	Zamítnuta
S-B2 I. Kap	0,04	-0,85	Ano			S-E1 III. Kap	0,86	-0,46	Ano		
S-C1 I. Odp	1,16	-0,09	Ano	0,001	Zamítnuta	S-E2 III. Odp	-0,51	-0,30	Ano	0,001	Zamítnuta
S-C1 I. Kap	1,42	-0,14	Ano			S-E2 III. Kap	0,82	0,05	Ano		
S-C2 I. Odp	0,08	-0,49	Ano	0,001	Zamítnuta	S-A1 IV. Odp	1,47	0,77	Ano	0,000	Zamítnuta
S-C2 I. Kap	1,20	-0,28	Ano			S-A1 IV. Kap	-0,46	-0,70	Ano		
S-D1 I. Odp	-0,10	-0,76	Ano	0,000	Zamítnuta	S-A2 IV. Odp	0,49	-1,26	Ano	0,000	Zamítnuta
S-D1 I. Kap	0,76	-0,70	Ano			S-A2 IV. Kap	0,56	1,24	Ano		
S-D2 I. Odp	0,76	-0,22	Ano	0,001	Zamítnuta	S-B1 IV. Odp	-1,55	0,88	Ano	0,350	Nezamítnuta
S-D2 I. Kap	1,06	-0,35	Ano			S-B1 IV. Kap	0,31	-1,14	Ano		
S-E1 I. Odp	1,25	0,04	Ano	0,003	Zamítnuta	S-B2 IV. Odp	0,75	-0,05	Ano	0,034	Zamítnuta
S-E1 I. Kap	1,39	-0,23	Ano			S-B2 IV. Kap	0,53	-0,65	Ano		
S-E2 I. Odp	0,53	-0,66	Ano	0,001	Zamítnuta	S-C1 IV. Odp	1,30	1,15	Ano	0,004	Zamítnuta
S-E2 I. Kap	1,52	1,39	Ano			S-C1 IV. Kap	0,27	0,18	Ano		
S-A1 II. Odp	1,73	1,37	Ano	0,000	Zamítnuta	S-C2 IV. Odp	2,56	3,23	Ne	0,001	Zamítnuta
S-A1 II. Kap	0,15	-0,90	Ano			S-C2 IV. Kap	0,98	-0,31	Ano		
S-A2 II. Odp	1,84	1,66	Ano	0,000	Zamítnuta	S-D1 IV. Odp	-0,57	-0,27	Ano	0,000	Zamítnuta
S-A2 II. Kap	-1,40	1,18	Ano			S-D1 IV. Kap	0,56	-0,67	Ano		
S-B1 II. Odp	1,56	0,71	Ano	0,520	Nezamítnuta	S-D2 IV. Odp	0,73	0,86	Ano	0,000	Zamítnuta
S-B1 II. Kap	1,49	0,27	Ano			S-D2 IV. Kap	0,86	-0,12	Ano		
S-B2 II. Odp	1,52	-0,04	Ano	0,143	Nezamítnuta	S-E1 IV. Odp	1,92	1,97	Ano	0,005	Zamítnuta
S-B2 II. Kap	0,60	-0,80	Ano			S-E1 IV. Kap	1,07	-0,02	Ano		
S-C1 II. Odp	0,98	1,20	Ano	0,000	Zamítnuta	S-E2 IV. Odp	-0,62	-0,43	Ano	0,001	Zamítnuta
S-C1 II. Kap	-0,34	-0,08	Ano			S-E2 IV. Kap	1,04	-0,24	Ano		
S-C2 II. Odp	1,33	0,22	Ano	0,001	Zamítnuta	S-A1 V. Odp	0,17	-0,72	Ano	0,000	Zamítnuta
S-C2 II. Kap	1,08	-0,18	Ano			S-A1 V. Kap	-0,32	-0,36	Ano		
S-D1 II. Odp	0,35	0,21	Ano	0,000	Zamítnuta	S-A2 V. Odp	-0,41	0,21	Ano	0,000	Zamítnuta
S-D1 II. Kap	-0,69	-0,45	Ano			S-A2 V. Kap	-0,44	-0,86	Ano		
S-D2 II. Odp	0,52	1,00	Ano	0,000	Zamítnuta	S-B1 V. Odp	0,02	-1,09	Ano	0,503	Nezamítnuta
S-D2 II. Kap	-0,40	-0,17	Ano			S-B1 V. Kap	-0,73	0,11	Ano		
S-E1 II. Odp	0,88	1,25	Ano	0,000	Zamítnuta	S-B2 V. Odp	1,28	0,29	Ano	0,025	Zamítnuta
S-E1 II. Kap	-0,18	0,06	Ano			S-B2 V. Kap	-0,54	-0,71	Ano		
S-E2 II. Odp	0,51	0,03	Ano	0,001	Zamítnuta	S-C1 V. Odp	0,78	-0,28	Ano	0,000	Zamítnuta
S-E2 II. Kap	0,88	-0,47	Ano			S-C1 V. Kap	0,75	0,25	Ano		
S-A1 III. Odp	-0,11	-0,14	Ano	0,000	Zamítnuta	S-C2 V. Odp	1,73	0,64	Ano	0,007	Zamítnuta
S-A1 III. Kap	-0,19	-0,94	Ano			S-C2 V. Kap	-0,65	-0,23	Ano		
S-A2 III. Odp	-0,39	-0,40	Ano	0,000	Zamítnuta	S-D1 V. Odp	0,33	0,17	Ano	0,000	Zamítnuta
S-A2 III. Kap	0,45	0,32	Ano			S-D1 V. Kap	-1,51	0,18	Ano		
S-B1 III. Odp	-0,96	-0,58	Ano	0,001	Zamítnuta	S-D2 V. Odp	0,44	-0,85	Ano	0,000	Zamítnuta
S-B1 III. Kap	-0,03	-1,45	Ano			S-D2 V. Kap	-0,65	-0,62	Ano		
S-B2 III. Odp	-1,19	0,26	Ano	0,001	Zamítnuta	S-E1 V. Odp	-0,19	-0,89	Ano	0,005	Zamítnuta
S-B2 III. Kap	0,49	-1,08	Ano			S-E1 V. Kap	1,33	0,14	Ano		
S-C1 III. Odp	-0,32	-0,35	Ano	0,000	Zamítnuta	S-E2 V. Odp	-0,98	-0,27	Ano	0,038	Zamítnuta
S-C1 III. Kap	0,47	-0,46	Ano			S-E2 V. Kap	0,34	-0,88	Ano		

Tabulka 6 Testování normality a shody mezi odporovou a kapacitní metodou na vzorkách smrku

Vzorek	Šikmost	Špičatost	Norm. roz.	P-hodnota	Shoda	Vzorek	Šikmost	Špičatost	Norm. roz.	P-hodnota	Shoda
B-A1 I. Odp	-1,23	-0,26	Ano	0,000	Zamítnuta	B-C2 III. Odp	-0,57	-0,59	Ano	0,000	Zamítnuta
B-A1 I. Kap	-1,41	-0,13	Ano			B-C2 III. Kap	0,87	-0,47	Ano		
B-A2 I. Odp	-0,64	-0,96	Ano	0,000	Zamítnuta	B-D1 III. Odp	0,19	0,11	Ano	0,000	Zamítnuta
B-A2 I. Kap	-0,74	-0,93	Ano			B-D1 III. Kap	0,28	-0,66	Ano		
B-B1 I. Odp	0,70	-0,54	Ano	0,000	Zamítnuta	B-D2 III. Odp	0,21	-1,35	Ano	0,000	Zamítnuta
B-B1 I. Kap	1,28	1,03	Ano			B-D2 III. Kap	-0,15	-0,55	Ano		
B-B2 I. Odp	-0,67	-0,85	Ano	0,000	Zamítnuta	B-E1 III. Odp	0,50	-0,74	Ano	0,000	Zamítnuta
B-B2 I. Kap	-0,46	-0,12	Ano			B-E1 III. Kap	-0,59	0,26	Ano		
B-C1 I. Odp	-0,41	-1,28	Ano	0,001	Zamítnuta	B-E2 III. Odp	-0,71	-0,47	Ano	0,000	Zamítnuta
B-C1 I. Kap	-0,58	-1,01	Ano			B-E2 III. Kap	-0,32	-0,46	Ano		
B-C2 I. Odp	-1,90	0,76	Ano	0,001	Zamítnuta	B-A1 IV. Odp	0,50	0,26	Ano	0,000	Zamítnuta
B-C2 I. Kap	-1,39	-0,21	Ano			B-A1 IV. Kap	-0,54	-0,31	Ano		
B-D1 I. Odp	-0,72	-0,45	Ano	0,000	Zamítnuta	B-A2 IV. Odp	0,14	-1,12	Ano	0,000	Zamítnuta
B-D1 I. Kap	-0,93	-0,28	Ano			B-A2 IV. Kap	0,72	-0,50	Ano		
B-D2 I. Odp	1,27	-0,36	Ano	0,001	Zamítnuta	B-B1 IV. Odp	2,52	3,33	Ne	0,001	Zamítnuta
B-D2 I. Kap	0,65	-0,61	Ano			B-B1 IV. Kap	-0,84	-0,42	Ano		
B-E1 I. Odp	-0,16	-1,09	Ano	0,000	Zamítnuta	B-B2 IV. Odp	1,68	0,84	Ano	0,000	Zamítnuta
B-E1 I. Kap	-0,69	-1,06	Ano			B-B2 IV. Kap	-1,59	0,52	Ano		
B-E2 I. Odp	-0,29	-1,13	Ano	0,000	Zamítnuta	B-C1 IV. Odp	0,00	-1,11	Ano	0,000	Zamítnuta
B-E2 I. Kap	-1,30	-0,25	Ano			B-C1 IV. Kap	0,11	-0,46	Ano		
B-A1 II. Odp	0,62	0,35	Ano	0,000	Zamítnuta	B-C2 IV. Odp	-0,49	0,22	Ano	0,000	Zamítnuta
B-A1 II. Kap	1,04	-0,09	Ano			B-C2 IV. Kap	1,10	0,33	Ano		
B-A2 II. Odp	0,55	-0,69	Ano	0,000	Zamítnuta	B-D1 IV. Odp	0,40	1,38	Ano	0,000	Zamítnuta
B-A2 II. Kap	0,82	-0,48	Ano			B-D1 IV. Kap	-0,76	0,51	Ano		
B-B1 II. Odp	-1,27	0,24	Ano	0,000	Zamítnuta	B-D2 IV. Odp	0,54	-0,56	Ano	0,000	Zamítnuta
B-B1 II. Kap	-0,39	-0,61	Ano			B-D2 IV. Kap	1,10	0,33	Ano		
B-B2 II. Odp	0,14	-0,96	Ano	0,000	Zamítnuta	B-E1 IV. Odp	-0,10	1,04	Ano	0,000	Zamítnuta
B-B2 II. Kap	-0,81	0,77	Ano			B-E1 IV. Kap	-0,08	-0,44	Ano		
B-C1 II. Odp	-0,15	-0,97	Ano	0,005	Zamítnuta	B-E2 IV. Odp	0,43	-0,64	Ano	0,000	Zamítnuta
B-C1 II. Kap	0,14	-1,43	Ano			B-E2 IV. Kap	1,28	-0,30	Ano		
B-C2 II. Odp	0,03	-0,32	Ano	0,003	Zamítnuta	B-A1 V. Odp	-0,91	0,06	Ano	0,000	Zamítnuta
B-C2 II. Kap	0,15	-1,14	Ano			B-A1 V. Kap	-0,46	-0,47	Ano		
B-D1 II. Odp	0,04	-0,71	Ano	0,002	Zamítnuta	B-A2 V. Odp	1,27	1,40	Ano	0,000	Zamítnuta
B-D1 II. Kap	-1,01	-0,14	Ano			B-A2 V. Kap	-0,23	-0,58	Ano		
B-D2 II. Odp	2,03	1,73	Ne	0,271	Nezamítnuta	B-B1 V. Odp	-0,36	-0,72	Ano	0,000	Zamítnuta
B-D2 II. Kap	1,56	-0,05	Ano			B-B1 V. Kap	-0,48	0,04	Ano		
B-E1 II. Odp	0,40	-0,89	Ano	0,002	Zamítnuta	B-B2 V. Odp	-0,64	-0,40	Ano	0,000	Zamítnuta
B-E1 II. Kap	0,11	-0,88	Ano			B-B2 V. Kap	-0,67	-0,50	Ano		
B-E2 II. Odp	0,49	-0,77	Ano	0,001	Zamítnuta	B-C1 V. Odp	-0,09	-1,08	Ano	0,000	Zamítnuta
B-E2 II. Kap	0,84	-0,71	Ano			B-C1 V. Kap	1,04	-0,24	Ano		
B-A1 III. Odp	-0,52	-0,85	Ano	0,000	Zamítnuta	B-C2 V. Odp	0,21	-1,06	Ano	0,000	Zamítnuta
B-A1 III. Kap	0,16	-1,32	Ano			B-C2 V. Kap	0,27	-0,66	Ano		
B-A2 III. Odp	0,71	-0,47	Ano	0,000	Zamítnuta	B-D1 V. Odp	0,33	-0,46	Ano	0,000	Zamítnuta
B-A2 III. Kap	1,15	-0,37	Ano			B-D1 V. Kap	-0,62	-0,40	Ano		
B-B1 III. Odp	1,44	1,70	Ano	0,000	Zamítnuta	B-D2 V. Odp	0,57	-0,33	Ano	0,001	Zamítnuta
B-B1 III. Kap	-0,29	-0,46	Ano			B-D2 V. Kap	-1,07	-0,21	Ano		
B-B2 III. Odp	1,29	0,54	Ano	0,000	Zamítnuta	B-E1 V. Odp	-0,02	-0,14	Ano	0,000	Zamítnuta
B-B2 III. Kap	-0,89	0,78	Ano			B-E1 V. Kap	1,71	1,23	Ano		
B-C1 III. Odp	-0,38	-0,15	Ano	0,000	Zamítnuta	B-E2 V. Odp	0,13	-0,64	Ano	0,000	Zamítnuta
B-C1 III. Kap	-0,16	-0,57	Ano			B-E2 V. Kap	0,85	-0,06	Ano		

Tabulka 7 Testování normality a shody mezi odporovou a kapacitní metodou na vzorkách borovice

5.4. Testování normality a shody v rámci stejné metody

Vzorek	Šikmost	Špičatost	Norm. roz	P-hodnota	Shoda	Vzorek	Šikmost	Špičatost	Norm. roz	P-hodnota	Shoda
J-A1 II. Odp Tes	0,69	-0,60	Ano	0,253	Nezamítnuta	B-A1 II. Odp Tes	0,62	0,35	Ano	0,271	Nezamítnuta
J-A1 II. Odp Ahl	-0,36	-1,00	Ano			B-A1 II. Odp Ahl	2,23	1,81	Ne		
J-A2 II. Odp Tes	-0,29	-0,94	Ano	0,022	Zamítnuta	B-A2 II. Odp Tes	0,55	-0,69	Ano	0,034	Zamítnuta
J-A2 II. Odp Ahl	-2,05	2,18	Ne			B-A2 II. Odp Ahl	0,54	-0,58	Ano		
J-B1 II. Odp Tes	1,38	0,14	Ano	0,450	Nezamítnuta	B-B1 II. Odp Tes	-1,27	0,24	Ano	0,028	Zamítnuta
J-B1 II. Odp Ahl	-0,16	-0,60	Ano			B-B1 II. Odp Ahl	-1,76	1,94	Ano		
J-B2 II. Odp Tes	1,58	-0,04	Ano	0,068	Nezamítnuta	B-B2 II. Odp Tes	0,14	0,37	Ano	0,457	Nezamítnuta
J-B2 II. Odp Ahl	-0,95	-0,23	Ano			B-B2 II. Odp Ahl	-0,96	-1,01	Ano		
J-C1 II. Odp Tes	1,65	0,06	Ano	0,102	Nezamítnuta	B-C1 II. Odp Tes	-0,15	-0,97	Ano	0,993	Nezamítnuta
J-C1 II. Odp Ahl	-1,40	-0,08	Ano			B-C1 II. Odp Ahl	0,15	-1,36	Ano		
J-C2 II. Odp Tes	0,80	-0,27	Ano	0,070	Nezamítnuta	B-C2 II. Odp Tes	0,51	-1,04	Ano	0,512	Nezamítnuta
J-C2 II. Odp Ahl	-1,02	0,22	Ano			B-C2 II. Odp Ahl	0,03	-0,32	Ano		
J-D1 II. Odp Tes	1,36	-0,01	Ano	0,035	Zamítnuta	B-D1 II. Odp Tes	0,04	-0,71	Ano	0,217	Nezamítnuta
J-D1 II. Odp Ahl	-0,15	-0,72	Ano			B-D1 II. Odp Ahl	1,45	0,34	Ano		
J-D2 II. Odp Tes	1,78	0,68	Ano	0,111	Nezamítnuta	B-D2 II. Odp Tes	2,03	1,73	Ne	0,627	Nezamítnuta
J-D2 II. Odp Ahl	1,38	0,17	Ano			B-D2 II. Odp Ahl	1,63	0,01	Ano		
J-E1 II. Odp Tes	0,32	-1,03	Ano	0,148	Nezamítnuta	B-E1 II. Odp Tes	0,40	-0,89	Ano	0,871	Nezamítnuta
J-E1 II. Odp Ahl	-0,41	-0,82	Ano			B-E1 II. Odp Ahl	0,80	-0,53	Ano		
J-E2 II. Odp Tes	-1,08	-0,25	Ano	0,488	Nezamítnuta	B-E2 II. Odp Tes	0,49	-0,77	Ano	0,472	Nezamítnuta
J-E2 II. Odp Ahl	-1,51	-0,05	Ano			B-E2 II. Odp Ahl	0,51	-1,02	Ano		
M-A1 II. Odp Tes	-0,60	-0,57	Ano	0,010	Zamítnuta	S-A1 II. Odp Tes	0,62	0,35	Ano	0,023	Zamítnuta
M-A1 II. Odp Ahl	-1,30	0,59	Ano			S-A1 II. Odp Ahl	0,96	-0,36	Ano		
M-A2 II. Odp Tes	1,01	-0,25	Ano	0,009	Zamítnuta	S-A2 II. Odp Tes	0,55	-0,69	Ano	0,004	Zamítnuta
M-A2 II. Odp Ahl	-1,54	1,48	Ano			S-A2 II. Odp Ahl	-0,26	-0,07	Ano		
M-B1 II. Odp Tes	1,49	0,25	Ano	0,007	Zamítnuta	S-B1 II. Odp Tes	-1,27	0,24	Ano	0,049	Zamítnuta
M-B1 II. Odp Ahl	1,40	-0,03	Ano			S-B1 II. Odp Ahl	-0,32	-0,73	Ano		
M-B2 II. Odp Tes	1,07	-0,35	Ano	0,019	Zamítnuta	S-B2 II. Odp Tes	0,14	-0,96	Ano	0,589	Nezamítnuta
M-B2 II. Odp Ahl	-0,40	-0,40	Ano			S-B2 II. Odp Ahl	0,54	-0,60	Ano		
M-C1 II. Odp Tes	-0,05	-0,91	Ano	0,000	Zamítnuta	S-C1 II. Odp Tes	-0,15	-0,97	Ano	0,165	Nezamítnuta
M-C1 II. Odp Ahl	-1,65	1,36	Ano			S-C1 II. Odp Ahl	-0,65	-0,68	Ano		
M-C2 II. Odp Tes	0,15	-0,87	Ano	0,000	Zamítnuta	S-C2 II. Odp Tes	0,03	-0,32	Ano	0,119	Nezamítnuta
M-C2 II. Odp Ahl	-0,41	-0,39	Ano			S-C2 II. Odp Ahl	0,04	-1,26	Ano		
M-D1 II. Odp Tes	0,25	-1,22	Ano	0,000	Zamítnuta	S-D1 II. Odp Tes	0,04	-0,71	Ano	0,027	Zamítnuta
M-D1 II. Odp Ahl	-1,48	0,84	Ano			S-D1 II. Odp Ahl	1,16	0,44	Ano		
M-D2 II. Odp Tes	1,58	-0,05	Ano	0,000	Zamítnuta	S-D2 II. Odp Tes	2,03	1,73	Ne	0,271	Nezamítnuta
M-D2 II. Odp Ahl	-0,66	0,60	Ano			S-D2 II. Odp Ahl	0,00	0,10	Ano		
M-E1 II. Odp Tes	1,18	-0,35	Ano	0,001	Zamítnuta	S-E1 II. Odp Tes	0,40	-0,89	Ano	0,177	Nezamítnuta
M-E1 II. Odp Ahl	1,93	2,30	Ne			S-E1 II. Odp Ahl	0,46	-0,65	Ano		
M-E2 II. Odp Tes	0,57	-0,27	Ano	0,000	Zamítnuta	S-E2 II. Odp Tes	0,49	-0,77	Ano	0,061	Nezamítnuta
M-E2 II. Odp Ahl	0,13	-0,25	Ano			S-E2 II. Odp Ahl	0,90	0,50	Ano		

Tabulka 8 Testování normality a shody mezi daty naměřenými odporovými vlhkoměry

Odp Tes – vlhkoměr Testo 606-2

Odp Ahl – vlhkoměr Ahl memo FH A636-MF

Vzorek	Šikmost	Špičatost	Norm. roz	P-hodnota	Shoda	Vzorek	Šikmost	Špičatost	Norm. roz	P-hodnota	Shoda
J-A1 II. Kap Tes	-1,08	1,21	Ano	0,036	Zamítnuta	B-A1 II. Kap Tes	1,04	-0,09	Ano	0,003	Zamítnuta
J-A1 II. Kap Ahl	-1,25	1,04	Ano			B-A1 II. Kap Ahl	0,77	-0,41	Ano		
J-A2 II. Kap Tes	0,71	-0,68	Ano	0,043	Zamítnuta	B-A2 II. Kap Tes	0,82	-0,48	Ano	0,002	Zamítnuta
J-A2 II. Kap Ahl	1,24	-0,27	Ano			B-A2 II. Kap Ahl	1,22	-0,23	Ano		
J-B1 II. Kap Tes	1,80	1,09	Ano	0,483	Nezamítnuta	B-B1 II. Kap Tes	-0,39	-0,61	Ano	0,000	Zamítnuta
J-B1 II. Kap Ahl	0,87	-0,28	Ano			B-B1 II. Kap Ahl	0,18	-0,37	Ano		
J-B2 II. Kap Tes	1,38	-0,21	Ano	0,377	Nezamítnuta	B-B2 II. Kap Tes	-0,81	0,77	Ano	0,001	Zamítnuta
J-B2 II. Kap Ahl	1,11	-0,32	Ano			B-B2 II. Kap Ahl	-0,90	-0,71	Ano		
J-C1 II. Kap Tes	1,20	0,03	Ano	0,383	Nezamítnuta	B-C1 II. Kap Tes	0,14	-1,43	Ano	0,042	Zamítnuta
J-C1 II. Kap Ahl	0,80	-0,62	Ano			B-C1 II. Kap Ahl	0,26	-1,28	Ano		
J-C2 II. Kap Tes	0,93	-0,08	Ano	0,957	Nezamítnuta	B-C2 II. Kap Tes	0,15	-1,14	Ano	0,007	Zamítnuta
J-C2 II. Kap Ahl	0,10	-0,75	Ano			B-C2 II. Kap Ahl	-0,25	-1,29	Ano		
J-D1 II. Kap Tes	0,28	-0,96	Ano	0,406	Nezamítnuta	B-D1 II. Kap Tes	-1,01	-0,14	Ano	0,654	Nezamítnuta
J-D1 II. Kap Ahl	0,53	-0,85	Ano			B-D1 II. Kap Ahl	-0,27	0,64	Ano		
J-D2 II. Kap Tes	0,58	-0,81	Ano	0,516	Nezamítnuta	B-D2 II. Kap Tes	1,56	-0,05	Ano	0,639	Nezamítnuta
J-D2 II. Kap Ahl	0,19	-1,26	Ano			B-D2 II. Kap Ahl	1,26	-0,18	Ano		
J-E1 II. Kap Tes	-0,35	-0,35	Ano	0,000	Zamítnuta	B-E1 II. Kap Tes	0,11	-0,88	Ano	0,121	Nezamítnuta
J-E1 II. Kap Ahl	-1,40	0,20	Ano			B-E1 II. Kap Ahl	0,51	-1,02	Ano		
J-E2 II. Kap Tes	-1,16	-0,15	Ano	0,000	Zamítnuta	B-E2 II. Kap Tes	0,84	-0,71	Ano	0,230	Nezamítnuta
J-E2 II. Kap Ahl	0,22	-0,12	Ano			B-E2 II. Kap Ahl	1,22	-0,38	Ano		
M-A1 II. Kap Tes	-0,98	-0,37	Ano	0,000	Zamítnuta	S-A1 II. Kap Tes	0,15	-0,90	Ano	0,003	Zamítnuta
M-A1 II. Kap Ahl	-0,74	-0,63	Ano			S-A1 II. Kap Ahl	0,04	-0,76	Ano		
M-A2 II. Kap Tes	0,33	-0,17	Ano	0,056	Nezamítnuta	S-A2 II. Kap Tes	-1,40	1,18	Ano	0,609	Nezamítnuta
M-A2 II. Kap Ahl	-1,20	-0,25	Ano			S-A2 II. Kap Ahl	-0,51	-0,28	Ano		
M-B1 II. Kap Tes	1,03	-0,28	Ano	0,168	Nezamítnuta	S-B1 II. Kap Tes	1,49	0,27	Ano	0,178	Nezamítnuta
M-B1 II. Kap Ahl	-0,57	0,62	Ano			S-B1 II. Kap Ahl	0,64	-0,67	Ano		
M-B2 II. Kap Tes	0,75	-0,18	Ano	0,000	Zamítnuta	S-B2 II. Kap Tes	0,60	-0,80	Ano	0,903	Nezamítnuta
M-B2 II. Kap Ahl	-0,51	0,60	Ano			S-B2 II. Kap Ahl	0,87	-0,64	Ano		
M-C1 II. Kap Tes	-0,01	-1,25	Ano	0,042	Zamítnuta	S-C1 II. Kap Tes	-0,34	-0,08	Ano	0,075	Nezamítnuta
M-C1 II. Kap Ahl	0,23	-0,89	Ano			S-C1 II. Kap Ahl	-0,05	-0,74	Ano		
M-C2 II. Kap Tes	-0,36	-0,85	Ano	0,119	Nezamítnuta	S-C2 II. Kap Tes	1,08	-0,18	Ano	0,110	Nezamítnuta
M-C2 II. Kap Ahl	0,00	-1,08	Ano			S-C2 II. Kap Ahl	0,76	0,04	Ano		
M-D1 II. Kap Tes	0,38	-0,47	Ano	0,000	Zamítnuta	S-D1 II. Kap Tes	0,21	-0,45	Ano	0,007	Zamítnuta
M-D1 II. Kap Ahl	1,31	-0,26	Ano			S-D1 II. Kap Ahl	0,03	-0,53	Ano		
M-D2 II. Kap Tes	0,59	-0,56	Ano	0,000	Zamítnuta	S-D2 II. Kap Tes	0,52	-0,40	Ano	0,040	Zamítnuta
M-D2 II. Kap Ahl	0,67	-0,76	Ano			S-D2 II. Kap Ahl	1,20	-0,22	Ano		
M-E1 II. Kap Tes	0,79	-0,29	Ano	0,000	Zamítnuta	S-E1 II. Kap Tes	1,25	0,06	Ano	0,022	Zamítnuta
M-E1 II. Kap Ahl	0,66	0,90	Ano			S-E1 II. Kap Ahl	1,44	-0,13	Ano		
M-E2 II. Kap Tes	1,22	-0,32	Ano	0,000	Zamítnuta	S-E2 II. Kap Tes	0,88	-0,47	Ano	0,126	Nezamítnuta
M-E2 II. Kap Ahl	-0,21	-0,80	Ano			S-E2 II. Kap Ahl	1,17	-0,32	Ano		

Tabulka 9 Testování normality a shody mezi daty naměřenými kapacitními vlhkoměry

Kap Tes – sonda Testo 0636 6160

Kap Ahl – sonda Ahlmemo FH A696-MF

6. Diskuze

Krabicové grafy uvedené na obr. 22 vizualizují hodnoty absolutní vlhkosti jednotlivých dřevin naměřené odporovou (Testo 606-2) a kapacitní metodou (Testo 0636 6160). Krabicové grafy uvedené na obr. 24-31 v příloze zobrazují naměřené hodnoty jednotlivých vzorků. Na základě uvedených grafů lze konstatovat, že variabilita naměřených hodnot klesá společně s absolutní vlhkostí vzorku. To platí zejména při měření odporovou metodou. Pokles variability hodnot naměřených kapacitní metodou je méně znatelný. Na základě grafů lze potvrdit dříve popsanou skutečnost, kterou uvádí výrobce v manuálu k obsluze obou vlhkoměrů a sice, že pro získání relevantních odhadů absolutní vlhkosti dřeva odporovou nebo kapacitní metodou je nutné měření několikrát opakovat na různých místech povrchu vzorku.

Krabicové grafy na obr. 23 zobrazují naměřené absolutní vlhkosti čtyř různých vzorků třemi různými metodami. Od každé dřeviny byl vybrán jeden vzorek a měřeno bylo metodou odporovou (Testo 606-2), kapacitní (Testo 0636 6160) a sorpční (Testo 0636 2135). V tabulce 3 jsou porovnány variační koeficienty hodnot naměřených na jednotlivých vzorkách různými metodami. Na základě těchto podkladů lze konstatovat, že nejmenší variabilitu naměřených hodnot vykazuje metoda sorpční a největší metoda kapacitní. Velmi nízká variabilita hodnot naměřených sorpční metodou ovšem nemusí znamenat, že touto metodou je měření přesnější než zbylými dvěma metodami. Pro stanovení přesnosti jednotlivých přístrojů by bylo zapotřebí pro srovnání změřit absolutní vlhkost vzorků referenční metodou, tedy například metodou gravimetrickou.

V tabulkách (Tabulka 4, 5, 6 a 7) jsou zobrazeny hodnoty vypočítané při testování shody výběrů naměřených hodnot stejného vzorku odporovou (Testo 606-2) a kapacitní metodou (Testo 0636 6160). Nejprve byla ověřována normalita rozdělení naměřených hodnot pomocí šikmosti a špičatosti. Normální rozdělení bylo zamítnuto pouze u 9 souborů hodnot z celkových 400. Dále byla testována shoda výběrů dvouvýběrovým t-testem na 5 % hladině významnosti. V případě, že soubor neměl normální rozdělení, byl místo dvouvýběrového t-testu použit neparametrický Kolmogorovův–Smirnovův test. Shoda nebyla zamítnuta pouze v 5 případech z celkově 200 možných. Z toho vyplývá, že každý z přístrojů měří odlišné hodnoty absolutní vlhkosti.

Pro účely druhého měření (provedeno 3.12.2022) byl zapůjčen odporový vlhkoměr Ahlmemo FH A636-MF a kapacitní vlhkoměr Ahlmemo FH A696-MF. Hodnoty naměřené

těmito přístroji byly následně porovnány s hodnotami naměřenými přístroji od společnosti Testo využívající stejnou metodu měření. Účelem šetření bylo zjistit, do jaké míry jsou hodnoty naměřené použitím stejné metody ovšem přístrojem různých výrobců shodné. Shoda výběrů byla testována stejným způsobem jako při porovnávání dvou odlišných metod. Nejprve byla testována normalita rozdělení pomocí šikmosti a špičatosti a dále shoda výběrů dvouvýběrovým t-testem, případně použitím testu Kolmogorov-Smirnov. U odporové metody byla shoda zamítnuta v 18 případech ze 40 celkových a u kapacitní metody v 21 případech ze 40. Shoda výběrů tak byla zamítnuta v přibližně polovině případech.

Z naměřených hodnot nelze stanovit přesnost jednotlivých přístrojů. Statistické šetření pouze potvrdilo, že variabilita hodnot naměřených nepřímými elektrickými metodami je znatelná a lze je použít pouze pro odhad absolutní vlhkosti řeziva, nikoliv však pro její přesné stanovení. K tomu je zapotřebí užít referenčních metod, jako například metody gravimetrické.

Rovněž se ukázalo, že při měření vlhkosti materiálu odlišnými metodami mohou vznikat znatelné odchylky. U hodnot získaných měřením přístroji různých výrobců užívajících stejné metody také nedošlo ke shodě ve všech případech, ovšem ke shodě naměřených souborů hodnot došlo výrazně častěji.

Testovaným zástupcem elektrické odporové metody byl vlhkoměr Testo 606-2. Oproti testované kapacitní vlhkoměrné sondě Testo 0636 6160 má odporový vlhkoměr výhody v univerzálnosti použití. Kapacitní vlhkoměry ke správné funkci potřebují plnoplošný kontakt ploché měřicí elektrody s měřeným vzorkem. Při nedodržení této podmínky vzniká zkreslení. To lze částečně eliminovat použitím vhodnějších měřicích elektrod. Například při užití povrchových pružinových elektrod lze měřit i mírně členitější povrch, avšak standardní zářecí měřicí elektrody odporového vlhkoměru změní vzorek s tímto povrchem spolehlivěji.

Kapacitní vlhkoměry mohou měřit vlhkost ve vzorku do větší hloubky než odporové. Dle výrobce dokáže kapacitní sonda Testo 0636 6160 měřit vlhkost materiálu až do hloubky 50 mm. Výrobce však také upozorňuje, že naměřená hodnota je silněji ovlivněna vodou obsaženou k blíže k povrchu. Odporové vlhkoměry již z podstaty své konstrukce mohou měřit vlhkost materiálu jen do hloubky několika milimetrů v závislosti na hloubce, do které jsou při měření zaráženy měřicí elektrody. Odlišnost parametru hloubky měření vlhkosti může být jedním z důvodů neshody naměřených hodnot mezi odporovou a kapacitní

metodou. V případě, že by byla voda uložena hlouběji ve vzorku, tak by ji dokázala zaznamenat pouze kapacitní sonda, odporový vlhkoměr by na hlouběji uloženou vodu takřka nereagoval.

Méně rozšířený princip měření vlhkosti dřeva je metoda sorpční. V experimentálním měření byla tato metoda zastoupena sondou Testo 0636 2135. Díky tomu, že měření sorpční metodou neprobíhá na povrchu vzorku, ale v předem vyvrtaném otvoru, odpadá nutnost jakékoli přípravy povrchu měřeného vzorku. Před měřením je ale třeba připravit samotný otvor. V případě sondy Testo 0636 2135 to znamená předvrtat otvor o hloubce minimálně 40 mm. Přístroje využívající sorpční metodu tak mohou měřit vlhkost hlouběji, než většina standardních kapacitních a odporových vlhkoměrů. Nevýhodou této metody je časová náročnost. Měření elektrickými metodami trvá několik sekund, za to měření řeziva sorpční metodou může trvat až 30 minut v závislosti na zkoumané dřevině a obsahu vody v řezivu.

Výhodou odporového vlhkoměru Testo 606-2 oproti zbylým dvěma zkoušeným přístrojům je jeho skladnost. Díky jeho kompaktním rozměrům ho lze bez problému přenášet, což je v dřevařské praxi velmi ceněná vlastnost. Pro použití vlhkoměrných sond Testo 0636 6160 a Testo 0636 2135 platí podmínka jejich připojení k měřicí ústředně Testo 635, což znesnadňuje možnost transportu. Vlhkoměrné sondy je tedy vhodnější použít například v laboratorních podmínkách, kde budou lépe využity možnosti, které nabízí měření s měřicí ústřednou. Těmi jsou například paměť zařízení a možnost připojení k počítači pro okamžitou analýzu naměřených dat.

Měření kapacitní metodou je nedestruktivní a nezanechává na měřeném řezivu žádné stopy. Po měření vzorku sorpční metodou zůstává ve vzorku vyvrtaný otvor, tudíž se jedná o zkoušku semidestruktivního charakteru. Zařazení odporové metody není jednoznačné. Většina autorů ji zařazuje mezi nedestruktivní zkoušky, avšak po měření zůstávají na materiálu drobné otvory po zarážecích měřicích elektrod. Použití metody na změření vlhkosti například finálního dřevěného výrobku není vhodné, jelikož dojde k poškození jeho povrchu. Z toho důvodu někteří autoři označují měření odporovou metodou jako „takřka nedestruktivní“ (Dietsch et al., 2014). Drobné otvory po hrotových elektrodách odporového vlhkoměru jsou zobrazeny na obr. 21. Za zcela destruktivní lze označit metodu gravimetrickou, která však tento zápor kompenzuje svojí vysokou přesností.

Při delším skladování dřevěných vzorků v místnosti s prostředím o teplotě 20 °C a relativní vlhkosti okolo 40 % by se absolutní vlhkost vzorků měla ustálit na hodnotě přibližně 7,5 %. Této hodnotě se při posledním měření nejvíce blížil sorpční a odporový vlhkoměr. Kapacitní sonda naměřila zpravidla hodnoty vyšší.

Příslušné normy pro odhad absolutní vlhkosti odporovou a kapacitní metodou doporučují použití těchto vlhkoměrů pro řezivo o absolutní vlhkosti v rozmezí 7 až 30 %. V praxi se však s řezivem o absolutní vlhkosti pod 7 % lze setkat pouze ojediněle, proto by povětšinou mělo stačit sledovat pouze horní hranici rozmezí, která přibližně odpovídá stavu mezi nasycení buněčných stěn.

V místních podmínkách jsou nejběžněji používané odporové vlhkoměry, ale například v USA jsou k orientačnímu měření vlhkosti řeziva častěji využívány vlhkoměry kapacitní (Gandelová et al., 2002). Měření vlhkosti dřeva sorpční metodou není příliš rozšířeno a samotná metoda se používá zejména pro měření vlhkosti stavebních materiálů, hlavně betonu. Gravimetrická metoda je pro svoji náročnost na čas a vybavení používána zejména v laboratořích, například pro kalibraci a ověření přesnosti elektrických vlhkoměrů.

7. Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala popisem metod užívaných k měření vlhkosti dřevěných materiálů. Obsah vody ovlivňuje výrobky ze dřeva po celou dobu jejich životnosti, kterou může znatelně zkrátit. Dřevo je hygroskopický materiál. Je tedy schopno přijímat a odevzdávat vodu z okolí. Z toho důvodu jeho vlhkost nezůstává konstantní, ale neustále se mění v závislosti na prostředí. Zvýšená vlhkost s sebou nese riziko napadení dřeva dřevokaznými houbami, které negativně ovlivňují mechanické vlastnosti dřeva. Výrazné změny vlhkosti dřeva způsobují sesychání a bobtnání, tedy změny jeho rozměrů. V krajních případech může dojít až ke zborcení, které se projevuje vznikem trhlin ve dřevě. To může mít za následek například porušení dřevěné konstrukce nebo jiná bezpečnostní rizika. Z těchto důvodů je třeba vlhkost dřevěných materiálů sledovat přístroji k tomu určenými – vlhkoměry.

Pro účely experimentálního měření bylo připraveno celkem čtyřicet vzorků vyrobených ze dřeva čtyř různých stromů (jasan, modřín, borovice a smrk). Vzorky se od sebe lišily rozdílnou vlhkostí, zapříčiněnou různou dobou a způsobem skladování řeziva, ze kterého byly vyrobeny. Připravené vzorky byly skladovány po dobu dvou měsíců ve vytápěné místnosti, kde postupně vysychaly. Absolutní vlhkost vzorků byla pravidelně měřena. Celkem proběhlo pět standardních zkušebních měření. Díky tomuto postupu bylo možné porovnat chování vlhkoměrů za různých vlhkostních podmínek.

Vzorky byly měřeny třemi různými metodami. Měření odporovou metodou proběhlo pomocí vlhkoměru Testo 606-2. K měření kapacitní metodou byla použita vlhkoměrná sonda Testo 0636 6160 a sorpční metodou měřila vlhkoměrná sonda Testo 0636 2135. Sondy byly během měření připojeny k měřicí ústředně Testo 635-2.

Výsledky byly zpracovány a vyneseny do grafů a tabulek. Ze statistického šetření vyplynulo, že shoda dat naměřených různými metodami je ojedinělá. Shoda naměřených hodnot byla posuzována také v rámci stejné metody vlhkoměry dvou různých výrobců. K tomuto účelu byl zapůjčen odporový a kapacitní vlhkoměr od společnosti Ahlborn. Zde došlo ke shodě výběrů přibližně v polovině případů. Sledována byla také variabilita naměřených hodnot. S nejmenší variabilitou měřila sonda užívající sorpční metody a s největší sonda kapacitní. K posouzení přesnosti měření jednotlivých přístrojů ovšem získaná data nestačí. Data naměřená nepřímými metodami by bylo nutné porovnat s metodou gravimetrickou, která slouží jako metoda referenční. Pro podrobnější zpracování tématu by

tedy bylo vhodné měřit současně absolutní vlhkost dřevěných vzorků metodami nepřímými a přímou referenční metodou gravimetrickou, se kterou by byly naměřené hodnoty následně porovnávány. Rovněž by bylo vhodné k experimentálnímu měření použít více přístrojů různých výrobců a při jejich následném porovnávání zohlednit pořizovací cenu.

Seznam použitých zdrojů

BAŠUS, V. *Příručka měřicí techniky pro strojírenství a energetiku*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965.

BRUMOVSKÝ, M., RADA, O. *Dřevo v rekreačním objektu*. Praha: Brázda, 1991. ISBN 80-209-0187-6.

DEJMAL, Aleš. *Základy hydrotermické úpravy a ochrany dřeva*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1995. ISBN 80-7157-163-6.

DIETSCH, P., FRANKE, S., FRANKE, B., GAMPER, A., WINTER, S. *Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts*. Journal of Civil Structural Health Monitoring [online], 2015. [cit. 2022-02-27]. ISSN 2190-5452. Dostupné z: doi:10.1007/s13349-014-0082-7

GANDELOVÁ, L., ŠLEZINGEROVÁ, J., HORÁČEK, P. *Nauka o dřevě*. 2. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2002. ISBN 80-7157-577-1.

HORÁČEK, P. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1998. ISBN 80-7157-347-7.

JAMES, W. *Electric Moisture Meters for Wood*. United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1988. [cit. 13.03.2022] Dostupné z: <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr06.pdf>

JOHANSSON, J., BLOM, Å., DVINSKIKH, S. *NMR-measurements for determination of local moisture content of coated wood*. Journal of Coatings Technology and Research [online], 2013, [cit. 13.3.2022]. ISSN 1547-0091. Dostupné z: doi:10.1007/s11998-013-9484-4

KEYLWERTH, R., NOACK, D. *Über den Einfluß höherer Temperaturen auf die elektrische Holzfeuchtigkeits-messung nach dem Widerstandsprinzip. Holz als Roh- und Werkstoff [online]. 1956, [cit. 14.03.2022]. ISSN 0018-3768. Dostupné z: doi:10.1007/BF02617621*

KLOIBER, M., DRDÁČKÝ, M. *Diagnostika dřevěných konstrukcí*. Praha: ČKAIT, 2015. Technická knihnice (ČKAIT). ISBN 978-80-87438-64-0.

KOPECKÝ, D., KADLEC, K. *Měření vlhkosti v pevných látkách*. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2019. [cit. 11.03.2022] Dostupné z: http://www.cukr-listy.cz/on_line/2019/PDF/119-123.pdf

KURJATKO, S. *Nauka o dreve. Návodny na cvičenia z fyzikálnich vlastností dreva a drevných materiálov*. Zvolen, VŠLD, 1990.

MAKOVÍNY, I. *Meranie Vlhkosti Dreva*. 1. vyd. Zvolen: Mat-centrum, 1995.

MATOVIČ, A. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva*. Brno: Vysoká škola zemědělská, 1993. ISBN 80-7157-086-9.

NIEMZ, P. *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen, 2003. DOI: 10.3929/ethz-a-010635628

NYSTRÖM, J., DAHLQUIST, E. *Methods for determination of moisture content in woodchips for power plants—a review [online]*. Mälardalen University, Västerås, Sweden, 2004. [cit. 10.3.2022] Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2003.11.002

PANSHIN, A. J., ZEEUW, C. De. *Textbook of Wood Technology: Structure, Identification, Properties, and Uses of the Commercial Woods of the United States and Canada*. New York: McGraw-Hill, 1980. ISBN 9780070484412.

PECINA, P., PECINA, J. *Materiály a technologie-dřevo*. Brno: MU, 2006. 132 s. ISBN 80-210-4013-0.

PERELYGIN, L. M. *Náuka o dreve: učebnica pre drevárske školy*. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1965.

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

SVOBODA, L. *Stavební hmoty*. Praha: Jaga Group s.r.o., 2018. ISBN 978-80-8076-057-1.

ŠIMONOVÁ, L. Průvodce k programu Statgraphics. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava – Fakulta elektrotechniky a informatiky – Katedra aplikované matematiky [online], 2006. [cit 21.03.2022] Dostupné z: https://homel.vsb.cz/~sim46/Pruvodce_2_2.pdf

ŠKÁRA, I. *Materiály a technologie: dřevo*. Brno: Masarykova univerzita v Brně, 1996.

TIEMANN, H. D. *Effect of moisture upon the strength and stiffness of wood*. Washington, D.C.: U.S. Dept. of Agriculture. 1906

TESTO s.r.o. *Manuál k obsluze vlhkoměru*.

TSOUMIS, G. *Science and technology of wood*. Chapman & Hall, 1991. ISBN 9780412078514.

VANIN, S. I. *Nauka o dřevě*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1955

VLKOVÁ, V., POLENO, Z., RYBNÍČEK, P. *Lesnický naučný slovník*. Praha: Agrospoj, 1994. ISBN 80-7084-111-7.

Použité normy:

ČSN EN 844 – Kulatina a řezivo – terminologie
ČSN EN 13183-1: *Vlhkost vzorku řeziva – Část 1: Stanovení váhovou metodou.* 2002
ČSN EN 13183-2: *Vlhkost vzorku řeziva – Část 2: Odhad odporovou metodou.* 2002
ČSN EN 13183-3: *Vlhkost vzorku řeziva – Část 3: Odhad kapacitní metodou.* 2005

Internetové zdroje:

Artisan s.r.o. Dřevo a jeho vlastnosti [online] [cit. 03.02.2022] Dostupné z: <https://www.artisan.cz/drevo-a-jeho-vlastnosti>

BALÁŠ, M., MOSKALÍK, J. *Měření vlhkosti paliv* [online] [cit. 11.03.2022] Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/mereni-vlhkosti-paliv>

ČZU FLD. *Lexikon vad dřeva* [online], 2010. [cit. 01.02.2022] Dostupné z: https://r.fld.czu.cz/vyzkum/multimedia/lexikon_vad/

HORÁK, J., KRPEC, K., MARTINÍK, L., MICHNOVÁ, L., HOPAN, F., KUBESA, P. *Jak si doma stanovit vlhkost a výhřevnost dřeva* [online] [cit. 13.2.2022] Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/9300-jak-si-doma-stanovit-vlhkost-a-vyhrevnost-dreva>

IEC. *IP ratings* [online] [cit. 10.02.2022] Dostupné z: <https://www.iec.ch/ip-ratings>

INFOMET. *Jaký je rozdíl mezi vlhkou teplotou a teplotou rosného bodu?* [online] [cit. 02.02.2022] Dostupné z: <http://www.infomet.cz/index.php?id=read&idd=1309452690>
Ministerstvo zemědělství. *Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2020* [online] [cit. 02.02.2022] Dostupné z: https://eagri.cz/public/web/file/688968/Zprava_o_stavu_lesa_2020_web.pdf

TESTO s.r.o. *Mikrovlonné vlhkoměry MOIST – nedestruktivní a spolehlivé měření vlhkosti stavebních materiálů.* 2015. [Online] [cit 14.03.2022] Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/vlhkost-a-kondenzace-v-konstrukcich/12289-mikrovlonne-vlhkomery-moist-nedestruktivni-a-spolehlive-mereni-vlhkosti-stavebnichmaterialu>

THE WOOD DATABASE. Lauan. [online] [cit. 03.02.2022] Dostupné z: <https://www.wood-database.com/lauan/>

VAVRČÍK, H. *Anatomická stavba dřeva.* Mendelova univerzita v Brně, LDF, Ústav nauky o dřevě [online]. 2004 [cit. 14.02.2022]. Dostupné z: http://ldf.mendelu.cz/und/sites/default/files/multimedia/stavba_dreva/index.htm

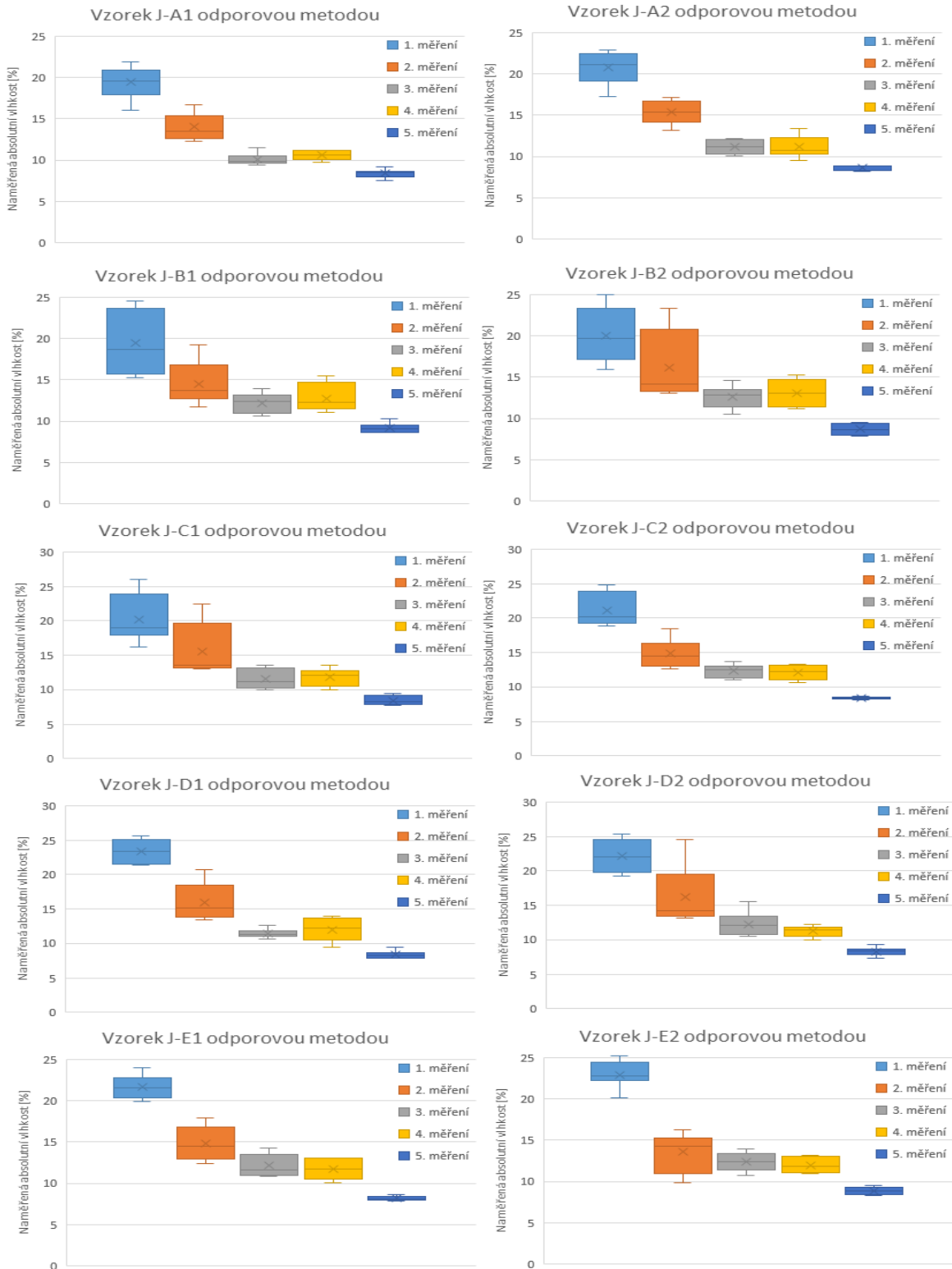
Seznam obrázků

Obrázek 1: Nomogram pro vzájemný přepočet absolutní a relativní vlhkosti dřeva (Vanin, 1955).....	12
Obrázek 2: Schéma uložení vody ve dřevě (Kurjatko 1990)	14
Obrázek 3: Rozložení vlhkosti dřeva rostoucího stromu v příčném řezu ve výšce 55 cm (Tsoumis, 1991)....	16
Obrázek 4: Míra sesychání v jednotlivých směrech v závislosti na vlhkosti dřeva (Panshin a Zeeuw, 1970).	17
Obrázek 5: Zmenšení rozměrů dřeva vlivem sesychání (Perelygin, 1965).....	18
Obrázek 6: Praskliny ve dřevě způsobené vnitřním napětím (Perelygin, 1965)	18
Obrázek 7: Typy borcení dřeva (Svoboda, 2018)	19
Obrázek 8: Schéma sušící váhy (Kopecký a Kadlec, 2019)	21
Obrázek 9: Destilační aparatura ke stanovení vlhkosti (Bašuš, 1965).....	22
Obrázek 10: Měření vlhkosti odporovým vlhkoměrem (Kopecký a Kadlec, 2019)	24
Obrázek 11: Vliv vlhkosti a teploty na elektrický odpor dřeva (upraveno podle Keylwerth a Noack, 1956) .	24
Obrázek 12: Typy měřicích elektrod elektrických odporových vlhkoměrů (Makovíny, 1995).....	25
Obrázek 13: Schéma měření vlhkosti odporovou a kapacitní metodou (Dietsch et al., 2014).....	27
Obrázek 14: Schéma měření vlhkosti odporovou metodou (ČSN EN 13183-2)	32
Obrázek 15: Rozměry použitých vzorků (v mm).....	33
Obrázek 16: Skladování dřevěných vzorků	34
Obrázek 17: Popis odporového vlhkoměru Testo 606-2.....	36
Obrázek 18: Měření odporovým vlhkoměrem Testo 606-2.....	37
Obrázek 19: Kapacitní vlhkoměrná sonda Testo 0636 6160	38
Obrázek 20: Detail sondy Testo 0636 2135.....	39
Obrázek 21: Měření sondou Testo 0636 2135 s použitím přístroje Testo 635-2	40
Obrázek 22: Krabicové grafy naměřených hodnot odporovou a kapacitní metodou	42
Obrázek 23: Krabicové grafy naměřených hodnot metodou odporovou, kapacitní a sorpční	43
Obrázek 24: Krabicové grafy naměřených hodnot odporovou metodou na vzorkách jasanu.....	61
Obrázek 25: Krabicové grafy naměřených hodnot kapacitní metodou na vzorkách jasanu.....	62
Obrázek 26: Krabicové grafy naměřených hodnot odporovou metodou na vzorkách modřínu.....	63
Obrázek 27: Krabicové grafy naměřených hodnot kapacitní metodou na vzorkách modřínu	64
Obrázek 28: Krabicové grafy naměřených hodnot odporovou metodou na vzorkách borovice	65
Obrázek 29: Krabicové grafy naměřených hodnot kapacitní metodou na vzorkách borovice.....	66
Obrázek 30: Krabicové grafy naměřených hodnot odporovou metodou na vzorkách smrku	67
Obrázek 31: Krabicové grafy naměřených hodnot kapacitní metodou na vzorkách smrku.....	68

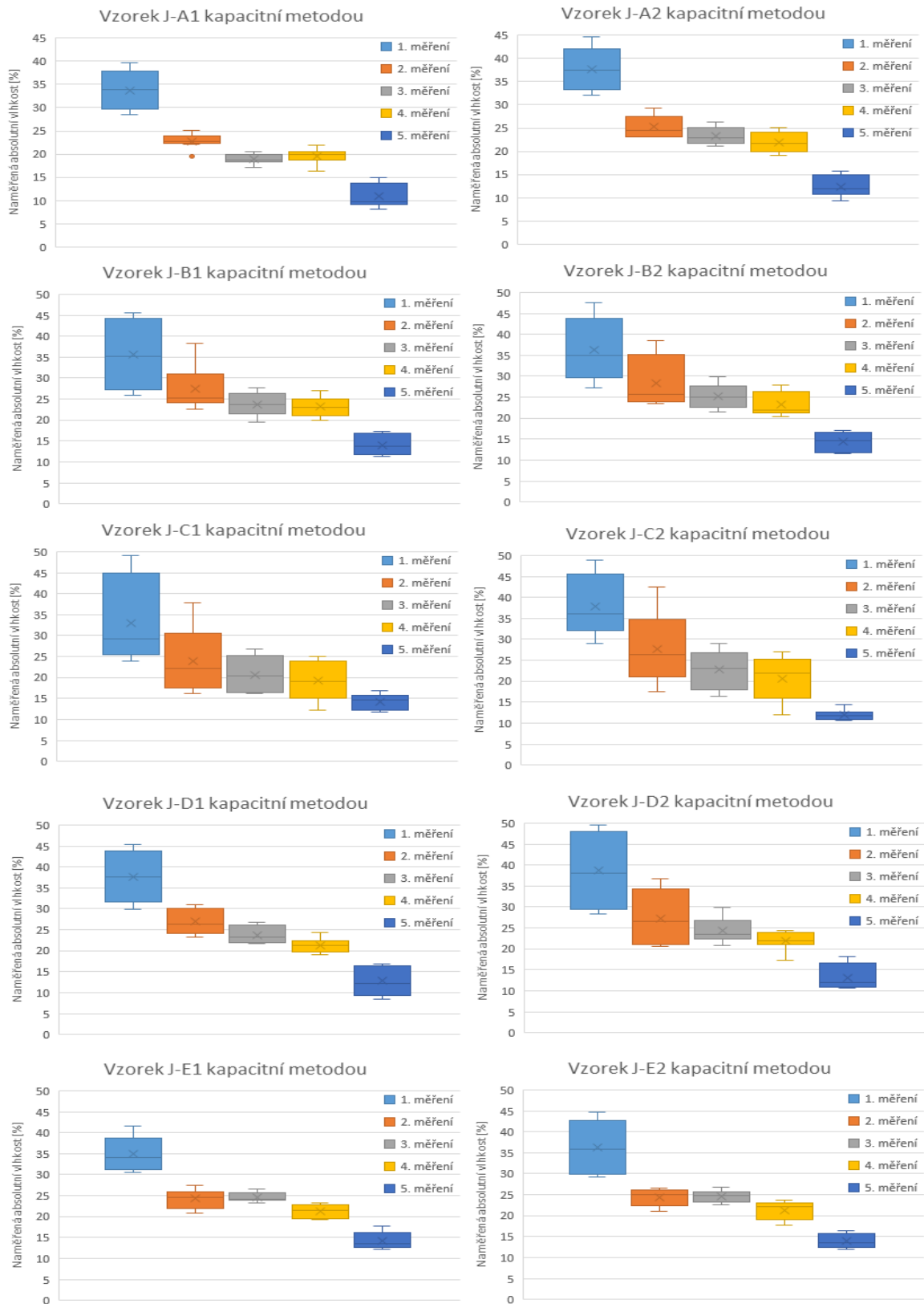
Seznam tabulek

Tabulka 1: Provozní vlhkost některých dřevěných výrobků (Dejmal, 1995)	13
Tabulka 2: Mez hygroskopicity u různých druhů dřev (Matovič, 1993)	15
Tabulka 3: Variační koeficienty naměřených hodnot	43
Tabulka 4: Testování normality a shody mezi odporovou a kapacitní metodou na vzorkách jasanu	44
Tabulka 5: Testování normality a shody mezi odporovou a kapacitní metodou na vzorkách modřínu	45
Tabulka 6: Testování normality a shody mezi odporovou a kapacitní metodou na vzorkách smrku.....	46
Tabulka 7: Testování normality a shody mezi odporovou a kapacitní metodou na vzorkách borovice.....	47
Tabulka 8: Testování normality a shody mezi daty naměřenými odporovými vlhkoměry	48
Tabulka 9: Testování normality a shody mezi daty naměřenými kapacitními vlhkoměry	49

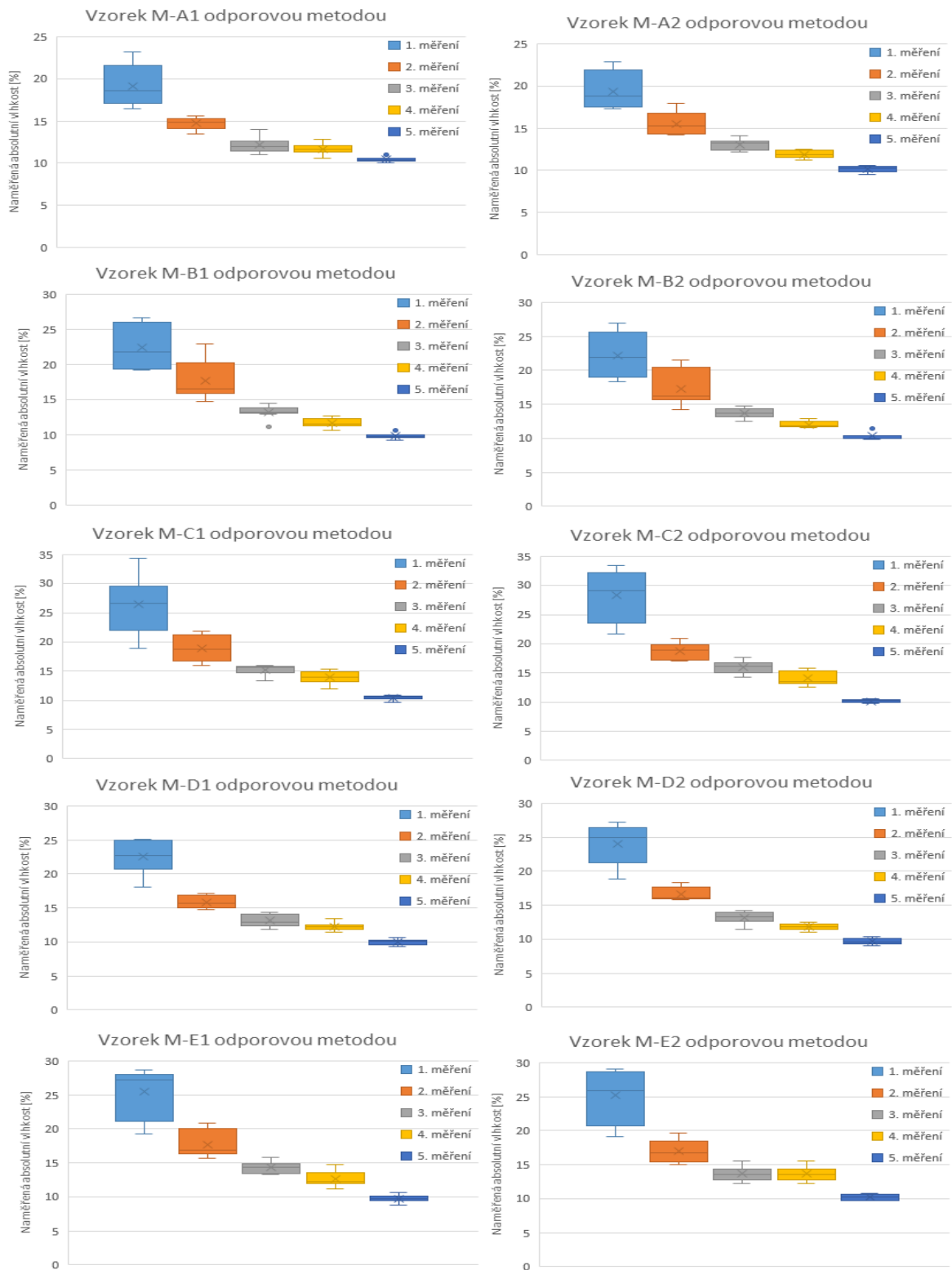
Přílohy



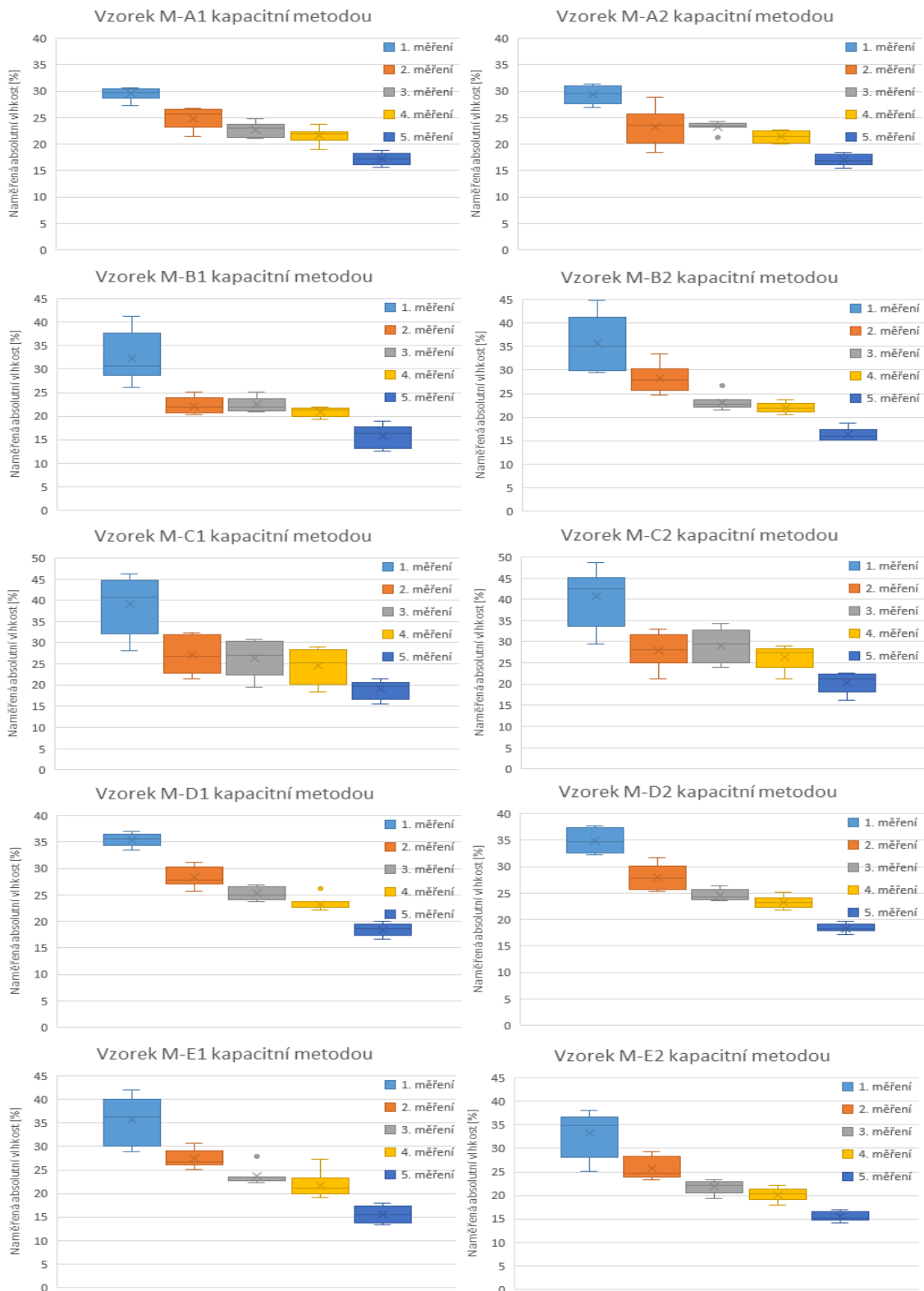
Obrázek 24 Krabicové grafy naměřených hodnot odporovou metodou na vzorkách jasanu



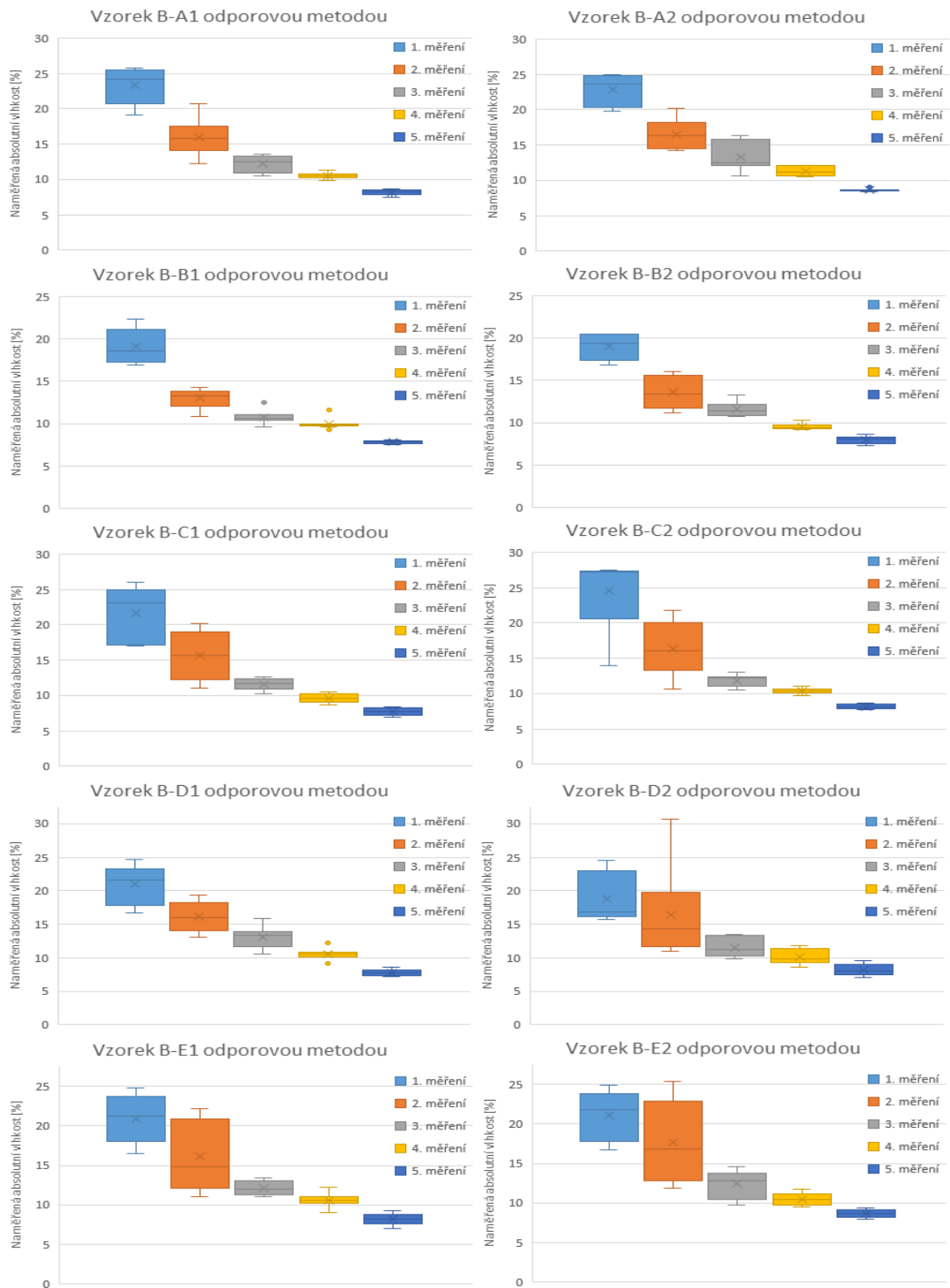
Obrázek 25 Krabicové grafy naměřených hodnot kapacitní metodou na vzorkách jasanu



Obrázek 26 Krabicové grafy naměřených hodnot odporovou metodou na vzorkách modřínu



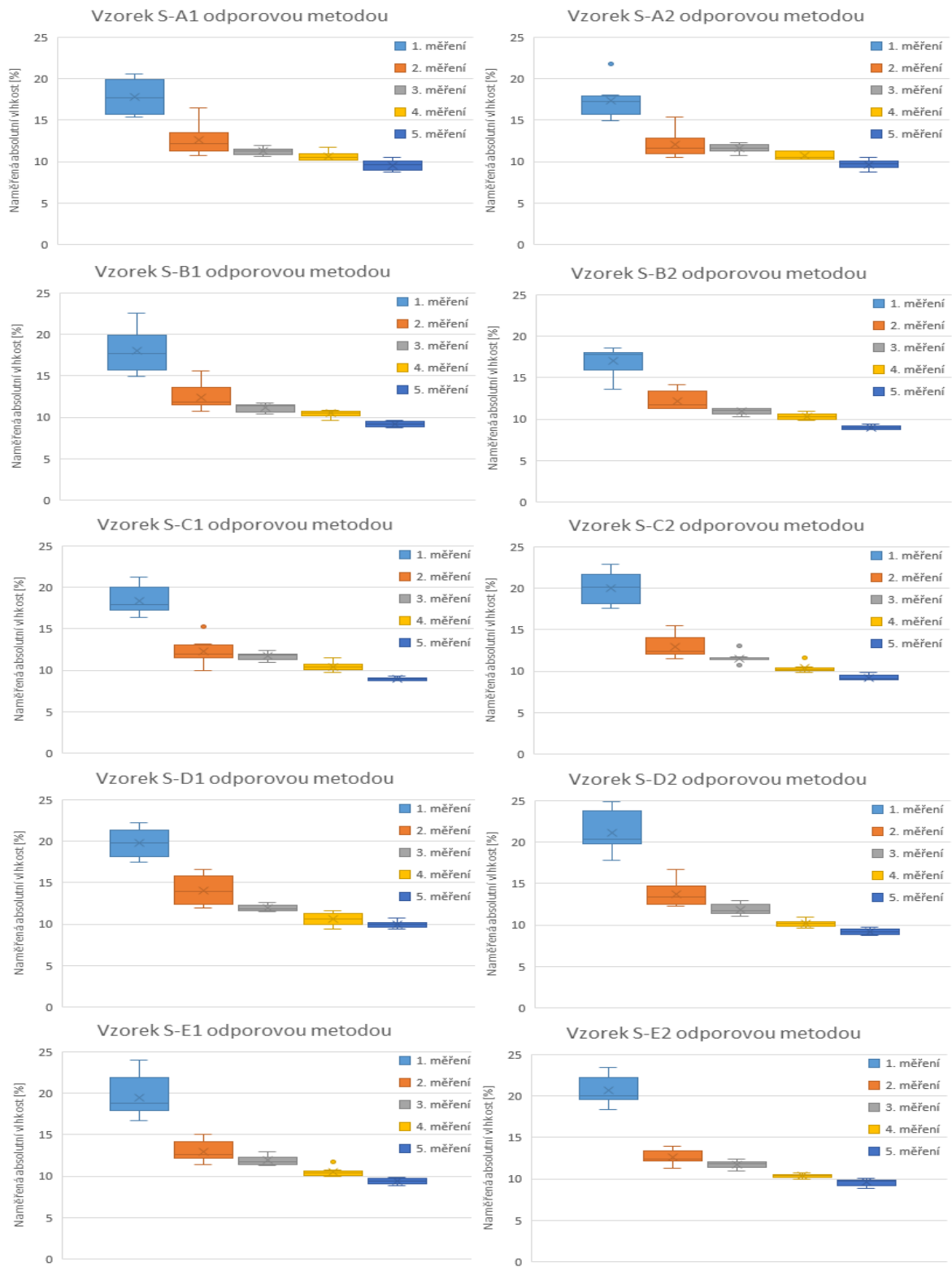
Obrázek 27 Krabicové grafy naměřených hodnot kapacitní metodou na vzorkách modřinu



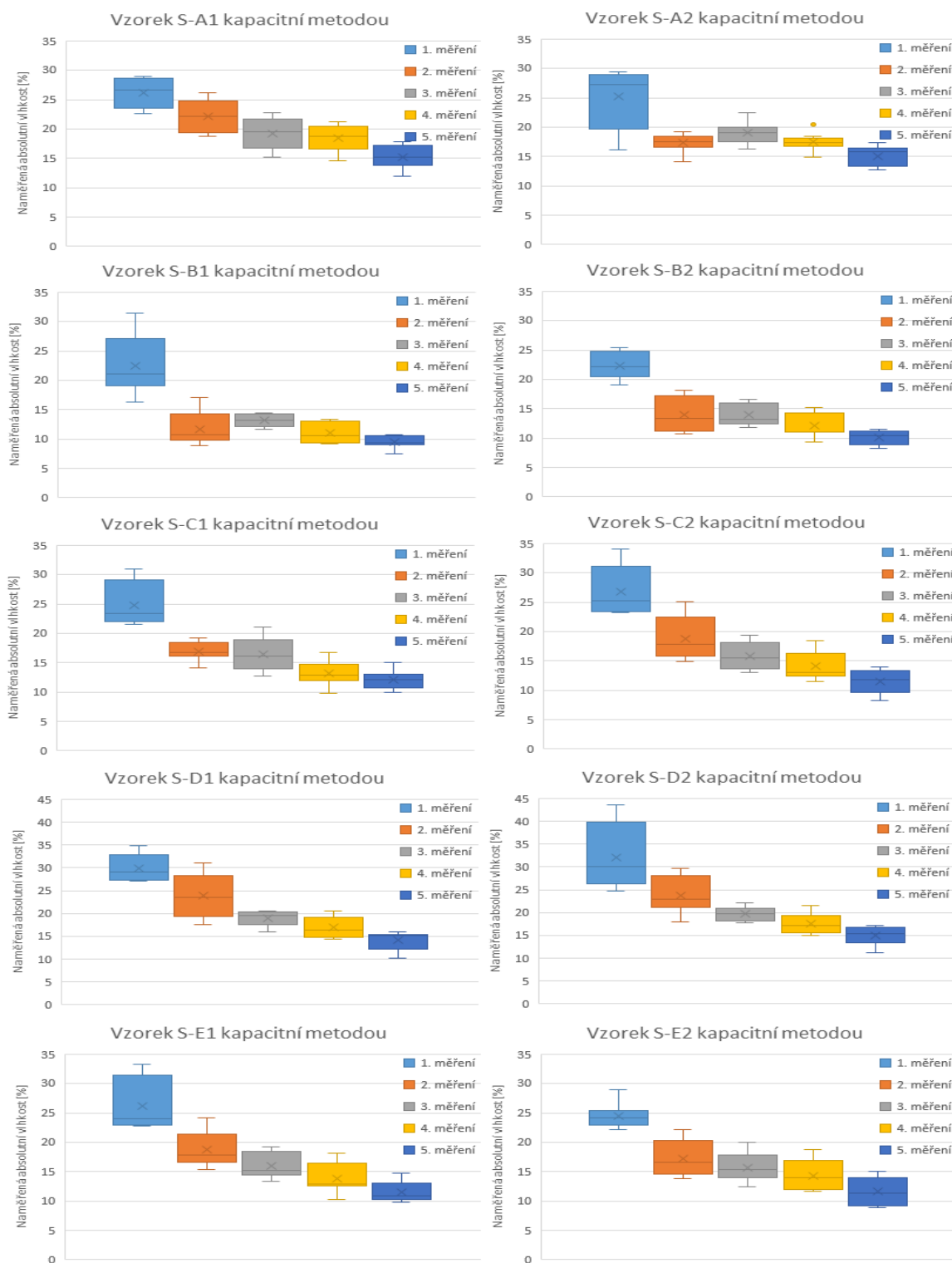
Obrázek 28 Krabicové grafy naměřených hodnot odporovou metodou na vzorkách borovice



Obrázek 29 Krabicové grafy naměřených hodnot kapacitní metodou na vzorkách borovice



Obrázek 30 Krabicové grafy naměřených hodnot odporovou metodou na vzorkách smrku



Obrázek 31 Krabicové grafy naměřených hodnot kapacitní metodou na vzorkách smrku