



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**ANALÝZA METOD PRO STANOVENÍ VLHKOSTI
DŘEVA NEDESTRUKTIVNÍMI METODAMI**

ANALYSIS OF METHODS FOR DETERMINING WOOD MOISTURE BY NON-DESTRUCTIVE METHODS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Změlík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JAN VANĚREK, Ph.D.

BRNO 2021



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Jiří Změlík
Název	Analýza metod pro stanovení vlhkosti dřeva nedestruktivními metodami
Vedoucí práce	doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2020
Datum odevzdání	28. 5. 2021

V Brně dne 30. 11. 2020

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA,
dr.h.c.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Horáček, Petr. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. Brno : Mendelova zemědělské a lesnická univerzita v Brně, 1998. ISBN 80-7157-347-7.

Požgaj, Alexander, a další. Štruktúra a vlastnosti dreva. Bratislava : Príroda a.s., 1997. ISBN 80-07-00960-4

Dietsch, P., Franke, S., Franke, B. Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts. Journal of Civil Structural Health Monitoring. 2014, 5(2):115-127

FEIO, A. O.: Inspection and Diagnosis of Historical Timber Structures: NDT Correlations and Structural Behaviour. Ph.D. thesis – Universidade do Minho, Guimaraes, 2005

MAKOVINY, I.: Meranie vlhkosti dreva. TU Zvolen. Mat – Centrum, Zvolen 1995

SAID, M.N.: Moisture Measurement Guide for Building Envelope Applications. Research Report, Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, 190, August 20, 2004

GAMPER, A., DIETSCH, P., MERK, M., WINTER, S., Building Climate – Long-term measurements to determine the effect on the moisture gradient in timber structures, Final Report, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München, 2012.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Parametr vlhkosti dřeva hraje důležitou roli nejenom ve vztahu k pevnostním charakteristikám, ale i k objemovým změnám a případné degradaci dřevokaznými houbami. V případě dřeva vystaveného vnějším vlivům se běžně používají vlhkoměry pracující na principu měření el. odporu či kapacity. Méně častými jsou pak vlhkoměry dielektrické či mikrovlnné. V teoretické části práce autor zpracuje problematiku vlhkosti dřeva a dále podrobně provede rešerši možných metod, které se využívají pro nedestruktivní stanovení vlhkosti dřeva. V popisu zohlednění uvede zejména princip metod a možné okrajové parametry, které mohou mít u každé metody měření zásadní vliv na dosažené hodnoty.

V praktické části práce poté autor provede:

1. Optimalizační proces, kterým vyhodnotí vybrané nedestruktivní metody pro stanovení vlhkosti dřeva na základě jím vybraných posuzovaných parametrů.
2. Praktické vyhodnocení výsledků vlhkostí stanovených na různých typech dřevin vybranými metodami (odporová, mikrovlnná, kapacitní).

Předpokládaný rozsah práce činí 40 - 50 stran.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Předmětem této bakalářské práce je analýza a porovnání vlhkoměrů vzhledem k jejich ceně, dostupnosti a použitelnosti. V teoretické části byly porovnány dostupné typy vlhkoměrů na základě jejich principu funkce. Následně byly podrobněji porovnány odporové, kapacitní a mikrovlnné přenosné vlhkoměry. Posuzovaných vlhkoměrů bylo pět, tři z řad kapacitních a po jednom z odporových a mikrovlnných. Měření bylo provedeno na dřevinách buku a smrku za gravimetricky známé vlhkosti, která se pohybovala od extrémně nízkých hodnot až po hodnoty extrémně vysoké (i mimo doporučení výrobce). Hodnocení metod bylo provedeno podle Saatyho metody. Vlhkoměry byly následně vybrány dle optimalizace. Po experimentální části byly určeny vhodnosti jednotlivých metod, jejichž pořadí bylo: kapacitní, následně odporová a nejhůře mikrovlnná.

KLÍČOVÁ SLOVA

Měření vlhkosti dřeva, elektrické metody, dielektrické metody, odporový vlhkoměr, kapacitní vlhkoměr, mikrovlnný vlhkoměr, gravimetrické stanovení, buk, smrk, sorpce dřeva

ABSTRACT

Subject of this bachelor thesis is the analysis and comparison of hygrometers considering their price, availability and applicability. Theoretical part compared available types of hygrometers based on their operating principle. Subsequently, resistance, capacitive and microwave portable hygrometers were compared in more detail. There were five reviewed hygrometers in total, with three of them capacitive and one of each resistance and microwave. The measurement was performed on beech and spruce trees at gravimetrically known humidity, ranging from extremely low to extremely high values (even out of bounds recommended by the manufacturer). The evaluation of the methods was performed according to the Saaty's AHP method. Hygrometers were then selected by their optimization. After the experimental part, the suitability of individual methods was determined. The best method was capacitive, followed by resistance and the worst microwave method.

KEYWORDS

Wood moisture measurement, electrical methods, dielectric methods, resistive hygrometer, capacitive hygrometer, microwave hygrometer, gravimetric method, beech, spruce, wood sorption

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Jiří Změlík *Analýza metod pro stanovení vlhkosti dřeva nedestruktivními metodami*. Brno, 2021. 63 s., 0 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Analýza metod pro stanovení vlhkosti dřeva nedestruktivními metodami* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 27.5. 2021

Jiří Změlík
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Analýza metod pro stanovení vlhkosti dřeva nedestruktivními metodami* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 27.5. 2021

Jiří Změlík
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Poděkovat bych chtěl všem členům mé rodiny a mé přítelkyni, za podporu při psaní této závěrečné práce a podporu i v rámci studia během semestru.

Děkuji také vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Janu Vaněrkovi, Ph.D. za odborné vedení práce a vstřícný přístup při konzultování a zpracovávání práce. Poděkovat chci také Ing. Adamu Běťákovi za poskytnutí cenných rad při zpracování mé práce. Díky patří i ústavu THD Fakulty stavební VUT v Brně, který poskytl vlhkoměry použité v experimentální části a připravil mě na tvorbu bakalářské práce.

Obsah

1. Úvod	10
2. Fyzikální vlastnosti dřeva.....	11
2.1. Vlhkostní vlastnosti dřeva.....	11
2.1.1. Vlhkost.....	11
2.1.2. Mez hygroskopicity	11
2.1.3. Rozdělení vody ve dřevě.....	12
2.1.4. Navlhavost	14
2.1.5. Stav vlhkostní rovnováhy	16
3. Měření vlhkosti ve dřevě	18
3.1. Rozdělení použitých způsobů měření vlhkosti	18
3.2. Destruktivní metody měření vlhkosti.....	19
3.2.1. Gravimetrická metoda	19
3.3. Nedestruktivní metody měření vlhkosti	20
3.3.1. Odporová metoda	20
3.3.2. Dielektrické metody	23
3.3.3. Radiační metoda	25
4. Cíl práce.....	27
5. Analýza NDT metod pro měření vlhkosti dřeva in-situ.....	28
5.1. Analyzované metody měření vlhkosti.....	28
5.1.1. Odporová metoda	28
5.1.2. Kapacitní metoda.....	29
5.1.3. Mikrovlnná metoda	31
5.1.4. Výběr metod	33
5.2. Kritéria výběru	33
5.2.1. Pořizovací cena.....	33
5.2.2. Optimalizační proces výběru	34
6. Metodika zkoušek.....	36
6.1. Materiál a metodika měření	36
6.1.1. Dřevo	36

6.1.2.	Použité zařízení pro měření vlhkosti	37
6.1.3.	Postup dosažení rovnovážné vlhkosti dřeva.....	38
6.1.4.	Určení měřících míst zkušebních těles	39
7.	Výsledky zkoušek.....	41
7.1.	Měření vlhkosti na příčných řezech	41
7.2.	Měření vlhkosti na podélných radiálních řezech	42
8.	Vyhodnocení a diskuze zkoušek	43
8.1.	Měření vlhkosti odporovým vlhkoměrem.....	43
8.2.	Měření vlhkosti kapacitními vlhkoměry	45
8.3.	Měření vlhkosti mikrovlnnými vlhkoměry	50
8.4.	Srovnání elektrických a dielektrických metod	52
9.	Shrnutí a diskuze	53
10.	Závěr.....	56

1. ÚVOD

Stejně jako u jiných stavebních materiálů, tak i u dřeva je nutné při jeho využití ve dřevěných konstrukcích vzít v potaz vlhkost, které bude následně vystaven. Zvýšená hodnota vlhkosti ve velké míře způsobuje u dřevěných konstrukcí problémy spojené s objemovými změnami či biologickým napadením. Za míru vlhkosti umožňující napadení dřevokaznými houbami se považuje hranice vlhkosti 20 hm. %. Vysoká vlhkost dřeva může mít za následek napadení dřeva dřevokaznými houbami, které způsobují hnilobné procesy vedoucí k degradaci prvků, v krajním případě může dojít až k poškození konstrukce.

Druhou problematickou vlastností dřeva z hlediska trvanlivosti konstrukce je jeho hygroskopicitu, aktuální vlhkost dřeva tedy závisí na stavu prostředí, jemuž je vystaveno. Pokud je dřevo vystaveno vnějším vlivům, nelze pohlížet shodně na určitou míru absolutní vlhkosti v průběhu roku. V podzimním období bývá zpravidla nižší absolutní vlhkost prostředí. Ovšem vzduch při nižší teplotě pojme zároveň méně vodní páry a s ohledem na počasí bývá zpravidla relativní vlhkost vzduchu vyšší, tedy i rovnovážná vlhkost dřeva bude vyšší než v letním období.

Měření v konstrukci probíhá zpravidla nepřímou, neměří se vlhkost, ale pouze veličina, která s vlhkostí určitým způsobem souvisí. Pro správné měření vlhkosti je třeba znát vliv okolního prostředí na měřenou veličinu a také rozsah přijatelné přesnosti jednotlivých typů zařízení. Přesnost jednotlivých typů měření lze stanovit experimentálním měřením dostatečného počtu vzorků o předem známé vlhkosti.

2. FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI DŘEVA

2.1. Vlhkostní vlastnosti dřeva

2.1.1. Vlhkost

V rostoucím dřevě se jeho vlhkost neustále mění a kolísá, vlhkost jádra stromu se pohybuje okolo 30–50 hm. % a vlhkost běle okolo 130–200 hm. %. (1)

Tabulka 1 Skupiny dřeva dle vlhkosti (2)

Název skupiny	Orientační vlhkost [hm. %]
Dřevo mokré, ve vodě uložené	> 100
Dřevo pokácené	50 – 100 (topol 180)
Dřevo vzduchosuché	15 – 22
Dřevo vysušené na pokojovou teplotu	8 – 15
Dřevo absolutně suché (dle ČSN 49 0103)	0

Dřevo je hygroskopickým materiálem, to znamená, že jeho vlhkost se mění v závislosti na relativní vlhkosti prostředí. Vlhkost se ustálí v okamžiku, kdy se tenze vodních par povrchových vrstev dřeva rovná tenzi par ve vzduchu. (3) Pokud hodnota relativní vlhkosti dosáhne hodnoty 100 %, buněčné stěny dřeva se nasytí a vlhkost dosáhne tzv. meze hygroskopicity. (4)

2.1.2. Mez hygroskopicity

Mez hygroskopicity je stav, kdy je již buněčná stěna dřeva zcela nasycena a zároveň je lumen stále volný. (1) Tento stav nastává při dlouhodobé klimatizaci tělesa při relativní vlhkosti velmi blízké 100 %. (4) Kromě meze hygroskopicity existuje také termín mez nasycení buněčných stěn. Jedná se prakticky o totožné pojmy, jejich použití závisí pouze na prostředí. Mez nasycení buněčných stěn se stanovuje v případě vodního uložení (voda v kapalném stavu). (5) Z praktických důvodů odlišení vody vázané a volné se více využívá mez hygroskopicity, kdy je těleso exponováno v prostředí plynné vlhkosti. (4)

Mez hygroskopicity (MH) prakticky nijak nezávisí na teplotě prostředí. (5) Mezi hygroskopicity obecně rozumíme rozmezí hodnot 22–35 hm. %, přičemž se pro různé dřeviny liší dle následující tabulky. (4) (5) (2)

Tabulka 2 Mez hygroskopicity dle typu dřeviny (1)

Mez hygroskopicity [hm. %]	Druh dřeva
22-24	Jádrové dřevo jehličnanů s vysokým obsahem pryskyřice
23-25	Jádrové dřevo listnáčů s (polo)kruhovitě pórovitou stavbou
26-28	Jádrové dřevo jehličnanů s nízkým obsahem pryskyřice
30-34	Jehličnany s bělí a vyzrálým dřevem Bělové dřevo jehličnanů s vyzrálým dřevem
32-35 a více	Listnáče s roztroušeně pórovitou stavbou Bělové dřevo listnáčů s (polo)kruhovitě pórovitou stavbou

2.1.3. Rozdělení vody ve dřevě

Vodu ve dřevě lze rozdělit dle její funkce ve dřevě. Takto lze vodu rozdělit do třech kategorií: (4)

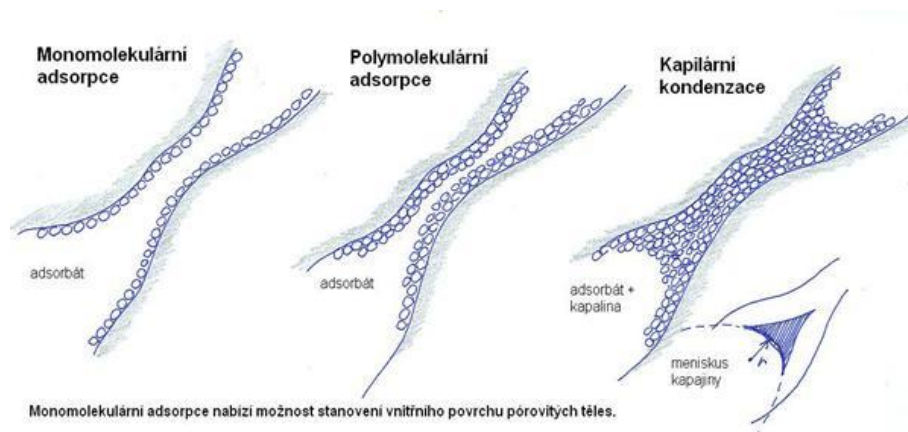
- Voda chemicky vázaná
- Voda fyzikálně vázaná
- Voda volná

Voda chemicky vázaná

Vodu chemicky vázanou ze dřeva nelze odstranit. Nachází se ve sloučeninách tvořících strukturu dřeva a její podíl činí zhruba 2 hm. % vysušeného dřeva. (4)

Voda fyzikálně vázaná

Voda fyzikálně vázaná se též nazývá vodou hygroskopickou. Její množství se odvíjí od relativní vlhkosti prostředí. Voda se váže vlivem fyzikálně-chemických sil na buněčnou stěnu. (1) Váže se na existující OH^- skupiny amorfni celulózy vodíkovými můstky. Tato voda má největší vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. (4) Fyzikálně vázaná voda se dle typu vazby dále dělí na sorpci monomolekulární, sorpci polymolekulární a kapilární kondenzaci. (6)



Obrázek 1 Průběh navázání fyzikálně vázané vody (7)

Monomolekulární sorpce je první jev, který nastane při vázání vody na buněčnou stěnu. V této fázi se voda váže v jedné vrstvě na OH^- skupiny amorfnní celulózy. (1) Molekuly vody se ukládají do mezifibrilárních prostor. Tento děj probíhá do relativní vlhkosti prostředí 20 % (vlhkost dřeva 0–7 hm. %). (6)

Po zaplnění volných OH^- vazeb se začnou nabalovat další vrstvy na již navázané molekuly vody (zpravidla 4–6 vrstev). (1) Tento děj se nazývá polymolekulární sorpce. Tyto vazby se již nevážou skrze vodíkové můstky, nýbrž přes slabší Van der Waalsovy síly. Tato vrstva se již fyzikálně blíží kapalně vodě (např. hustota $1\,000\text{--}1\,200\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) i díky povrchovému napětí. Tato fáze probíhá do relativní vlhkosti prostředí 70 % (vlhkost dřeva 7–15 hm. %). (6)

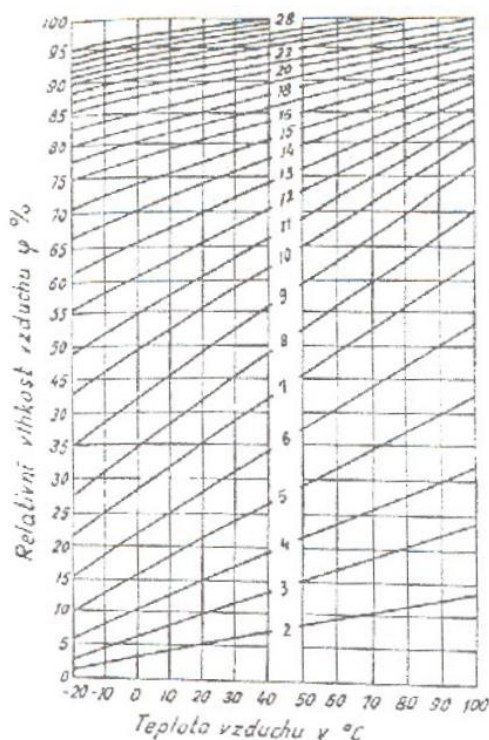
Po tomto ději nastává v mikrokapilárách a mezokapilárách jev nazývaný kapilární kondenzace. Počátek tohoto jevu závisí na poloměru konkrétní kapiláry. Kondenzovaná voda poté smáčí stěny kapiláry. (6) Toto se děje až do nasycení intermicelárních a interfibrilárních prostor v buněčné stěně, což je považováno za mez nasycení buněčné stěny neboli mez hygroskopicity.

Voda volná

Třetím typem vody je voda volná. Tato voda se ve dřevě začne shromažďovat po nasycení buněčných stěn, tedy po vyčerpání kapacit pro vodu vázanou. (4) Tato voda se nachází v lumenu a mezibuněčných dutinách. Tato voda je zde vázána pouze na základě kapilárních vlastností vody (5), nezpůsobuje žádné objemové změny dřeva a slouží zejména k výživě. (3) Její množství se odvíjí od schopnosti dané dřeviny pojmout vodu. (2)

2.1.4. Navlhavost

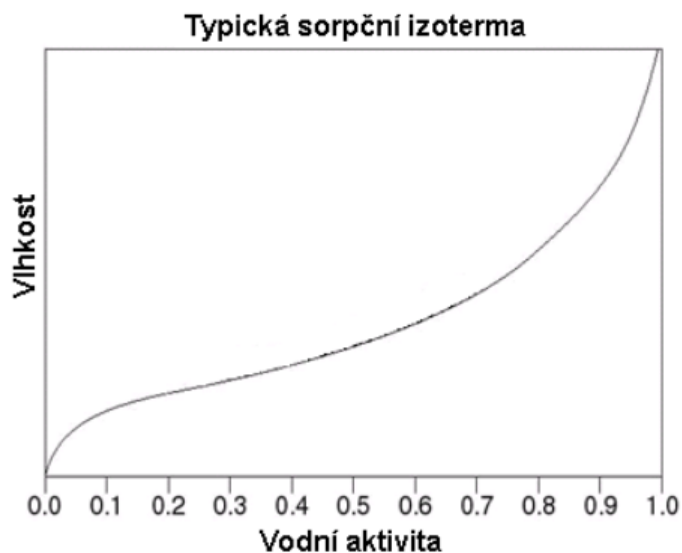
Navlhavost je vlastnost dřeva založená na jeho hygroskopicitě. Je to schopnost materiálu pojmout do své struktury vlhkost z okolního prostředí o určité relativní vlhkosti. Pokud se za dané relativní vlhkosti ustálí vlhkost dřeva, hovoříme o rovnovážné vlhkosti dřeva. Stav také nazýváme stavem vlhkostní rovnováhy. Pokud relativní vlhkost prostředí zvýšíme, dřevo začne přijímat vodu (absorbovat). Pokud relativní vlhkost snížíme, dřevo bude vlhkost odevzdávat prostředí (desorbovat). (4)



Obrázek 2 Závislost vlhkosti prostředí na vlhkosti dřeva podle teploty (4)

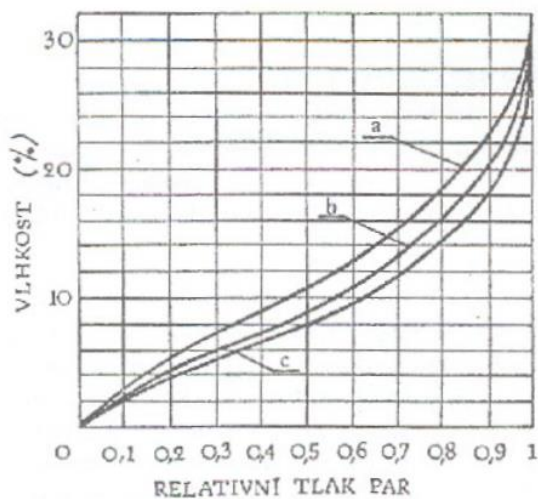
Tento jev nastává díky tomu, že pro každou relativní vlhkost je charakteristický parciální tlak, který vlhkost vyvolává. Pokud tento tlak změníme, nastane nerovnováha ve dřevě. Tento deficit se začne okamžitě srovnávat, až jsou parciální tlaky prostředí a dřeva opět totožné. Parciální tlak vodní páry se odvíjí i od teploty, která udává maximální parciální tlak páry, aniž by začala kondenzovat. (8)

Obsah vlhkosti ve dřevě je funkční závislostí relativní vlhkosti. Tato závislost ovšem nemá konstantní průběh. V první fázi je tato závislost logaritmická, ve druhé části jde o téměř lineární proces a třetí část má exponenciální charakter. (4) Toto rozdělení přibližně odpovídá fázím vázání fyzikální vody. Logaritmická část odpovídá monomolekulární sorpci, lineární polymolekulární sorpci a exponenciální část kapilární kondenzaci. (6)



Obrázek 3 Průběh sorpce (9)

Sorpce vody závisí na teplotě prostředí, kdy s rostoucí teplotou klesá míra sorpce. Zavádí se tedy pojem sorpční izoterma, který udává sorpci za konkrétní teploty. Je také prokázáno, že adsorpce a desorpce nejsou vratné po totožné křivce (tzv. hystereze sorpce). Křivka desorpce se nachází nad křivkou adsorpce, dřevo se tedy zbavuje vlhkosti pomaleji, než ji přijímá. Křivky ovšem končí v totožných bodech. (4) Znázorněno to je na schématu níže.



Obrázek 4 Sorpční izoterma; a - desorpce, b - oscilující sorpce, c – adsorpce (4)

2.1.5. Stav vlhkostní rovnováhy

Sorpční izoterma je jako křivka vytvořena převážně experimentálním měřením. V této oblasti se nachází řada teorií pro správný výpočet jednotlivých bodů izotermy. Všechny ovšem respektují základní předpoklad principu sorpce. (2)

První sorpční teorií je teorie **Dentova**. Tato teorie je platná pro sorpci monomolekulární (viz kapitola 2.1.3, voda fyzikálně vázaná). (4) Základním předpokladem této teorie je velký měrný povrch vnitřní buněčné stavby dřeva, na který se bude vázat tato voda. Podle Denta je poté v rámci monomolekulární sorpce možno stanovit míru sorpce dle rovnice (2-1). (2)

$$\frac{w}{w_m} = \frac{b_0 \times \varphi}{(1 - b \times \varphi) \times (1 + b_0 \times \varphi - b \times \varphi)} \quad (2-1)$$

kde w ...vlhkost dřeva [%]

w_m ...vlhkost dřeva při ukončení monomolekulární sorpce [%]

φ ...relativní vlhkost vzduchu [%]

b_0/b ...koeficient pro primárně/sekundárně sorbované molekuly

Tyto koeficienty jsou proměnné, které zahrnují vliv teploty na sorpci vody v plynném stavu a jsou dány následujícími rovnicemi (2-2), (2-3). (2)

$$b_0 = \exp\left(-\frac{F_0}{R \times T}\right) \quad (2-2)$$

$$b = \exp\left(-\frac{F}{R \times T}\right) \quad (2-3)$$

kde F_0/F ...volná energie primárně/sekundárně sorbovaných molekul [J]

R ...molární plynová konstanta (=8,31 J·kg·K⁻¹)

T ...termodynamická teplota [K]

Pokud je koeficient sekundárně sorbovaných molekul roven nule ($b = 0$), jedná se o zvláštní případ Dentovy teorie. Tento případ se nazývá **Langmuirova izoterma**. Pokud je tento koeficient roven jedné, jedná se o izotermu **Brauner Emmet Tellerovu (BET)**. (2) Jedná se o nejrozšířenější typ izotermy, který se uplatňuje v rámci polymolekulární sorpce (viz kapitola 2.1.3, voda fyzikálně vázaná). Nejrozšířenější je z důvodu, že rozmezí vlhkosti polymolekulární sorpce se pohybuje v hodnotách reálné vlhkosti stavební konstrukce v provozu (až 22 % hmotnostní vlhkosti). (4) Oproti Dentově izotermě zde dochází k obměně rovnice, jelikož předchozí rovnice není platná pro

násobné vrstvy molekul. Proto byla zavedena následující rovnice o dvou parametrech: (10)

$$\frac{\frac{p}{p_0}}{n_a \times \left(1 - \frac{p}{p_0}\right)} = \frac{1}{n_m \times C} + \frac{C-1}{n_m \times C} \times \frac{p}{p_0} \quad (2-4)$$

kde p ...rovnovážný tlak adsorbátu [Pa]

p_0 ...saturační tlak adsorbátu [Pa]

n_a ...objem adsorbovaného plynu za dané teploty [mol·g⁻¹]

n_m ...objem plynu adsorbovaného v monomolekulární vrstvě [mol·g⁻¹]

C ...BET konstanta [-]

Jedná se o matematický model, kdy jsou hodnoty objemu plynu adsorbovaného v monovrstvě a BET konstanty určeny z grafického záznamu. V tomto záznamu se na osu y vynáší levá strana rovnice sorpce (2-4) a na osu x se vynáší podíl rovnovážného a saturačního tlaku adsorbátu. Z tohoto grafického vyjádření by měla vzniknout přímka ($y = a + b \times x$) s následujícími podmínkami: a je kladná hodnota a vyjadřuje člen $\frac{1}{n_m \times C}$, hodnota b je sklonem této přímky a vyjadřuje člen $\frac{C-1}{n_m \times C}$. Po této substituci se následně zjistí hodnoty objemu plynu adsorbovaného v monovrstvě a BET konstanty z následujících rovnic: (10)

$$n_m = \frac{1}{a+b} \quad (2-5)$$

$$C = \frac{b}{a} + 1 \quad (2-6)$$

kde: a ...posun přímky od počátku na ose y [-]

b ...sklon přímky z grafického vyjádření [-]

Hodnota C vyjadřuje interakci systému adsorbent-adsorbát a na základě tvaru BET křivky je vhodné jej používat především pro hodnoty C v rozmezí 80-150. Zde lze totiž dostatečně přesně odlišit posuny a rozdíly, jelikož je zde vytvořená monovrstva dostatečně matematicky definována a odlišena. Měření touto metodou se provádí kapalným dusíkem za teploty 77 K (-196 °C). Při použití BET analýzy je nutno myslet na to, že není vhodné metodu používat pro příliš nízké a ani pro příliš vysoké tlaky. Pokud bychom tyto zahrnuli do bodů, jimiž prokládáme přímku, mohlo by dojít v grafickém řešení k posunu (a) do záporných hodnot, což je z principu analýzy nepřipustné. (10)

3. MĚŘENÍ VLHKOSTI VE DŘEVĚ

Měření vlhkosti ve dřevě nám velmi komplikuje nehomogenita rostlého dřeva. Díky tomu jsou vlastnosti dřeva v průřezu prvku proměnné. Je tedy nutno zvolit vhodnou metodu dle aktuálních nároků na průzkum a také dle druhu zjišťovaného prvku a požadavků na výsledky. Při výběru vhodné metody je nutno uvážit pravděpodobné rozložení vlhkosti ve dřevě, zda potřebujeme provést měření pouze jednorázově či bude měření probíhat kontinuálně (např. pro zjištění vlivu povětrnostních podmínek na pohyb vlhkosti ve dřevě). (11) Dalším důležitým kritériem pro výběr je povrch měřeného prvku, abychom předešli případným zkreslením měření (např. měření plošnou elektrodou na nerovném povrchu). (12) Je také nutno posoudit, zdali budeme měření provádět in-situ nebo provedeme měření laboratorně.

Na základě vztažení vlhkosti rozlišujeme dva typy určení vlhkosti. Jedná se o relativní vlhkost a absolutní vlhkost. (4) (2)

Relativní vlhkost závisí na podílu hmotnosti vody ve dřevě a hmotnosti vlhkého dřeva. Její hodnotu udáváme v procentech (zpravidla hmotnostních) a maximální teoretická hodnota relativní vlhkosti je 100 % (ve skutečnosti cca 64 %). Relativní vlhkost zjistíme dle vztahu (3-1) (4) (5):

Absolutní vlhkost má v praxi vyšší uplatnění. Jedná se také o hodnotu standardně udávanou v procentech. Absolutní vlhkost je definována jako podíl hmotnosti vody ve dřevě a hmotnosti suchého dřeva. (4) (5):

$$w_{rel} = \frac{m_w - m_0}{m_w} \times 100 \quad (3-1)$$

$$w_{abs} = \frac{m_w - m_0}{m_0} \times 100 \quad (3-2)$$

kde w_{rel} ...relativní vlhkost [%]
 w_{abs} ...absolutní vlhkost [%]
 m_w ...hmotnost vlhkého dřeva [g]
 m_0 ...hmotnost suchého dřeva [g]

3.1. Rozdělení použitých způsobů měření vlhkosti

Způsoby měření vlhkosti lze roztrždit na základě různých kritérií. Dle druhu měřené veličiny lze měření rozdělit na metody přímé, kdy měříme přímo vlhkost dřeva, a metody

nepřímé, kde vlhkost určujeme nepřímo podle chování jiné veličiny, která je s vlhkostí funkčně provázána. S tímto dělením úzce souvisí dělení na metody destruktivní a nedestruktivní. (12)

Metody destruktivní zpravidla odpovídají metodám přímým. Destruktivní metoda se vyznačuje odebráním vzorku konstrukce, který je dále zkoumán. Tyto metody nejsou vždy přípustné, jelikož se jedná o zásah do konstrukce, což by mohlo mít fatální následky. (11) Destruktivní metoda je ovšem velmi vhodná pro zpřesnění nepřímých nedestruktivních metod. (12)

Metody nedestruktivní jsou zpravidla metody nepřímé. Takto jsou měřeny zpravidla vlastnosti, které jsou ovlivněny vlhkostí (např. elektrické vlastnosti dřeva). (13) Jelikož se jedná o pouhé odvození vlhkosti, nikoli o přímé změření vlhkosti, je vhodné výsledné hodnoty následovně potvrdit, případně upřesnit. (12)

3.2. Destruktivní metody měření vlhkosti

3.2.1. Gravimetrická metoda

Měření vlhkosti gravimetricky spadá do skupiny metod přímých. Jedná se o velmi přesnou metodu zjištění vlhkosti, kdy je vzorek vysušován a hodnota vlhkosti se zjistí z úbytku hmotnosti při sušení. Výslednou hodnotou jsou tedy hmotnostní procenta. (4) (5) Zařízení určená speciálně pro gravimetrické měření se nepoužívají. Ideální je použít zařízení pro zjištění vlhkosti dle ČSN 49 0103.

Nevýhodou této metody je nutnost odběru vzorku ze samotné konstrukce a možnost ovlivnění její únosnosti, což není vždy možné a v důsledku potřeby vzorky vážit a vysoušet není možno metodu provádět in-situ. (12) Také není možno ji provádět kontinuálně. (13) Metoda je ovšem vhodná pro potvrzení výsledků elektrických metod, kdy známe přibližnou hodnotu z elektrického vlhkoměru a tímto měřením ji zpřesníme. (4)

3.3. Nedestruktivní metody měření vlhkosti

3.3.1. Odporová metoda

a) *Princip metody:*

Nejrozšířenější metodou pro měření vlhkosti dřeva je metoda odporová. Tato nepřímá elektrická metoda se zakládá na velmi silném vlivu vlhkosti na odporu při stejnosměrném elektrickém proudu (měří se tzv. jednosměrný odpor). (4) Suché dřevo je totiž téměř nevodivé a vlhkost vodivost výrazně zvyšuje (na mezi hygroskopicity již hovoříme o polovodiči). (2) (14) V mezích vlhkosti od 0 % do meze hygroskopicity je výsledná hodnota odlišná řádově o 6 řádů (odpor se tedy milionkrát sníží). (2) S rostoucím odporem nám poté projde materiálem menší proud. Kromě elektrického odporu je opačnou veličinou elektrická vodivost, která je převrácenou hodnotou měrného odporu. Jelikož jsou elektrický odpor a elektrická vodivost závislé na průřezu tělesa a délce měřeného úseku, je zavedena veličina měrného elektrického odporu (respektive vodivosti). Vztah mezi elektrickým odporem a měrným elektrickým odporem má následující tvar: (2)

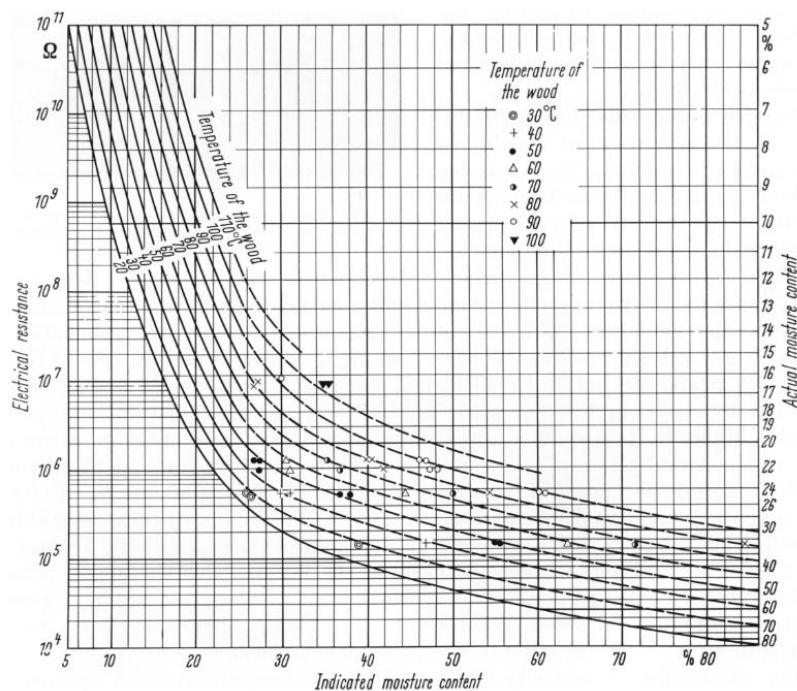
$$R = \frac{\rho \times l}{S} \quad (3-3)$$

kde R...elektrický odpor [Ω]
 ρ ...měrný elektrický odpor [$\Omega \cdot m$]
 l...délka měřeného úseku [m]
 S...průřez tělesa [m^2]

U dřevin lze měrný odpor dále rozdělit. Odlišný je totiž měrný elektrický odpor na povrchu tělesa a měrný elektrický odpor uvnitř tělesa. Jedná se také o veličinu, kterou ovlivňuje anizotropie dřeva. V podélném směru je až 8krát vyšší než ve směru příčném. (4) Měrný odpor je veličinou, která silně závisí na aktuálním stavu. Její míru značně ovlivňuje hustota dřeva, teplota, vlhkost a jiné veličiny. (2) Absolutně suché dřevo má měrný odpor řádově $1 \times 10^{15} \Omega \cdot m$, kdežto měrný odpor dřeva o vlhkosti na mezi hygroskopicity se pohybuje okolo $10^4 \Omega \cdot m$. (4)

Odporové vlhkoměry jsou často vybaveny teplotním čidlem. Pokud tomu tak není, měl by být použit externí teploměr. Je také vhodné používat přístroje pro zjištění relativní vlhkosti prostředí. Odporové vlhkoměry je vždy nutno kalibrovat na určitý druh dřeviny

dle tabulek, jinak tato měření budou nepoužitelná, jelikož každá dřevina vykazuje jiné fyzikální vlastnosti. (12) Jedním z hlavních parametrů, který ovlivňuje měření vlhkosti na základě měrného odporu, je teplota. S teplotou totiž měrný odpor dřeviny výrazně klesá. Je tedy nutno hodnoty výsledné vlhkosti upravit dle tabulek od výrobce měřiče, případně nastavit teplotu materiálu, je-li k tomu zařízení uzpůsobeno. (4)



Obrázek 5 Vliv teploty na měření odporovou metodou; osa x: měřená hodnota vlhkosti, levá osa y: elektrický odpor, pravá osa y: reálná hodnota vlhkosti (13)

b) Zařízení:

Základními prvky měřicích zařízení založených na odporu dřeva jsou elektroda a přístroj pro vyhodnocení měření.

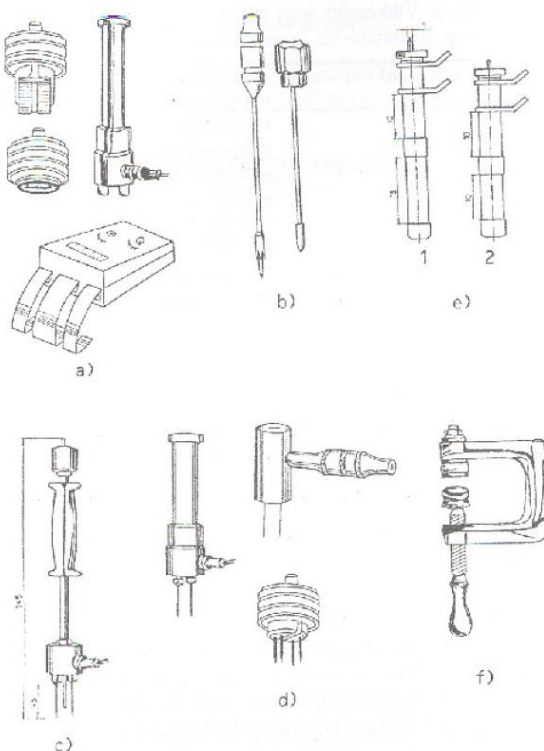
Elektroda je část měřiče, která je v přímém kontaktu se dřevem. Její konec je tvořen vodivými kolíky, mezi kterými prochází elektrický proud, který prochází dřevem v závislosti na elektrickém odporu dřeva. Elektrod existuje více typů v závislosti na vhodnosti použití dle materiálu. (4)

Prvním typem elektrody je typ zarážecí. Jedná se o měření uvnitř prvku, tedy měření invazivní. Zarážecí elektrody se zpravidla izolují po celé délce, jen na úplném konci je odizolovaná. V případě neizolovaných elektrod by vlhkoměr zjistil nejvyšší vlhkost po celé délce elektrody a data by tak mohla být při opakovaných měřeních nepřesná (elektroda by mohla procházet ložisky vlhkosti, případně přes mokré povrch a zkreslil by

se finální výsledek). Izolace nám zajistí zjištění vlhkosti na požadovaném místě. Tyto elektrody se používají u prvků, kde se předpokládá, že vlhkost nebude v průřezu rovnoměrná. Změří se tak vlhkost na malém prostoru a pokud vhodně rozložíme měření na vzorku, získáme prokazatelné hodnoty. (12)

Časté uplatnění nachází elektrody upínací. Velkou výhodou této elektrody je, že je pouze upoutána k povrchu vzorku, není tedy třeba nijak narušovat jeho strukturu. Pro přesné měření je ovšem nutno zařídit, aby byla měřicí část elektrody v těsném kontaktu s prvkem. (4) Pokud tomu tak není, vzniká přechodový odpor vzduchové mezery a měření je zkresleno. Jelikož při zvýšení odporu přístroj naměří nižší vlhkost, měření je prováděno na nebezpečnou stranu přesnosti. (14)

Dalšími typy elektrod jsou elektrody přítlačné, hloubkové či válcové. Přítlačné elektrody jsou vhodné pro měření prvků malé tloušťky nebo povrchu tělesa. Využívá se jich například pro měření vlhkosti dýh. (4)



Obrázek 6 Typy odporových elektrod; a) přítlačné, b) hloubkové, c) a d) zarážecí, e) zvláštní, f) upínací (4)

Elektrody, které jsou v přímém kontaktu se dřevem, jsou poté propojeny s měřicí jednotkou. Jedná se o přístroj, který na základě napětí na koncích elektrody a procházejícím proudem dokáže na základě elektrického odporu určit adekvátní hodnotu.

(2) Méně technologicky vyspělé přístroje vyhodnotí výsledek, který je poté nutno podle přiložených tabulek vyhodnotit na základě druhu dřeviny, teplotě a podobně. Novější přístroje již umí vyhodnotit vlhkost dřeva bez použití tabulek, protože mají naprogramováno převedení údajů na základě zvoleného druhu dřeviny (některé dokáží upravit hodnotu i podle teploty a není třeba tento parametr zohledňovat).

c) Postup měření:

Vhodný typ elektrody závisí na rovnoměrnosti vlhkosti. Pokud je vlhkost rovnoměrná, výsledek nebude záviset na druhu elektrody. (4) Ale toto je u rostlého dřeva nemožné. Zpravidla se uvažuje, že vlhkost dřevěného prvku je funkcí hloubky, ve které je měření prováděno. (15) Při nerovnoměrné vlhkosti se doporučuje použít elektrody zarážecí, které jsou zaraženy do zhruba 1/6 tloušťky prvku. (11) Pokud je potřeba nechat prvek zcela zachovalý bez porušení, je vhodné použít elektrody upínací. (4)

Chyba měření při vlhkosti do 26 hm. % (doporučuje se měřit od 5 hm. %) by měla činit max 1 %. (2) Čidla by se měla v příčném směru umisťovat minimálně 50 mm od kraje prvku a v ose prvku. Podélně se čidla umisťují zhruba každý metr. Při průměrování hodnot se vyloučí krajní změřené hodnoty. Měření by mělo ideálně probíhat při teplotě prostředí v rozmezí +5 °C - +60 °C. Elektrody by se měly umisťovat mimo přirozené vady dřeva (např. suky). Odečet hodnot by měl proběhnout co nejdříve po začátku měření, pokud výrobce nestanoví jinak. (12) Je-li potřeba, je nutno na výsledku zohlednit parametry prostředí.

3.3.2. Dielektrické metody

Metody dielektrické úzce souvisí s metodou odporovou. Vycházejí z dielektrických, tedy polarizačních, vlastností hygroskopických materiálů, a tak platí i pro dřevo. Mezi tyto polarizační vlastnosti patří hustota dřeva, teplota, orientace vláken a vlhkost dřeva. (12) Dle pracovní frekvence vlhkoměry dělíme na nízkofrekvenční, vysokofrekvenční a mikrovlnné. (4) Přenosné vlhkoměry spadají převážně do dvou posledně jmenovaných skupin, konkrétně pracují na frekvencích 1-10 MHz a 0,1- 5 GHz. (11) Ruční vlhkoměry jsou schopny měřit s přesností 1 hm. % v celé škále vlhkostí až do meze hygroskopicity. (12)

Měření těmito metodami probíhá zpravidla na povrchu vzorku. Z tohoto důvodu mají tyto vlhkoměry relativně malý hloubkový dosah a při měření masivnější konstrukce nám tedy

může dojít ke zkreslení údajů o vlhkosti. Problémem je také proměnlivost objemové hmotnosti rostlého dřeva, doporučuje se tedy zjištění objemové hmotnosti zkoumaného prvku, aby se co nejlépe předešlo chybným údajům. Měření by mělo probíhat mimo místa s výskytem vad dřeva (suky, hniloba, kůra apod.) a mělo by se rozlišovat měření jádrového a bělového dřeva z důvodu rozdílných hustot struktury. (12)

3.3.2.1. Kapacitní metoda

a) Princip metody:

Kapacitní vlhkoměr funguje na principu nabíjení a vybíjení kondenzátoru. Měření touto metodou je možno uplatnit pouze v případě měření do meze hygroskopicity dřeva. (2) Při použití této metody je hlavním parametrem permitivita, od níž se následně odvíjí kapacita dřeva (s rostoucí permitivitou roste i kapacita). (2) Permitivita určuje míru vlivu elektrického pole o určité síle na dielektrické vlastnosti dřeva. S rostoucí teplotou a vlhkostí se hodnota permitivity zvyšuje. (1)

b) Zařízení:

Existují dva základní typy elektrod. Pro rovné povrchy se používají elektrody s tzv. kondenzační deskou. Jedná se o plochou elektrodu, která je umístěna přímo na měřicím přístroji. Protože je pro správné měření potřeba přímý kontakt s měřeným materiálem, je tato plošná elektroda vhodná pouze pro měření hladkých a rovných materiálů, jinak vznikají vzduchové mezery. (16) Pro rostlé dřevo tato elektroda není příliš vhodná. Pro nerovné povrchy se používá měření elektrodami na krátkých pružinkách. Tyto elektrody mají zakulacenou špičku. Při přitlačení na vzorek se elektrody povrchu přizpůsobí a nevzniká tak vzduchová mezera. Zároveň jsou elektrody přitlačovány na měřicí ložiska, která umožňují měření vlhkosti. (12)

c) Postup měření:

Kapacitní elektroda měří zpravidla do hloubky 35 mm. (13) Pro měření je dle povrchu vzorku nutno určit vhodný typ elektrody. Je vhodné také zkontrolovat povrch materiálů a pokud možno se vyhnout místům, která by mohla zkreslit měření (poškozená místa, viditelně vlhká místa, vady dřeva atd.). Měřič je také nutno správně nakonfigurovat (např. hustota dřeva), jinak měření nebudou průkazná. (12)

3.3.2.2. Mikrovlnná metoda

a) Princip metody:

Mikrovlnná metoda funguje na principu vlivu vody na průchod mikrovlnného záření. Mikrovlnné záření je totiž schopno procházet dielektrikem. (2) Voda, zejména volná, v pórovitých a sypkých materiálech tlumí a brání průchodu mikrovlnného záření. (14) Tato metoda funguje na podobném principu jako metoda kapacitní, jen v jiném frekvenčním rozmezí. (2) Protože má voda a suché látky různé elektromagnetické vlastnosti, je tato metoda velmi citlivá. Zkoumanou veličinou je útlum záření, které projde určitým objemem látky. (14)

b) Zařízení:

Zařízení sestává z vysílače mikrovln, detektoru útlumu vlnění a měřicí jednotky. Vysílač mikrovln a detektor útlumu bývá často totožným zařízením. Vysílač vysílá záření o dané frekvenci do vlhkého vzorku, kde se záření tlumí. Míru útlumu měří detektor útlumu vlnění. Na základě naměřených dat měřicí jednotka vyhodnotí vlhkost. (17)

c) Postup měření:

Velkou výhodou této metody je, že oproti kapacitním vlhkoměrům zde lze měřit v daleko větších hloubkách. Zatímco u vlhkoměrů kapacitních jsme se pohybovali v desítkách milimetrů, u mikrovlnných vlhkoměrů jsme schopni měřit až do hloubek desítek centimetrů. (17) Měření probíhá jednorázově krátkým přiložením senzoru, který změří útlum vysílaného měření. Zařízení jsou schopna vynést plošné rozložení vlhkosti na základě změření uzlů rastru dané plochy. (17)

3.3.3. Radiační metoda

a) Princip metody:

Tato metoda spočívá v moderaci neutronů převážně atomy vodíku z vody obsažené ve dřevě. Hlavním zářičem je směs americia a beryllia. (14) Použit lze také radium či polonium. (18) Protože atomy vodíku ve vodě fungují jako moderátor, s rostoucí vlhkostí se nám zvyšuje zpomalení neutronů. Detekujeme právě tyto zpomalené neutrony, kterých s rostoucí vlhkostí přibývá. (14) Moderace je ovšem závislá pouze na atomech vodíku, což může zkreslit měření u vzorků s vázanou vodou. Rozlišujeme zářiče hloubkové a zářiče povrchové. (18)

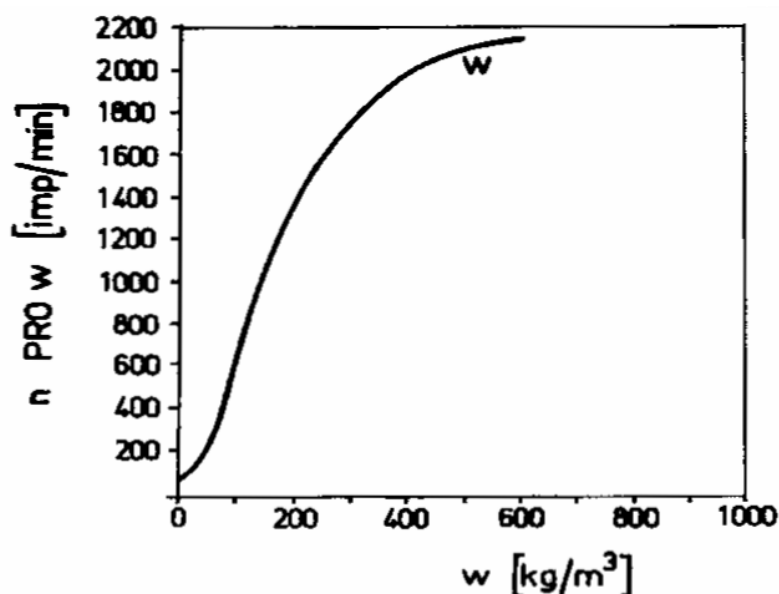
b) Zařízení:

Hloubkové zářiče jsou používány pro měření v tzv. kulové geometrii. Přístroj se skládá z vysílače neutronů, které vysílají neutrony k detektoru zpomalených neutronů. Umístění měřiče je možné např. do vývrtu. Touto metodou je možno měřit sypané hráze nebo kamenivo do betonu. Výstupní hodnotou je objemová vlhkost. (14) (18)

Povrchové zářiče jsou používány pro měření v polokulové geometrii. Zásadním rozdílem je, že zde není třeba materiál nijak porušovat. Neutrony jsou vysílány do zkoušeného vzorku, ve kterém jsou tyto neutrony moderovány. Těmito zářiči je možno zjistit vlhkost povrchových vrstev materiálu (např. beton či sypaná zemina). (14) (18)

c) Postup měření:

Je nutno zvolit, zda chceme měřit povrchovým či hloubkovým zářičem. Neutrony jsou vysílány do vzorku, kde je moderuje voda. Pokud jsou zpomaleny natolik, že mají tepelnou rovnováhu totožnou s jádry prostředí, detektor je zaznamená. Platí tedy, že s rostoucí vlhkostí roste míra detekce. (14) Objemovou vlhkost materiálu poté můžeme zjistit tak, že přístroj udá počet neutronů, z něhož poté zjistíme vlhkost podle kalibrační křivky. Vyspělejší přístroje zobrazí vlhkost přímo na displeji. (18)



Obrázek 7 Vzor kalibrační křivky; n - počet detekcí, w - objem vlhkosti (18)

4. CÍL PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je provést analýzu jednotlivých měřicích metod na základě analýzy použitelnosti konkrétních vlhkoměrů, na kterých bude následně provedena optimalizace rozhodujících vlastností. Z těchto metod bude posouzena vhodnost jejich použití vzhledem k přesnosti měření na zvolených dřevinách, na jejich ceně a možnostech jejich použití in-situ s případným omezením v důsledku principu měření samotné metody.

Další částí práce je experimentální ověření výsledků optimalizačního procesu, které bude sestávat z měření vlhkostí na konkrétních typech dřeviny v laboratorním prostředí. Vlhkoměry běžně pracují v určitém rozmezí vlhkosti materiálu, který je uváděn výrobcem vlhkoměru. Vlhkost bude ověřována nejen ve výrobcem udávaném rozmezí vlhkostí dřeva, ale bude provedeno srovnání přesnosti jednotlivých zvolených vlhkoměrů i mimo tato rozmezí vlhkosti. Za směrodatnou hodnotu, ke které jsou vztahována naměřená data, je uvažována hodnota vlhkosti vzorku stanovená gravimetricky.

Poznatky z této práce mohou být dále využity při měření v praxi, případně mohou poukázat na úskalí nepřesností jednotlivých principů vlhkoměrů v daném prostředí či nepřesnosti měření při vyšších nebo nižších vlhkostních stavech. Tyto nepřesnosti se stanoví z měření sady tří vzorků z daného typu dřeviny, čímž eliminujeme vliv nehomogenity rostlého dřeva z hodnot průměrů a směrodatné odchylky jednotlivých vyhodnocení vlhkoměrů.

5. ANALÝZA NDT METOD PRO MĚŘENÍ VLHKOSTI DŘEVA IN-SITU

5.1. Analyzované metody měření vlhkosti

5.1.1. Odporová metoda

Tato metoda je nejvíce rozšířenou metodou, která se v našich podmínkách využívá. Toto platí i o samotném využití in-situ, kde se využívá příznivých rozptylů přesného měření. Největších přesností měření nastává při měření v oblasti polymolekulární sorpce a kapilární kondenzace. Pro zpřesnění se doporučuje elektrody umístit kolmo na vlákna, jelikož v tomto směru jsou hodnoty méně variabilní než ve směru vláken, kudy dochází k hlavním tokům vlhkosti. (13)

Jedním ze současných měřicích odporových systémů s kontinuálním měřením je například MOISTUREGUARD. Výrobce zde nabízí měřicí čidla a centrální jednotku jednotlivě po kusech, měřicí soupravu je pak možno vhodně nakonfigurovat na měřenou konstrukci. (19)

Kombinovaný senzor pro měření vlhkosti masivního dřeva je základní jednotkou měřicího systému. Tato jednotka měří na základě elektrických vlastností vlhkost dřevěného prvku a data následně odesílá do centrální jednotky. (19)



Obrázek 8 Kombinovaný senzor (19)

Digitální senzor vzdušné teploty a vlhkosti slouží k doplňkovému měření prostředí konstrukce (teplota a vlhkost vzduchu). Senzor je uzpůsoben pro měření jak v interiéru, tak i v exteriéru. Data ze senzoru jsou odesílána do centrální jednotky. (19)



Obrázek 9 Senzor prostředí (19)



Obrázek 10 Centrální jednotka (19)

Výrobou ručních odporových vlhkoměrů se například zabývá německá firma GREISINGER. Jejich vlhkoměrem pro materiály dřevěné a materiály na bázi dřeva je typ GHM 3851. Přístroj je schopen měřit přesnou hodnotu vlhkost v návaznosti na vybraný typ materiálu. S přístrojem lze měřit jak nárazově, tak také kontinuálně. V rámci měření vlhkosti do meze hygroskopicity udává výrobce přesnost přístroje 0,2 hm. %. Přístroj lze ovšem propojit pouze s jednou sondou. (20)



Obrázek 11 Měřicí přístroj Greisinger GHM 3851 (21)

5.1.2. Kapacitní metoda

V evropských poměrech se jedná o méně používanou metodu. Z důvodu proměnlivých vlastností rostlého dřeva se upřednostňuje používání na používání materiálů na bázi dřeva (OSB desky, lamely, překližky apod.), kde jsme schopni zajistit větší homogenitu

v průřezu prvku. Měření není vhodné pro diagnostické účely prvků o vyšších tloušťkách, protože kapacitní metodou nelze zjistit gradienty vlhkosti a pohyby vlhkosti, ale jen vlhkost v povrchových vrstvách prvku dle permitivity vzorku. (13)

Jedním z výrobců těchto vlhkoměrů je americká firma WAGNER METERS, vyrábějící řadu Orion®, konkrétním výrobkem je například kapacitní měřič Orion® 910 Deep Depth Pinless Wood Moisture Meter Kilt. Jedná se o přístroj pro jednorázové měření vzorku. Pro správné měření je potřeba vždy přístroj vhodně nastavit pro správnou dřevinu. Na základě tohoto nastavení a následného přiložení přístroje na vzorek nám přístroj vyhodnotí absolutní vlhkost vzorku. (22)

Výrobce udává měrnou hloubku přístroje na $\frac{3}{4}$ palce (cca 19 mm) pod povrch vzorku. Spolu s přístrojem je dodávána také kalibrační podložka, díky které je možno kalibrovat přístroj svépomocí přes sekundární mód kalibrace. Skenovací plocha přístroje činí 5,75 x 3 palce (cca 146 x 76 mm). (22)



Obrázek 12 Přístroj Orion® 910 (22)

Výrobou kapacitních vlhkoměrů se například dále zabývá německá firma CONRAD ELECTRONIC. Jedním z přístrojů je model MF-50 výrobní značky Voltcraft®. Přístroj je potřeba před měřením nastavit na konkrétní materiál, protože je vlhkost měřena přímo ve vlhkostních procentech na základě vlastností materiálu. Jeho součástí je také alarm. Po nastavení mezních hodnot vlhkosti v konstrukci se alarm spustí po překročení těchto

hodnot. Díky této vlastnosti je možno plošně určit problematická místa konstrukce. Výrobce udává měrnou hloubku 19 mm a přesnost měření 0,1 hm. %. (23)



***Obrázek 13** Přístroj Voltcraft® MF-50*

5.1.3. Mikrovlnná metoda

Zjednodušeně řečeno lze říct, že se jedná o metodu blízkou kapacitní metodě, pouze zde mluvíme o vyšších frekvencích. V této oblasti dochází k řádově vyššímu rozdílu útlumu vlnění ve vodě a ve dřevě. (14) Je ovšem potřeba mít rovinný povrch, abychom zajistili přesné měření vlhkosti, což omezuje přesnosti u měření rostlého dřeva. Mikrovlnné měřiče by sice na rozdíl od kapacitních měřičů dokázaly měřit i tlustší prvky, nicméně tyto vlhkoměry vyhodnocují nejvyšší zaznamenanou vlhkost, což se u rostlého dřeva může silně lišit od střední vlhkosti. Proto se doporučuje použití na materiálech na bázi dřeva, které mají vyšší homogenitu. (13) Velkou výhodou ovšem je, že na rozdíl od metod odporových či kapacitních není nutné použití přepočtů či tabulek pro zjištění skutečné vlhkosti, vlhkost se již sama vyhodnocuje.

Ruční zařízení pro měření vlhkosti MOIST 350 B dokáže měřit do hloubky až 80 cm. (17) Přístroj sestává z vysílače a přijímače mikrovln, který je přikládán k měřenému prvku. Toto zařízení je připojeno na řídicí jednotku, která vyhodnocuje útlumy mikrovln

vodou v prvku. (14) V případě verze MOIST 350 B dokáže tato řídicí jednotka pojmout až milion jednotlivých výsledků a 128 odlišných sérií měření. (24)

Zařízení MOIST mají také schopnost vyhodnocovat plošné mapy vlhkosti. Stačí k tomu pouze vytvořit rastr měřicích bodů a zadat tento rastr do řídicí jednotky. Poté přikládáním a měřením přístroj zaznamenává jednotlivé body a tvoří z nich mapu struktury vlhkosti. Data je také možno stáhnout a dále zpracovávat skrze USB port. (24)



Obrázek 14 MOIST 350 B (24)

1,4	0,7	2,1	2,6	1,1	1,1	2,7	2,6	1,7	3,3	3,5	4,4
1,1	2,9	3,9	4,6	4,8	6	4,4	4,3	4,3	3	3,4	3,5
3,5	4,9	3,8	5,2	4,2	4,7	5,1	3,2	4	3,7	4,4	3,5
4,1	4,2	4,8	5,1	5,5	5,8	5,5	3,9	2,7	3,6	2,5	4,4
3,3	3,4	4	5	4	4,4	6	4	3,8	3,8	2,5	5
3,5	4,2	4	3,3	4,2	4,6	5,5	4,8	4,1	4,1	3,7	4,2
3,9	4,6	4	4,2	5,8	5,4	4,3	4,8	4	3,3	3,3	4,5
4,2	4,8	4	3,9	5,1	4,3	4,3	4,5	4,6	3	3,4	3,9
3,6	6,8	3,5	4,6	5,6	5,3	4	4,5	1,1	4,4	4,3	4
3,4	6,2	4,1	5,4	4,6	5,3	5,4	4,2	2,1	3,7	4,8	4,6
4	5,6	3,9	4,2	4,2	4,3	3,9	4	4,5	4,2	4	4,2
3,2	4,9	4,2	4,9	3,8	4,2	3,7	3,8	2,3	5,4	4,3	3,7

Obrázek 15 Plošná mapa měření (25)

Německá firma TROTEC vyrábí mj. mikrovlnný vlhkoměr typ T610. Jedná se o přístroj profesionálního charakteru. Přístrojem je možno měřit vlhkost konstrukce do hloubky 300 mm. Jeho předností je možnost nastavení kritické hodnoty vlhkosti v měřené konstrukci. Pokud tuto vlhkost měřená konstrukce překročí, spustí se alarm, který na tento

problém upozorní. Naměřená data je možné následně zpracovat na počítači v softwaru výrobce. Zařízení ovšem není určeno pro kontinuální měření. (26)



Obrázek 16 Vlhkoměr TROTEC T610 (26)

5.1.4. Výběr metod

Z provedené základní analýzy metod pro určení vlhkosti dřeva byl sestaven výběr metod. Pro porovnání a potvrzení zmíněných hypotéz byly vybrány všechny výše zmíněné metody.

5.2. Kritéria výběru

5.2.1. Pořizovací cena

Pořizovací cena je jedním z důležitých aspektů, který je nutno zohlednit. Je potřeba uvážit, k čemu budou měřená data sloužit a jaké výdaje je možno vynaložit. Na základě financí je teprve možno uvážit metodu dostačující pro příslušné měření a jakou přesnost přístroj bude mít.

Tabulka 3 Pořizovací ceny vlhkoměrů

Metoda měření	Výrobce	Model	Cena
Odporová	Testo	606	4 600 Kč
	Greisinger	GHM 3851	10 900 Kč
	Trotec	BM22WP	1 600 Kč
Kapacitní	Wagner Meters	Orion 910	8 000 Kč
	Greisinger	GMK 100	4 300 Kč
	Greisinger	GMI 15	3 300 Kč
	Testo	616	7 500 Kč
	Trotec	BM40	2 200 Kč
Mikrovlnná	Moist	350 B	107 000 Kč
	Trotec	T610	16 800 Kč
	Moist	210	44 500 Kč

U vlhkoměrů Moist je patrné velké rozpětí v ceně výrobků. Tento rozdíl je způsoben tím, že i když se jedná o stejnou řadu vlhkoměrů, značný rozdíl je v jejich možnostech zpracování dat. Model 210 dokáže uchovat v paměti cca 2 000 naměřených hodnot, model 350 B jich dokáže uchovat již 1 000 000 a rovněž není třeba vytvářet přepočty indikované hodnoty.

5.2.2. Optimalizační proces výběru

Z výběru konkrétních vlhkoměrů bylo mimo cenu přístroje provedeno další posouzení vlastností. Zejména šlo o posouzení rozsahu měřitelnosti doporučeného výrobcem, případné omezení přístroje, pracovní teplotní rozsah, přesnost vyhodnocených dat, přenositelnost a vhodnost přístroje. Jednotlivá kritéria byla posouzena dle Saatyho metody jednotlivých vah kritérií. Kritéria byla vážena dle následující tabulky:

Tabulka 4 Váhy kritérií pro Saatyho optimalizaci

Kritérium	Cena	Přesnost měření	Rozsah	Rozlišení dřevin	Teplotní omezení
Váha	4	4	3	2	2

Ke každému kritériu byla stanovena stupnice hodnot. Všechna kritéria byla hodnocena v rozmezí 1 (nejhorší) až 5 (nejlepší).

Tabulka 5 Hodnocení zvolených kritérií

Vlhkoměr	Cena	Přesnost měření	Rozsah	Rozlišení dřevin	Teplotní omezení
Testo 606	4	4	2	2	4
Greisinger GMK 100	4	4	3	5	5
Greisinger GMI 15	5	1	1	2	3
Testo 616	3	4	4	4	3
Moist 350 B	1	3	5	2	3

Následně bylo provedeno vyhodnocení kritérií v souladu se zvolenou váhovou metodou s přihlédnutím k nedostatkům, které by mohly ovlivnit měření vlhkosti.

Tabulka 6 Výsledek optimalizačního výběru

Vlhkoměr	Hodnocení	Nedostatek přístroje
Testo 606	50	Omezené měřitelné hodnoty (8,8 – 54,7 %)
Greisinger GMK 100	61	Nejnižší volitelná hustota 450 kg·m ⁻³
Greisinger GMI 15	37	Pouze k orientačnímu měření, nepřesné hodnoty
Testo 616	54	Přítlačný přístroj, ovlivnění provedením měření
Moist 350 B	41	Nelze rozlišit druhy dřevin

Jako minimální hodnota pro možnost použití vlhkoměru v praktické bylo stanoveno hodnocení 35, což bylo splněno u všech zvolených vlhkoměrů. Přístroj Greisinger GMI 15 byl vybrán jako přístroj srovnávací. Výrobce je udáván jako orientační indikátor vlhkosti (proto výrazně nižší hodnocení než jiné kapacitní vlhkoměry) a v experimentu je ověřeno, zda u tohoto vlhkoměru hodnoty alespoň přibližně limitují k požadované hodnotě či se jedná o značně nepřesné měření.

6. METODIKA ZKOUŠEK

6.1. Materiál a metodika měření

6.1.1. Dřevo

Pro účely bakalářské práce byly zvoleny dva druhy dřevin, a to **smrk** jako zástupce jehličnanů a jako zástupce listnatých dřevin byl zvolen **buk** s roztroušeně pórovitou stavbou. Smrkové dřevo je primárně využíváno pro konstrukční účely, ale i jako surovina pro výrobu aglomerovaných materiálů na bázi dřeva. Buk se naopak využívá přednostně pro výrobu nábytku a jeho využití ve stavebních konstrukcích je v současnosti velmi omezené (dýhy). Pro porovnání vlivu dřeviny vzhledem k prováděným měřením vlhkosti byl zvolen buk.

Smrk řadíme do kategorie bělových jehličnatých dřevin. Dřevina obsahuje relativně malý podíl pryskyřičných kanálků vedoucích příčně ke směru růstu v radiálním směru. Dřevo smrku je dle klasifikace přirozené trvanlivosti podle ČSN EN 350-1,2 zařazeno do třídy ohrožení 4. Z tohoto důvodu je z hlediska ochrany dřeva nutné dbát na správnou konstrukční ochranu vzhledem k zabudování dřeva v konstrukci. Nesprávným zabudováním dřevěných prvků výrazně snižujeme jejich životnost a zvyšujeme riziko napadení dřevokaznými činiteli a s tím spojenou degradaci konstrukce. Jedná se o měkké dřevo s nízkou objemovou hmotností ($420 - 460 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), které svými vlastnostmi má širokou škálu využití. Ve stavebnictví je dřevo smrku využíváno na všechny druhy stavebního řeziva. Ve velké míře využíváno jako materiál pro výrobu dřevěných masivních profilů jako jsou například KVH, BSH hranoly. Smrk jako surovina je využívána pro výrobu deskových materiálů na bázi dřeva jako jsou například desky z plochých orientovaných třísek, dřevotřískové desky a dřevovláknité desky.

Buk řadíme do kategorie bělových listnatých dřevin s roztroušenou pórovitou stavbou a s nepravým jádrem. Buk podle klasifikace přirozené trvanlivosti dle ČSN EN 350-1,2 je klasifikováno třídou odolnosti 5. Jedná se o tvrdé dřevo s vysokou objemovou hmotností ($650 - 700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Tato dřevina se hůře přizpůsobuje objemovým změnám, proto je dřevina náchylná ke tvorbě trhlin a není vhodné ji používat v rostlých masivních prvcích. Dřevo buku obsahuje velké množství širokých dřeňových paprsků ovlivňující bobtnání dřeva v příčném směru. Dřevo buku je převážně využíváno pro výrobu nábytku,

podlahových krytin a kompozitních materiálů na bázi dřeva. Ve stavebnictví se dřevina používá zejména pro výrobu dýh a překližek.

Parametry jednotlivých vzorků těchto dřevin jsou popsány v tabulce 7 níže. Tyto dřeviny byly vybrány na základě jejich poměrně výrazné odlišnosti. Byly zvoleny jako zástupce jehličnaté a listnaté dřeviny, díky čemuž mají značně odlišnou strukturu. Dalším důvodem výběru právě těchto dřevin je jejich rozdílná hustota, kdy smrk patří mezi jehličnatými dřevinami k těm lehčím (měkká dřevina), zatímco buk mezi listnatými k těžším (tvrdá dřevina). Obě dřeviny se řadí mezi bělové (neobsahují jádra, která by mohla ovlivnit měření) z důvodu co nejvyšší eliminace odchylek v měření.

Tabulka 7 Specifikace značení a vstupní parametry zkušebních vzorků ve vysušeném stavu

Parametry	a [mm]	b [mm]	c [mm]	m_s [g]	ρ_0 [kg·m ⁻³]
SM1	97,6	83,2	50,9	178,8	435
SM2	98,0	80,8	50,0	177,5	450
SM3	97,9	83,0	50,8	181,2	440
BK1	97,7	83,3	51,3	282,9	680
BK2	97,9	81,0	48,5	254,1	660
BK3	98,0	81,1	48,4	252,2	655

6.1.2. Použité zařízení pro měření vlhkosti

Měření bylo prováděno celkem pěti typy vlhkoměrů, tři z kategorie kapacitních, jeden z kategorie odporových a jeden z kategorie mikrovlnných vlhkoměrů. Všechna měření probíhala při teplotě 20 ± 2 °C a relativní vlhkosti vzduchu 40 ± 5 %.

A) Odporový vlhkoměr Testo 606-2

Jedná se o přístroj, který by měl patřit mezi přesnější vlhkoměry, jelikož měříme veličinu poměrně přesně závislou na vlhkosti. Přístroj také neměří pouze povrch, ale data získává ze zaražených hrotů. Vyhodnocení vlhkosti probíhá na základě odporových vlastností dřeva. Přístroj má zabudováno čidlo pro zjištění teploty a relativní vlhkosti prostředí, které použijeme pro přepočet v prostředí. Doporučený pracovní rozsah měření je 8,8 – 54,8 hm. % pro buk i smrk. Lze předpokládat, že hodnoty nižší nebudou měřitelné, jelikož je zde odpor velmi vysoký (stoupá exponenciálně).

B) Kapacitní vlhkoměr Greisinger GMI 15

Přístroj je deklarován pouze pro orientační měření. Přístrojem změříme bezrozměrnou hodnotu, kterou poté dle přiložených pokynů od výrobce přepočítáme na hodnotu vlhkosti dřeva. Pro tento typ přístroje je nutno zajistit co nejvíce hladký povrch vzorků. Doporučený pracovní rozsah měření je 0 – 30 hm. %.

C) Kapacitní vlhkoměr Greisinger GMK 100

Jeho předností oproti výše zmíněnému typu je možnost volby měření na základě hustoty dřeva, která je udávána v rozestupech $50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Toto by mělo zajistit oproti předešlému typu přesnější měření. Výsledná hodnota je zobrazena v procentech absolutní hmotnostní vlhkosti dřeva. Doporučený pracovní rozsah měření není určen, pouze se přesnost měření při hodnotách nad 19,9 hm. % sníží z 0,1 % na 1 %.

D) Kapacitní vlhkoměr Testo 616

Tento přístroj měří na rozdíl od jiných kapacitních vlhkoměrů až do hloubky 50 mm, lze tedy značně zpřesnit výsledek. V přístroji jsou předvoleny různé typy dřevin, po jejichž výběru přístroj ukazuje přímo hmotnostní procenta vlhkosti ze suchého vzorku. Doporučený pracovní rozsah měření je 0 – 50 hm. %.

E) Mikrovlnný vlhkoměr Moist 350 B

Jedná se o přístroj s vyměnitelnou sondou, kterou vlhkost zjišťujeme do určité zvolené hloubky materiálu. Pro tento výzkum byla použita sonda s měrnou hloubkou 30 mm. Doporučený pracovní rozsah měření je 0 – 400 hm. %.

6.1.3. Postup dosažení rovnovážné vlhkosti dřeva

Pro stanovení vlhkosti jednotlivých prostředí pomocí zvolených vlhkoměrů byly přichystány tři rozměrově totožné vzorky ze dřeva buku a smrku. Určené vlhkostní stavy zkoušených vzorků byly stanoveny tak, aby bylo zastoupení rovnovážných vlhkostí dřeva nápomocné pro praktické stanovení vlhkosti dřeva, které je zabudované v konstrukci. Zároveň poslouží pro porovnání jednotlivých vlhkoměrů a jejich přesností pro stanovené intervaly zvolených vlhkostí. Záměrně byly vzorky po dosažení meze hygroskopicity dále vlhčeny pro dosažení extrémní vlhkosti vzorků.

Cílené dosažené vlhkosti vzorku pro provedení stanovení vlhkosti proběhly v požadovaných intervalech při přírůstku 3 hm. % vlhkosti vzorku s počáteční hodnotou

vlhkosti 5 hm. % až do hodnoty vlhkosti 26 hm. %, poté byly provedeny další dvě měření mimo tento rozsah (30 hm. % a 50 hm. %).

Připravené vzorky a jejich strany byly označeny vzhledem k průběhu dřevních vláken a poté byly vloženy do sušárny pro vysušení a stanovení suché hmotnosti vzorků při teplotě sušení 103 ± 2 °C. Vzorky byly vytaženy ze sušárny po dosažení konstantní hmotnosti (změna hmotnosti mezi dvěma měřeními v intervalu dvou hodin nepřekročí 0,01g). Poté byly vzorky ochlazeny v exsikátorech na pokojovou teplotu a každý vzorek byl zvážen s přesností na 0,01g a tím byla zjištěna jejich počáteční suchá hmotnost před vlhčením.

Následně byly výpočtem stanoveny orientační vlhkosti a s tím související množství vody, které je nutné do vzorku dodat pro dosažení požadované vlhkosti. Adsorpce vody na povrch vzorků byla zajištěna pomocí nádoby s rozstřikovací hlavicí, vlhčení bylo prováděno rovnoměrně ze všech stran vzorků. Po navlhčení vzorků a ustálení vlhkosti bylo přistoupeno ke gravimetrickému ověření vlhkosti na požadovaných počátečních 5 % vlhkosti vzorků. Ustálení vlhkosti **po celém průřezu vzorku** a zamezení vlivu vlhkosti okolního prostředí bylo dosaženo separátním umístěním navlhčených vzorků po dobu 72 h do polyethylenové fólie, při vyšších vlhkostech se doba ustálení ekvivalentně prodlužovala. Během procesu ustalování byly vzorky pravidelně kontrolovány vážením a v případě nedosažené požadované hodnoty hmotnosti byl proveden opětovný postřík povrchu vzorku pro zvýšení hmotnosti a tím dosažení odpovídající vlhkosti vzorku.

Následně bylo provedeno měření vlhkosti pomocí jednotlivých zvolených vlhkoměrů a vážení pro finální stanovení vlhkosti pomocí gravimetrické metody. Měření vzorků bylo prováděno na všech příslušných plochách vzorků s ohledem na průběh vláken a tyto plochy byly posuzovány zvlášť. Následně se výše popsané operace opakovaly pro dosažení další stanovené vlhkosti vzorku.

Data byla následně zpracována a byla určena průměrná hodnota vlhkosti naměřené vlhkoměrem a byla určena i směrodatná odchylka měření.

6.1.4. Určení měřících míst zkušebních těles

Dřevo je anizotropním materiálem, jeho vlastnosti se tedy liší v závislosti na měřeném směru. Toto platí i o vlhkosti dřeva. Vlhkost se totiž nejlépe adsorbuje ve směru růstu (podélném směru), zde tedy bude přenos vlhkosti nejúčinnější. Naproti tomu na

radiálních a tangenciálních plochách dochází k pomalejšímu pohybu ve směru napříč vláken. Pro posouzení měření bylo u všech vzorků provedeno rozdělení ploch na **příčné plochy, a dále plochy podélné radiální a tangenciální.**

Na příčných plochách (obě čelní strany) byla vždy při jednom měřicím cyklu provedena tři měření. Na podélných řezech byla následně stanovena charakteristika ploch, podle které se určilo, zdali se jedná o radiální nebo tangenciální plochu. Měření poté probíhalo na ploše radiální taktéž na třech místech (místa viz obr. 18 a 19). Radiální plocha byla vybrána z důvodu převažujícího počtu těchto ploch, díky čemuž mohlo být měření přesnější a mohly být vyloučeny krajní hodnoty. Měření sice provedeno na všech plochách, nicméně pro další hodnocení byly vzaty pouze hodnoty z příčného řezu a hodnoty z podélné plochy radiální. Tangenciální podélná plocha byla měřena pouze jako orientační.



Obrázek 17 Vzorek smrku SM2 a vyznačení míst měření, radiální podélná plocha



Obrázek 18 Vzorek buku BK1 a vyznačení míst měření, radiální podélná plocha

7. VÝSLEDKY ZKOUŠEK

Hodnoty byly měřeny s rozlišením 0,1 % hmotnostní vlhkosti a do výsledků zkoušek byla zahrnuta jejich průměrná hodnota pro každou dřevinu. U kapacitního vlhkoměru Greisinger GMK 100 jsou výsledné hodnoty pro buk zdvojeny, jelikož bylo provedeno měření při nastavení parametru objemové hmotnosti $650 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (BK-650) a $700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (BK-700). K tomuto způsobu měření bylo přistoupeno z toho důvodu, že reálná objemová hmotnost dřeviny se nacházela uprostřed tohoto rozmezí.

7.1. Měření vlhkosti na příčných řezech

Hodnoty vlhkostí měřeny na příčných řezech vzorků, kde se očekává na základě poznatků o difúzním toku dřevinou lepší vedení vody.

Tabulka 8 Naměřené hodnoty vlhkostí na příčném řezu pro vzorky SM, BK při použití všech přístrojů zahrnutých v experimentu

Příčný řez	Druh dřeviny	Naměřené hodnoty vlhkosti [hm. %]									
Gravimetrické měření	SM	5,2	8,0	11,0	14,2	16,9	20,2	22,9	26,4	31,1	50,9
	BK	5,0	7,9	10,9	14,2	17,0	20,5	23,0	26,7	30,5	50,5
Moist 350	SM	14,1	14,9	16,4	20,8	22,7	27,6	29,7	39,1	45,6	60,3
	BK	19,0	21,3	22,6	28,0	30,9	36,3	42,2	52,2	51,6	57,8
Testo 606	SM	X	11,5	11,2	14,8	17,9	19,2	18,9	20,9	26,7	37,1
	BK	8,4	10,5	15,1	22,5	21,1	21,6	20,8	23,5	23,4	38,9
Testo 616	SM	6,4	9,9	13,0	14,8	18,5	20,8	22,3	33,7	40,0	47,4
	BK	7,5	9,1	12,4	17,8	19,0	20,3	23,5	32,6	37,1	48,1
Greisinger GMK 100	SM	6,3	8,7	10,0	12,7	14,5	18,7	21,5	27,7	30,5	40,2
	BK-650	6,8	9,8	10,3	15,0	17,4	22,0	25,5	32,3	33,8	37,0
	BK-700	6,8	8,1	10,1	14,6	16,5	21,4	23,5	29,0	30,5	35,5
Greisinger GMI 15	SM	4,1	6,2	6,8	12,5	16,1	21,4	24,8	X	X	X
	BK	7,9	10,0	12,6	19,9	25,4	X	X	X	X	X

X...hodnota mimo rozsah

7.2. Měření vlhkosti na podélných radiálních řezech

Z podélných řezů bylo vybráno měření vlhkosti na podélných radiálních podélných plochách. Výsledky vlhkosti jsou uvedeny v tabulce č. 9.

Tabulka 9 Naměřené hodnoty vlhkosti na radiálním řezu pro SM, BK při použití všech přístrojů zahrnutých v experimentu

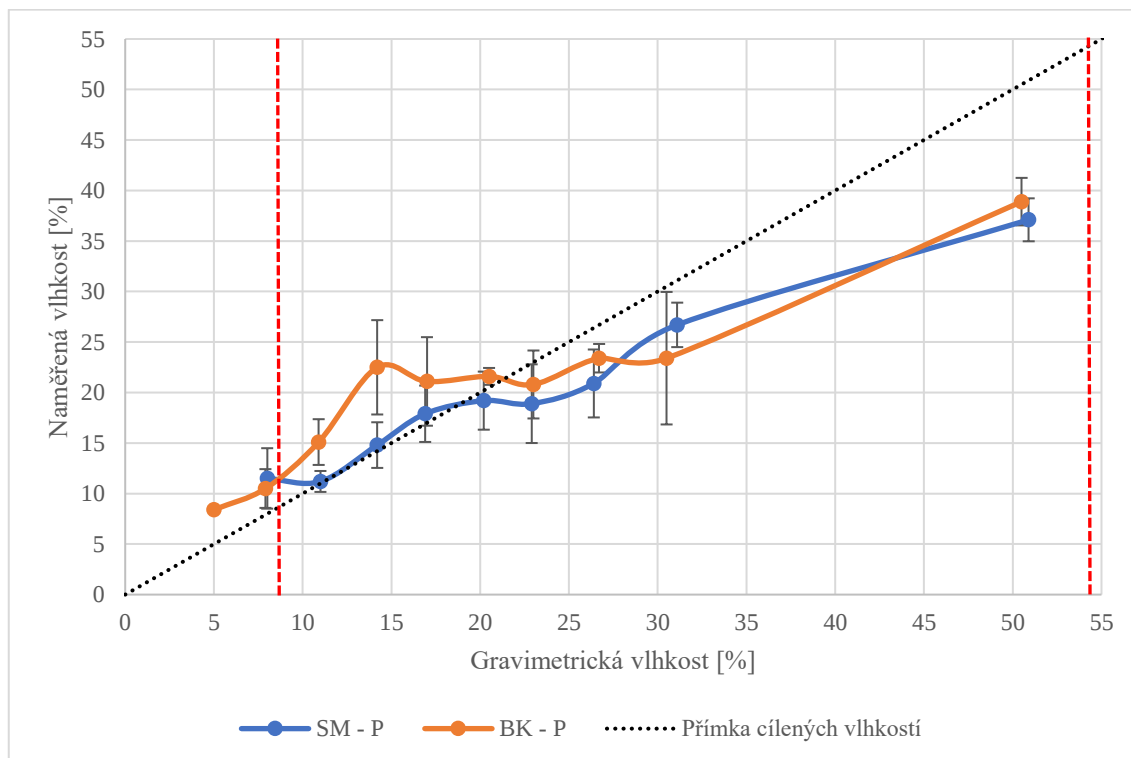
Radiální řez	Druh dřeviny	Naměřené hodnoty vlhkosti [hm. %]									
Gravimetrické měření	SM	5,2	8,0	11,0	14,2	16,9	20,2	22,9	26,4	31,1	50,9
	BK	5,0	7,9	10,9	14,2	17,0	20,5	23,0	26,7	30,5	50,5
Moist 350	SM	14,4	15,8	16,8	21,1	21,2	23,1	24,2	27,2	32,5	50,7
	BK	18,3	22,1	23,4	27,8	26,6	25,7	28,9	31,3	37,8	52,9
Testo 606	SM	9,6	12,3	12,1	16,7	16,2	16,5	20,2	18,9	24,0	35,8
	BK	8,5	14,2	16,2	22,4	16,6	17,0	17,1	21,0	21,8	37,7
Testo 616	SM	8,6	12,8	16,0	15,4	19,5	18,9	16,1	24,4	29,5	45,2
	BK	6,7	11,2	15,2	20,0	20,1	17,5	18,6	24,0	37,0	48,2
Greisinger GMK 100	SM	5,4	9,4	8,4	11,1	12,1	14,5	18,1	19,9	24,4	39,7
	BK-650	6,0	10,6	11,3	15,0	15,5	17,4	21,5	23,4	23,3	37,0
	BK-700	5,7	9,1	10,9	15,0	14,8	16,4	18,7	20,1	22,0	35,7
Greisinger GMI 15	SM	3,2	5,5	5,2	10,6	12,3	15,0	15,7	21,2	25,3	X
	BK	6,0	8,8	12,8	16,4	17,1	19,0	19,9	23,2	23,2	X

X...hodnota mimo rozsah

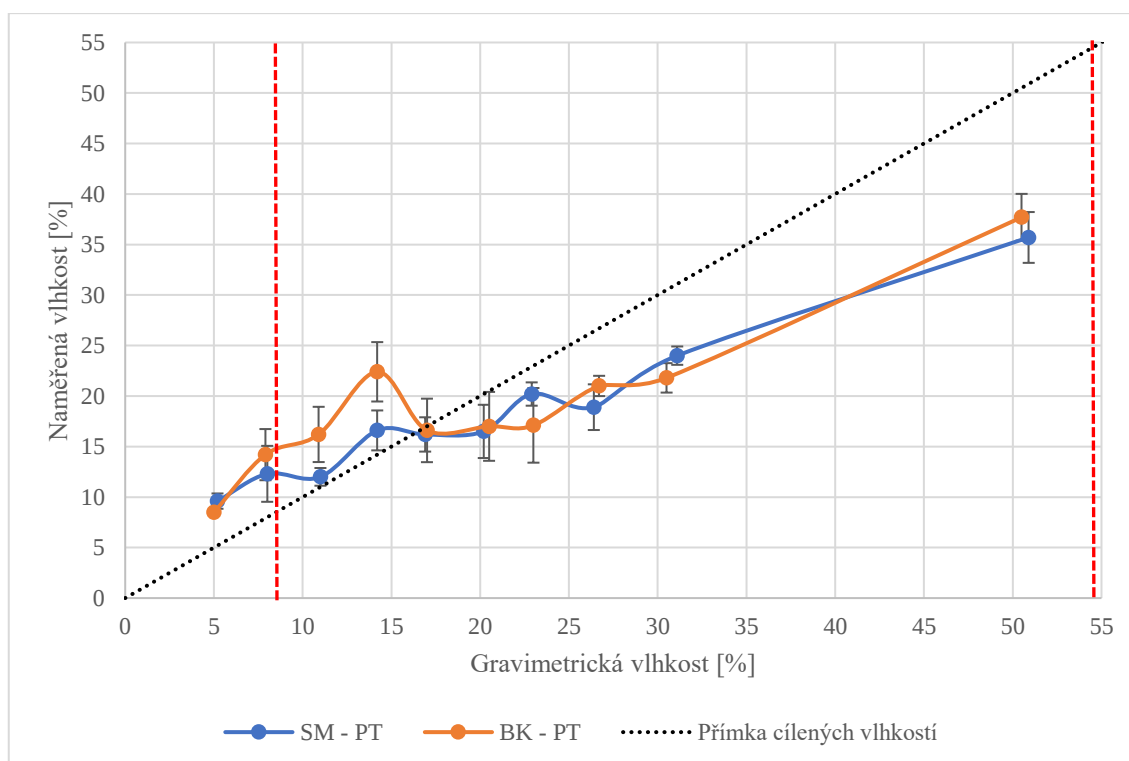
8. VYHODNOCENÍ A DISKUZE ZKOUŠEK

8.1. Měření vlhkosti odporovým vlhkoměrem

Měření bylo prováděno vlhkoměrem Testo 606. Měření na příčném řezu a na radiální podélné ploše byla z důvodu přehlednosti znázorněna odděleně a je patrná na následujících grafech č. 1 a č. 2. graficky.



Graf 1 Průměrné hodnoty vlhkosti zjištěné odporovým vlhkoměrem TESTO 606 v podélném směru pro vzorky SM a BK, tečkovaně vyznačena gravimetricky požadovaná vlhkost (referenční), svisle čárkovaně znázorněno omezení vlhkoměru



Graf 2 Průměrné hodnoty vlhkosti zjištěné odporovým vlhkoměrem TESTO 606 v příčném tangenciálním směru pro vzorky SM a BK, tečkovaně vyznačena gravimetricky požadovaná vlhkost (referenční), svisle čárkovaně znázorněno omezení vlhkoměru

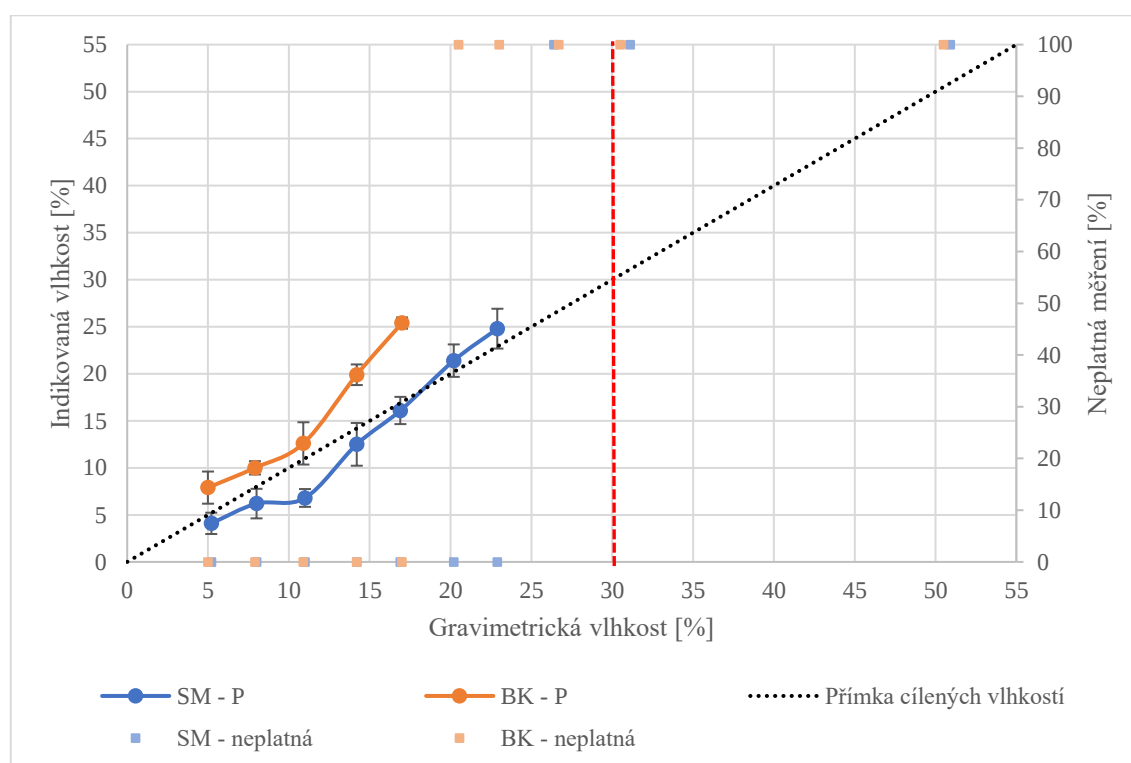
Hodnoty na obou řezech vykazují oscilační charakter. Při nižších vlhkostech (do 17 hm. %) jsou měřené hodnoty vyšší než reálná vlhkost, měří se na stranu bezpečnou. Ovšem při hodnotách vlhkosti od 17 – 22 hm. % dochází ke zlomu, kdy se hodnoty zpřesní a následně dochází k opačnému trendu. Naměřené hodnoty jsou nižší než reálná vlhkost, což ukazuje na měření na nebezpečnou stranu.

Ve směru podélném bylo problematické naměřit nejnižší hodnoty vlhkosti 5 hm. %, kdy se u smrku nepodařila vlhkost naměřit a vlhkost buku se podařila naměřit s daleko vyšší hodnotou. Naměřené hodnoty pomocí vlhkoměru Testo 606 na vzorcích smrku vykazují vysokou přesnost až do vlhkosti cca 22 hm. % a následně klesá přesnost měření na nebezpečnou stranu. Oproti tomu hodnoty na vzorcích buku vykazují zpočátku vyšší odchylku na bezpečnou stranu, poté je to ovšem kompenzováno nižší odchylkou v části grafu s nebezpečným směrem odchylky. U vzorků buku byly také zjištěny mnohem vyšší odchylky. Ve směru příčném je trend výsledků velmi podobný. Jediným rozdílem jsou vyšší nepřesnosti smrku v části grafu se zjištěnou odchylkou na bezpečnou stranu.

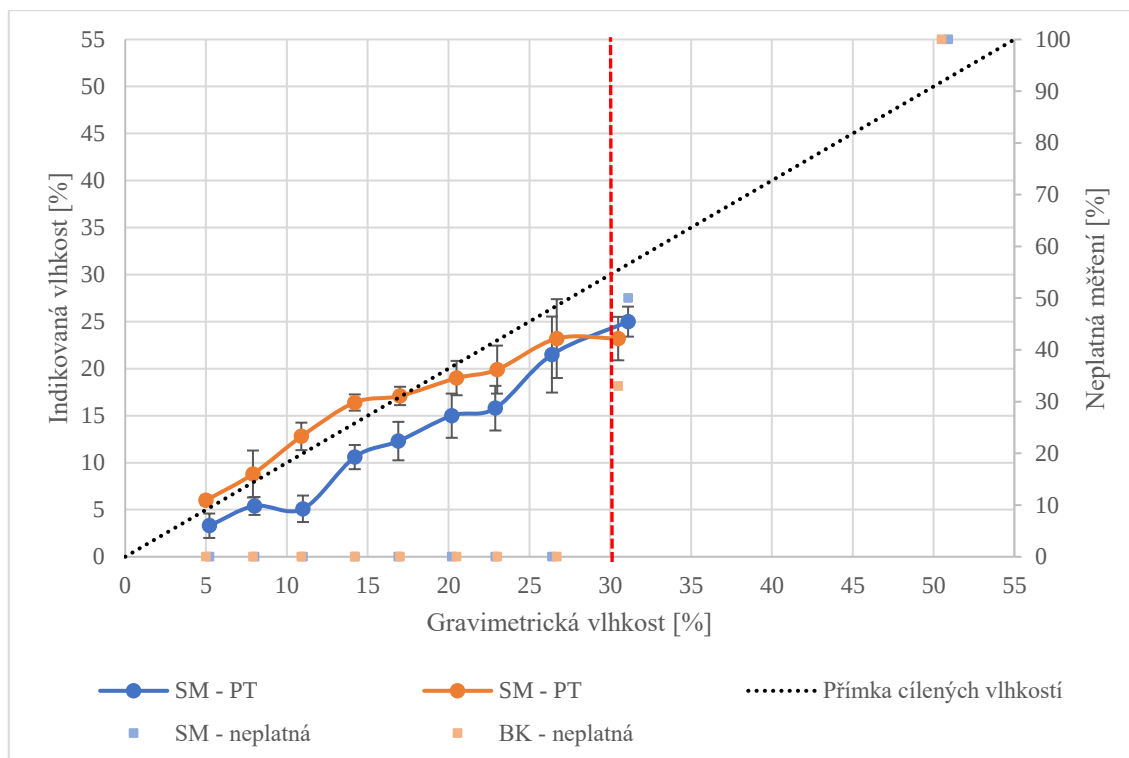
8.2. Měření vlhkosti kapacitními vlhkoměry

Měření bylo prováděno třemi typy kapacitních vlhkoměrů, konkrétně Greisinger GMI 15, Greisinger GMK 100 a Testo 616.

Vlhkoměr Greisinger GMI 15 je výrobcem uváděn pouze jako orientační indikátor vlhkosti. Pracovní rozmezí vlhkoměru je do 30 hm. %, nad 30 hm. % nelze propojit žádnou interpolací. V grafech jsou navíc vyhodnoceny i podíly platných měření (bodový graf), kdy v daném vlhkovstním stavu nebylo možné vlhkovstní stav změřit (neplatná měření o výši 100 %) anebo vlhkost byla změřena pouze při některých měření (procenta počtu platných měření).



Graf 3 Průměrné hodnoty vlhkosti zjištěné kapacitním vlhkoměrem GREISINGER GMI 15 v podélném směru pro vzorky SM a BK, tečkovaně vyznačena gravimetricky požadovaná vlhkost (referenční), svisle čárkovně znázorněno omezení vlhkoměru



Graf 4 Průměrné hodnoty vlhkosti zjištěné kapacitním vlhkoměrem GREISINGER GMI 15 v příčném tangenciálním směru pro vzorky SM a BK, tečkovaně vyznačena gravimetricky požadovaná vlhkost (referenční), svisle čárkovaně znázorněno omezení vlhkoměru

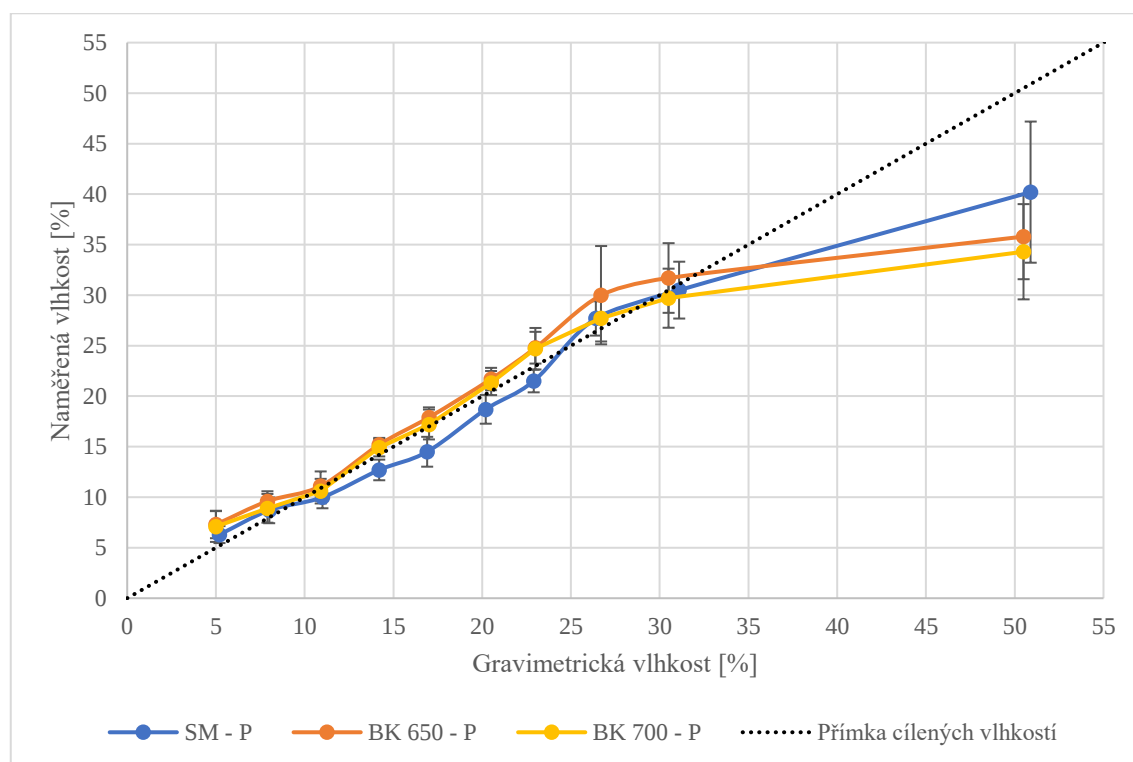
U obou grafů je naznačeno omezení přístroje, kdy jsou přepočty vlhkosti dřeva udávány pouze do vlhkosti dřeva 30 hm. %. Zpravidla se hodnoty měření pohybovaly na vyšších hodnotách u buku než smrku hlavně díky možnosti volby pouze jediného nastavení přístroje pro měření.

V podélném směru dochází u hodnot k trendu přesunu přesnosti měření ve směru rezervy na stranu bezpečnou. Hodnoty pro smrk jsou vyjma vlhkosti 11 hm. % relativně velmi přesné vzhledem ke gravimetrickému stanovení. Zpočátku se jedná o chybu na stranu nebezpečnou, v okolí 17 hm. % vlhkosti se hodnota téměř zcela zpřesní a nadále trend pokračuje i s rostoucí chybou na stranu bezpečnou. Naproti tomu buk vykazuje hodnoty odchýlené na stranu bezpečnou a tato odchylka s rostoucí vlhkostí roste. V podélném směru bylo měření ukončeno při vlhkosti 17 hm. % u buku a při vlhkosti 23 hm. % v smrku, přičemž vždy byla měření platná buď všechna nebo žádná, nedošlo tedy ke zkreslení případným omezením 30 hm. %.

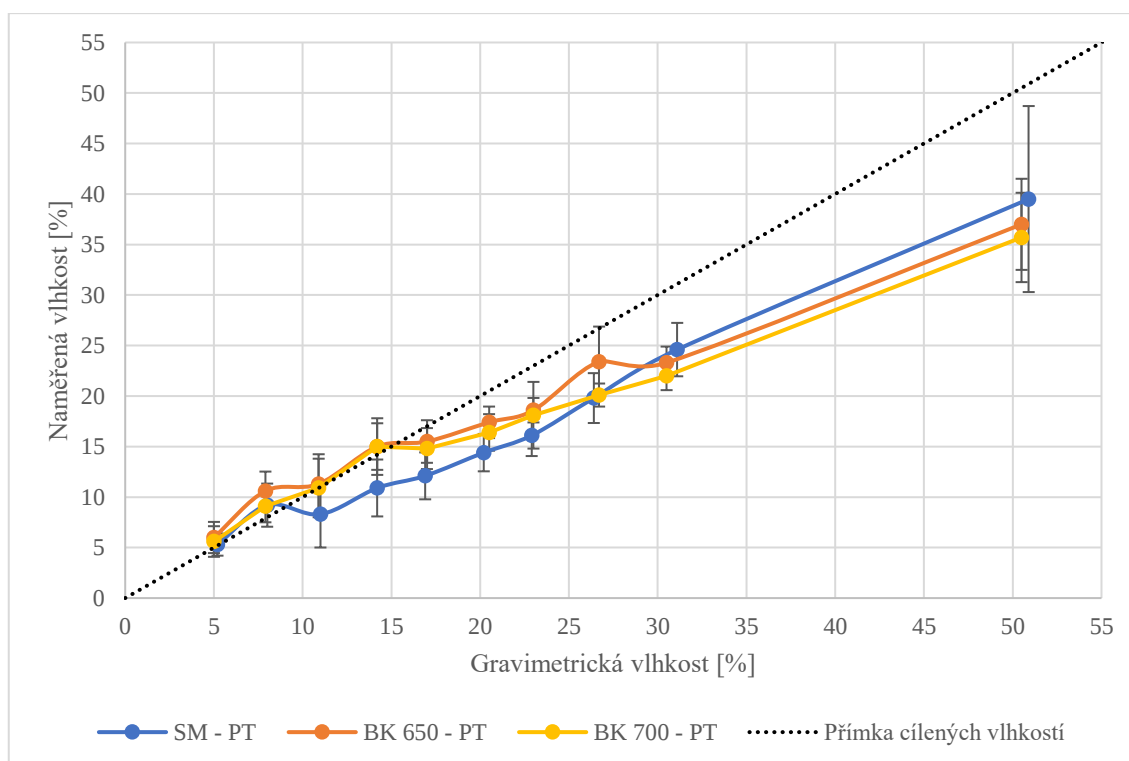
V příčném směru byla zjištěna jistá odlišnost. Hodnoty se zde nachází převážně v pásmu chyby na stranu nebezpečnou, přičemž tato se dále zvyšovala. V příčném směru je naopak

měření přesnější pro vzorky buku, ale pouze do vlhkosti 26 hm. %. U měřených hodnot 30 hm. % dochází k nárůstu chyby, ale hlavně z důvodu, že vzorky jsou namočené na maximální měřitelnou hodnotu a třetina měření u buku, respektive polovina u smrku, byla neplatných (tedy nad hranicí 30 hm. %). S rostoucí vlhkostí navíc rostla odchylka měřených hodnot, jejíž vývoj neměl příliš výrazný vliv na typ dřeviny.

Dalším vlhkoměrem od firmy **Greisinger** byl model **GMK 100**, který již slouží jako plnohodnotný měřič vlhkosti. Přesnější by měl být i z důvodu možnosti nastavení přesné hustoty vzorku v intervalech $50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.



Graf 5 Průměrné hodnoty vlhkosti zjištěné kapacitním vlhkoměrem GREISINGER GMK 100 v podélném směru pro vzorky SM a BK, tečkovaně vyznačena gravimetricky požadovaná vlhkost (referenční)



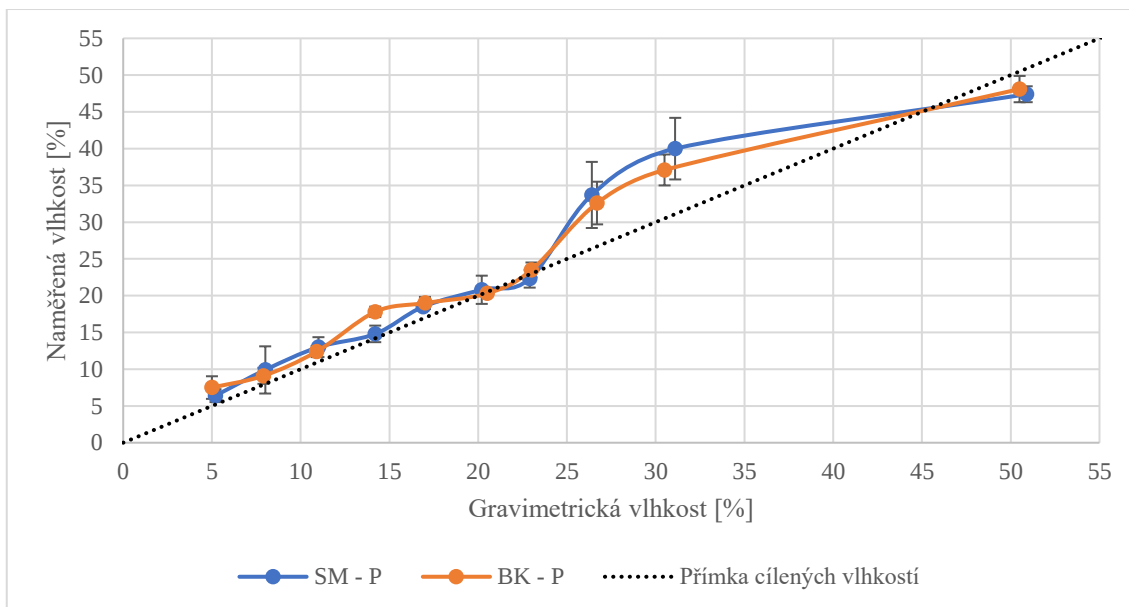
Graf 6 Průměrné hodnoty vlhkosti zjištěné kapacitním vlhkoměrem GREISINGER GMK 100 v příčném tangenciálním směru pro vzorky SM a BK, tečkovaně vyznačena gravimetricky požadovaná vlhkost (referenční)

V podélném směru lze vidět, že měření se dají považovat za velmi přesná vyjma měření vlhkosti při 50 hm. %. Vzorky smrkové stejně jako bukové vykazují velmi přesné hodnoty měření vlhkostí, přičemž vzorky smrkové jsou měřeny mírně na stranu nebezpečnou a bukové vzorky na stranu bezpečnou. Platí také, že hodnoty při měření v parametru objemové hmotnosti $700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ jsou přesnější než při měření $650 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Měření jsou velmi přesná také co se týká odchylek, které jsou v porovnání s jinými hodnotami do vlhkosti 26 hm. % velmi nízké. Poté následuje nejprve nárůst odchylek na značně vyšší hodnoty a následně dojde k poklesu přesnosti měření ve směru strany nebezpečné.

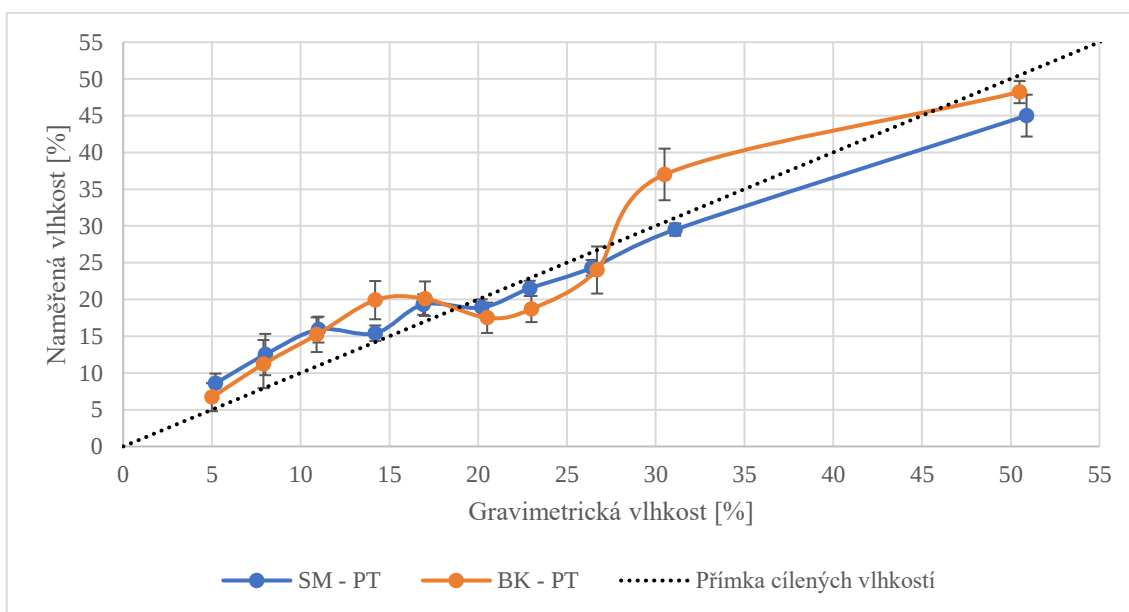
V příčném směru nejsou hodnoty tolik přesné jako v podélném. Dochází zde k odlišnostem, zejména v chybách na stranu nebezpečnou. Zde jsou hodnoty u buku přesné naopak při měření vlhkosti na parametr $650 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Trend nárůstu chyby zde ovšem není tak markantní, ovšem došlo k nárůstu odchylek u dílčích měření oproti podélnému směru, zejména díky změnám vzorku s rostoucí vlhkostí, kdy při vyšších

vlhkostech nelze zajistit požadovaný kontakt s rostlým dřevem zejména v příčných směrech.

Posledním vlhkoměrem pracujícím na principu kapacity je vlhkoměr **Testo 616**. Tento vlhkoměr byl vybrán jako zástupce již lehce vyšší třídy.



Graf 7 Průměrné hodnoty vlhkosti zjištěné kapacitním vlhkoměrem TESTO 616 v podélném směru pro vzorky SM a BK, tečkovaně vyznačena gravimetricky požadovaná vlhkost (referenční)

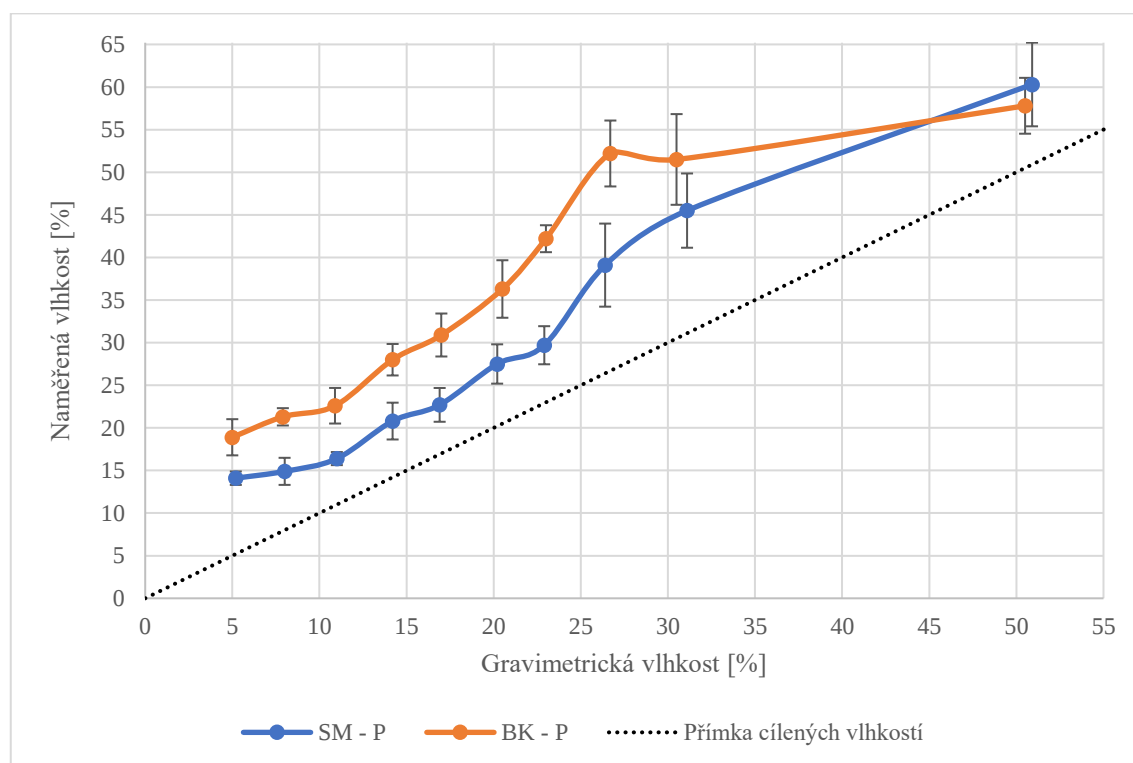


Graf 8 Průměrné hodnoty vlhkosti zjištěné kapacitním vlhkoměrem TESTO 616 v příčném tangenciálním směru pro vzorky SM a BK, tečkovaně vyznačena gravimetricky požadovaná vlhkost (referenční)

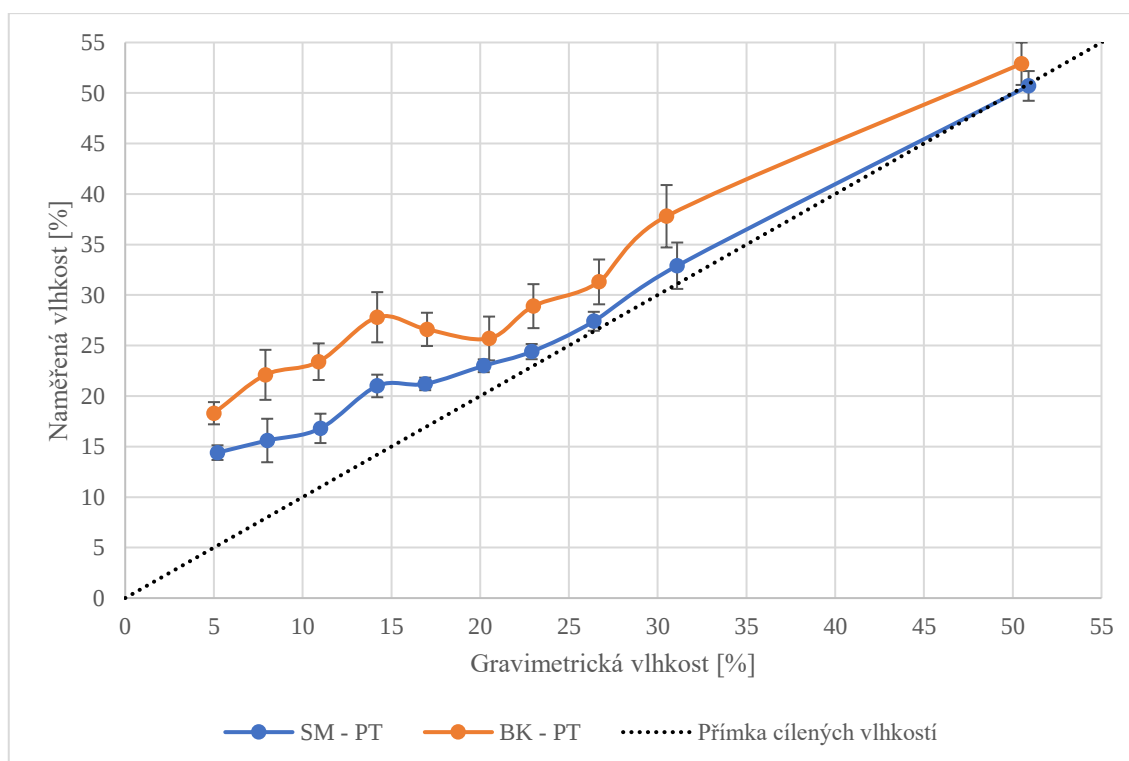
Pro podélný směr lze u tohoto přístroje pozorovat, že ačkoli vlhkoměr nerozlišuje typ dřeviny, jeho měření jsou velmi přesná v případě obou dřevin a výsledky se ani vzájemně příliš neliší. Téměř všechna měření jsou měřena s chybou na stranu bezpečnou a výsledky do 26 hm. % vlhkosti jsou velmi blízké reálné hodnotě, stejně tak jsou odchylky nízké. Dále poté nastává vysoká odchylka na stranu bezpečnou a při nejvyšší vlhkosti a při měření extrémního případu vlhkosti nastal posun chyby do oblasti na nebezpečnou stranu. V příčném směru již lze pozorovat jisté odlišnosti mezi dřevinami. Obě dřeviny se pohybují při vlhkostech do 17 hm. % na straně bezpečné chyby měření, následně nastává pohyb na stranu nebezpečnou. Lze také říci, že hodnoty měření vycházejí přesněji u smrku než u buku. Smrkové vzorky také vykazují nižší odchylky měření než vzorky bukové.

8.3. Měření vlhkosti mikrovlnnými vlhkoměry

Měření zde probíhalo pouze jedním vlhkoměrem, konkrétně se jednalo o vlhkoměr **Moist 350 B**.



Graf 9 Průměrné hodnoty vlhkosti zjištěné mikrovlnným vlhkoměrem MOIST 350 B v podélném směru pro vzorky SM a BK, tečkovaně vyznačena gravimetricky požadovaná vlhkost (referenční)



Graf 10 Průměrné hodnoty vlhkosti zjištěné mikrovlnným vlhkoměrem MOIST 350 B v příčném tangenciálním směru pro vzorky SM a BK, tečkovaně vyznačena gravimetricky požadovaná vlhkost (referenční)

Grafy byly zpracovány odděleně pro podélný směr a pro příčný směr. U tohoto vlhkoměru nebylo možno rozlišit typ měřené dřeviny, což se projevilo na výsledcích. Hodnoty naměřených vlhkostí byly ve všech případech vyšší u vzorků buku a tyto hodnoty byly zároveň i s vyšším odstupem od reálné gravimetricky zjištěné hodnoty vlhkosti. Lze tedy předpokládat, že s rostoucí hustotou dřeva jsou hodnoty naměřené vlhkosti vyšší a výsledky jsou zkreslenější, jedná se ovšem o chybu na stranu bezpečnou.

V podélném směru byly hodnoty naměřené vlhkosti smrku blíže reálné hodnotě a zároveň byla zjištěna menší odchylka měření. V okolí meze hygroskopicity došlo k nárůstu odchylky a také k vyššímu rozdílu od reálné hodnoty gravimetrické vlhkosti. U smrku odchylka rostla s rostoucí vlhkostí, u buku není pozorována jednoznačná závislost.

V příčném směru byl pozorován takový trend, kdy hodnoty při nižší reálné vlhkosti jsou odchýleny podobně jako v podélném směru, ale s rostoucí vlhkostí se tyto hodnoty přibližovaly reálné hodnotě. V případě smrku se u hodnoty vlhkosti cca 50 hm. % měřená hodnota téměř sjednotila s hodnotou reálnou. Odchylky jsou oproti měření v podélném

směru mnohem nižší. U smrku jsou ve většině případů zanedbatelné, u buku jsou vyšší, ale hodnoty s rostoucí vlhkostí zůstávají podobné.

8.4. Srovnání elektrických a dielektrických metod

V praxi se v místních podmínkách používají mnohem častěji metody elektrické. Z naměřených hodnot ovšem vyplývá, že i při dostatečném množství času pro rovnoměrné rozložení vlhkosti vykazují měření místy velmi vysokých hodnot odchylek (u vzorku buku až 30 % z naměřené hodnoty vlhkosti, tato hodnota se týkala vyšších vlhkostí nad 30 hm. % a vlhkosti přibližně 14 hm. %). S takto rozptýlenými hodnotami je měření vzorků dost nepřesné. Naproti tomu metody na principu dielektrických vlastností vycházely relativně spolehlivě (z řad kapacitních nejvyšší hodnota 17 % z naměřené hodnoty, ale průměrná hodnota byla daleko nižší). V rámci těchto metod vycházejí přesněji měření kapacitními vlhkoměry, nejpřesněji poté do vlhkosti dřeva 17 hm. %. (průměrná hodnota do 10 % z naměřené hodnoty). Měření pomocí mikrovlnných vlhkoměrů poté sice vykazují relativně výraznou odchylku průměrné hodnoty od reality, ale tato je v průběhu měření poměrně konstantní. Dle měření a výsledných hodnot tedy sice vychází lépe měření metodami dielektrickými (konkrétně nejlépe měření kapacitními vlhkoměry), ačkoli v praxi se setkáme hlavně s metodami elektrickými, konkrétně s metodou odporovou.

9. SHRNU TÍ A DISKUZE

Pro diskuzi výsledků jako celku bylo provedeno srovnání s jinými autory. V našich podmínkách se mnohem častěji používají měření odporovými vlhkoměry než vlhkoměry kapacitními či mikrovlnnými viz Gandelová (4). Z naměřených hodnot se ovšem jeví jako přesnější měření metodami dielektrickými. I když byla měření dielektrickými vlhkoměry přesnější než vlhkoměrem na bázi měření elektrického odporu, v praktickém užití nemusí být úplně vždy vhodné. Povrch konstrukce často bývá vlivem působení objemových změn velmi nepravidelný. Vlhkoměry pracující na principu vlastností dielektrických jsou ve většině příložené a je nutno zajistit plnoplošný kontakt. Měření na nerovných površích způsobí zkreslení. Proto se v praxi více používá měření odporovými vlhkoměry, byť je správné použití dielektrického vlhkoměru přesnější.

Metoda měření odporová:

Odporové vlhkoměry ve svém experimentu monitorování vlhkosti používal také Dietsch a kol. V tomto experimentu se zabývali vývojem vlhkosti v dřevěných prvcích. Jejich měření probíhalo v již existující konstrukci. S ohledem na zabudování prvků v konstrukci se jednalo o měření ve směru příčném. Na základě jejich experimentu, kdy vlhkost dosahovala maximálně 16 hm. % v období kladných teplot, v zimě poté výjimečně 20 hm. % (13), lze určit rozmezí intervalu, ve kterém se míra vlhkosti pohybuje (10 – 17 hm. %). Pokud srovnáme jejich výsledky s výsledky této práce, lze říct, že až na výjimečné případy se v praxi u tohoto rozptylu a při měření v tomto směru setkáme s měřením sice mírně nepřesným, ale tato nepřesnost je posunuta na stranu bezpečnou, jelikož měřená vlhkost je vyšší než vlhkost reálná (při vlhkosti 14,2 hm. % pro buk i smrk byla průměrná naměřená hodnota u vzorků smrku 16,7 hm. % a u vzorků buku 22,4 hm. %).

Vlhkost je prakticky nezměřitelná odporovou metodou při nízkých hodnotách vlhkosti. K podobným výsledkům ve své diplomové práci došla také Burešová, v jejíž práci bylo zkoušeným materiálem cihelné zdivo. V případě cihelného zdiva byla mezní hodnota 4,3 hm. % vlhkosti. (27) V případě dřevěných prvků mezní hodnota odpovídá předpisu výrobce a nachází se mezi 8 – 9 hm. % vlhkosti. Dle Burešové je také potřeba zajistit dobrý kontakt s materiálem a je potřeba se vyhnout prvkům, které mohou ovlivnit měření. (27) V každém materiálu je nutno zajistit homogenitu. Pokud tomu tak není, jednotlivé

části mohou mít různé charakteristické elektrické odpory, jiný průběh závislosti odporu na vlhkosti nebo díky nehomogenitě může být způsobeno nerovnoměrné rozdělení vody v prvku (např. nepravá jádra).

Metoda měření kapacitní:

Dle Hobsta a Vodové jsou měření kapacitními metodami relativně přesné, jedná se pouze o nízkou odchylku ovšem na straně nebezpečné (v jejich experimentu byla gravimetrická vlhkost 7,8 hm. % a následně byla naměřena hodnota 7,3 hm. %). (28) Ve většině případů byla experimentálně zjištěná obdobná odchylka přesnosti měření vlhkosti dřeva, záleží však i na typu kapacitního vlhkoměru. Například vlhkoměr Greisinger GMI 15 měl hodnoty nižší z důvodu horního omezení rozsahu měření (pro smrk při vlhkosti 11 hm. % byly hodnoty 6,8 hm. % v podélném směru a 5,2 hm. % v příčném směru). Naopak vlhkoměr Greisinger GMK 100 dokáže měřit vlhkost s přesnými parametry, hodnoty lze považovat za přesné (pro buk při vlhkosti 10,9 hm. % byly výsledné hodnoty 10,3 hm. % pro parametr objemové hmotnosti $650 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, případně 10,1 hm. % pro parametr objemové hmotnosti $700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Na stranu bezpečnou se měření prakticky nedostávají vyjma několika hodnot vlhkoměru Testo 616. Výsledky tedy byly relativně přesné, zejména v případě vlhkoměrů Greisinger GMK 100 a Testo 616.

Metoda měření mikrovlnná:

Burešová ve své práci analyzuje i vlhkoměry mikrovlnné. Konkrétně použila přístroj Moist 210. Její měření vykazovalo přesné hodnoty, bylo potřeba hodnoty pouze přepočíst dle stanovené kalibrační křivky. (27)

V této práci byl použit přístroj Moist 350 B. U tohoto modelu nelze volit typ dřeviny, ovšem přístroj vyhodnotí přímo vlhkost bez použití kalibrační křivky. Oproti měřením Burešové (která analyzovala vlhkost cihelného zdiva) v provedeném experimentu pro smrkové a bukové dřevo vycházejí hodnoty naměřených vlhkostí odlišně od reálné vlhkosti (jedná se o chybu na bezpečnou stranu). Chyba měření se jeví téměř konstantní, a to ve výši do 20 hm. % v podélném směru, konkrétně se jednalo při vlhkosti smrku 8,0 hm. % o naměřenou hodnotu 14,9 hm. %; při vlhkosti smrku 14,2 hm. % byla naměřená hodnota 20,8 hm. % a při vlhkosti smrku mimo tento rozptyl, 26,4 hm. %, byla naměřená hodnota 39,1 hm. %. Po tomto zjištění chyby přístroje, respektive při měření

při vyšších vlhkostních stavech by bylo možné tuto chybu eliminovat stanovením kalibrační křivky pro tento typ přístroje.

10. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo provést výběr vlhkoměrů zastupujících jednotlivé metody použitelné na dřevěné konstrukce a následně provést analýzu jejich vlastností. Jako vhodné metody pro měření na dřevěných konstrukcích byly určeny metody **odporové, kapacitní a mikrovlnné**. S ohledem na optimalizaci byly metody posouzeny na základě vybraných zástupců a jejich deklarovaných vlastností. Optimalizace byla provedena podle Saatyho metody přidělení vah jednotlivých kritérií (váhu 4 měla cena a přesnost měření, váhu 3 měl rozsah a váhu 2 měly rozlišení dřevin a teplotní omezení pro použití vlhkoměru). Nejvyšší váhu v optimalizačním procesu vykazala metoda kapacitní, u které bylo pro srovnání použito i vlhkoměr Greisinger GMI 15, který je výrobcem udáván pouze jako orientační zařízení pro měření. Nižší váhu stanovenou optimalizačním procesem vykazaly metody odporová a poté mikrovlnná. Mezi základní úskalí mikrovlnných vlhkoměrů v optimalizačním procesu patří jejich vysoká pořizovací cena (až patnáctinásobná oproti jiným metodám), největší vadou odporových vlhkoměrů byl měřitelný rozsah, který byl pevně dán schopností přístroje detekovat daný elektrický odpor.

V následném praktickém experimentu bylo provedeno měření, které spočívalo ve využití vybraných typů vlhkoměrů zastupujících jednotlivé metody měření. Jednalo se o vlhkoměry pracující na principu určení závislosti změny odporových, kapacitních a mikrovlnných vlastností na změnu vlhkosti. Měření byla prováděna na vzorcích dvou druhů dřevin, a to smrku a buku.

V případě **odporového vlhkoměru** se prokázal výše zmíněný nedostatek týkající se rozsahu měření. Hodnoty pod výrobcem udávanou hodnotu 8,8 hm. % byly měřeny jako vyšší oproti reálným hodnotám. Naopak s rostoucí vlhkostí se měření dostávalo z bezpečné strany měření (indikovaná vlhkost je vyšší než reálná) na stranu nebezpečnou, což bylo dáno horním omezením vlhkoměru 54,7 hm. %, ke kterému závěr experimentu limitoval.

Z řad **kapacitních vlhkoměrů** dosáhl velmi přesného měření vlhkoměr Greisinger GMK 100. Tento vlhkoměr byl dle optimalizace nejvýhodnějším, což se projevilo i v následném experimentu. Hodnoty měřené tímto vlhkoměrem byly velmi přesné. U buku navíc bylo měřeno ve dvou režimech objemové hmotnosti, konkrétně $650 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a $700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Rozdíly mezi těmito měřeními nebyly také nikterak odlišné, rozlišovací schopnost vlhkoměru je tedy velmi vysoká. Dalším kapacitním vlhkoměrem byl vlhkoměr Testo 616, druhý nejlépe hodnocený vlhkoměr dle optimalizace. I tento vlhkoměr měřil relativně přesně, na příčném řezu ovšem docházelo ke kolísání hodnot v pásmu bezpečného a nebezpečného měření, nelze jasně stanovit směr odchylky. Také odchylka sady měření vzrostla, ovšem stále se jedná o dobře měřící vlhkoměr. Přidán byl orientační vlhkoměr, který byl zároveň nejhůře hodnocen v optimalizačním procesu, ovšem i zde byly výsledky relativně přesné. V rámci orientačního měření při pohybu v praktických vlhkostech (do 20 hm. %) lze hodnotu považovat ze směrodatnou, nad touto hodnotou je měření zkresleno horním omezením vlhkoměru 30 hm. %.

U **mikrovlnných vlhkoměrů** byla základním problémem dostupnost vlhkoměrů pracujících na tomto principu. Měření vlhkostí dřeva tímto vlhkoměrem naznačovala jistou závislost. Vlhkoměr vykazoval relativně vysokou chybu, ale do hodnoty vlhkosti na mezi hygroskopicity se jednalo pro každou dřevinu o téměř konstantní hodnotu. Následně byl vývoj odlišný, ale v porovnání dřevin byl trend podobný. U tohoto typu vlhkoměru po následném vypracování kalibrační křivky mohou být dosažená data řádně a přesně interpretována.

Výsledky **měření potvrdily** výsledky provedeného optimalizačního procesu. Nejlepších hodnot dosahovaly vlhkoměry kapacitní. Tyto vlhkoměry mají nejvýhodnější poměr cena-výkon a jejich měření vykazalo nejpresnějších výsledků změřené vlhkosti dřeva ze všech použitých metod v experimentu. Po optimalizaci byla další metoda v pořadí odporová. Zde bylo znatelné omezení přístroje v rámci rozsahu, což byla oproti kapacitním vlhkoměrům podstatná nevýhoda. V běžných podmínkách se konstrukce obvykle nacházejí v tomto rozmezí od 12 % do 20 %, nad tyto hranice je vlhkost ve dřevě dosažena pouze v extrémních případech. Metodu lze hodnotit jako dostačující a v platném měřitelném intervalu je kvalitativně srovnatelná s kapacitní metodou. Nejnižší rozlišovací schopnost byla potvrzena u mikrovlnné metody, jejíž další nevýhodou je i vysoká pořizovací cena. Vyšší odchylku měřených dat lze eliminovat vytvořením kalibračního vztahu, který by byl určen na základě korelace experimentálně naměřených dat s hodnotami vlhkostí gravimetricky stanovenými.

SEZNAM OBRÁZKŮ:

Obrázek 1 Průběh navázání fyzikálně vázané vody (7)	13
Obrázek 2 Závislost vlhkosti prostředí na vlhkosti dřeva podle teploty (4).....	14
Obrázek 3 Průběh sorpce (9)	15
Obrázek 4 Sorpční izoterma; a - desorpce, b - oscilující sorpce, c – adsorpce (4).....	15
Obrázek 5 Vliv teploty na měření odporovou metodou; osa x: měřená hodnota vlhkosti, levá osa y: elektrický odpor, pravá osa y: reálná hodnota vlhkosti (13)	21
Obrázek 6 Typy odporových elektrod; a) přitlačné, b) hloubkové, c) a d) zarážecí, e) zvláštní, f) upínací (4).....	22
Obrázek 7 Vzor kalibrační křivky; n - počet detekcí, w - objem vlhkosti (18).....	26
Obrázek 8 Kombinovaný senzor (19).....	28
Obrázek 9 Senzor prostředí (19).....	29
Obrázek 10 Centrální jednotka (19)	29
Obrázek 11 Měřicí přístroj Greisinger GHM 3851 (21)	29
Obrázek 12 Přístroj Orion® 910 (22).....	30
Obrázek 13 Přístroj Voltcraft® MF-50	31
Obrázek 14 MOIST 350 B (24).....	32
Obrázek 15 Plošná mapa měření (25)	32
Obrázek 16 Vlhkoměr TROTEC T610 (26).....	33
Obrázek 17 Vzorek smrku SM2 a vyznačení míst měření, radiální podélná plocha ...	40
Obrázek 18 Vzorek buku BK1 a vyznačení míst měření, radiální podélná plocha.....	40

SEZNAM GRAFŮ:

Graf 1 Průměrné hodnoty vlhkosti zjištěné odporovým vlhkoměrem TESTO 606 v podélném směru pro vzorky SM a BK, tečkovaně vyznačena gravimetricky požadovaná vlhkost (referenční), svisle čárkovaně znázorněno omezení vlhkoměru	43
Graf 2 Průměrné hodnoty vlhkosti zjištěné odporovým vlhkoměrem TESTO 606 v příčném tangenciálním směru pro vzorky SM a BK, tečkovaně vyznačena	

gravimetricky požadovaná vlhkost (referenční), svisle čárkovaně znázorněno omezení vlhkoměru	44
Graf 3 Průměrné hodnoty vlhkosti zjištěné kapacitním vlhkoměrem GREISINGER GMI 15 v podélném směru pro vzorky SM a BK, tečkovaně vyznačena gravimetricky požadovaná vlhkost (referenční), svisle čárkovaně znázorněno omezení vlhkoměru	45
Graf 4 Průměrné hodnoty vlhkosti zjištěné kapacitním vlhkoměrem GREISINGER GMI 15 v příčném tangenciálním směru pro vzorky SM a BK, tečkovaně vyznačena gravimetricky požadovaná vlhkost (referenční), svisle čárkovaně znázorněno omezení vlhkoměru	46
Graf 5 Průměrné hodnoty vlhkosti zjištěné kapacitním vlhkoměrem GREISINGER GMK 100 v podélném směru pro vzorky SM a BK, tečkovaně vyznačena gravimetricky požadovaná vlhkost (referenční).....	47
Graf 6 Průměrné hodnoty vlhkosti zjištěné kapacitním vlhkoměrem GREISINGER GMK 100 v příčném tangenciálním směru pro vzorky SM a BK, tečkovaně vyznačena gravimetricky požadovaná vlhkost (referenční)	48
Graf 7 Průměrné hodnoty vlhkosti zjištěné kapacitním vlhkoměrem TESTO 616 v podélném směru pro vzorky SM a BK, tečkovaně vyznačena gravimetricky požadovaná vlhkost (referenční).....	49
Graf 8 Průměrné hodnoty vlhkosti zjištěné kapacitním vlhkoměrem TESTO 616 v příčném tangenciálním směru pro vzorky SM a BK, tečkovaně vyznačena gravimetricky požadovaná vlhkost (referenční)	49
Graf 9 Průměrné hodnoty vlhkosti zjištěné mikrovlnným vlhkoměrem MOIST 350 B v podélném směru pro vzorky SM a BK, tečkovaně vyznačena gravimetricky požadovaná vlhkost (referenční).....	50
Graf 10 Průměrné hodnoty vlhkosti zjištěné mikrovlnným vlhkoměrem MOIST 350 B v příčném tangenciálním směru pro vzorky SM a BK, tečkovaně vyznačena gravimetricky požadovaná vlhkost (referenční)	51

SEZNAM TABULEK:

Tabulka 1 Skupiny dřeva dle vlhkosti (2)	11
Tabulka 2 Mez hygroskopicity dle typu dřeviny (1)	12
Tabulka 3 Pořizovací ceny vlhkoměrů	34
Tabulka 4 Váhy kritérií pro Saatyho optimalizaci	34
Tabulka 5 Hodnocení zvolených kritérií	35
Tabulka 6 Výsledek optimalizačního výběru	35
Tabulka 7 Specifikace značení a vstupní parametry zkušebních vzorků ve vysušeném stavu	37
Tabulka 8 Naměřené hodnoty vlhkostí na příčném řezu pro vzorky SM, BK při použití všech přístrojů zahrnutých v experimentu	41
Tabulka 9 Naměřené hodnoty vlhkosti na radiálním řezu pro SM, BK při použití všech přístrojů zahrnutých v experimentu	42

LITERATURA:

1. Dejmal, Aleš. *Základy hydrotermické úpravy a ochrany dřeva*. Brno : Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 1995. ISBN 80-7157-163-6.
2. Požgaj, Alexander, a další. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Bratislava : Príroda a.s., 1997. ISBN 80-07-00960-4.
3. Vaněrek, Jan a kolektiv. *Kovové a dřevěné materiály - Modul M01*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2006.
4. Gandelová, Libuše, Horáček, Petr a Šlezingerová, Jarmila. *Nauka o dřevě*. Brno : Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2008. ISBN 978-80-7157-577-1.
5. Horáček, Petr. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. Brno : Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 1998. ISBN 80-7157-347-7.
6. Lang. 4. Vlhkost dřeva. *Studijní opory MENDELU*. [Online] [Citace: 16.. říjen 2020.] https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=9177;lang=cz.
7. Krňanský, Jan. Úvaha k interpretaci faktoru difúzního odporu kapilárně pórovitých materiálů . *Izolace.cz*. [Online] Mon Alba, 5. červen 2009. [Citace: 22. říjen 2020.] <https://www.isolace.cz/clanky/uvaha-k-interpretaci-faktoru-difuzniho-odporu-kapilarne-porovitych-materialu/>.
8. Šťastník, Stanislav a Steuer, Radek. *Fyzika stavebních látek - Modul M02 Příklady a výpočetní postupy*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2006.
9. Carter, Brady. Dynamické vs statické izotermy. [Online] Decagon Devices, Inc. [Citace: 22. říjen 2020.] <https://www.qia.cz/shop/pdf/2011dvsandddiisothermseminarcz.pdf>.
10. Pechoušek, Jiří. Měření plochy povrchu pevných látek a určování jejich porozity metodou sorpce plynu. *Univerzita Palackého v Olomouci*. [Online] 25. leden 2010. [Citace: 30. duben 2021.] <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/ostatni/BET.pdf>.
11. Kloiber, Michal. *Nedestruktivní zjišťování vlastností dřeva*. [Disertační práce] Brno : Grada, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2007.
12. Kloiber, Michal a Drdáký, Miloš. *Diagnostika dřevěných konstrukcí*. Praha : Informační centrum ČKAIT, s. r. o., 2015. ISBN 978-80-87438-64-0.

13. Dietsch, Philipp, a další. Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. srpen 2014, stránky 115-127.
14. *Měření vlhkosti v praxi soudního inženýra*. Anton, Ondřej, Blažková, Vendula a Hobst, Leonard. Brno : Ústav soudního inženýrství, 2005. ISSN 1211-443X.
15. Dvořáková, Martina. *Využití nedestruktivních metod určující kvalitu lepených dřevěných spojů*. [Bakalářská práce] Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2013.
16. Hora, Lukáš. *Porovnání metod měření materiálové vlhkosti ve stavebnictví*. [Bakalářská práce] Praha : České vysoké učení technické, 2018.
17. TESTO s.r.o. Mikrovlnné vlhkoměry MOIST – nedestruktivní a spolehlivé měření vlhkosti stavebních materiálů. *TZB-info*. [Online] Topinfo s.r.o., 5. únor 2015. [Citace: 9. říjen 2020.] <https://stavba.tzb-info.cz/vlhkost-a-kondenzace-v-konstrukcich/12289-mikrovlanne-vlhkomery-moist-nedestruktivni-a-spolehlive-mereni-vlhkosti-stavebnich-materialu>. ISSN 1801-4399.
18. Hobst, Leonard. *Zkušebnictví a technologie - M03 Radiační defektoskopie*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2004.
19. Moisture Guard. Moisture Guard. *Moisture Guard*. [Online] nastartujto.cz. [Citace: 20. říjen 2020.] <https://www.moistureguard.cz/produkty/>.
20. GMH 3851. *Greisinger*. [Online] GHM - Greisinger, s.r.o. [Citace: 20. říjen 2020.] <https://www.greisinger.cz/GHM-GREISINGER-GMH-3851-Odporovy-merici-pristroj-vlhkosti-materialu-a-teploty-s-loggerovymi-funkcemi>.
21. GMH 3851 - Odporový měřicí přístroj vlhkosti materiálů a teploty s loggerem. *Eximus*. [Online] [Citace: 22. říjen 2020.] <http://obchod.eximus.cz/vlhkomery/gmh-3851-odporovy-merici-pristroj-vlhkosti-materialu-a-teploty-s-loggerem-13407i>.
22. Wagner Meters. Orion® 910 Deep Depth Pinless Wood Moisture Meter Kit. *Wagner Meters*. [Online] Wagner Meters. [Citace: 12. říjen 2020.] <https://www.wagnermeters.com/shop/orion-910-deep/>.
23. VOLTcraft MF-50 měřič vlhkosti materiálů. *Conrad*. [Online] Conrad Electronics s.r.o. [Citace: 2. listopad 2020.] <https://www.conrad.cz/p/voltcraft-mf-50-meric-vlhkosti-materialu-mereni-vlhkosti-stavebnich-materialu-0-do-100-vol-mereni-vlhkosti-dreva-0-do-123491>.

24. Hf-sensor. MOIST 350 - Handheld for portable Moisture Measuring System for non-destructive moisture measurement and moisture mapping. *Hf-sensor*. [Online] Hf-sensor. [Citace: 10. říjen 2020.] <http://www.hf-sensor.de/englisch/moist350xe.html>.
25. TESTO s.r.o. Nedestruktivní a spolehlivé měření vlhkosti stavebních materiálů. *ESTAV.cz*. [Online] Topinfo.cz, 16. září 2014. [Citace: 28. říjen 2020.] <https://www.estav.cz/cz/559.nedestruktivni-a-spolehlive-mereni-vlhkosti-stavebnich-materialu>.
26. Mikrovlnný vlhkoměr T610. *TROTEC.cz*. [Online] TROTEC. [Citace: 1. listopad 2020.] https://www.trotec24.cz/merici-pristroje/rada-multimeasure/prenosne-merici-zarizeni-rady-profi/mikrovlnny-vlhkomer-t610.html?rc=d3f4613691&gclid=Cj0KCQjwufn8BRCwARIsAKzP697PEi4kqCY04zMt2iIcAIFqPXgGz9DNC7CnLDxNznXv3MjnzlCGxHsaAjk2EALw_wcB.
27. Burešová, Eliška. *Analýza metod měření vlhkosti ve stavebních materiálech*. [Diplomová práce] Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2021.
28. Hobst, Leonard a Vodová, Lucie. *Beton - technologie, konstrukce, sanace*. [Časopis] Praha : Beton TKS s.r.o., 2012. s. 66-69. ISSN 12133116.
29. ČSN 49 0103 - Drevo. *Zisťovanie vlhkosti pri fyzikálnych a mechanických skúškach*. 1979.
30. Numet spol. s.r.o. NMT-204. *Numet - radiometrická měřicí technika*. [Online] Numet , 2012. [Citace: 7. květen 2021.] <https://www.numet.cz/produkty/mereni-vlhkosti/?id=1>.