



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 MĚŘENÍ VLHKOSTI VE STAVEBNÍCH MATERIÁLECH

ANALYSIS OF METHODS USED FOR MEASUREMENT OF MOISTURE IN BUILDING
MATERIALS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Eliška Burešová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc., Ph.D.

BRNO 2021



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Eliška Burešová
Název	Analýza metod měření vlhkosti ve stavebních materiálech
Vedoucí práce	prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc., Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2020
Datum odevzdání	15. 1. 2021

V Brně dne 31. 3. 2020

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

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

PODKLADY A LITERATURA

Kuenzel, H., M. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components, IRB Verlag, 1995, ISBN 978-3816741039.

Balík, M. a kol. Odvlhčování staveb, Grada Publishing, 2008, ISBN 978-80-247-2693-9.

Cabrera, V. et al. A functional structure for state functions of moisture transfer in heritage building elements, Journal of Building Engineering 29 (2020).

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Problém vlhkosti ve stavbách je stále aktuálním tématem stavební praxe, protože zvýšená vlhkost negativně ovlivňuje nejen vlastnosti stavebních konstrukcí, může vést například k vytvoření biotického napadení škodlivého pro lidský organismus, ale zejména může zkrátit životnost celého stavebního díla. Pro správný návrh sanačního postupu, zejména u starších budov, je třeba mít proveden dlouhodobý monitoring vlhkosti, ideálně postihující všechna roční období. Cílem této práce bude nalezení optimální metody pro dlouhodobé monitorování vlhkosti v průřezu stavební konstrukce. Práce bude řešena ve spolupráci s firmou DEK a.s.

V diplomové práci proveďte:

1. Sestavte literární rešerši zaměřenou na problematiku sledování obsahu vlhkosti vyskytující se ve stavebních konstrukcích.
2. Analyzujte různé metody dlouhodobého sledování vlhkosti ve stavebních konstrukcích.
3. Na základě provedené analýzy vyberte vhodné metody měření a tyto experimentálně ověřte na různých skladbách konstrukcí (cihelné zdivo, pórobetonové zdivo, případně opatřené obkladem s kapilárně aktivními póry nebo s vysokou pórovitostí).
4. Pozornost zaměřte na validaci elektrických metod (kapacitní, odporová, mikrovlnná) porovnáním s gravimetrickými zkouškami.
5. Proveďte zhodnocení dosažených výsledků a rozbor problematiky s praktickými dopady do stavební praxe z hlediska jejich reálné využitelnosti.

Rozsah práce 60–80 stran.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ 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).

prof. RNDr. Ing. Stanislav Štastník, CSc., Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na problematiku měření obsahu vlhkosti ve stavebních materiálech s využitím nepřímých metod, které umožňují její dlouhodobé měření. Teoretická část diplomové práce uvádí přehled o formách výskytu vlhkosti v pórovitých stavebních materiálech a poskytuje přehled o principech měření vlhkostního obsahu. V experimentální části práce je cílem ověřit dostupné metody pro dlouhodobé monitorování vlhkosti ve stavebních materiálech zabudované do stavebních konstrukcí. Mezi ověřované metody měření vlhkosti patří odporová, kapacitní a mikrovlnná metoda a jejich porovnání s výsledky gravimetrických měření. V závěru práce je uvedeno vyhodnocení poznatků a doporučení pro další výzkum v této oblasti.

KLÍČOVÁ SLOVA

vlhkost stavebních materiálů, měření vlhkosti, dlouhodobé monitorování vlhkosti, odporová metoda, mikrovlnná metoda, kapacitní metoda, vlhkostní snímače

ABSTRACT

The diploma thesis is focused on the issue of measuring the moisture content in building materials using indirect methods that allow its long-term measurement. The theoretical part of the thesis provides an overview of the forms of moisture in porous building materials and provide an overview of the principles of measuring moisture content. In the experimental part of the thesis, the aim is to verify the available methods for long-term monitoring of moisture in building materials built into building structures. Proven methods of measuring humidity include resistance, capacitive and microwave methods and their comparison with the results of gravimetric measurements. At the end of the work is an evaluation of knowledge and recommendations for further research in this area.

KEYWORDS

humidity in porous building materials, methods of moisture measurement, long-term humidity monitoring, resistance method, microwave method, capacitive method, humidity sensors

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Eliška Burešová *Analýza metod měření vlhkosti ve stavebních materiálech*. Brno, 2021. 104 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc., Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem Analýza metod měření vlhkosti ve stavebních materiálech je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 14. 1. 2021

Bc. Eliška Burešová
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem Analýza metod měření vlhkosti ve stavebních materiálech zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 14. 1. 2021

Bc. Eliška Burešová
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

V první řadě patří poděkování všem členům mé rodiny, kteří mi byli nápomocni při přípravě experimentálních modelů a umožnili mi tak práci dokončit i přes nepříznivou epidemiologickou situaci.

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. RNDr. Ing. Stanislavu Štastníkovi, CSc., Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a vstřícný přístup. Zároveň chci poděkovat odborníkům Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií VUT Brno za pomoc při dílčích měřeních v experimentální části diplomové práce. Poděkování patří společnosti DEK a.s. a za poskytnuté materiály, vybavení a prostory pro vypracování mé diplomové práce, a jejím zaměstnancům za cenné rady a vstřícný přístup.

OBSAH

I	ÚVOD	11
II	TEORETICKÁ ČÁST	12
1	VELIČINY PRO POPIS VLHKOSTI STAVEBNÍCH LÁTEK	12
1.1	<i>VLHKOST.....</i>	12
1.1.1	Absolutní vlhkost.....	12
1.1.2	Relativní vlhkost	12
1.1.3	Měrná vlhkost	13
1.1.4	Rosný bod	13
1.2	<i>VLHKOST STAVEBNÍCH LÁTEK.....</i>	14
1.2.1	Praktický obsah vlhkosti.....	14
1.2.2	Vlhkost ve stavu úplného nasycení vodou	14
1.2.3	Vlhkost ve stavu volného nasycení vodou.....	14
1.2.4	Kritická vlhkost.....	14
1.2.5	Sorpční rovnovážná vlhkost.....	15
2	ZDROJE VLHKOSTI VE STAVEBNÍCH MATERIÁLECH.....	15
2.1	<i>VLIV VLHKOSTI NA STAVEBNÍ KONSTRUKCE.....</i>	16
3	ŠÍŘENÍ VLHKOSTI VE STAVEBNÍCH MATERIÁLECH	16
3.1	<i>VLIVY PŮSOBÍCÍ NA POHYB VLHKOSTI UVNITŘ MATERIÁLU.....</i>	16
3.1.1	Materiálová struktura.....	16
3.1.2	Skupenství vody	17
3.2	<i>ADSORPCE VODNÍ PÁRY.....</i>	17
3.3	<i>DIFUZE VODNÍ PÁRY.....</i>	18
3.4	<i>ŠÍŘENÍ KAPALNÉ FÁZE.....</i>	18
4	SALINITA ZDIVA	19
5	VLHKOSTNÍ AKUMULACE STAVIV.....	20
6	METODY MĚŘENÍ VLHKOSTI VE STAVEBNÍCH MATERIÁLECH	21
6.1	<i>PŘÍMÉ METODY MĚŘENÍ VLHKOSTI.....</i>	21
6.1.1	Gravimetrická metoda.....	21
6.1.2	Karbidová metoda	23
6.2	<i>NEPŘÍMÉ METODY MĚŘENÍ VLHKOSTI</i>	24
6.2.1	Fyzikální základ metod měření dielektrických veličin	24
6.2.2	Kalibrace	25
6.2.3	Odporová metoda	25
6.2.4	Kapacitní metoda	28
6.2.5	Mikrovlnná metoda.....	30
6.2.6	Termografická metoda.....	33
6.2.7	Radiometrická metoda.....	34
7	KLASIFIKACE ZDIVA DLE ČSN P 73 0610	35
7.1	<i>KLASIFIKACE VLHKOSTI ZDIVA.....</i>	35

8	DLOUHODOBÉ MONITOROVÁNÍ VLHKOSTI.....	35
8.1	<i>MĚŘIDLO MOISTURE GUIDE.....</i>	36
8.2	<i>BEZDRÁTOVÝ PASIVNÍ SENZOR.....</i>	36
8.3	<i>SLEDOVÁNÍ VLHKOSTI VE STĚNĚ POMOCÍ DŘEVĚNÝCH HMOŽDINEK.....</i>	37
III	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	39
9	CÍL PRÁCE.....	39
10	METODIKA PRÁCE.....	39
11	VÝBĚR METOD MĚŘENÍ VLHKOSTI VE STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍCH.....	41
12	MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ PRO STANOVENÍ OBSAHU VLHKOSTI V KONSTRUKCÍCH.....	42
12.1	<i>ODPOROVÁ METODA MĚŘENÍ VLHKOSTI VE STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍCH.....</i>	42
12.1.1	Vybrané měřicí zařízení pro odporovou metodu měření vlhkosti.....	42
12.1.2	Návrh snímacího zařízení pro odporovou metodu měření vlhkosti.....	43
12.1.3	Výroba snímacího zařízení pro odporovou metodu měření vlhkosti.....	45
12.1.4	Kalibrace snímacího zařízení pro odporovou metodu měření vlhkosti.....	45
12.2	<i>KAPACITNÍ METODA MĚŘENÍ VLHKOSTI VE STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍCH.....</i>	47
12.2.1	Vybrané měřicí zařízení pro kapacitní metodu měření vlhkosti.....	47
12.2.2	Návrh snímacího zařízení pro kapacitní metodu měření vlhkosti.....	48
12.2.3	Výroba snímacího zařízení pro kapacitní metodu měření vlhkosti.....	52
12.2.4	Kalibrace snímacího zařízení pro kapacitní metodu měření vlhkosti.....	53
12.3	<i>MIKROVLNNÁ METODA MĚŘENÍ VLHKOSTI VE STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍCH.....</i>	58
12.3.1	Vybrané měřicí zařízení pro mikrovlnnou metodu měření vlhkosti.....	58
12.3.2	Návrh snímacího zařízení pro mikrovlnnou metodu měření vlhkosti.....	58
12.3.3	Kalibrace snímacího zařízení pro mikrovlnnou metodu měření vlhkosti.....	59
13	NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍCH modelů pro ověření metod měření.....	61
13.1	<i>VELIKOST MODELU.....</i>	61
13.2	<i>UTĚSNĚNÍ MODELU PRO ZAJIŠTĚNÍ VYSYCHÁNÍ JEDNÍM SMĚREM.....</i>	62
13.3	<i>PODKLADNÍ ZDIVO.....</i>	63
13.3.1	Návrh podkladního zdiva.....	63
13.3.2	Výroba podkladního zdiva.....	64
13.4	<i>SANAČNÍ POVRCHOVÁ ÚPRAVA.....</i>	65
13.5	<i>NÁVRH ROZMÍSTĚNÍ SNÍMAČŮ.....</i>	66
14	VÝROBA EXPERIMENTÁLNÍCH MODELŮ.....	67
14.1	<i>ZATMELENÍ MEZERY MEZI PODKLADNÍM ZDIVEM A NÁDOBOU.....</i>	67
14.2	<i>INSTALACE ODPOROVÝCH SNÍMAČŮ.....</i>	68
14.3	<i>ZVLHČENÍ PODKLADU.....</i>	69
14.4	<i>INSTALACE KAPACITNÍHO SNÍMAČE.....</i>	70
14.5	<i>APLIKACE SANAČNÍCH POVRCHOVÝCH ÚPRAV.....</i>	71
14.5.1	Aplikace polystyrenbetonové desky.....	71
14.5.2	Aplikace polyuretanové desky.....	72
14.5.3	Aplikace kalciumsilikátové desky.....	73

14.5.4	Aplikace sanační omítky	74
15	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ	75
15.1	<i>NAMĚŘENÉ HODNOTY.....</i>	76
15.1.1	Naměřené hodnoty gravimetrickou metodou	76
15.1.2	Naměřené hodnoty odporovou metodou měření vlhkosti	78
15.1.3	Naměřené hodnoty kapacitní metodou měření vlhkosti	79
15.1.4	Naměřené hodnoty mikrovlnnou metodou měření vlhkosti.....	80
16	VYHODNOCENÍ	82
16.1	<i>VYHODNOCENÍ HODNOT NAMĚŘENÝCH GRAVIMETRICKOU METODOU.....</i>	82
16.2	<i>VYHODNOCENÍ HODNOT NAMĚŘENÝCH ODPOROVOU METODOU.....</i>	84
16.3	<i>VYHODNOCENÍ HODNOT NAMĚŘENÝCH KAPACITNÍ METODOU.....</i>	86
16.4	<i>VYHODNOCENÍ HODNOT NAMĚŘENÝCH MIKROVLNNOU METODOU.....</i>	87
16.5	<i>POSOUZENÍ METOD MĚŘENÍ PRO POUŽITÍ V RŮZNÝCH KONSTRUKCÍCH.....</i>	90
16.5.1	Posouzení metod pro měření obsahu vlhkosti v cihelném zdivu.....	90
16.5.2	Posouzení metod pro měření obsahu vlhkosti v cihelném zdivu s obkladem	92
16.5.3	Posouzení metod pro měření obsahu vlhkosti v cihelném zdivu se sanační omítkou 96	
16.6	<i>NÁVRH PRO DALŠÍ VÝZKUM.....</i>	97
IV	ZÁVĚR.....	98
V	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	101

I ÚVOD

Stavební materiály se v suchém stavu vyskytují zcela výjimečně. Vlhkost ovlivňuje nejen fyzikálně mechanické, elektrické a jiné vlastnosti materiálu, ale má dominantní vliv na jejich životnost a tepelně-technické vlastnosti. Vlhkost může způsobit řadu problémů, které mohou mít negativní vliv nejen na trvanlivost konstrukce, ale i na zdraví člověka.

Ze všech těchto důvodů je účelné obsah vlhkosti ve stavebních konstrukcích sledovat a pokud je to možné, provádět i sanační opatření, která vedou ke snížení jejího obsahu. Z dostupných zdrojů je možné vybrat různé typy vlhkoměrů, které jsou pro zkoumaný materiál vhodné, co však s jistotou zjistit nelze, je přesnost měření námi vybraného vlhkoměru, i když výrobci udávají tolerance a možné ovlivnění výsledku měření například přítomností solí. Pokud je zřejmé, že je přístroj nepřesný, je důležité znát přesně jeho odchylky, aby bylo možné naměřené hodnoty objektivně vyhodnocovat.

U starších objektů je monitorování vlhkosti z dlouhodobého hlediska velmi důležité pro návrh optimálního sanačního opatření.

Tato diplomová práce je v experimentální části zaměřena na problematiku měření vlhkosti a její validaci v porovnání s gravimetrickou metodou tak, aby bylo možné po provedení experimentu určit, která metoda je nejvhodnější pro měření vlhkosti v podobné konstrukci. Metody měření byly ověřeny na zdivu s různými sanačními úpravami a také na zdivu bez jakékoliv dodatečné povrchové úpravy přispívající k vysoušení zdiva.

II TEORETICKÁ ČÁST

1 VELIČINY PRO POPIS VLHKOSTI STAVEBNÍCH LÁTEK

1.1 VLHKOST

Vlhkost označuje přítomnost vody v okolním vzduchu nebo plynu. O vodní páře lze uvažovat jako o plynné formě vody. Tvoří asi jedno procento ve vzduchu kolem nás. [1]

1.1.1 Absolutní vlhkost

Absolutní vlhkost je množství vodní páry přítomné v jednotkovém objemu vlhkého vzduchu při dané teplotě a barometrickém tlaku. V případě, že se vzduch plně nasytí vodní parou a nedokáže další vlhkost přijmout, tedy počet molekul odpařených se rovná množství molekul zkondenzovaných, jedná se o mokřý vzduch. Udává se v gramech vody na jeden kubický metr vzduchu. [1]

Platí vztah:
$$\phi = \frac{m}{V}, \quad (1)$$

kde m hmotnost vodní páry,
 V objem vzduchu.

1.1.2 Relativní vlhkost

Relativní vlhkost udává poměr mezi množstvím vodních par ve vzduchu a množstvím vodních par, které by měl vzduch plně nasycený při totožném tlaku a teplotě. Udává tedy procentuální zastoupení vodní páry v suchém vzduchu za přesně daných klimatických podmínek. V případě vynásobení výsledné bezrozměrné veličiny stem se udává v procentech jako relativní vlhkost. [1]

Platí vztah:
$$\varphi = 100 \frac{p_v}{p_v^s}, \quad (2)$$

kde φ relativní vlhkost vzduchu [%],
 p_v parciální tlak vodní páry ve vzduchu [Pa],
 p_v'' nasycený tlak vodní páry (při stejné teplotě) [Pa].

1.1.3 Měrná vlhkost

Měrná vlhkost udává hmotnost vodní páry na jeden kilogram vlhkého vzduchu. Může být vyjádřena jako hmotnostní zlomek, v gramech vodní páry na kilogram vzduchu, případně v kilogramech vodní páry na kilogram vlhkého vzduchu. [1]

Platí vztah:
$$\chi = \frac{m_p}{m_v}, \quad (3)$$

kde m_p hmotnost vodní páry,
 m_v hmotnost suchého vzduchu.

1.1.4 Rosný bod

Rosný bod, resp. teplota rosného bodu je teplota, při níž je vzduch plně nasycen vodními parami. Při dalším ochlazení začínají vodní páry kondenzovat. Jednotkou je °C. [1]

Platí vztah:
$$\log EW = 0,66077 + 7,5 \left(\frac{t}{237,3+t} + \log(RH) - 2 \right), \quad (4)$$

$$DP = \frac{237,3 \cdot (0,66077 - \log(EW))}{\log(EW) - 8,16077}, \quad (5)$$

kde EW hodnota substituční konstanty,
 t teplota vzduchu,
 RH relativní vlhkost,
 DP teplota rosného bodu. [2]

1.2 VLHKOST STAVEBNÍCH LÁTEK

1.2.1 Praktický obsah vlhkosti

Praktický obsah vlhkosti u_{pr} je obsah vlhkosti, který s pravděpodobností $p = 0,9$, v praxi u zabudovaných staviv nepřekročí danou hodnotu. Měření probíhá předepsaným postupem a smí být provedeno až po ustálení vlhkosti v konstrukci.

Praktický obsah vlhkosti se využívá zejména u návrhu počátečních hodnot tepelné izolačnosti a dále například u posouzení obytných objektů z hlediska hygienického. [3]

1.2.2 Vlhkost ve stavu úplného nasycení vodou

Vlhkost ve stavu úplného nasycení vodou u_{max} odpovídá maximálnímu nasycení vodou bobtnavých nepórovitých látek a úplnému vyplnění pórů (vodě přístupných) u látek pórovitých. [3]

1.2.3 Vlhkost ve stavu volného nasycení vodou

Vlhkost ve stavu volného nasycení vodou u_f je ustálená po určité době působení vody na daný materiál. Smáčitelné, hrubě pórovité látky provlhají úplně a rychle ($u_f = u_{max}$), naopak u jemně pórovitých látek se hodnota vlhkosti ustálí na hodnotě u_f a postupem času (v průběhu několika let) se obsah vlhkosti zvyšuje pozvolna na hodnotu u_{max} . [3]

1.2.4 Kritická vlhkost

Kritická vlhkost u_{kr} má význam pouze u porézních látek, které navlhají kapilárně a vytváří dolní hranici vlhkosti z hlediska možného kapilárního transportu kapalné fáze. [3]

1.2.5 Sorpční rovnovážná vlhkost

Sorpční rovnovážná vlhkost udává závislost ustálené vlhkosti látky na relativní vlhkosti okolního vzduchu pro určitou teplotu. Vlhkost látky odpovídá relativní vlhkosti vzduchu. V případě vlhkosti látky u_{100} ukazuje stav vyplnění vodou všech mikropórů, vzduch má tedy relativní vlhkosti 100 % a difúze vodní páry je možná jen v důsledku teplotního spádu. [3]

2 ZDROJE VLHKOSTI VE STAVEBNÍCH MATERIÁLECH

Velká část stavebních materiálů je porézních (kromě skla, kovů a některých plastických hmot) a jejich póry mohou být zaplněny různými látkami, nejčastěji vzduchem. Se vzduchem se do pórů materiálu mohou dostat i další látky, jako je vodní pára, která může v pórech kondenzovat. Pórovité stavební materiály se v suchém stavu prakticky nevyskytují. Dalším případem vnikání vlhkosti do stavebních materiálů je styk přímo s vodou v kapalně fázi, kde bude voda do matrice vnikat pomocí kapilárních sil. Voda se do stavebních materiálů tedy může dostat několika cestami a formami. Podle zdroje vlhkosti můžeme materiálové vlhkosti rozdělit následovně:

- vlhkost výrobní (technologická, počáteční),
- vlhkost zemní,
- sorpční vlhkost,
- zkondenzovaná voda,
- provozní vlhkost.

Mezi nejčastější zdroje zavlhnutí zdiva patří:

- voda srážková (hnaná větrem nebo odstříkující),
- voda vzlínající,
- voda tlaková,
- difundující vodní pára a vodní pára zkondenzovaná. [4]

2.1 VLIV VLHKOSTI NA STAVEBNÍ KONSTRUKCE

V případě, že obsah vlhkosti v konstrukci překročí povolenou hodnotu, dochází nejprve k poklesu tepelného odporu a ke zvýšení tepelných ztrát objektu. Pokud dojde k dalšímu zvyšování vlhkosti, bude následovat výskyt hub a plísní na povrchu konstrukce a s tím spojená povrchová destrukce na konstrukci, z hlediska mrazuvzdornosti dojde k jejímu významnému poklesu. [3]

3 ŠÍŘENÍ VLHKOSTI VE STAVEBNÍCH MATERIÁLECH

Vlhkost se šíří z míst s vyšší relativní vlhkostí do míst s nižší relativní vlhkostí, což znamená, že se snaží dosáhnout rovnovážného stavu.

3.1 VLIVY PŮSOBÍCÍ NA POHYB VLHKOSTI UVNITŘ MATERIÁLU

3.1.1 Materiálová struktura

Materiálová struktura stavebních látek vytváří transportní prostor pro pohyb molekul vody. Rozhodujícími kritérii transportního prostoru a tím i kritérii vlhkostního transportu jsou druh, tvar a velikost vnitřního prostoru.

Většina anorganických materiálů obsahuje póry rozmanitých tvarů (kulový, válcový, kuželový nebo tvar trhlin) i druhů (oboustranně otevřené, jednostranně otevřené póry nebo vnitřní dutiny).

Podle Lykova se póry s poloměrem $r < 10^{-7}$ m označují jako mikropóry a póry s poloměrem $r > 10^{-7}$ m jako makropóry a transportní mechanismus kapalně vody v obou případech probíhá odlišně. V makropórech nedochází k vyplnění celého objemu póru kapalnou vodou v důsledku kapilární kondenzace, ale pouze v důsledku kontaktu s kapalnou vodou. [3]

3.1.2 Skupenství vody

Voda se ve stavebních materiálech vyskytuje v plynné a kapalně fázi a ve formě ledu. Pro definici možných stavů je hlavním kritériem velikost pórů. Pokud se v pórové struktuře nachází led, dochází k blokování šíření kapalně vody i vodní páry.

Střední volná dráha molekuly vodní páry je závislá na teplotě a tlaku, její velikost je odhadována na vzdálenost $2,78 \cdot 10^{-10}$ m. V porézních materiálech dochází častěji k nárazu molekul vody na stěnu póru než ke vzájemným srážkám, a to z důvodu menších rozměrů pórů, než je velikost střední volné dráhy vodní páry. [3,5]

3.2 ADSORPCE VODNÍ PÁRY

V závislosti na sorpčních vlastnostech materiálu v něm dochází ke změně obsahu vlhkosti v důsledku změn obsahu vodní páry v okolí konstrukce. Sorpce vlhkosti je složena ze tří jevů (adsorpce, absorpce, chemisorpce). V případě, že dochází ke vzrůstu tlaku vodní páry v okolí konstrukce, dochází k sorpci. Pokud tlak vodní páry klesá, dochází k opačnému jevu-desorpci. Pojmeme rovnovážná sorpční vlhkost se rozumí, že materiál nevykazuje v časové závislosti žádné úbytky ani přírůstky vlhkosti v závislosti.

Mechanismus adsorpce je způsoben Van der Waalsovými silami, jimiž se navzájem přitahují molekuly vodní páry a tuhých látek a dochází ke vzniku molekulárních vrstev na stěnách pórů, které jsou obsaženy v materiálu.

V jemných pórech a nízkých prostorách dochází ke shromažďování vody, jejíž hladina je v jednotlivých pórech zakřivená. K tomuto zakřivenému povrchu vodní hladiny okolní vodní páry difundují a také kondenzují.

Absorpce je děj, při níž se vstřebává kapalná nebo plynná fáze difuzí a vedením vlhkosti do tuhé fáze.

Chemisorpce vychází z chemických vazeb mezi vodou a tuhým materiálem.

Sorpční izoterma vlhkost přijímající látky udává korelační vztah mezi relativní vlhkostí okolního vzduchu a vlhkostí látky (při dané teplotě). [3,5]

3.3 DIFUZE VODNÍ PÁRY

Mezi dvěma prostředími s různými parciálními tlaky vodní páry nebo plynu, dochází k difuzi z prostředí s vyšším parciálním tlakem do prostředí s parciálním tlakem nižším. Obecně lze difuzi definovat jako molekulární proces vyrovnávání koncentračního spádu plynů nebo kapalin, který je založen na vlastní pohyblivosti částic nebo molekul v důsledku obsahu vnitřní energie.

Vodní pára nebo plyn mohou difundovat pouze v případě, že materiál, kterým prochází, měl mezimolekulární prostory větší, než je střední volná dráha molekul plynu. V materiálech obsahující mikrokapiláry dochází ke kapilární kondenzaci, v makrokapilárách ke kapilární kondenzaci nedochází a vodní pára jimi pouze prochází. [3,5]

3.4 ŠÍŘENÍ KAPALNÉ FÁZE

Šíření kapalné fáze probíhá v prostorech pórů. Příčinou pohybu může být tlakový spád, který způsobuje gravitace, dále kapilární síly nebo elektrické napětí. Viskozita kapaliny je charakterizující vlastností pro tento typ pohybu.

Kapilární jevy lze definovat jako jevy založené na povrchovém napětí kapalin a smáčitelnosti pevných látek. Povrchové napětí je podmíněno kohezí molekul kapaliny a smáčitelnost adhezí kapaliny a pevné látky.

Na rozhraní mezi plynem a kapalinou jsou povrchové molekuly vystaveny orientovanému silovému působení. Smáčecí úhel mezi sebou vytváří povrchové plochy kapaliny a pevné látky (dokonale smáčivé látky dosahují hodnoty smáčecího úhlu 0° , dobře smáčitelné v rozmezí $0-90^\circ$, špatně

smáčitelné 90-180 ° a u dokonale nesmáčivých látek je smáčecí úhel roven 180 °). Kapilární šíření lze vyjádřit tak, že v úzké kapiláře se na základě povrchového napětí vytváří sloupec kapaliny s povrchem (dle smáčecího úhlu) konvexním (> 90 °) nebo konkávním (< 90 °). Výška vzlinutí kapaliny v kapiláře je nezávislá na sklonu kapiláry a proměnném průřezu kapiláry pod meniskem. Maximální výška vzlinutí je vyjádřena jako rovnováha mezi tíhou kapalinového sloupce a elevačního úhlu při vzlínání následovně: [3, 6]

$$h_{max} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r \cdot \rho_w \cdot g}, \quad (6)$$

kde h_{max} maximální výška vzlinutí,

σ povrchové napětí,

θ smáčecí úhel,

r poloměr kapiláry,

ρ_w objemová hmotnost vody,

g gravitační zrychlení.

4 SALINITA ZDIVA

Anorganické vodorozpustné soli jsou jednou z hlavních příčin poškozování vlhkého zdiva. Transport solí je úzce spojen s transportem vlhkosti v pórovitých materiálech zdiva. Vodorozpustné soli jsou většinou hygroskopické, mají tedy schopnost vazby vzdušné vlhkosti a povrch materiálů se poté projevuje jako vlhký. Vlhkostí jsou soli rozpouštěny a vystupují na povrch materiálu, kde vlivem odpaření vody krystalizují a způsobují poškození povrchových úprav a zdiva samotného. Soli v kapilárách krystalizují a sedimentují na stěny, čímž dochází k rýhování stěn kapilár a následnému zmenšení jejich průměru.

K transportu solí do zdiva dochází s pronikající vlhkostí z půdy nebo mohou být již obsaženy ve stavebních materiálech. Soli mohou dále vznikat chemickou korozí nebo do zdiva pronikat z biologických zdrojů.

Ve stavebních konstrukcích se nejčastěji vyskytují sírany (ze znečištění atmosféry, často na povrchu fasád, dále z chemických hnojiv), chloridy (z posypové soli, dále z chlorového vápna při dezinfekci) a dusičnany (z močoviny, z rozkladu organických hmot v blízkosti stájí, hřbitovů apod.), mohou se zde v menší míře vyskytovat uhličitany a dusitany.

Sanace zasoleného zdiva většinou spočívá v zabránění přístupu nosného média (vody) do konstrukce a snížení koncentrace solí na takovou úroveň, aby nedocházelo k dalšímu poškozování zdiva. Úplné odsolení zdiva není však z hlediska stavební praxe proveditelné. [17]

5 VLHKOSTNÍ AKUMULACE STAVIV

Ve stavebních materiálech jsou nejnižší obsahy vlhkosti jednoznačně určeny relativní vlhkostí okolního vzduchu. Při této vlhkosti jsou molekuly vody přítomny na vnitřním povrchu pórů a tvoří tak povrchový film. V důsledku kapilární kondenzace dochází v mikropórech k zaplnění vodou. Toto zaplnění je závislé na poloměru pórů a okolní relativní vlhkosti, protože tyto vlastnosti určují, zda vodní pára vytvoří kapalnou vodu. Pokud se bude relativní vlhkost dále zvyšovat, dojde k zaplnění nejprve nejjemnějších pórů a poté k zaplnění pórů větších. Relativní vlhkost je tedy řídicí veličinou při nízkých obsazích vlhkosti v látkách.

Podle K. Kießla se rozlišují tři oblasti velikosti pórů:

1. Hygroskopická oblast velikosti pórů do $r = 10$ nm. Jedná se o nejjemnější póry, kde je voda vázána sorpčně. Vlhkostní potenciál v této oblasti je identický s relativní vlhkostí.

2. Přechodová oblast s velikostí pórů od 10 do 100 nm. Zde může docházet mimo sorpční vázání vody i ke kapilární kondenzaci. Relativní vlhkost odpovídá hodnotám mezi 90-100 %.
3. Nadhygroskopická oblast s póry o průměru větším než 100 nm. Zde nedochází k zaplnění vodou vlivem kapilárních sil, protože síly jsou zanedbatelně malé, aby se v nich působením gravitační síly mohla voda udržet. Vlhkostní potenciál se v této oblasti určuje podle poloměru pórů. [3]

6 METODY MĚŘENÍ VLHKOSTI VE STAVEBNÍCH MATERIÁLECH

Vlhkost ve stavebních konstrukcích lze měřit různými metodami. Často jsou nepřímé metody měření doplněny o přímé měření vlhkosti v laboratoři. Výběr měřicí metody je velmi specifický, v některých případech je destruktivní měření vyloučeno úplně. [4]

6.1 PŘÍMÉ METODY MĚŘENÍ VLHKOSTI

Metody přímého měření vlhkosti jsou destruktivní metody založeny na určení skutečného množství vody v materiálu odstraněním vody. Mimo metody popsané níže se sem řadí např. metoda azeotropní destilace, která se využívá pro určení vlhkosti v asfaltových emulzích a metoda extrakce vody, která se používá u materiálů, které nereagují s organickými rozpouštědly.

6.1.1 Gravimetrická metoda

Gravimetrická metoda je destruktivní metodou zjištění obsahu vlhkosti, která je definovaná v normě ČSN ISO 12570 Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků – Stanovení vlhkosti sušením při zvýšené teplotě. Princip metody je založený na ručním odebráním vzorků, které se zváží ve vlhkém

stavu, následně se vysuší v sušárně do ustálení hmotnosti a poté se vypočítá hmotnostní vlhkost vzorku podle vzorce:

$$u = \frac{m - m_0}{m_0}, \quad (7)$$

kde: u hmotnostní vlhkost,

m hmotnost vzorku před vysušením,

m_0 hmotnost vzorku po vysušení.

Vzorky se neodebírají metodou, která by mohla ovlivnit vlhkostní obsah. Při odřezávání nebo vrtání může dojít k odpaření vlhkosti a vlhkost vzorku by nebyla přesná.

Norma definuje postup pro vzorky vážené bezprostředně po vyříznutí ze vzorku a postup pro vzorky parotěsně uzavřené po vyříznutí ze vzorku. V případě, že se vzorek odebírá mimo laboratoř, je nutné zajistit jeho vzduchotěsné uzavření, které zajistí přesné zjištění vlhkosti a následné sušení v sušárně bude probíhat i s tímto obalem. Vzorky se váží s přesností na desetiny gramu.

Samotné sušení vzorků musí být provedeno při teplotě, která je definována v normě. V případě nedodržení předepsané maximální teploty může dojít ke znehodnocení vzorků. Teploty sušení jsou uvedeny v následující tabulce:

Tabulka 1: Přehled předepsaných teplot sušení dle ČSN ISO 12570

Materiál	Teplota sušení [°C]
Materiály, které nemění svou strukturu při teplotě 105 °C (např. některé minerální materiály, dřevo)	105 ± 2
Materiály, u kterých může dojít ke změně struktury mezi 70 a 105 °C (např. některé lehčené plasty)	65 ± 2
Materiály, u kterých může vyšší teplota vést k uvolnění krystalizační vody nebo ovlivnit nadouvadla (např. sádra, některé pěny)	40 ± 2

Zkouška se vyhodnocuje v případě, že je hmotnost vzorku konstantní a to tak, že se ve třech po sobě jdoucích měřeních, které se provádí po 24 hodinách, hmotnost neliší o více než 0,1 % celkové hmotnosti.

Výhodou gravimetrické metody je vysoká přesnost a její specifikovaný normový postup.

Nevýhodou je destruktivní provedení, po odebrání vzorku z konstrukce se musí vyspravit tak, aby do ní nevnikala další vlhkost. V případě nevyhovění zkoušky není možné ji na stejném vzorku opakovat a musí se odebrat další vzorky z konstrukce. Jedná se o časově náročnou zkoušku z důvodu ověřování konstantní hmotnosti po 24 hodinách. [7, 8]

6.1.2 Karbidová metoda

Karbidová metoda je destruktivní metodou zjištění obsahu vlhkosti, která je definována v normě ČSN 74 4505 Podlahy – Společná ustanovení. Jak je z názvu normy patrné, jedná se o metodu využívanou pro určení vlhkosti podlahové vrstvy.

Princip metody spočívá v ručním odebrání vzorku (vysekáním), následného vložení do nádoby s kapslemi karbidu vápenatého a s ocelovými kuličkami. Po uzavření se nádoba protřepe, čímž dojde k rozbití kapslí s karbidem vápenatým, který za přítomnosti vlhkosti vytváří chemickou reakcí acetylén. Acetylén zvýší v nádobě tlak, který se odečte pomocí tlakoměru. Změna tlaku v nádobě a hmotnost vzorku určuje vlhkost.

Rovnice rozkladu:



Výhodou této metody je srovnatelná přesnost s gravimetrickou metodou a rychlost provedení a získání výsledků zkoušky.

Nevýhodou této metody je destruktivní provedení bez možnosti opakování na jednom vzorku. [8, 9]

6.2 NEPŘÍMÉ METODY MĚŘENÍ VLHKOSTI

Metody nepřímého měření vlhkosti jsou založeny na měření veličin, které mají přímou vazbu s obsahem vody ve vzorku, např. vodivost, elektrická vodivost, permitivita, pohlcování vysokofrekvenčního záření apod. Vlhkost v materiálu mění jeho fyzikální parametry, čehož je u nepřímých metod využito.

6.2.1 Fyzikální základ metod měření dielektrických veličin

Měření vlhkosti je založeno na dielektrických vlastnostech vody. Voda je polární molekula, tj. centra náboje se v molekule lokálně neshodují, což je důvodem, proč se molekula vody vyrovná v preferovaném směru v externě aplikovaném poli; neboť může být polarizována. Pokud je aplikováno střídavé elektromagnetické pole, molekuly se začnou otáčet s frekvencí pole (polarizační orientace). Tento efekt je makroskopicky charakterizován dielektrickou konstantou fyzikální veličiny (nadále zkratka DK, symbol ε).

$$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0, \quad (9)$$

Kde: ε dielektrická konstanta,

ε_r relativní permitivita,

ε_0 permitivita vakua.

Dielektrický jev je u molekul vody tak výrazný, že relativní hodnota dielektrické konstanty vody je asi 80. Relativní DK většiny pevných látek, včetně stavebních materiálů, je mnohem menší, pohybuje se v rozmezí $\varepsilon_r \in [2 \dots 10]$ a nejčastěji mezi 3 a 6, takže se měří rozdíl mezi DK vody a DK

stavebních materiálů. Vzhledem k velkému rozdílu mezi těmito hodnotami lze dobře detekovat i malé množství vody.

V závislosti na frekvenci aplikovaného elektrického pole dělíme dielektrické metody na kapacitní a mikrovlnné. [22]

6.2.2 Kalibrace

Kalibrace je činnost, která nejprve za specifikovaných podmínek stanoví vztah mezi hodnotami veličiny s nejistotami měření poskytnutými etalony a odpovídajícími indikacemi s přidruženými nejistotami měření, a následně použije tyto informace ke stanovení vztahu pro získání výsledku měření z indikace. Kalibrací jsou určovány metrologické charakteristiky přístroje. Obvykle se toho dosahuje přímým porovnáním s etalony nebo s certifikovanými referenčními materiály. [23]

V kontextu uvedené definice představuje kalibrace měřidla soubor činností, které za definovaných podmínek fyzikálních měření umožňují sestavit vztah mezi odečítanými hodnotami na měřidle (včetně případné nejistoty měření) a odpovídajícím údajem měřené veličiny. To umožňuje využít tyto informace k sestavení vztahu, pomocí něhož může být výsledek měření odečten přímo vyčíslen na zobrazovači. V tomto významu bylo v experimentální části využíváno pojmu kalibrace a kalibrační vztah.

6.2.3 Odporová metoda

Odporová metoda je založena na měření elektrického odporu, který se snižuje se vzrůstající vlhkostí. Přístroje pro měření vlhkosti odporovou metodou jsou nastaveny na přepočítání dle křivek pro dané materiály, na které je výrobce přednastavil. Suché materiály dosahují hodnot elektrického odporu v řádu stovek M Ω , vlhké materiály v řádu stovek k Ω . Přesnost měření

ovlivňuje mnoho faktorů. Nejčastěji odchylky naměřených hodnot způsobuje obsah solí, které zvyšují vodivost materiálu. Nepřesné měření může způsobit nastavení charakteristik pro materiál výrobcem, které nelze měnit, a tudíž není možné přesně definovat měřený materiál. Některé odporové vlhkoměry jsou nastaveny pouze pro měření vlhkosti dřeva, jiné mohou být nastaveny pro dřevo, omítku, beton apod. Naměřené hodnoty u zdánlivě stejných materiálů se mohou lišit v řádech jednotek až desítek procent, proto nelze výsledky považovat za objektivní. Měření je také závislé na teplotě.

Odporové vlhkoměry se dělí na dvě skupiny, a to s tuhým nebo kapalným elektrolytem.

Odporový vlhkoměr s kapalným elektrolytem je vyroben jako izolant válcového tvaru, který je obalen tkaninou napuštěnou vodným roztokem chloridu lithného. Elektrody z platiny jsou spirálovitého tvaru a jsou umístěny rovnoběžně na válci. Během měření jsou elektrody napojeny na střídavý proud. Na teplotě elektrolytu je závislý rovnovážný stav obsahu vody v elektrolytu, a tato teplota je dále závislá na parciálním tlaku vodní páry v okolním vzduchu.

Odporový vlhkoměr s tuhým elektrolytem Al_2O_3 sestává ze dvou elektrod z hliníku, z nichž jedna je opatřena tenkou vrstvou oxidu hlinitého a druhá tenkou vrstvou zlata, které je propustné pro vodní páru. Elektrický odpor se mění v závislosti na absorpci vody do elektrolytu Al_2O_3 . [8, 9, 10]

1.1.1.1 Fyzikální základ měření odporovou metodou

Principem odporových snímačů vlhkosti je skutečnost, že vodivost nekovových vodičů závisí na obsahu vlhkosti. Vlhký materiál však nelze uvažovat jako matici naplněnou určitým množstvím vody, protože na elektrické vlastnosti má vliv vazba vody v matici a v ní případné

rozpuštěné anorganické soli. Jak již bylo zmíněno výše, vliv na změnu elektrických vlastností má také teplota.

$$R_E = \frac{a}{w_h^b} \cdot (1 + \alpha \cdot dT), \quad (10)$$

kde: a , b jsou konstanty závislé na chemickém složení pórové vody, na vlastnostech tuhé fáze,
 α koeficient teplotní změny elektrického odporu.

1.1.1.2 Odporové vlhkoměry s hrotovými sondami

K měření vlhkosti se využívají dva kovové hroty, které je nutné zapíchnout do materiálu, z čehož vyplývá, že není možné u stavebních materiálů, jako například je beton, zapíchnout hroty o více než několik milimetrů. Naopak u dřeva je většinou možné hroty zapíchnout do hloubky větší, obvykle až 20 mm, čímž je zvětšena kontaktní plocha a měření v hlubších místech než v povrchové vrstvě. [8, 9, 10]



Obrázek 1: Fotografie zařízení pro měření vlhkosti odporovou metodou s hrotovými elektrodami [11]

1.1.1.3 Odporové vlhkoměry s kartáčkovými sondami

Do měřeného materiálu je nutné předvrtat otvory, do kterých se kartáčky zasunou. Průměr otvorů závisí na velikosti kartáčku, nejčastěji je 6 mm. Hloubka otvoru je opět závislá na typu kartáčku, někteří výrobci nabízejí sondy s měřením v hloubce 100-300 mm.

Při vrtání otvorů dojde k uvolnění tepla a tím ke snížení obsahu vlhkosti v okolí otvoru. Je tedy vhodné používat velmi ostré vrtáky a se samotným měřením vyčkat, než se vlhkost přesune zpět k otvorům. Někteří výrobci uvádí třicetiminutovou pauzu před samotným měřením. [8, 9, 10]



Obrázek 2: Fotografie kartáčkových sond pro odporový vlhkoměr [12]

6.2.4 Kapacitní metoda

Kapacitní metoda je založena na měření permitivity, která je značně rozdílná pro vodu ($\epsilon = 81,6$) a pro většinu stavebních materiálů $\epsilon \in [2 .. 10]$. Permitivita vzduchu je rovna jedné. Pokud vytváří měřené prostředí dielektrikum kondenzátoru, pak se bude se změnou vlhkosti tohoto prostředí měnit i kapacita kondenzátoru. Oproti odporové metodě měření vlhkosti má kapacitní metoda výhodu v tom, že měření je nedestruktivní a nedochází k poškození materiálu ani jeho povrchu.

V kapalném nebo plynném skupenství má voda velkou schopnost molekul orientovat se v elektrickém poli, u vázané vody je tato schopnost výrazně nižší. Díky tomu je možné rozlišovat, zda se jedná o vodu volnou nebo vázanou. Chyby měření se často vyskytují při nízkém obsahu vlhkosti.

Senzory se skládají z dielektrika, které je tvořeno materiálem absorbující vlhkost. Z každé strany dielektrika je elektroda, z nichž jedna je perforovaná a umožňuje dielektriku kontakt s okolním vzduchem.

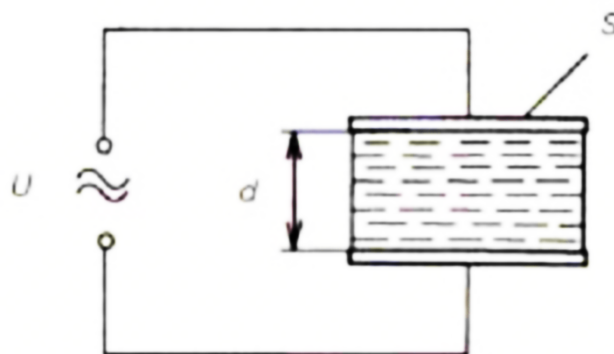
Velkou výhodou této metody je vysoká citlivost a nízká závislost na teplotě. Nevýhodou jsou poněkud delší odezvy senzorů řádově desítky sekund. [10]



Obrázek 3: Fotografie kapacitního vlhkoměru Greisinger GMK 100 [13]

1.1.1.4 Fyzikální základ měření kapacitní metodou

Elektricky nevodivé látky obsahují polarizované molekuly a disociované kladné i záporné ionty, které se chovají jako elektrické dipóly a sledují změny polarizace elektrického pole. Vzájemným třením těchto částic vzniká tzv. dielektrické teplo. Kapacita kondenzátoru je schopnost dielektrika pojmout určitý elektrický náboj. Schéma kondenzátoru je uvedeno na obrázku níže.



Obrázek 4: Schéma deskového kondenzátoru s vloženým dielektrikem

Dielektrikum je tvořeno elektricky nevodivou látkou (měřený stavební materiál), která je charakterizována bezrozměrnými veličinami, a to relativní permitivitou ε_r a ztrátovým činitelem $\text{tg } \delta$. Hodnoty ε_r a $\text{tg } \delta$ nejsou konstantní, ale mění se s frekvencí a závisejí na teplotě, vlhkosti apod.

Kapacita kondenzátoru je dána vztahem:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S \cdot d^{-1}, \quad (11)$$

kde ε_0 permitivita vakua [$8,859 \cdot 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$],

ε_r relativní permitivita materiálu (relativní permitivita je poměr kapacity C kondenzátoru vyplněného dielektrikem a kapacity C_0 stejného kondenzátoru vakuového),

S plocha desky kondenzátoru [m^2],

d vzdálenost desek [m]. [24]

Tabulka 2: Relativní permitivita a ztrátový činitel vybraných materiálů [24]

Materiál	ε_r [-]	$\text{tg } \delta$ [-]
vzduch	1,0	0
voda	80,0	1,0
polystyrén pěnový	2,3-2,5	-
bakelit	4,8-5,3	-
polyamid	3,0-4,0	0,015-0,004
kaučuk přírodní	2,1-2,3	0,004-0,005
sklo	4,5-8,0	0,002-0,015
kaučuk syntetický	2,7-2,9	0,005-0,1
acetylcelulóza	3,5 až 7,0	0,03 až 0,1
dřevo suché	2,5 až 3,6	0,025 až 0,13
dřevo vlhké	3,5 až 26,0	0,01 až 1,0
hedvábí suché	4,0 až 7,0	0,033 až 0,06
kaučuk přírodní	2,1 až 2,3	0,004 až 0,005

6.2.5 Mikrovlnná metoda

Mikrovlnná metoda je založena na principu vysílání elektromagnetických vln na mikrovlnném kmitočtu do materiálu a podle množství odražených vln od molekul vody je přístroj schopen přepočítat vlhkost materiálu. Vlhkost

materiálu lze měřit v různých hloubkách, podle použité sondy, a to v rozsahu 30-800 mm. Při nižším obsahu vlhkosti dochází ke zjištění nepřesných výsledků měření. Tato metoda není ovlivněna ostatními fyzikálními vlastnostmi materiálu, na rozdíl od odporové nebo kapacitní metody. Mezi výhody měření patří rychlé stanovení výsledků, možnost měření v různých hloubkách a přímá závislost měřených vlastností na vodě. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena. [14]



Obrázek 5: Fotografie mikrovlnného vlhkoměru Moist 210 s měřicími sondami do různých hloubek umístěné v transportním kufříku

1.1.1.5 FYZIKÁLNÍ ZÁKLAD MĚŘENÍ MIKROVLNNOU METODOU

S rostoucími frekvencemi jsou molekuly vody stále méně schopné sledovat vnější aplikované střídavé elektromagnetické pole kvůli vnitřním vazebným silám. Mezi rotačním pohybem molekul (polarizace) a vnějším polem dochází k fázovému posunu. Jak se frekvence zvyšuje, způsobuje to pokles dielektrické konstanty a zvyšování dielektrických ztrát (analogicky ohřevu v kuchyňské mikrovlnné troubě). Z tohoto důvodu je relativní dielektrickou

konstantu při vysokých frekvencích nutno vnímat jako komplexní proměnnou, tj. má reálnou část ε_r' a imaginární část ε_r''

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' + j\varepsilon_r'' = \varepsilon_r'(1 + j \tan \delta_\varepsilon), \quad (12)$$

kde ε_r' a ε_r'' představují relativní permitivity,

$\tan \delta_\varepsilon$ ztrátový činitel nebo faktor rozptylu.

Reálná část ε_r' je část, která umožňuje měření při kapacitním měření. Imaginární část ε_r'' představuje dielektrické ztráty, které odpovídají fázově posunuté části molekulárního pohybu. Celkové elektrické ztráty materiálu jsou výsledkem součtu dielektrických ztrát a ztrát v důsledku stejnosměrné vodivosti iontů (např. solí ve zdivu). Oba typy ztrát jsou zahrnuty do celkového ztrátového faktoru $\tan \delta$.

Kvůli těmto fyzikálním vztahům jsou naměřené hodnoty ovlivněny vlivem vodivosti v obvyklých nízkofrekvenčních kapacitních metodách měření. Vlivy iontové vodivosti klesají s rostoucí frekvencí f . V mikrovlnném rozsahu (od 2 .. 3 GHz) jsou účinky vodivosti kvůli vysoké frekvenci zanedbatelně malé a ke ztrátám přispívají pouze dielektrické vlastnosti vody. Proto není mikrovlnná metoda měření vlhkosti ovlivněna iontovými vodivostmi způsobené přítomností solí. Maximální dielektrická ztráta vody je na frekvenci kolem 20 GHz. Související vlnová délka elektromagnetické vlny je však velmi malá (přibližně 10 mm v suchém stavebním materiálu). Jelikož hloubka průniku do materiálu závisí přímo na vlnové délce, měření na této frekvenci nemá smysl. Navíc i při nižších frekvencích, jako je např. běžná frekvence 2,45 GHz (kuchyňská mikrovlnná trouba) jsou dielektrické ztráty dostatečně vysoké, aby byly schopny vodu dobře detekovat. V mikrovlnném rozsahu jsou kromě vysoké reálné části dielektrické konstanty u vody k dispozici jako měřená veličina také dielektrické ztráty. Spojení s fyzikálními vlastnostmi vody je proto velmi těsné.

Vlnové délky upřednostňovaných frekvenčních rozsahů mezi 2 a 10 GHz jsou takové, že mohou být generovány relativně dobře sdruženým mikrovlnným zařízením, jako jsou antény nebo jednotky pro vyzařování rozptýleného pole, které jsou uspořádány do přijatelné velikostí. Díky směrovosti antén lze dosáhnout hloubky průniku v rozsahu decimetrů, zatímco několika centimetrů lze dosáhnout pomocí uspořádání rozptýleného pole. S mikrovlnným uspořádáním je možné nedestruktivní srovnání mezi obsahem vody na povrchu měřeného materiálu i v jeho objemu.

Elektromagnetická vlna vyzařována do materiálu z antény nebo elektromagnetické pole uspořádání rozptýleného pole (např. otevřený rezonátor) expanduje do materiálu. Měří se jak elektromagnetická vlna vstupující do materiálu, tak vlna odrážená materiálem. Tzv. odrazový faktor ρ je poměrem mezi zpětnou a odchozí vlnou. [22]

6.2.6 Termografická metoda

Termografická metoda pro měření vlhkosti je spíše orientační. Princip je založen na snímání teploty povrchu termokamerou, která dokáže určit vlhkostní mapy v ploše. Jedná se tedy o zviditelnění energie, kterou tělesa vyzařují formou elektromagnetických vln, jejichž vlastnosti (frekvence, vlnová délka) je měněna v závislosti na teplotě. Touto metodou lze okamžitě kvalitativně zjistit vlhkost pouze v povrchových vrstvách konstrukce. [15, 16]



Obrázek 6: Fotografie z měření termokamerou [15]

6.2.7 Radiometrická metoda

Radiometrická metoda měření vlhkosti je založena na moderaci rychlých neutronů. Rychlé neutrony jsou zbrzděny srážkami s vodíkovými jádry, resp. s jádry atomů s nízkou atomovou hmotností, tedy například s vodíkem.



Obrázek 7: Fotografie radiometrické soupravy Troxler [14]

V anorganických materiálech je zdrojem vodíku voda, jejíž obsah lze touto metodou měřit. Zdrojem záření je nejčastěji směsný zářič americia a beryllia. Metoda je velmi přesná a jednoznačná. Soli výsledek ovlivňují minimálně, naopak materiály s velkým obsahem vázané vody mohou výsledky velmi ovlivňovat. [14]

7 KLASIFIKACE ZDIVA DLE ČSN P 73 0610

V přílohách normy ČSN P 73 0610 Hydroizolace staveb – Sanace vlhkého zdiva – Základní ustanovení je zdivo klasifikováno dle obsahu vlhkosti, salinity a vlhkosti vzduchu ve vnitřním prostoru budovy.

7.1 KLASIFIKACE VLHKOSTI ZDIVA

V příloze A normy ČSN P 73 0610 je klasifikace vlhkosti zdiva podle hmotnostní vlhkosti. Tato klasifikace se vztahuje konstrukce staveb, z běžně používaných zdicích materiálů, s místnostmi pro pobyt osob.

Tabulka 3: Klasifikace vlhkosti zdiva dle [18]

Stupeň vlhkosti	Vlhkost zdiva w [% hm.]
Velmi nízká	$w < 3$
Nízká	$3 \leq w < 5$
Zvýšená	$5 \leq w < 7,5$
Vysoká	$7,5 \leq w < 10$
Velmi vysoká	$w > 10$

8 DLOUHODOBÉ MONITOROVÁNÍ VLHKOSTI

V současnosti se na trhu nachází několik výrobců, kteří v ČR nabízejí systémy pro dlouhodobé monitorování vlhkosti v konstrukcích, avšak většina se zabývá monitorováním v konstrukcích dřevěných (surové dřevo, dřevěné panely atd.).

8.1 MĚŘIDLO MOISTURE GUIDE

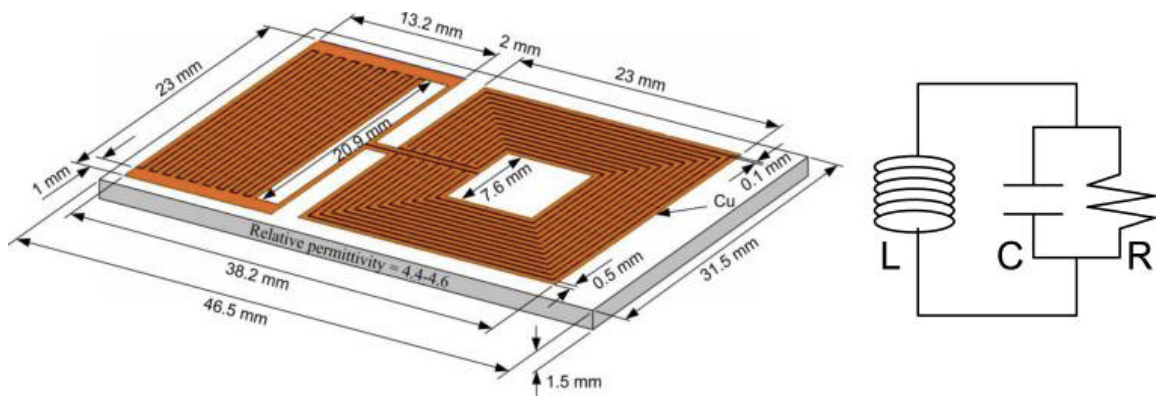
Moisture Guide nabízí dlouhodobé monitorování vlhkosti v dřevostavbách za použití různých komponentů. Nabízí kombinované senzory pro zabudování do konstrukce, senzory pro měření teplot a vlhkosti uvnitř i vně budovy, centrální jednotku pro sběr a vyhodnocení dat, která v případě odchýlení od povolených hodnot vlhkosti upozorní na případný problém. Cena systému závisí na počtu senzorů, vybrané řídicí jednotce a množství doplňkových senzorů, odhadem se pohybuje v desítkách tisíc Kč pro rodinný dům (dle ceníku uvedeného na webových stránkách. [19]

8.2 BEZDRÁTOVÝ PASIVNÍ SENZOR

Ve studii [20] se zabývali vývojem pasivního bezdrátového senzoru, který se skládá z induktoru a intergradiálního kondenzátoru. Měděný senzor je vyroben na jednostranné desce s plošnými spoji. Ve výzkumu se zabývali kromě sestavení senzoru i experimentálním ověřením na cihle a pórobetonové tvárnici. Měření probíhalo při vložení materiálů do vody a při následném sušení. Jako možné zdroje chyb při použití tohoto senzoru pro dlouhodobém monitorování vlhkosti uvádí možnou korozi měděných komponentů, do určité míry přítomnost kovových součástí v blízkosti místa měření a ovlivnění výsledků měření solemi, které výsledky ovlivňovaly během absorpce slané vody (během sušení byla pozorována pouze malá hystereze). Během absorpce vody došlo se zvýšením obsahu vlhkosti ke snížení rezonanční frekvence.

Doba potřebná k úplnému vysušení cihel byla zhruba 190 hodin a u pórobetonu asi 250 hodin, během sušení cihel se dielektrická konstanta i kapacita snížily a následně se zvýšila rezonanční frekvence.

Kalibrace mezi rezonanční frekvencí a obsahem vody byla zajištěna pomocí charakteristik uložených v přístroji Testo 606-2.



Obrázek 8: Schéma bezdrátového pasivního senzoru [20]

8.3 SLEDOVÁNÍ VLHKOSTI VE STĚNĚ POMOCÍ DŘEVĚNÝCH HMOŽDINEK

Tato metoda je založena na principu vložení dřevěných borových hmoždinek do stěny a následného měření vlhkosti daných hmoždinek odporovými vlhkoměry v pravidelných intervalech.

Ve studii [21] byla nejprve stanovena vlhkost hmoždinek gravimetrickou metodou ve srovnání s hodnotami z odporového vlhkoměru, následně byl uplatněn korekční faktor tak, aby byla na vlhkoměru přesně určena vlhkost stanovená gravimetricky. Základním principem úspěchu této metody je stanovení rovnováhy mezi okolím a dřevěnou hmoždinkou. Z tohoto důvodu bylo provedeno měření vlhkosti hmoždinek a okolních cihel s maltou v prostředí s různými relativními vlhkostmi. Porovnáním vlhkosti se určilo, zda hmoždinka dosáhla rovnovážného obsahu vlhkosti se stěnou, která ji obklopuje. Po této části studie v laboratoři byla vlhkost zkoumána v reálných zděných konstrukcích.

Tato metoda je známá mnoho let, nejčastěji však u dřevěných konstrukcí. Typicky se do konstrukce vkládají různé druhy dřevěných bloků a tyčí, které se propojí dráty k zařízení schopnému měřit elektrické vlastnosti. Příkladem sondy je Duffova sonda, která je složena z obdélníkového dřevěného prvku potaženého vodivou stříbrnou barvou a elektrod, které jsou připojeny k odporovému vlhkoměru pomocí vodičů. V méně častých případech

se používají dřevěné hmoždinky pro měření vlhkosti jiných stavebních materiálů. Dlouhodobě je možné měřit pórovité materiály jako je beton nebo zdivo a že je možné rozlišit mezi nasyceným vzduchem a kapalnou vodou.



Obrázek 9: Fotografie tyče pro měření vlhkosti v různých hloubkách stěny [21]

Studie potvrdila své předpoklady, že po aplikaci vápenné omítky došlo ke zvýšení vlhkosti stěn (nejvyšší vlhkost mezi 105 a 285 mm od povrchu stěny) po dvou měsících po aplikaci omítky. Po deseti měsících se vlhkost snížila na původní hodnotu vlhkosti. Proto se dospělo k závěru, že hmoždinka poskytuje dobrou indikaci obsahu vlhkosti ve zdi, když hodnoty vlhkosti hmoždinek nejsou vyšší než 15 % a dokážou indikovat změny relativní vlhkosti nad 15 %. [21]

III EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

9 CÍL PRÁCE

Cílem experimentální části je vybrat a ověřit nejvhodnější metodu měření vlhkosti ve stavebních konstrukcích pro dlouhodobá měření dle poznatků z teoretické části. Po analýze následuje experimentální ověření na různých experimentálních modelech konstrukcí vybranými metodami měření v porovnání s gravimetrickou zkouškou.

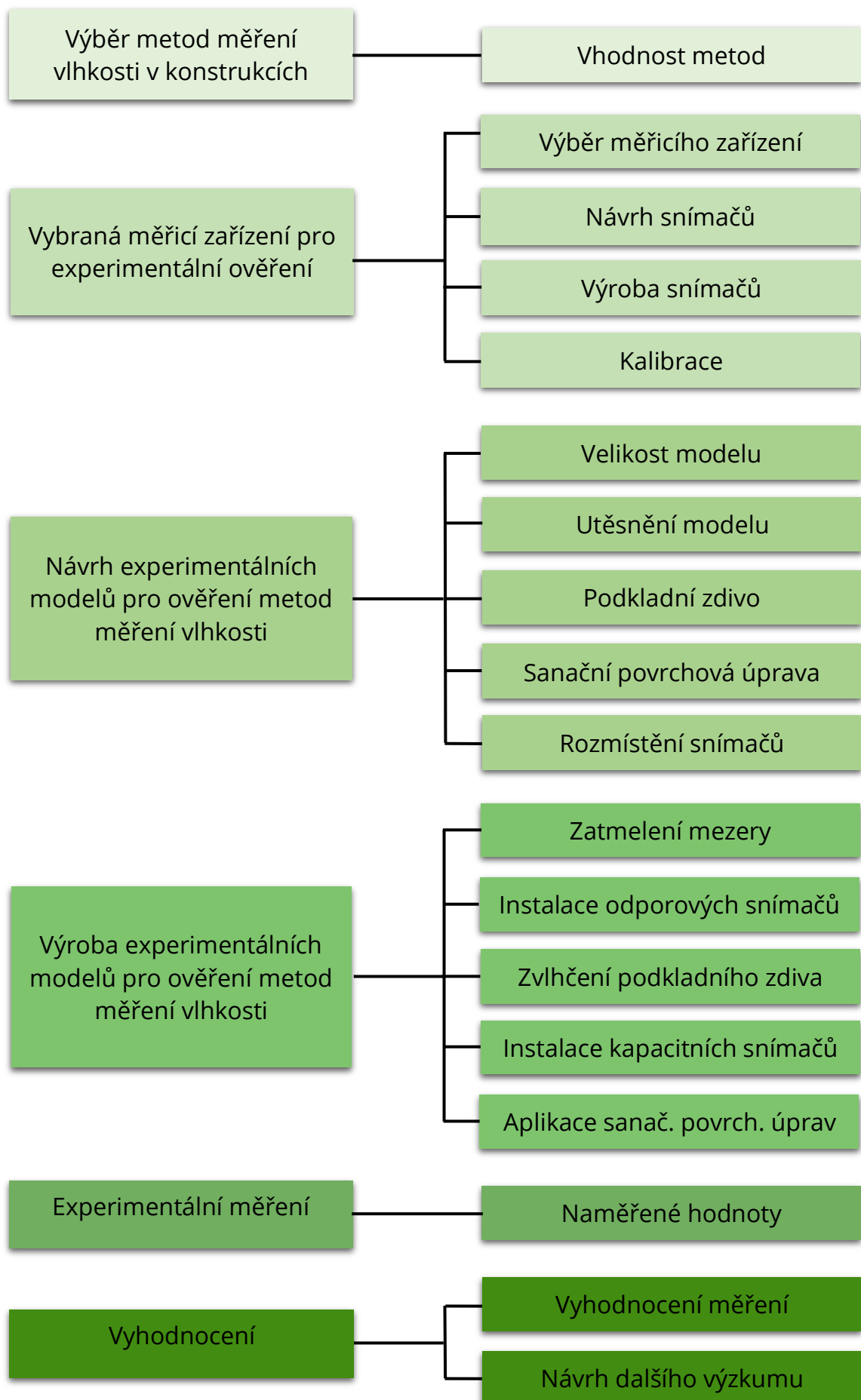
Po výběru měřicích metod a konkrétních měřicích zařízení byla navržena, vyrobena a kalibrována snímací zařízení pro použití v experimentálních modelech vybraných stavebních fragmentů.

V následující části experimentu jsou navrženy a vyrobeny experimentální modely, které sestávají z podkladního zdiva z cihel plných pálených a povrchové sanační úpravy, z toho jeden model byl ponechán bez povrchové úpravy. V návrhu velikosti experimentální části modelu je zohledněno možné ovlivnění měřicích metod mezi sebou navzájem. Při návrhu utěsnění modelu je kladen důraz na mechanickou pevnost celého modelu a na zajištění šíření vlhkosti pouze v jednom směru celého průřezu. Do podkladního zdiva a do sanačních povrchových úprav byly zabudovány vytvořené snímače, kterými je zajištěno sledování vlhkosti v průběhu vysychání experimentálního modelu.

Cílem experimentální části mé diplomové práce je zhodnocení dosažených výsledků naměřených různými metodami měření vlhkosti v konstrukcích a rozbor problematiky s praktickými dopady do stavební praxe.

10 METODIKA PRÁCE

Zadání diplomové práce bylo rozděleno do několika částí, které lze graficky vyjádřit následujícím grafem:



11 VÝBĚR METOD MĚŘENÍ VLHKOSTI VE STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍCH

V první části bylo cílem vybrat vhodné metody pro experimentální ověření dlouhodobého monitorování vlhkosti v konstrukcích. Tento výběr byl proveden dle poznatků z teoretické části mé diplomové práce následovně:

Gravimetrická metoda je nejpoužívanější metodou pro zjištění obsahu vlhkosti. Stanovuje se podle normového postupu sušením a vážením vzorku. Její nevýhodou je fakt, že se jedná o metodu destruktivní, kdy se z konstrukce odebere část vzorku (vývrt) a metoda je dle normového postupu časově náročná. Mezi její výhody patří velká přesnost stanovení obsahu vlhkosti.

Mezi často používané metody měření vlhkosti se používá **odporová metoda**, která poskytuje poměrně přesné výsledky při relativně nízké ceně přístroje. Jak již bylo zmíněno v teoretické části, mezi nevýhody měření vlhkosti odporovou metodou je možné ovlivnění výsledků zasolením zdiva i přítomností kovových částí v blízkosti místa měření, a také závislostí na teplotě. Hlavní výhodou je časová nenáročnost zjištění výsledku měření.

Mezi další dostupné metody patří **metoda kapacitní**. Snímače mohou být zhotoveny z různých materiálů elektrod vhodných pro danou aplikaci. Důležité je zajištění elektrické izolace snímače, které by mohlo ovlivnit výsledek měření. Kapacitní metoda není tolik ovlivněna zasolením, jako výše uvedená odporová metoda. Při měření kapacitní metodou jsou k dispozici hodnoty permitivity vybraných materiálů. Pro co nejpřesnější měření a vyhodnocení nejvhodnější metody bylo vhodné permitivitu experimentálně měřit na vlastních vzorcích. Hlavní výhodou této metody je rychlá indikace výsledků měření a možnost měření vlhkosti v celém průřezu konstrukce.

Mikrovlnná metoda taktéž patří mezi velmi rozšířené metody měření i mezi přesnější metody. Na rozdíl od výše uvedených nedestruktivních metod není ovlivněna solemi, je závislá pouze na obsahu vlhkosti ve zkoumaném

materiálu, což patří mezi její hlavní výhody. Nevýhodou je nutná opakovatelnost měření v přesně stanoveném místě a určení průměrné hodnoty vlhkosti.

12 MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ PRO STANOVENÍ OBSAHU VLHKOSTI V KONSTRUKCÍCH

V této části byla nejprve vybrána měřicí zařízení, kterými bude sledován obsah vlhkosti. Následně byla pro tato zařízení navržena, vyrobena a kalibrována snímací zařízení, která budou použita pro měření v experimentálních skladbách. U měření vlhkosti mikrovlnnou metodou jsou snímače součástí měřicího zařízení, které nebyly v experimentální části vyráběny, ale pouze kalibrovány pro použité materiály.

Při návrhu byly snímače voleny tak, aby byly kompatibilní s danou metodou, aby nedocházelo k destrukci při aplikaci do skladby i při samotném měření a aby se metody vzájemně neovlivňovaly.

Nepřímé metody měření vlhkosti byly doplněny o metodu gravimetrickou, pro kterou byla použita elektronická váha s váživostí 60 kg a rozlišením 5 g.

12.1 ODPOROVÁ METODA MĚŘENÍ VLHKOSTI VE STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍCH

12.1.1 Vybrané měřicí zařízení pro odporovou metodu měření vlhkosti

Odporový vlhkoměr ELBEZ WHT 770 s označením je hrotový vlhkoměr pro měření vlhkosti dřeva a stavebních materiálů. Má dva zapichovací hroty a na přístroji je možné nastavit teplotu od 0 do 100 °C. Přístroj byl použit k měření vlhkosti pro vytvoření kalibrační křivky a pro měření vlhkosti v experimentálních skladbách.



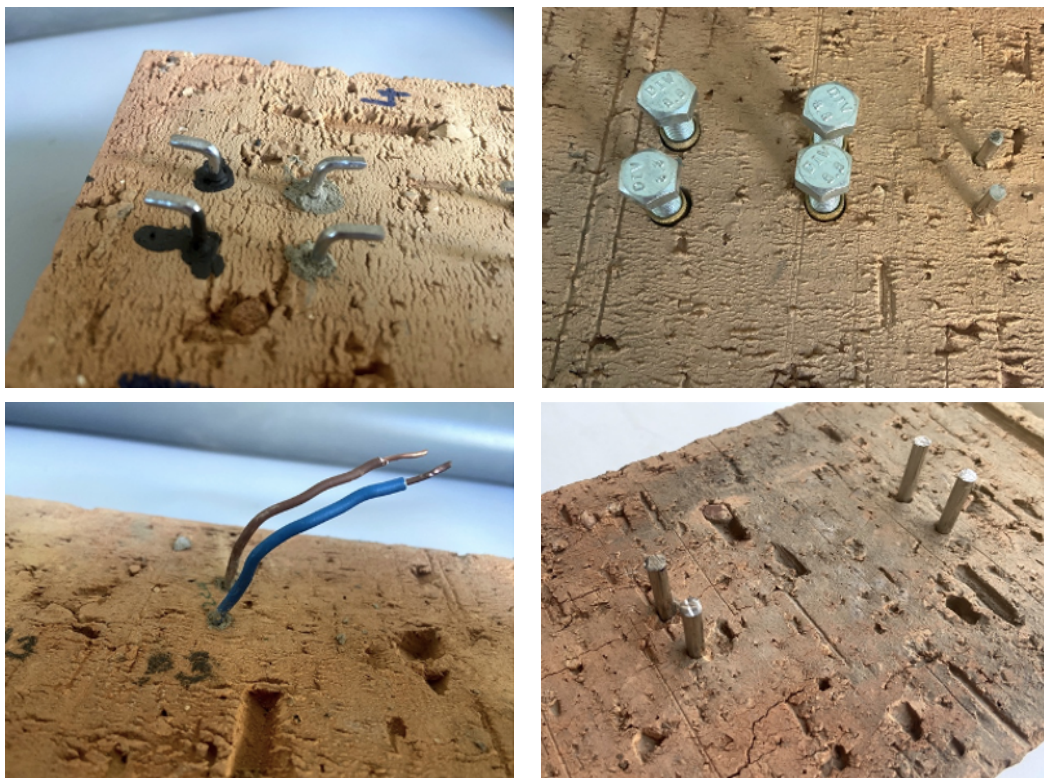
Obrázek 10: Fotografie odporového vlhkoměru ELBEZ WHT 770 s hrotovými sondami v transportním kufříku

12.1.2 Návrh snímacího zařízení pro odporovou metodu měření vlhkosti

Vzhledem k tomu, že se odporovou metodou bude měřit obsah vlhkosti pouze ve vlhkém podkladním zdivu, bylo nutné zvolit materiál, který odolává prostředí s vyšší vlhkostí a u něhož nedojde k destrukci při zaražení do cihly. Byly vybrány čtyři typy elektrod, na kterých byla odzkoušena aplikace do zkušebního vzorku cihly plné pálené, a to: ocelové skoby, ocelové hmoždinky, měděné vodiče a nerezová kulatina.

Před vložením čidel do cihly bylo nutné předvrtat otvory.

Pro zajištění lepšího kontaktu a eliminaci vzduchové mezery mezi cihlou a vloženou elektrodou bylo navrženo aplikovat elektrovedivé lepidlo nebo cementovou zdicí maltu do předvrtaných otvorů.



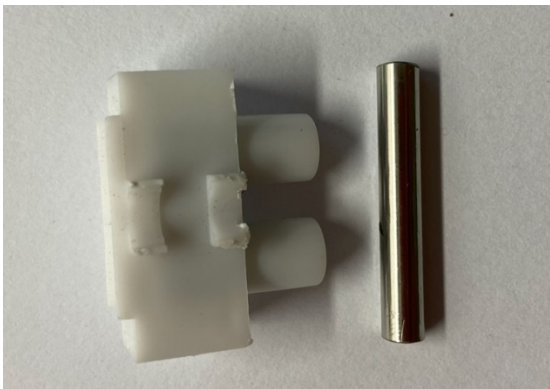
Obrázek 11: Ukázka aplikace elektrod pro měření odporovou metodou, vlevo nahoře ocelové skoby, vpravo nahoře ocelové hmoždinky, vlevo dole měděné vodiče a vpravo dole nerezová kulatina

U skob, drátů a hmoždinek, které byly vyhodnoceny jako nevhodné, je velmi malá přídržnost k podkladu při použití cementového i použití elektrovedivého lepidla.

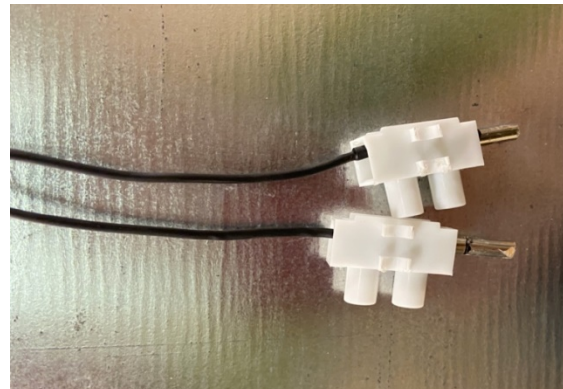
Jako nejvhodnější snímače (elektrody) byly vybrány zakrácené nerezové kulatiny o průměru 4 mm, které se částečně zatlačí do předvrtaných otvorů vyplněných elektrovedivým lepidlem. Na kulatinu se velmi jednoduše může umístit svorkovnice a další součásti snímače. Celý systém se skládá ze dvou snímačů vyrobených z výše uvedených kulatin, na které byly připojeny přes svorkovnici a kabely do měřicího přístroje, který byl použit pro kontinuální snímání elektrického odporu. Snímání hodnot ohmického odporu bylo provedeno v hloubce 10 mm třikrát za hodinu a následně bylo průměrováno.

12.1.3 Výroba snímacího zařízení pro odporovou metodu měření vlhkosti

Pro výrobu snímačů pro měření odporovou metodou byly zhotoveny elektrody z ocelové kulatiny o průměru 4 mm a délce 20 mm, které budou zasunuty do cihelného podkladu do hloubky 10 mm. Po zakrácení na požadovanou délku byly konce zbroušeny pro lepší vložení do předvrtaných otvorů. Mírně zbroušena byla i část kulatiny, která je zasunuta do svorkovnice pro zajištění lepšího kontaktu.



Obrázek 12: Ukázka svorkovnice a zabroušené nerezové kulatiny připravené k montáži měřicí elektrody



Obrázek 13: Vzhled vytvořených snímačů pro odporovou metodu měření vlhkosti před zaizolováním páskou

Po montáži elektrod následovalo zapojení systému, tedy připojení kabelu a vytvořené elektrody přes svorkovnici, kontrola funkčnosti systému a obalení napojované části elektroizolační páskou, která zajistí snímání pouze přes elektrodu v požadované hloubce podkladního zdiva.

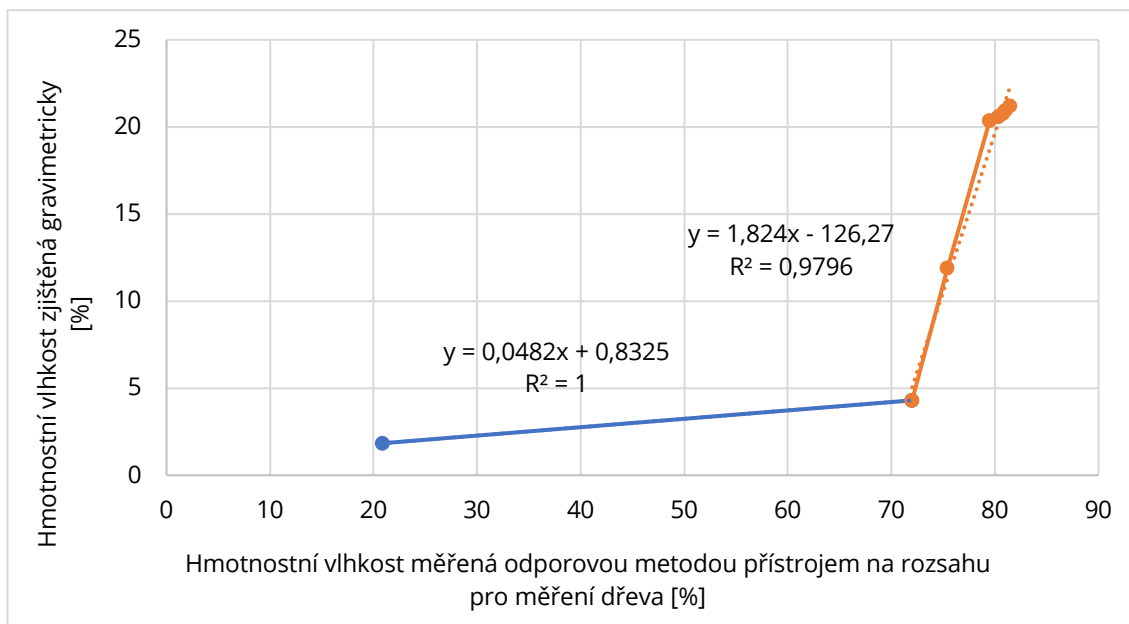
12.1.4 Kalibrace snímacího zařízení pro odporovou metodu měření vlhkosti

Měření odporovou metodou je nejvíce využíváno pro měření vlhkosti dřeva. Z toho důvodu mají výrobci do přístrojů vloženy kalibrační křivky pro dřevo a při měření jiného materiálu nabízí převodní tabulku, pomocí níž lze naměřenou hodnotu vlhkosti přepočítat na jím uvedený materiál. V nabídce používaného přístroje jsou uvedeny materiály jako pórobeton, beton

o různých objemových hmotnostech, sádra atd. Výrobce neuvádí převodní vztah pro cihlu plnou pálenou nebo cihelné zdivo, proto bylo nutné zjistit závislost hmotnostní vlhkosti měřeného materiálu naměřené gravimetricky a naměřené hodnoty hmotnostní vlhkosti pro dřevo indikovanou přístrojem. Zkoušený vzorek cihly byl opatřen dvěma elektrodami z nerezové kulatiny. Poté byl vzorek ponořen do vody pro dosažení stavu úplného nasycení vodou a následně byl vysoušen. Před každým měřením byl vzorek utěsněn parotěsnou fólií kvůli stejnoměrnému ustálení vlhkosti. Během celého procesu byl vzorek průběžně měřen odporovým přístrojem a vážen, aby byla zjištěna závislost mezi obsahem hmotnostní vlhkosti a naměřenou hodnotou hmotnostní vlhkosti pro dřevo. Vysušení vzorku pro zjištění hmotnosti v suchém stavu bylo provedeno v laboratorní sušárně.



Obrázek 14: Fotografie měření vlhkosti CPP odporovým vlhkoměrem



Obrázek 15: Průběh kalibrační křivky mezi hmotnostní vlhkostí zjištěnou gravimetrickou metodou a hmotnostní vlhkostí indikovanou odporovou metodou pomocí přístroje pro měření vlhkosti dřeva

Z grafického vyhodnocení je patrné, že kalibrační křivku bylo nutné vyhodnotit jako dvě části s rozdílnými strmostmi. Hodnota naměřené hmotnostní vlhkosti na přístroji pro měření vlhkosti dřeva odporovou metodou, kde v grafickém vyhodnocení dochází ke zlomu, odpovídá 72 % hmotnostní vlhkosti dřeva, resp. 4,3 % hmotnostní vlhkosti cihly plně pálené naměřené gravimetricky.

12.2 KAPACITNÍ METODA MĚŘENÍ VLHKOSTI VE STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍCH

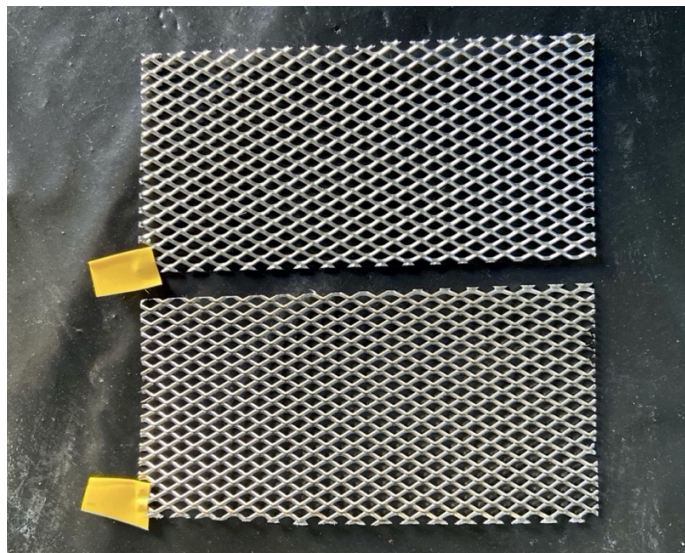
12.2.1 Vybrané měřicí zařízení pro kapacitní metodu měření vlhkosti

Zobrazovacím zařízením kapacitní metody pro měření vlhkosti byl zvolen software vyvinutý na VUT FEKT Brno. Software zobrazuje naměřenou kapacitu a teplotu na snímačích. Měření může probíhat kontinuálně s možností nastavení časového intervalu jednotlivých měření a ukládáním naměřených hodnot do datového souboru. Maximální hodnota kapacity měřená uvedeným zařízením činí 24,4 pF.

12.2.2 Návrh snímacího zařízení pro kapacitní metodu měření vlhkosti

Při volbě snímačů pro kapacitní metodu byly voleny plošné materiály, které nezabrání šíření vlhkosti v materiálu a nebudou tak bránit vysychání podkladu. Dalším kritériem byla odolnost snímače proti korozi vlivem vlhkosti, ale zároveň byla důležitá elektrická nevodivost snímače, která by mohla výrazně ovlivnit měření touto i ostatními metodami.

Jako nejvhodnější materiál se ukázal pozinkovaný tahokov, tj. kovová mřížovina vyrobená bezodpadovou technologií, opatřený elektroizolační povrchovou úpravou. Na pozinkovaný tahokov se snadno připájí další součásti systému snímače.

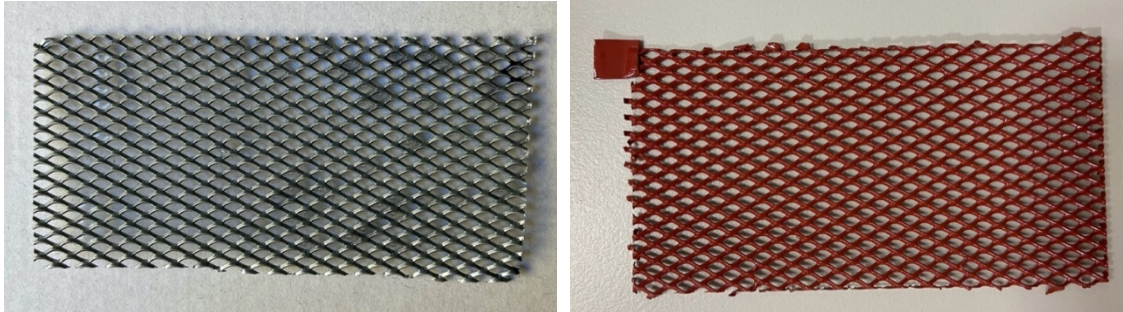


Obrázek 16: Vzhled tahokovů před aplikací elektroizolačního nátěru se zalepeným rohem pro možné připájení kabelu na neošetřenou část

Mezi zkoušené elektroizolační povrchové úpravy byly vybrány laky aplikované štětcem, máčením a sprejováním na různých materiálových bázích.

Čirý lak na epoxidové bázi aplikovaný máčením nebo nátěrem štětcem byl zvolen nevhodně vzhledem k jeho viskozitě, která zapříčinila stečení a zalepení ok tahokovu, čímž došlo k nepropustnosti pro vodní páru a měření

by bylo ovlivněno chybou. Při ověření elektrické vodivosti dosahoval tento nátěr velmi vysokých hodnot a byl z výběru vyloučen.

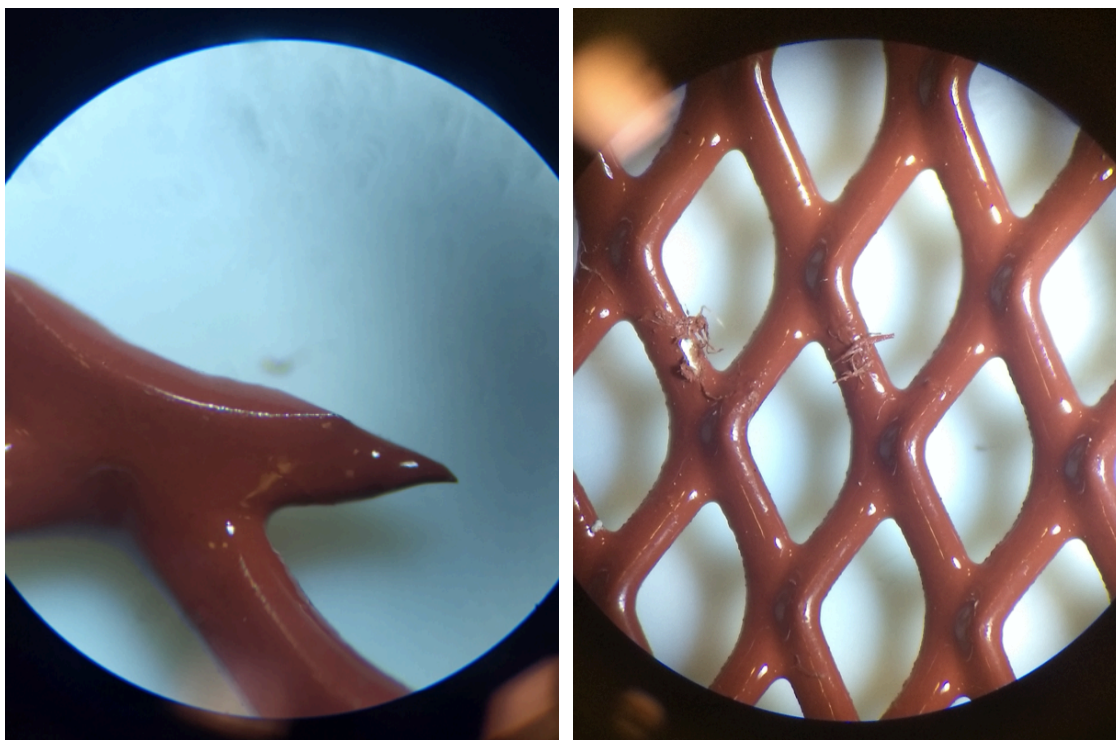


Obrázek 17: Ukázka aplikace epoxidového laku na pozinkovaný tahokov. Na některých místech lze pozorovat zalepená oka (vlevo), ukázka silikonového krycího laku naneseného na tahokov (vpravo)

Polyuretanový krycí lak ve spreji byl testován jako druhý vybraný materiál, mezi jehož výhody použití patří zejména vysoká přilnavost k podkladu, odolnost proti vlhkosti a vysoká odolnost proti mechanickému poškození. Tento lak nebyl zvolen z důvodu nemožnosti vizuální kontroly v průběhu aplikace i po ní, což výrazně ovlivnilo konečné elektrické vlastnosti, které byly ověřeny.

Silikonový krycí lak ve spreji v červené barvě byl testován z důvodu možné vizuální kontroly během aplikace. Mezi jeho vlastnosti patří vysoká adheze ke všem materiálům, odolnost vůči vlhkosti a mechanickému poškození (po dostatečném vytvrzení).

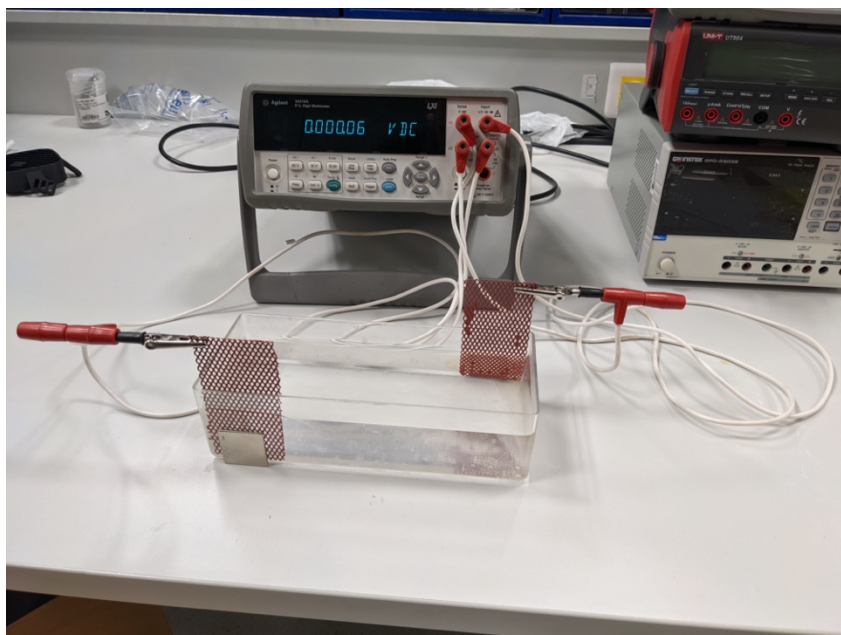
Lak byl prvotně testován v několika vrstvách (2 až 6) a ve všech případech neizoloval dokonale. Po mikroskopické kontrole povrchu byly zjištěny trhliny a nepokrytá místa zpravidla na ostrých koncích. Při dalším testování byl kladen důraz na dokonalé odmaštění a očištění povrchu tahokovu, a aplikaci laku v bezprašném prostředí, což mělo zajistit lepší výsledky. Tato důkladná předúprava před aplikací laku zajistila lepší výsledky, ale hodnoty stále neodpovídaly těm předpokládaným a požadovaným.



Obrázek 18: Ukázka makroskopických snímků nesouvislého povrchu laku elektrod způsobené ostrými konci (vlevo) a neočištěným povrchem (vpravo)

Kombinací epoxidového laku na okrajích (10 mm okraj) a několikvrstvého nátěru silikonového laku v ploše tahokovu nebylo dosaženo lepších výsledků než v případě použití pouze silikonového laku.

Na připravených dílčích vzorcích tahokovu s několikvrstvámi elektroizolačními nátěry byl ověřen elektrický odpor tak, že měření bylo provedeno na přístroji Agilent 34401A čtyřvodičovou metodou. Na vstup přístroje byly připojeny elektrody, které byly ponořeny do solného roztoku. Izolační odpor se zvyšoval s větším počtem vrstev elektroizolačního laku. Jako vyhovující byly vyhodnoceny vzorky s pěti a více vrstvami.



Obrázek 19: Uspořádání elektrod při měření izolačního odporu několikvrstevných nátěrů na tahokovech

Vzhledem k časovým omezením a nemožnosti dalšího testování byl zvolen dvouvrstvý nástřík silikonového laku aplikovaný v bezprašném prostředí.

Celé monitorovací zařízení bylo sestaveno ze dvou takto upravených snímačů z tahokovu připojené napájecím kabelem k měřicímu přípravku, po jehož připojení k notebooku bylo umožněno čtení kapacity s využitím vlastního software.

Snímače byly aplikovány z obou stran desky do vrstvy lepicí malty v případě lepení systému celoplošně, v případě bodového lepení desky (na terče) byly přilepeny pouze snímače.

Velikost snímačů musela být zvolena tak, aby bylo zajištěno měření kapacity v rozsahu 0 až 24,4 pF. Nejprve byly vyrobeny snímače o rozměru 200 x 150 mm, mezi kterými naměřená kapacita deskových materiálů vykazovala maximální hodnoty. Z toho důvodu byly ověřeny velikosti menších snímačů a naměřená kapacita již dosahovala hodnot v měřicím rozsahu.

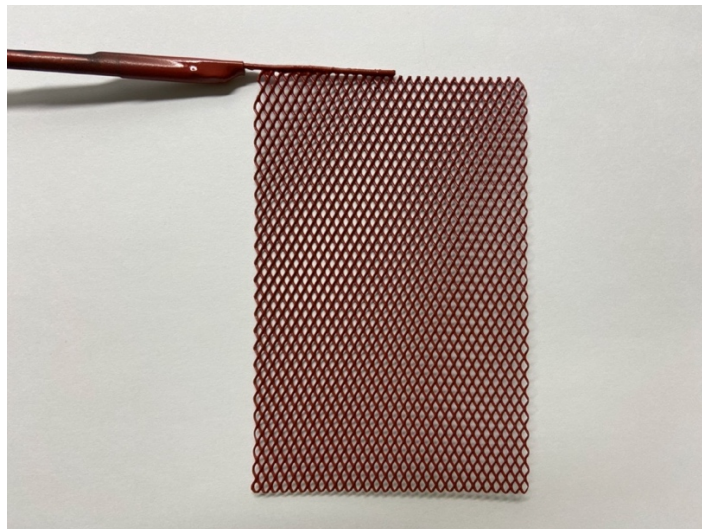
Podle dílčího experimentálního prověření velikosti snímačů byla navržena velikost snímačů 100 x 150 mm.

12.2.3 Výroba snímacího zařízení pro kapacitní metodu měření vlhkosti

Pro výrobu kapacitních snímačů byly nejprve zakráceny archy tahokovu na požadovaný rozměr 100 x 150 mm. Zakrácení bylo provedeno nůžkami, což zapříčinilo vznik ostrých konců, které bylo nutné zabrousit. Zbroušení bylo provedeno ruční bruskou po celém obvodu tahokovu.

Po předúpravě uvedené výše byl na každý snímač připájen měděný drát o průměru 1,5 mm a o délce zhruba 80 mm, který byl kutím narovnáán. K tomuto drátu byl připojen koaxiální kabel s anténní koncovkou. Část kabelu byla připevněna rovnoběžně k drátu smršťovací páskou, aby se zamezilo namáhání pájeného spoje a tím i případnému zlomu.

Poté byl snímač zaizolován v celé ploše elektroizolačním silikonovým lakem.



Obrázek 20: Ukázka připraveného snímače pro kapacitní metodu před zabudováním do experimentálního modelu

12.2.4 Kalibrace snímacího zařízení pro kapacitní metodu měření vlhkosti

Kapacita je přímo úměrná ploše překrývajících se elektrod a nepřímo úměrná vzdálenosti elektrod. Pro zjištění správnosti výsledků měření v experimentální skladbě byly vyrobeny vzorky pro měření kapacity na LCR metru, který je k dispozici na FEKT VUT Brno. Velikost vzorků byla dána vzdáleností elektrod, která činí 40 mm. Jako tvar vzorků byl zvolen válec o průměru 50 mm a výšce 10 mm. Při měření je nejdůležitějším parametrem rovnoběžnost stran, která zajišťuje velmi přesné měření. Toho se u takto malých vzorků stavebních materiálů dosahuje velmi obtížně.

Při výrobě vzorků byly nejprve 3D tiskem vyrobeny formy, které měly zaručit co nejlepší rozměrovou přesnost.



Obrázek 21: Ukázka vytvořených forem z 3D tiskárny pro výrobu vzorků pro měření kapacity



Obrázek 22: Ukázka z výroby vzorků pro měření kapacity

Formy byly následně připevněny páskou k rovnému podkladu a naplněny maltami a lepidly zvolenými do experimentálních skladeb k proměření. U většiny vzorků však došlo k objemovým změnám, které zapříčinily nežádanou nerovnoběžnost stran. U části vzorků, kde objemové změny

nebyly tak výrazné, nebylo možné docílit hladkého povrchu kvůli hrubým frakcím plniva vystupující na povrchu.

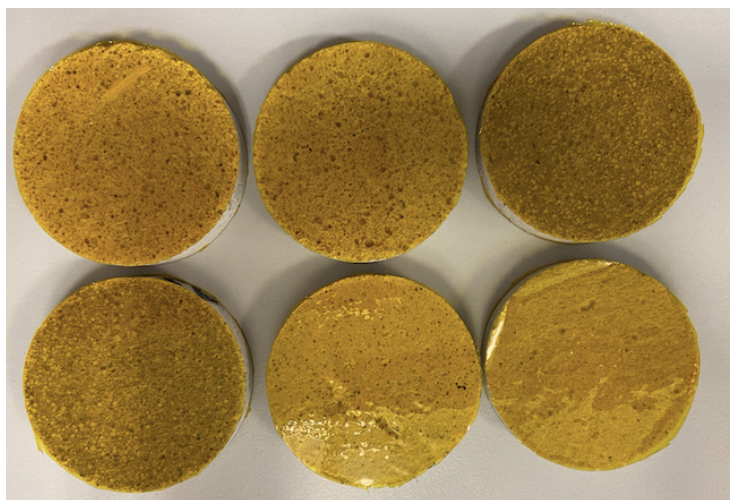
Po vizuální kontrole bylo nutné zbroušení většiny horních povrchů, aby bylo následné měření co nejpřesnější. K broušení takto malých vzorků nebyl k dispozici vhodný uchopovací přípravek, proto broušení bylo provedeno pouze ručně.



Obrázek 23: Vzhled vzorků pro měření kapacity po odformování a před broušením povrchu

Z deskových materiálů polystyrenbeton, kalciumsilikát a PUR, které byly vybrány jako sanační povrchové úpravy, bylo také nutné vyrobit válcové vzorky pro měření kapacity. K tomu byla použita vrtací korunka o vnitřním průměru 50 mm. Vyříznutý válec se ručně zkrátil na požadovanou tloušťku 10 mm.

Na každý válcový vzorek byla z obou stran nalepena kaptonová páska pro zajištění lepšího kontaktu s elektrodami.

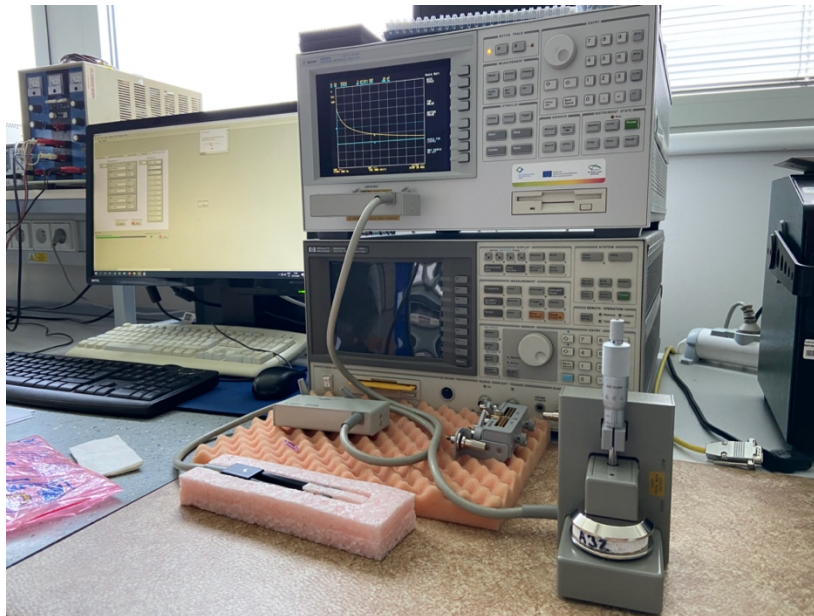


Obrázek 24: Ukázka vzorků s nalepenou kaptonovou páskou

Vzorky byly vyrobeny v počtu čtyř kusů od každého materiálu, a to z důvodu odlišného postupu měření. V prvním případě se jednalo o měření vzorků při jejich vlhčení a v druhém případě o měření vzorků při jejich vysoušení.

Vzorky určené k vlhčení byly nejdříve vysušeny v laboratorní sušárně o teplotě 65 °C do konstantní hmotnosti. Vzorky určené k vlhčení byly umístěny do vody pro dosažení stavu úplného nasycení vodou.

Bezprostředně před každým měřením byl vzorek zvážen na analytických vahách a vložen do uzavíratelného sáčku pro vyrovnání vnitřní vlhkosti. Poté byl vložen do LCR metru, kde byla změřena jeho kapacita a ztrátový činitel.



Obrázek 25: Fotografie z měření vzorku pomocí LCR metru

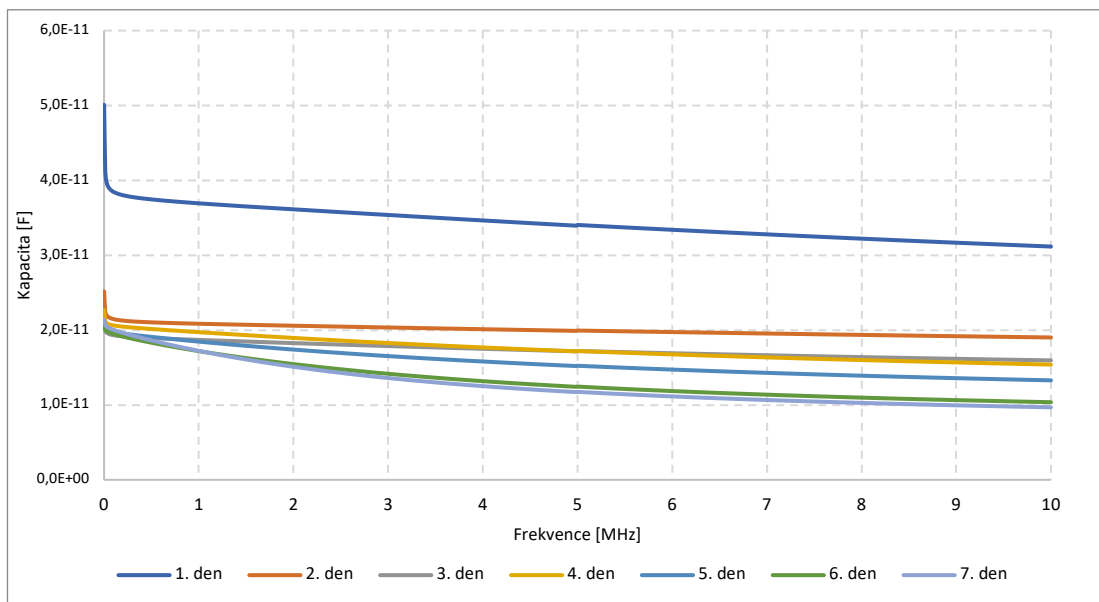
Po měření byl suchý vzorek určený pro vlhčení vložen do exsikátoru nad vodní hladinu a vlhký vzorek určený k vysoušení byl ponechán v laboratorním prostředí.



Obrázek 26: Fotografie vzorků opatřených kaptonovou páskou určených k vlhčení nad vodní hladinou v exsikátoru

Celé měření bylo časově náročné, neboť proměření v LCR metru trvalo u jednoho vzorku zhruba 6 minut a opakovalo se několik dnů.

Cílem této části práce bylo zjistit závislost naměřené permitivity (kapacity) použitých materiálů na hmotnostní vlhkosti. Předpokládala jsem, že stanovení těchto hodnot pro konkrétní materiál umožní přepočítání naměřené kapacity v experimentálním modelu na hmotnostní vlhkost v experimentálním modelu, následně pak také v reálné stavební konstrukci. Vzhledem k časové náročnosti vyhodnocování naměřených dat a velkému množství vzorků nebyla tato část práce vyhodnocena a může být předmětem dalšího výzkumu.



Obrázek 27: Grafický průběh naměřené kapacity C_p u vzorků vysušené lepicí malty v závislosti na frekvenci (1. den byl vzorek plně nasycený, 7. den byl vzorek suchý)

12.3 MIKROVLNNÁ METODA MĚŘENÍ VLHKOSTI VE STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍCH

12.3.1 Vybrané měřicí zařízení pro mikrovlnnou metodu měření vlhkosti

Pro měření vlhkosti mikrovlnnou metodou byl využit přístroj MOIST 210. Tento přístroj nabízí měření v různých hloubkách dle použité sondy. Pro měření byly zvoleny měřicí sondy do hloubky 40 a 70 mm.



Obrázek 28: Fotografie zařízení MOIST 210 pro měření vlhkosti mikrovlnnou metodou s měřicími sondami

12.3.2 Návrh snímacího zařízení pro mikrovlnnou metodu měření vlhkosti

V nabídce nastavení mikrovlnného měřidla pro měření vlhkosti je uvedeno několik materiálů (zdivo, cementová podlaha atd.), pro které jsou přednastaveny kalibrační křivky. Pro ostatní materiály lze měřit tzv. index vlhkosti, bezrozměrný parametr udávaný v rozmezí 0-4000 úměrný obsahu vlhkosti. Vzhledem k měření materiálů jako polyuretan, polystyrenbeton nebo pórobeton bylo nutné vytvořit vzorky shodné se skladbou, které je možné měřit s různým obsahem hmotnostní vlhkosti. Vzorky vyrobené pro vytvoření kalibrační křivky musí mít rozměr alespoň 250 x 250 mm, aby byly zajištěny podmínky nezkráceného měření.

12.3.3 Kalibrace snímacího zařízení pro mikrovlnnou metodu měření vlhkosti

Nejprve byly z deskových materiálů vyříznuty kvádry o rozměrech 300 x 300 mm odpovídající tloušťce desky. Na tyto desky byla aplikována komerční lepicí silikátová hmota, která byla použita v experimentálním modulu, podle pokynů výrobce.

V případě kalciumpolyuretanové a polyuretanové desky byla lepicí hmota aplikována z obou stran celoplošně.

U polystyrenbetonové desky, která je dle výrobce aplikována na terče, byla lepicí hmota nanášena celoplošně pouze z jedné strany. Druhá strana nebyla opatřena terčí, neboť i následné měření nebude probíhat v místě terče.

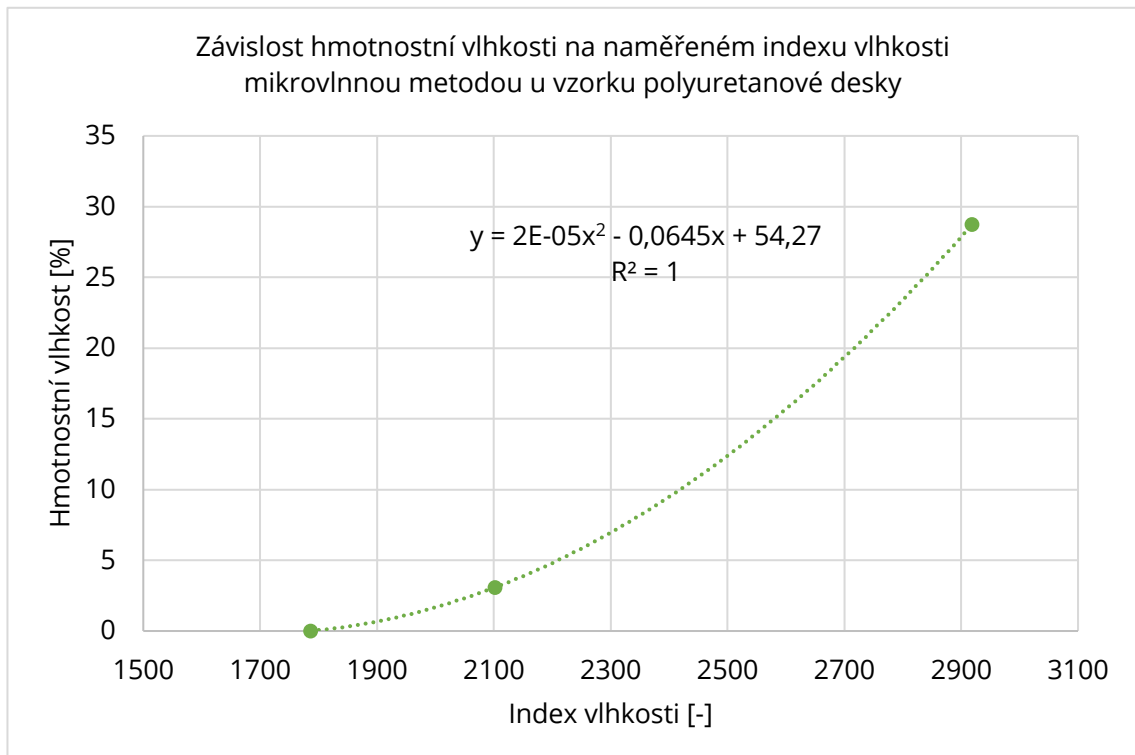
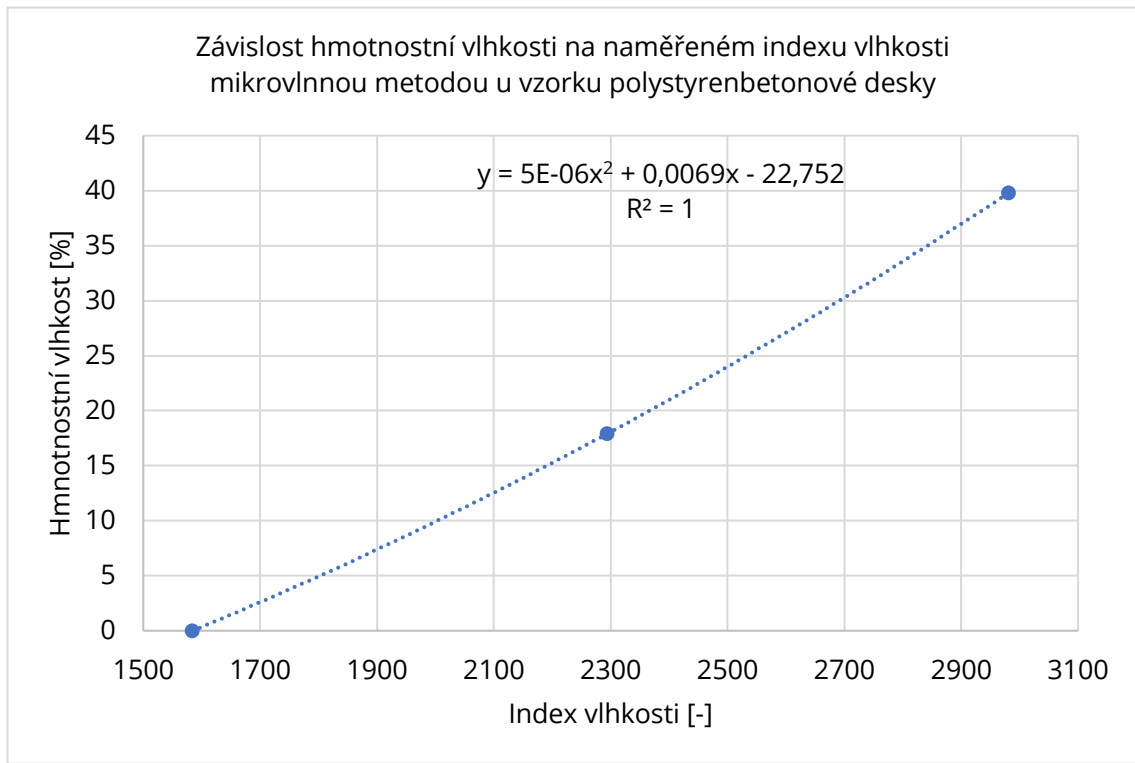
Takto připravené vzorky byly uloženy do vody kvůli úplnému nasycení vodou a poté vysoušeny, aby mohly být během procesu vysoušení váženy a proměřovány mikrovlnnou metodou. Tak byly získány hodnoty indexu vlhkosti v závislosti na hmotnostní vlhkosti dané skladby, a tak mohla být vytvořena kalibrační křivka pro konkrétní skladbu.

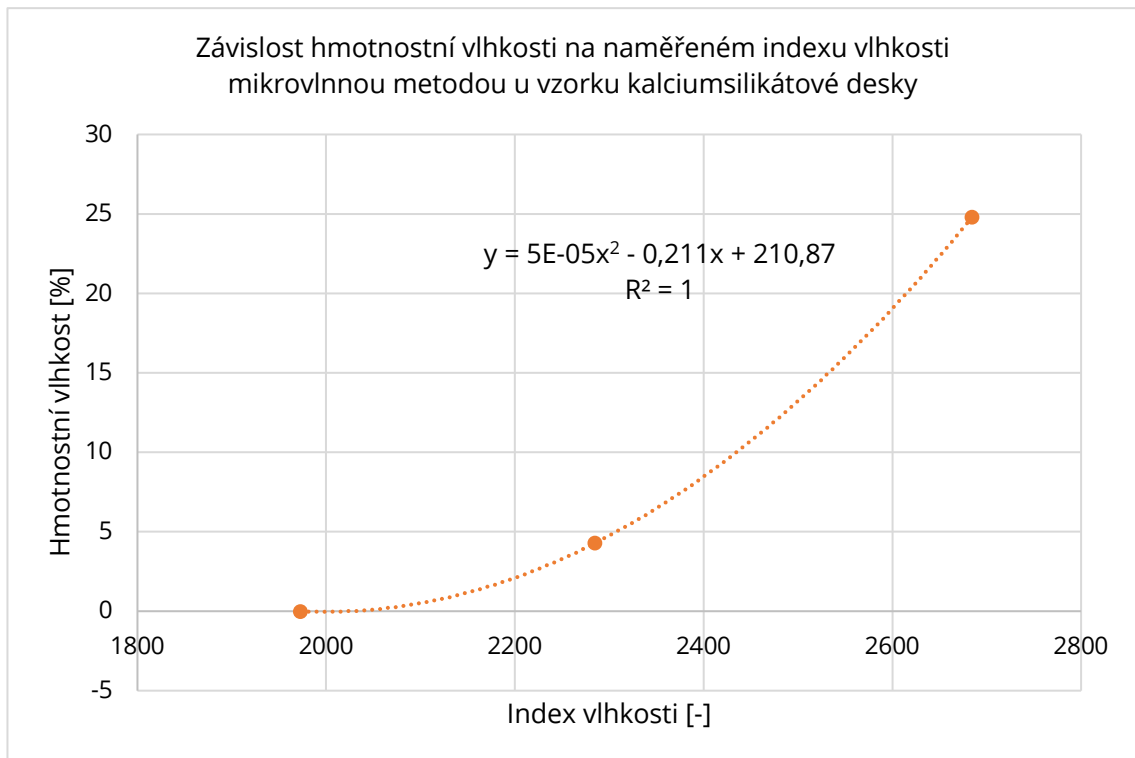


Obrázek 29: Fotografie vzorků pro kalibraci měření mikrovlnnou metodou

Grafické vyhodnocení naměřených hodnot pro jednotlivé vzorky desek je uvedeno níže. Lineární průběh závislosti hmotnostní vlhkosti na naměřeném

indexu vlhkosti nebyl prokázán, proto byla zvolena těsnější funkční závislost vyjádřená polynomem druhého řádu.





Obrázek 30: Graf závislosti indexu vlhkosti na hmotnostní vlhkosti při měření mikrovlnnou metodou

13 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍCH MODELŮ PRO OVĚŘENÍ METOD MĚŘENÍ

Jako experimentální modely byly zvoleny skladby skládající se z vlhkého podkladního zdiva a sanační povrchové úpravy, ve kterém bude nastávat vysychání souvrství pouze jedním směrem přes sanační povrchovou úpravu. V tomto experimentálním modelu byly zabudovány snímače pro měření vlhkosti vybranými metodami. Velikost modelu musí být zvolena tak, aby bylo zamezeno vzájemnému ovlivnění měřících metod.

13.1 VELIKOST MODELU

Plocha souvrství byla přizpůsobena tak, aby se jednotlivá měření vzájemně neovlivňovala; tomuto požadavku vyhovuje minimální rozměr 300 x 400 mm.

13.2 UTĚSNĚNÍ MODELU PRO ZAJIŠTĚNÍ VYSYCHÁNÍ JEDNÍM SMĚREM

V této části návrhu experimentálního modelu bylo nejprve uvažováno použití parotěsné fólie k obalení stran skladby, a tedy k zamezení vysychání modelu všemi směry. Fólie byla vyhodnocena jako nevhodná pro obtížné zajištění její polohy na modelech složených z podkladního zdiva a sanační povrchové úpravy.

Nejvhodnějším řešením se ukázalo použití plastové nádoby (přepravky), do níž bylo umístěno podkladní zdivo a sanační povrchová úprava, která zajistí dostatečnou tuhost modelu a nedojde k porušení souvrství vlivem manipulace.

Plastová nádoba musí splňovat minimální plochu uvedenou v kapitole výše, proto byla zvolena nádoba o rozměrech 410 x 480 mm s výškou 160 mm. Tyto nádoby mají stanovené odchylky od udávaných rozměrů, a jsou mírně kónické. Z toho důvodu bylo nutné uvažovat utěsnění vložených skladeb po jejich obvodu na styku s nádobou, aby bylo zajištěné vysychání pouze horní otevřenou stranou. Pro utěsnění bylo navrženo použít systémovou maltu pro danou sanační povrchovou úpravu.



Obrázek 31: Schéma uspořádání experimentálního modelu vloženého do plastové nádoby (černě), s podkladním zdivem (oranžově), sanační povrchovou úpravou (šedě) a maltou pro utěsnění (fialově)

13.3 PODKLADNÍ ZDIVO

13.3.1 Návrh podkladního zdiva

Podkladní zdivo pro experiment musí splňovat několik požadavků. Po určení optimálních rozměrů bylo nutné zvolit podkladní materiál s nízkou objemovou hmotností z důvodu omezené nosnosti váhy.

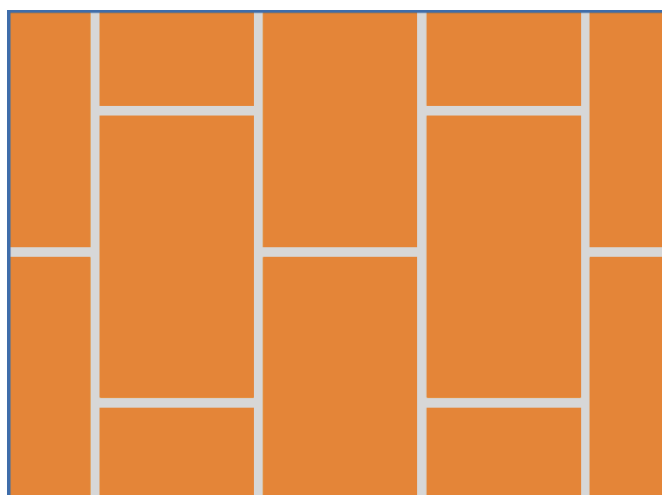
Mezi hlavní požadavky na podkladní zdivo patří:

- nízká objemová hmotnost,
- co nejvíce rovnoměrné vlastnosti v celém průřezu,
- co největší plocha bez spár,
- materiál běžně používaný u starších staveb.

Jako vhodné podkladní zdivo pro experiment se jevily pórobetonové tvárnice, které splňovaly požadavky na co největší plochu bez spár, nízkou objemovou hmotnost, teoreticky i co nejrovnoměrnější vlastnosti v celém průřezu tvárnice, avšak nejedná se o materiál, který by byl typický pro starší objekty. Dutinové cihelné zdivo nebylo vybráno z důvodu nerovnoměrných vlastností v celém průřezu, dutiny by významně ovlivňovaly měření v laboratorních podmínkách a vzhledem k časové náročnosti i pracnosti celého experimentu (bylo by nutné zhotovit více skladeb, případně skladbu o větší ploše pro umístění několika snímačů) bylo vyhodnoceno jako nevhodné.

Po zhodnocení výhod a nevýhod bylo jako podkladní zdivo zvoleno zdivo z cihel plných pálených, které splňuje právě požadavek na materiál běžně používaný u starších objektů a současně požadavek na rovnoměrné vlastnosti v celém průřezu. Zdění podkladního zdiva bylo provedeno na co nejmenší spáru maltou pro tenkovrstvé zdění.

Vzhledem k nerovnostem na povrchu, které jsou dány výrobou cihel plných pálených, je nutné každou cihlu ve skladbě upravit řezáním či broušením ze všech stran.



Obrázek 32: Schéma uspořádání podkladní skladby z CPP při pohledu shora

Pro lepení cihel do skladby bylo voleno mezi PUR pěnou pro zdění a cementovou maltou pro tenkovrstvé zdění. Pěna zajistila vysokou pevnost pro manipulaci, avšak ve většině případů starších zděných objektů nebyla použita. Cementová malta byla zvolena především z důvodu použití při zdění starších objektů a kvůli její kapilární aktivitě.

13.3.2 Výroba podkladního zdiva

Výroba podkladního zdiva probíhala v několika částech, které se skládaly z řezání jednotlivých cihel na požadovaný rozměr, lepení cihel do tvaru navrženého schématem a zbroušení obou povrchů již vyzděného zdiva. Následovalo vlhčení podkladního zdiva pro simulaci vlhkého zdiva v reálné konstrukci.

Řezání jednotlivých cihel bylo provedeno z důvodu nerovností na površích cihel z výroby a kvůli výrobním tolerancím. Na všech podkladních zdivech bylo nutné zajistit stejné rozměry a velikosti spár, aby se co nejvíce eliminovaly možné chyby měření.

V dalším kroku bylo provedeno lepení cihel tenkovrstvou cementovou maltou do požadovaného tvaru skladby. Skladba z upravených cihel před vyzděním je zobrazena na obrázku níže.



Obrázek 33: Fotografie zakrácených cihel připravených k vyždění podkladního zdiva



Obrázek 34: Fotografie vyžděného podkladního zdiva uloženého v plastové nádobě

Po vyždění bylo podkladní zdivo zabroušeno z důvodu nerovného povrchu a zakráceno pro přesné uložení v mírně kónických plastových nádobách.

13.4 SANAČNÍ POVRCHOVÁ ÚPRAVA

Sanační povrchové úpravy byly zvoleny tak, aby byla zároveň ověřena jejich schopnost odvlhčovat zdivo. Při volbě materiálů bylo přihlédnuto k možnosti ověřit jejich vlastnosti v programu WUFI ®, který simuluje vlhkostní šíření v celé skladbě konstrukce. Jedna skladba nebyla opatřena povrchovou úpravou.

Sanační omítka, která byla zvolena jako jedna z povrchových úprav, je hojně používaná sekundární sanační metoda k odvlhčování i odsolování zdiva. Princip sanační omítky spočívá ve zvýšení pórovitosti omítky pomocí velkých pórů a na jejich hydrofobizaci, čímž se radikálně sníží kapilární aktivita. Ve velkých pórech dochází k odpařování vlhkosti do okolního prostředí.

Jako další povrchová úprava byly zvoleny polystyrenbetonové desky. Obvykle se aplikují na stěnu difuzně otevřeným lepidlem, čímž dojde k absorpci

vlhkosti ze zdiva do desek, kde dojde k její redistribuci v pórové struktuře a následně k odpařování vlhkosti do místnosti.

V nabídce programu WUFI se nabízí kapilárně aktivní desky z PUR pěny s příznivými výsledky, kvůli kterým byl tento materiál do výběru zařazen. Díky praktickému ověření výsledků je poté možné ověřit i přesnost programu.

Na českém trhu jsou nabízeny kalciumsilikátové desky, jedná se o tepelně izolační desky s vynikající paropropustností a kapilární aktivitou. Používají se k vnitřní izolaci stěn, což napomáhá k vysoušení zdiva.

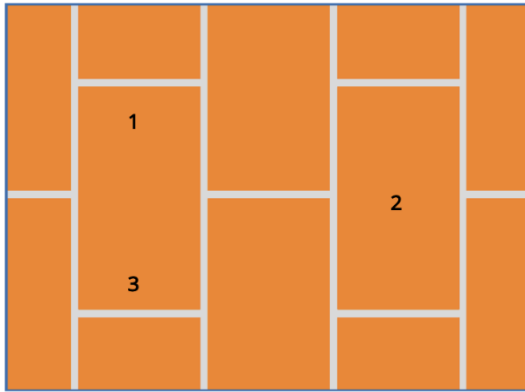
13.5 NÁVRH ROZMÍSTĚNÍ SNÍMAČŮ

Snímače musí být rozmístěny ve skladbě tak, aby se vzájemně neovlivňovalo měření jednotlivými metodami.

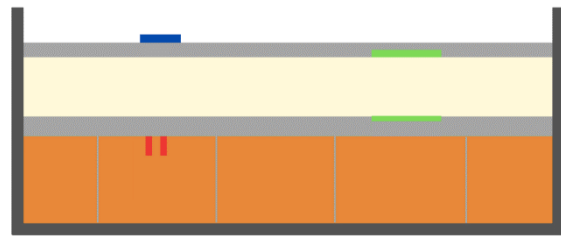
Odporová metoda byla vyhodnocena jako vhodná pro měření vlhkosti v podkladním zdivu v hloubce 10 mm pod povrchovou úpravou.

Kapacitní metoda je vhodná pro měření vlhkosti v povrchových úpravách, zejména v deskových materiálech, které byly popsány v předchozí kapitole. Tato metoda není použita pro měření vlhkosti v sanační omítce z důvodu nedodržení nutné vzdálenosti obou plošných snímačů nad sebou.

Snímač pro měření mikrovlnnou metodou bude přikládán v místě, kde nebude měření ovlivněno výše uvedenými snímači. Tento snímač nebude pevně upevněn do skladby a bude jím měřena skladba do hloubky 40 a 70 mm.



Obrázek 35: Schéma umístění snímačů při pohledu shora na experimentální model pro měření odporovou metodou (1), kapacitní metodou (2), mikrovlnnou metodou (3)



Obrázek 36: Schéma bočního pohledu na proměřovaný vzorek pro umístění odporového snímače (červeně), kapacitního snímače (zeleně), mikrovlnného snímače (modře)

14 VÝROBA EXPERIMENTÁLNÍCH MODELŮ

Po výrobě dílčích částí následovalo sestavení celých modelů včetně umístění snímačů.

14.1 ZATMELENÍ MEZERY MEZI PODKLADNÍM ZDIVEM A NÁDOBOU

Po vložení cihelného podkladního zdiva do plastových nádob vznikla mezi nádobou a podkladním zdivem mezera z důvodu kónického zakřivení a rozměrové tolerance nádob. Tato mezera mohla ovlivnit nežádoucí vysychání zdiva okolo povrchové úpravy, z toho důvodu bylo navrženo zatmelení okrajů zdicí maltou pro zdění podkladního zdiva. Avšak kvůli velmi úzkým mezerám a nesnadné aplikaci bylo nakonec od tohoto způsobu upuštěno. Mezera byla vyplněna polyuretanovým tmelem DEKMASTIC, který zůstal po vytvrzení trvale pružný a odolává povětrnostním vlivům. Po zatmelení byly nádoby se zdivem uloženy do komory s konstantní teplotou.



Obrázek 37: Vzhled zatmelené mezery (spáry) mezi zdivem a nádobou

14.2 INSTALACE ODPOROVÝCH SNÍMAČŮ

Po umístění zatmeleného podkladního zdiva do klimakomory následovalo umístění snímačů pro měření odporovou metodou.

Pro připravené snímače byly předvrtány otvory o hloubce 10 mm. Do těchto otvorů bylo pro lepší kontakt nanášeno elektrovedivé lepidlo. Po nanášení lepidla byly do otvorů vloženy elektrody.



Obrázek 38: Ukázka aplikace elektrovedivého lepidla do předvrtaných otvorů před vložením odporových snímačů opatřených elektroizolační páskou

14.3 ZVLHČENÍ PODKLADU

Po umístění odporových snímačů následovala technologická přestávka pro vytvrzení elektrovedivého lepidla. Poté následovalo vlhčení cihelného zdiva. Kvůli epidemiologické situaci a s tím souvisejícímu uzavření škol nebylo možné zjistit obsah vlhkosti ve zdivu sušením v sušárně. Proto bylo navrženo zvlhčit zdivo o 10 % hmotnostní vlhkosti. Zdivo bylo umístěno 4 dny v klimakomoře a poté bylo zváženo.

Množství vody pro vlhčení bylo vypočítáno z aktuální hmotnosti a voda byla aplikována do zdiva pomocí rozprašovače.

Po vnesení vody do zdiva byly nádoby uzavřeny parotěsnou folií, aby došlo k rovnoměrnému rozprostření vlhkosti v celém podkladu a nedošlo k jeho vysychání. Nádoby byly dva dny umístěny v klimakomoře takto utěsněné.

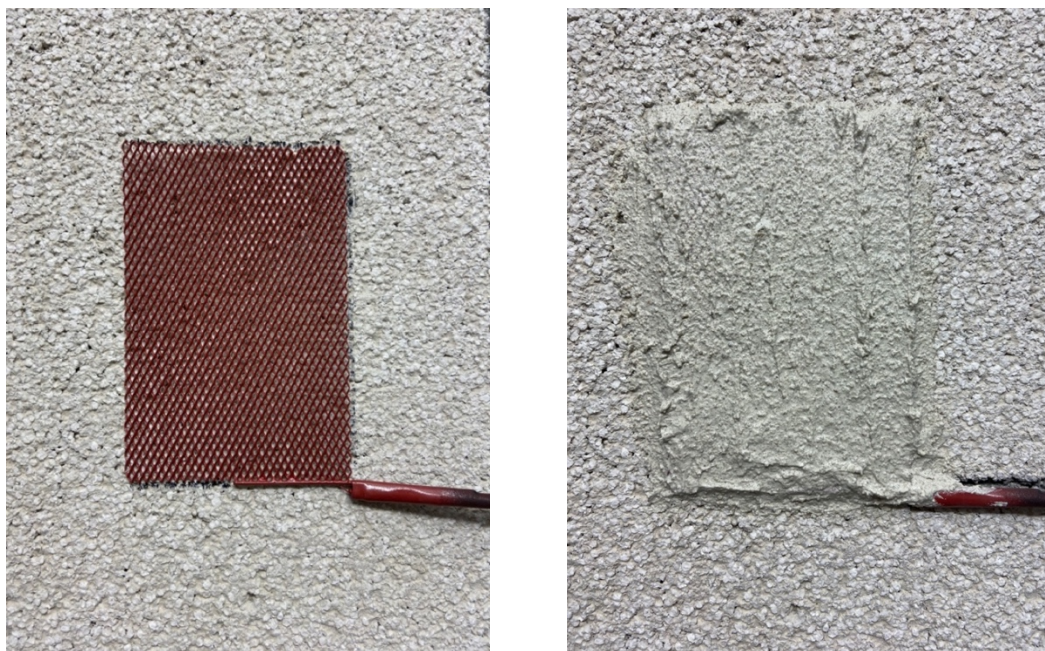


Obrázek 39: Fotografie zvlhčeného podkladního zdiva ošetřeného proti vysychání parotěsnou folií

14.4 INSTALACE KAPACITNÍHO SNÍMAČE

Předtím, než bylo možné na zvlhčený podklad aplikovat sanační povrchovou úpravu, resp. desky z polystyrenbetonu, kalciumsilikátu a polyuretanu, bylo nutné na tyto desky přesně umístit kapacitní snímač, který se bude nacházet na spodní straně desky (blíže k podkladnímu zdivu). V případě umístění snímačů až při aplikaci lepicí malty by mohlo dojít k jejich posunutí a tím k nepřesným výsledkům měření.

Instalace kapacitních snímačů na desky byla provedena pomocí tenké vrstvy systémové lepicí malty předepsané výrobcem.



Obrázek 40: Vzhled kapacitního snímače umístěného na spodní straně polystyrenbetonové desky tenkou vrstvou systémového lepidla

14.5 APLIKACE SANAČNÍCH POVRCHOVÝCH ÚPRAV

Sanační povrchové úpravy byly aplikovány po instalaci odporových snímačů a po zvlhčení podkladního zdiva. Před samotnou aplikací byla provedena kontrola přídržnosti odporových snímačů a jednotlivé skladby byly zváženy.

Snímače pro měření vlhkosti odporovou metodou, resp. svorkovnice, zasahují svou velikostí z podkladního zdiva i do dalších vrstev skladby. Z tohoto důvodu byly do desek vytvořeny nezbytně hluboké prohlubně tak, aby bylo možné použití pouze tenké vrstvy lepicí hmoty o tloušťce předepsané výrobcem.

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, jedna skladba zůstala bez povrchové úpravy pro zjištění účinnosti sekundárních sanačních metod.

14.5.1 Aplikace polystyrenbetonové desky

Polystyrenbetonové desky jsou dle výrobce lepeny k podkladnímu zdivu difuzně otevřeným lepidlem, které je nanášeno na terče. V ploše stěny

je těchto terčů méně než nevyplněných míst, z toho důvodu bylo navrženo měřit právě v mezeře, kde nedochází ke kapilárnímu vedení, ale pouze k difúzi.

Deska s předem instalovaným snímačem (viz předchozí kapitola) byla umístěna na lepidlem vytvořený rámeček po obvodu skladby. Po instalaci desky na rámeček bylo na desku celoplošně aplikováno difuzně otevřené lepidlo a zabudován horní snímač kapacitní metody.

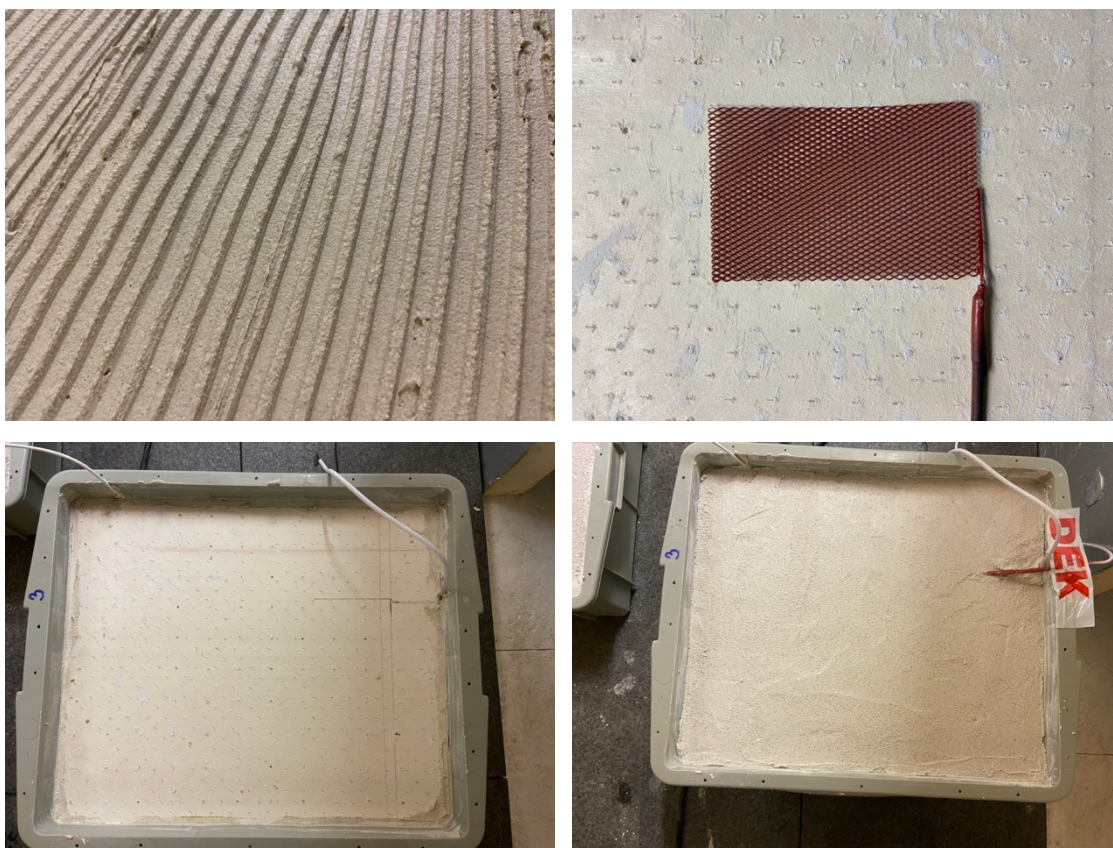


Obrázek 41: Fotografie z výroby experimentálního modelu s povrchovou úpravou z polystyrenbetonové desky a difuzně otevřeného lepidla

14.5.2 Aplikace polyuretanové desky

Polyuretanová deska se aplikuje na podklad celoplošně nanášenou systémovou lepicí maltou, která má zajistit kapilární vedení vlhkosti z podkladu do desky.

Na desku s přilepeným snímačem byla dle pokynů výrobce nanášena lepicí malta ocelovým zubovým hladítkem. Následovalo nanesení systémové omítky regulující klima z horní strany desky a instalace horního snímače do vrstvy omítky.



Obrázek 42: Fotografie z výroby experimentálního modelu s povrchovou úpravou z polyuretanové desky a systémového lepidla a omítky

14.5.3 Aplikace kalciumsilikátové desky

Kalciumsilikátová deska se aplikuje na podklad celoplošně nanášenou systémovou lehkou minerální maltou, která by měla zajistit kapilární vedení vlhkosti z podkladu do desky.

Na desku s přilepeným snímačem byla dle pokynů výrobce nanášena minerální malta ocelovým zubovým hladítkem. Po okrajích desky vznikla mezi deskou a plastovou nádobou mezera, která byla vyplněna maltou. Na horní

plochu desky byla nanášena minerální malta, do které byl umístěn kapacitní snímač.



Obrázek 43: Fotografie z výroby experimentálního modelu s povrchovou úpravou z kalciumsilikátové desky a lehké minerální malty

14.5.4 Aplikace sanační omítky

Sanační omítka byla dle pokynů výrobce nanášena jako dvouvrstvá s požadavkem celkové tloušťky 20-30 mm. Na první vrstvu o tloušťce 10 mm se po zavadnutí (5 hodinách) nanášela druhá vrstva o tloušťce zhruba 20 mm. Při výrobě byly dodrženy technologické postupy dané výrobcem. Mísení proběhlo podle pokynů výrobce tzv. unimixerem s pomalými otáčkami 3-4 minuty.



Obrázek 44: Fotografie z výroby experimentálního modelu s dvouvrstvou sanační omítkou

15 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Etapa experimentálního měření následovala po vytvoření experimentálních modelů s instalovanými snímači.

Odporovou metodou byla vlhkost snímána v čase od zabudování snímačů do podkladního zdiva. Zvýšení naměřené hmotnostní vlhkosti je tak možné sledovat i v momentě zvlhčení zdiva a po aplikaci sanačních povrchových úprav

Kapacitní a mikrovlnnou metodou bylo možné experimentální modely měřit až po vytvrdnutí povrchu, aby nedošlo k posunu kapacitních snímačů a k porušení povrchu modelu po přiložení mikrovlnné sondy.

Pro měření mikrovlnnou metodou, kterou se snímá konkrétní místo na stěně modelu, byla na experimentální model naznačena přesná místa měření, aby bylo zajištěno měření v jednom místě. Mikrovlnná metoda funguje přesněji na hladkém rovném povrchu, k čemuž bylo při výběru místa měření přihlédnuto.

15.1 NAMĚŘENÉ HODNOTY

V této části jsou uvedeny naměřené hodnoty jednotlivých měřicích metod naměřené na experimentálních modelech.

15.1.1 Naměřené hodnoty gravimetrickou metodou

Experimentální modely byly měřeny gravimetrickou metodou před a po vlhčení, po aplikaci sanačních povrchových úprav a v průběhu vysychání modelu. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce:

Tabulka 4: Naměřené hodnoty experimentálních modelů gravimetrickou metodou

Čas (den) měření	Experimentální model				
	Podkladní zdivo	Podkladní zdivo + polystyrenbetonová deska	Podkladní zdivo + polyuretanová deska	Podkladní zdivo + kalciumsilikátová deska	Podkladní zdivo + sanační omítka
	Hmotnost [kg]				
Hmotnost podkladního zdiva před vlhčením	20,215	19,730	19,540	19,440	19,735
Hmotnost podkladního zdiva po vlhčení	22,055	21,525	21,315	21,205	21,530
Hmotnost po aplikaci povrchové úpravy	22,055	27,065	24,250	25,145	25,550
1.	21,915	26,955	24,130	25,030	25,415
2.	21,780	26,945	24,090	24,970	25,345
3.	21,645	26,900	24,055	24,890	25,305
4.	21,585	26,900	24,055	24,855	25,270
5.	21,500	26,900	24,050	24,820	25,240
6.	21,410	26,900	24,050	24,800	25,230
7.	21,340	26,895	24,040	24,760	25,210
8.	21,270	26,885	24,040	24,750	25,180
9.	21,195	26,880	24,040	24,735	25,135
10.	21,100	26,865	24,030	24,715	25,115
11.	21,045	26,865	24,025	24,665	25,085
12.	20,985	26,855	24,025	24,665	25,065
13.	20,960	26,845	24,025	24,645	25,055
14.	20,915	26,845	24,025	24,620	25,035
15.	20,865	26,830	24,025	24,615	25,020
16.	20,890	26,830	23,990	24,580	25,005

15.1.2 Naměřené hodnoty odporovou metodou měření vlhkosti

Odporová metoda byla použita pro měření vlhkosti v podkladním zdivu experimentálních modelů. Hodnoty uvedené v následující tabulce jsou naměřeny zařízením pro měření vlhkosti odporovou metodou. Toto zařízení je určeno pro měření dřeva, proto není možné vyhodnotit naměřenou hodnotu jako vlhkost cihelného zdiva. Pro vyhodnocení naměřené vlhkosti byla použita kalibrační rovnice, sestavena v kapitole 12.1.4.

Tabulka 5: Naměřené hodnoty odporovou metodou měření vlhkosti, pozn. Dnem měření „0“ je označen čas vnesení vody do podkladního zdiva (vlhčení)

Den měření	Experimentální model				
	Podkladní zdivo	Podkladní zdivo + polystyrenbetonová deska	Podkladní zdivo + polyuretanová deska	Podkladní zdivo + kalciumsilikátová deska	Podkladní zdivo + sanační omítka
	Naměřená hmotnostní vlhkost (měřená hodnota pro dřevo) [%]				
0.	106,32	108,00	107,20	107,41	103,24
1.	106,62	102,60	115,25	75,07	96,31
2.	103,3	101,17	114,92	72,94	91,90
3.	96,53	101,61	116,61	71,58	87,94
4.	80,98	100,89	119,49	69,84	84,26
5.	70,30	99,12	120,11	68,49	80,30
6.	59,87	102,16	119,33	67,94	79,20
7.	54,79	100,61	119,46	66,74	73,74
8.	53,71	101,16	118,93	65,89	69,36
9.	46,53	100,97	119,57	65,42	65,26
10.	40,58	100,77	118,64	64,31	59,18
11.	36,86	101,36	118,2	63,66	54,54
12.	33,34	101,43	118,33	61,96	51,65
13.	33,31	102,16	118,44	62,75	49,16
14.	30,53	102,89	119,61	61,86	45,70
15.	31,05	102,85	120,69	60,95	44,05
16.	26,94	103,37	120,69	59,57	41,65

15.1.3 Naměřené hodnoty kapacitní metodou měření vlhkosti

Kapacitní metoda měření vlhkosti byla použita pro měření vlhkosti v sanační povrchové úpravě experimentálního modelu. Rozsah naměřených hodnot měřicího zařízení je od 0 do 24,4 pF. I přes prvotní ověření velikosti snímačů (kapitola 12.2.2) se ve dvou experimentálních modelech hodnota kapacity nesnížila z maximální možné naměřené hodnoty 24,4 pF. Naměřené hodnoty kapacity jsou tedy uvedeny pouze pro model, ve kterém došlo ke snížení kapacity z maximální indikované hodnoty.

Tabulka 6: Naměřené hodnoty kapacitní metodou měření vlhkosti

Experimentální model	
Podkladní zdivo + polyuretanová deska	
Den měření	Kapacita [pF]
1.	24,4 (maximální)
2.	24,4 (maximální)
3.	24,4 (maximální)
4.	23,2542
5.	20,3387
6.	19,0190
7.	18,3634
8.	17,6628
9.	16,7074
10.	12,0345
11.	11,6766
12.	11,9873
13.	15,7106
14.	15,2813
15.	15,6858
16.	15,1722

15.1.4 Naměřené hodnoty mikrovlnnou metodou měření vlhkosti

V nastavení přístroje pro měření vlhkosti mikrovlnnou metodou se nachází několik materiálů, po jejichž výběru přístroj zobrazí obsah vlhkosti daného materiálu (využívá se výrobcem stanovené kalibrační křivky).

V experimentálních modelech jsou však použity materiály, které v nabídce měřicího zařízení nejsou, proto byl měřen index vlhkosti pro výpočet vlhkosti po sestavení kalibrační křivky.

Tabulka 7: Naměřené hodnoty indexu vlhkosti mikrovlnnou metodou v experimentálních modelech

Den měření	Experimentální model		
	Podkladní zdivo + polystyrenbetonová deska	Podkladní zdivo + polyuretanová deska	Podkladní zdivo + kalciumsilikátová deska
	Index vlhkosti [-]	Index vlhkosti [-]	Index vlhkosti [-]
1.	2180	1950	2355
2.	2068	1945	2346
3.	2033	1945	2312
4.	2070	1943	2306
5.	2004	1920	2295
6.	1986	1911	2263
7.	2005	1892	2230
8.	2054	1911	2259
9.	2064	1927	2257
10.	2033	1845	2214
11.	2072	1859	2199
12.	2105	1972	2259
13.	2009	1888	2222
14.	2021	1824	2264
15.	2187	1896	2203
16.	2234	1974	2247

Pro cihelné zdivo bylo v nabídce přístroje nastavena poloha „Mauerziegel“, cihelné zdivo, a pro sanační omítku byla nastavena možnost „Zementestrich“, cementový potěr. Hodnoty indexu vlhkosti a hmotnostní vlhkosti naměřené mikrovlnnou metodou jsou uvedeny v tabulkách níže.

Tabulka 8: Naměřené hodnoty hmotnostní vlhkosti mikrovlnnou metodou v experimentálních modelech

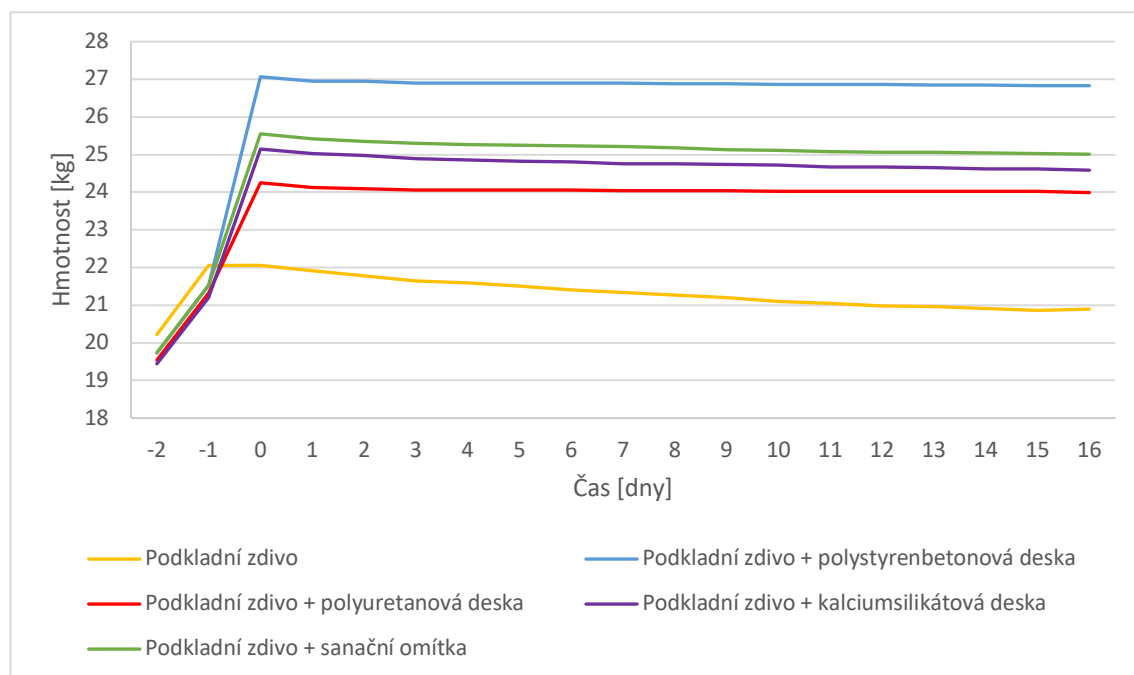
Den měření	Experimentální model	
	Podkladní zdivo	Podkladní zdivo + sanační omítky
	Hmotnostní vlhkost [%]	Hmotnostní vlhkost [%]
1.	13,40	7,45
2.	10,40	6,55
3.	7,50	6,50
4.	6,20	6,75
5.	5,70	6,35
6.	5,60	6,20
7.	6,30	6,95
8.	5,30	7,00
9.	5,10	7,00
10.	3,90	6,80
11.	5,20	6,25
12.	5,90	6,45
13.	5,20	6,15
14.	4,90	5,45
15.	5,70	6,15
16.	5,90	6,70

16 VYHODNOCENÍ

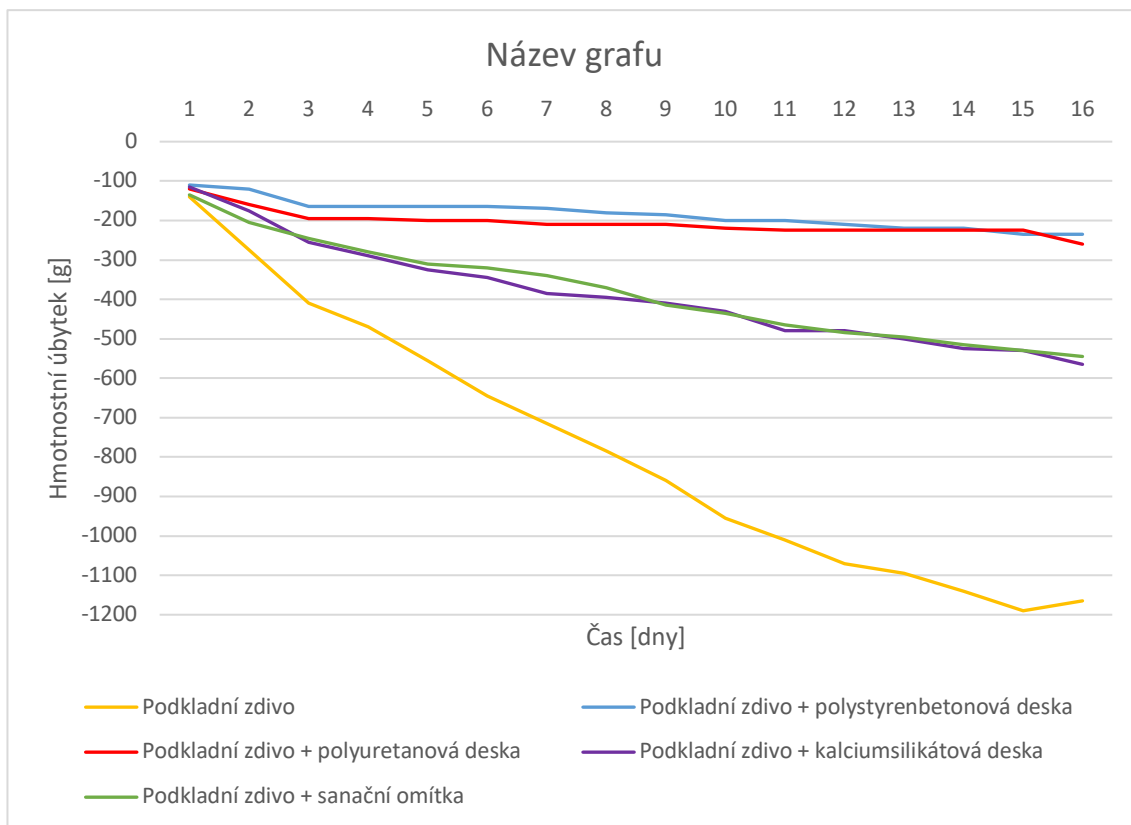
Naměřené hodnoty odporovou metodou a hodnoty indexu vlhkosti naměřené mikrovlnnou metodou bylo pro vyhodnocení nutné přepočítat podle kalibračních křivek, které jsou uvedeny v předchozích kapitolách.

16.1 VYHODNOCENÍ HODNOT NAMĚŘENÝCH GRAVIMETRICKOU METODOU

V grafu níže je zobrazena hmotnost experimentálních modelů ve dnech. První hodnotou je hmotnost pouze podkladního zdiva (na vodorovné ose -2), následuje hodnota hmotnosti podkladního zdiva po zvlhčení (-1), hodnota hmotnosti po aplikaci sanačních povrchových úprav (0) a hodnota hmotnosti v průběhu vysychání experimentálních modelů.



Obrázek 45: Graf průběhu hmotnosti vzorků experimentálních modelů v čase



Obrázek 46: Graf hmotnostních úbytků experimentálních modelů v čase

Z grafického vyhodnocení je patrné, že největší hmotnostní úbytek nastal v experimentálním modelu s podkladním zdívem bez povrchové úpravy.

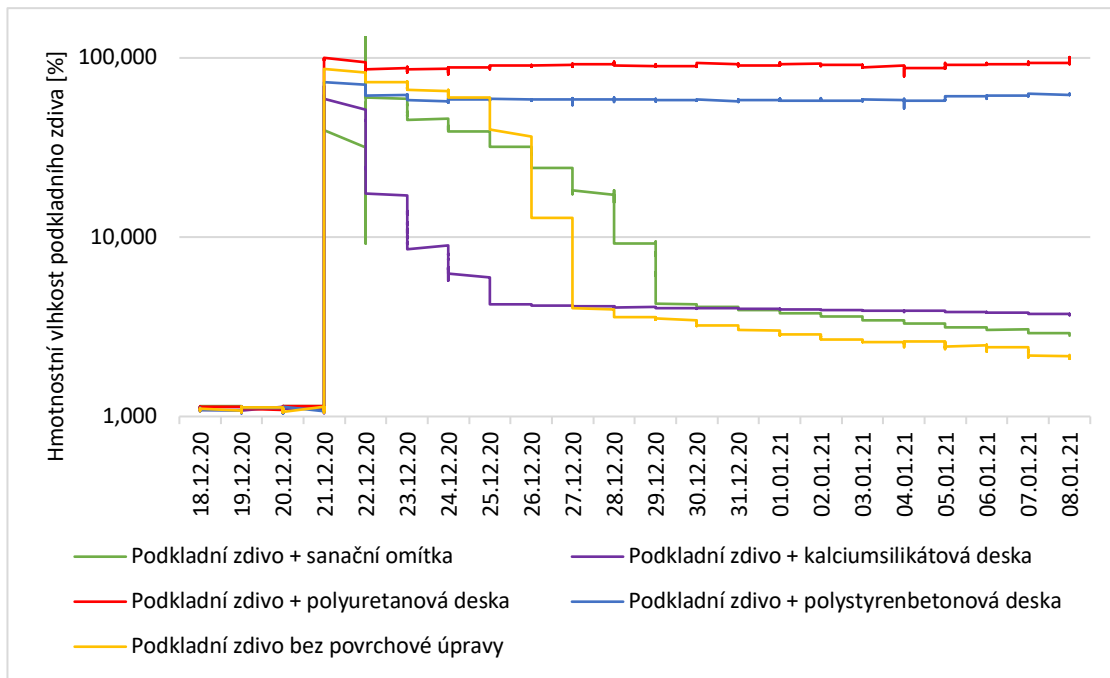
16.2 VYHODNOCENÍ HODNOT NAMĚŘENÝCH ODPOROVOU METODOU

Pro výpočet byl použit vytvořený kalibrační vztah z kapitoly 12.1.4. Vlhkost byla ve všech experimentálních modelech měřena v hloubce 10 mm podkladního zdiva.

Tabulka 9: Vypočítané hodnoty hmotnostní vlhkosti pro podkladní zdivo v experimentálních modelech, pozn. Dnem měření „0“ je označen čas vnesení vody do podkladního zdiva (vlhčení)

Den měření	Experimentální model				
	Podkladní zdivo	Podkladní zdivo + polystyrenbetono vá deska	Podkladní zdivo + polyuretanová deska	Podkladní zdivo + kalciumsilikátová deska	Podkladní zdivo + sanační omítka
	Dopočtený obsah hmotnostní vlhkosti [%]				
0.	67,7	70,7	69,3	69,6	62,0
1.	68,2	60,9	83,9	10,7	49,4
2.	62,1	58,3	83,3	6,8	41,4
3.	49,8	59,1	86,4	4,3	34,1
4.	21,4	57,8	91,7	4,2	27,4
5.	4,2	54,5	92,8	4,1	20,2
6.	3,7	60,1	91,4	4,1	18,2
7.	3,5	57,2	91,6	4,0	8,2
8.	3,4	58,2	90,7	4,0	4,2
9.	3,1	57,9	91,8	4,0	4,0
10.	2,8	57,5	90,1	3,9	3,7
11.	2,6	58,6	89,3	3,9	3,5
12.	2,4	58,7	89,6	3,8	3,3
13.	2,4	60,1	89,8	3,9	3,2
14.	2,3	61,4	91,9	3,8	3,0
15.	2,3	61,3	93,9	3,8	3,0
16.	2,1	62,3	93,9	3,7	2,8

V tabulce nejsou uvedeny všechny hodnoty z měření z důvodu velkého množství hodnot, avšak jsou vyobrazeny na následujícím grafu.



Obrázek 47: Vypočítaná hmotnostní vlhkost podkladního zdiva ve všech experimentálních modelech zobrazená v čase

Ve výše uvedeném grafu lze sledovat celkový průběh hmotnostních vlhkostí všech experimentálních modelů v čase. Počáteční hodnoty (od 18. 12.) udávají hmotnostní vlhkost nezvlhčeného cihelného podkladního zdiva po instalaci elektrod pro měření odporovou metodou (kapitola 14.2). Následně bylo podkladní zdivo zvlhčeno o 10 % hmotnostní vlhkosti a tento prudký nárůst je možné sledovat 21. 12. Následující den po vlhčení byly na podkladní zdivo aplikovány sanační povrchové úpravy (jeden experimentální model obsahuje pouze zvlhčené zdivo, v grafickém vyjádření žlutě). V případě sanační omítky a kalciumpolyuretanové nebo polyuretanové desky byla aplikace (lepení) provedena celoplošně a došlo ke zvýšení vlhkosti v podkladním zdivu. Polystyrenbetonová deska nebyla lepena celoplošně a nedošlo k výraznému zvýšení hmotnostní vlhkosti v podkladním zdivu. Po zvlhčení zdiva došlo k prudkému nárůstu na vysoké hodnoty hmotnostní vlhkosti. Tento stav byl zapříčiněn kontaktem elektrod s vrstvou vody, která

je obklopila a došlo tím, k měření hmotnostních vlhkostí, které nelze považovat za vypovídající.

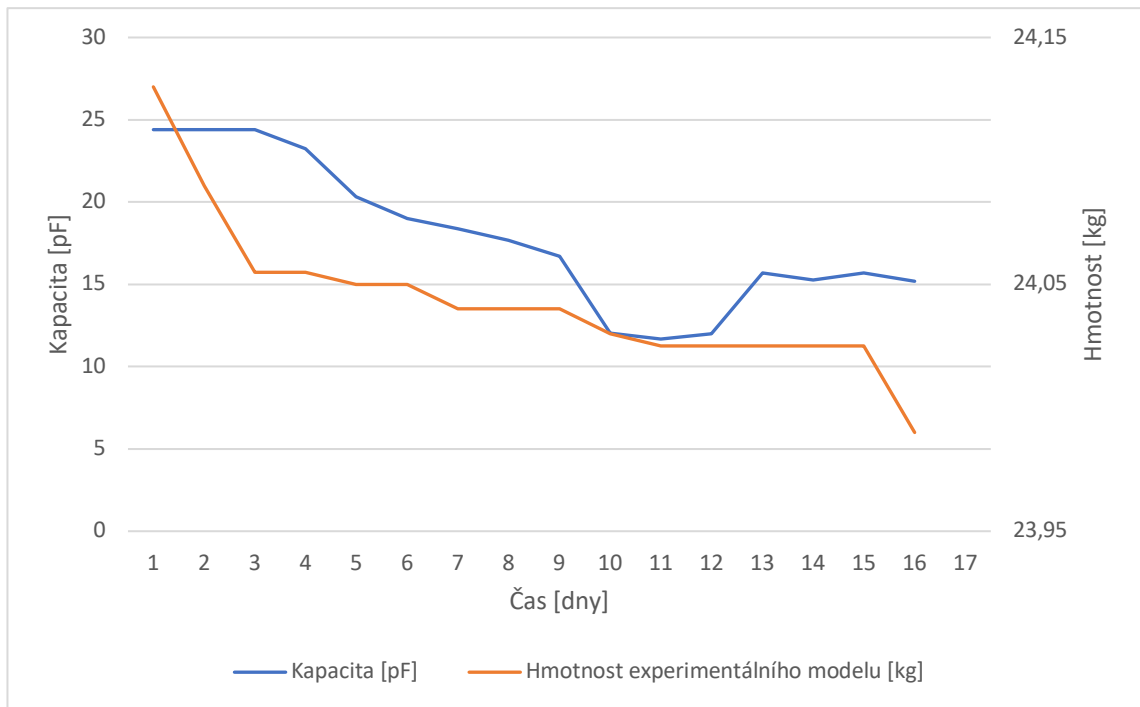
V experimentálních modelech obsahujících polystyrenbetonovou nebo polyuretanovou desku tento stav přetrvává i po šestnácti dnech měření. V experimentálním modelu s polyuretanovou deskou pravděpodobně nedochází k vysychání podkladního zdiva z důvodu blokace vlhkosti v podkladu použitou deskou. V modelu s polystyrenbetonovou deskou může být nevysychání podkladního zdiva způsobeno lepením desky na terče, čímž je omezeno šíření kapalné fáze a dochází převážně k difuzi z vlhkého podkladního zdiva do desky, což je mnohonásobně pomalejší proces.

Bylo předpokládáno, že u podkladního zdiva bez jakékoliv povrchové úpravy bude docházet k nejrychlejšímu vysychání (ke snižování hmotnostní vlhkosti) vzhledem k nevnesení další vlhkosti, záměsové vody, do modelu, jako je tomu u použití lepicích malt u ostatních modelů, a tento předpoklad dle výsledků splněn byl.

16.3 VYHODNOCENÍ HODNOT NAMĚŘENÝCH KAPACITNÍ METODOU

Kapacitní metodou byla měřena kapacita v sanačních povrchových úpravách tří experimentálních modelů, ale jak již bylo zmíněno v předešlých kapitolách, pouze u experimentálního modelu obsahující polyuretanovou desku došlo ke snížení kapacity z maximální hodnoty 24,4 pF.

Vyhodnocení naměřených hodnot pro určení hmotnostní vlhkosti nebylo kvůli časové náročnosti provedeno.



Obrázek 48: Grafické vyjádření hmotnosti vzorku a naměřené kapacity experimentálního modelu cihelného zdiva opatřeného polyuretanovou deskou

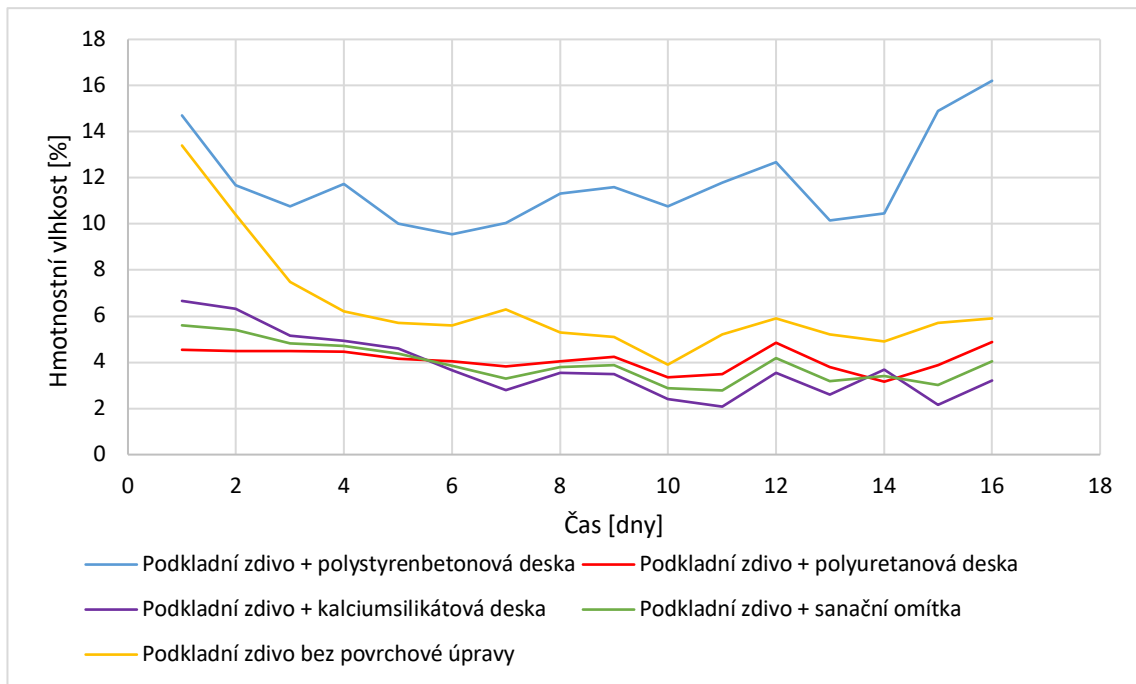
16.4 VYHODNOCENÍ HODNOT NAMĚŘENÝCH MIKROVLNNOU METODOU

Hodnoty hmotnostní vlhkosti naměřené mikrovlnnou metodou pro cihelné zdivo a sanační omítku nebylo pro hodnocení přepočítávat, neboť měřicí zařízení stanovuje obsah vlhkosti podle integrované kalibrační křivky daného materiálu.

Pro výpočet hmotnostní vlhkosti z naměřeného indexu vlhkosti byly použity vytvořené kalibrační rovnice (kapitola 12.3.3) a výsledky jsou uvedeny v tabulce níže:

Tabulka 10: Vypočítané hodnoty hmotnostní vlhkosti z indexu vlhkosti naměřeného mikrovlnnou metodou

Den měření	Experimentální model		
	Podkladní zdivo + polystyrenbetonová deska	Podkladní zdivo + polyuretanová deska	Podkladní zdivo + kalciumsilikátová deska
	Hmotnostní vlhkost [%]	Hmotnostní vlhkost [%]	Hmotnostní vlhkost [%]
1.	14,709	4,5447	6,662
2.	11,688	4,4777	6,328
3.	10,769	4,4777	5,143
4.	11,741	4,4512	4,946
5.	10,015	4,1577	4,596
6.	9,552	4,0487	3,649
7.	10,041	3,8290	2,786
8.	11,319	4,0487	3,538
9.	11,582	4,2448	3,484
10.	10,769	3,3477	2,409
11.	11,794	3,4819	2,080
12.	12,673	4,8514	3,538
13.	10,145	3,7846	2,594
14.	10,456	3,1613	3,677
15.	14,901	3,8741	2,166
16.	16,207	4,8803	3,216



Obrázek 49: Graf závislosti průběhu hmotnostní vlhkosti naměřené mikrovlnnou metodou v čase

Hmotnostní vlhkost naměřená mikrovlnnou metodou se výrazněji snižovala u experimentálního modelu obsahujícího pouze podkladní zdivo a u modelu se sanační omítkou. V těchto experimentálních modelech, na rozdíl od experimentálních modelů obsahující deskové povrchové úpravy, není nijak zabráněno vysychání do okolního prostředí, proto je snížení hmotnostní vlhkosti předpokládáno.

U experimentálních modelů obsahující deskové povrchové úpravy během 16 dnů měření pravděpodobně dochází pouze k odpaření záměsové vody obsažené v omítce na povrchu modelu.

Aby mohlo být posouzeno, zda dochází k šíření vlhkosti z podkladního zdiva do povrchové úpravy a poté do okolního prostředí z modelu, musely být zavedeny předpoklady. Šířením vlhkosti v průřezu experimentálních modelů se zabývá následující kapitola.

16.5 POSOUZENÍ METOD MĚŘENÍ PRO POUŽITÍ V RŮZNÝCH KONSTRUKCÍCH

Pro určení vhodné měřicí metody pro konkrétní skladbu konstrukce bylo nutné zabývat se teoretickým posouzením šíření vlhkosti v experimentálních modelech.

16.5.1 Posouzení metod pro měření obsahu vlhkosti v cihelném zdivu

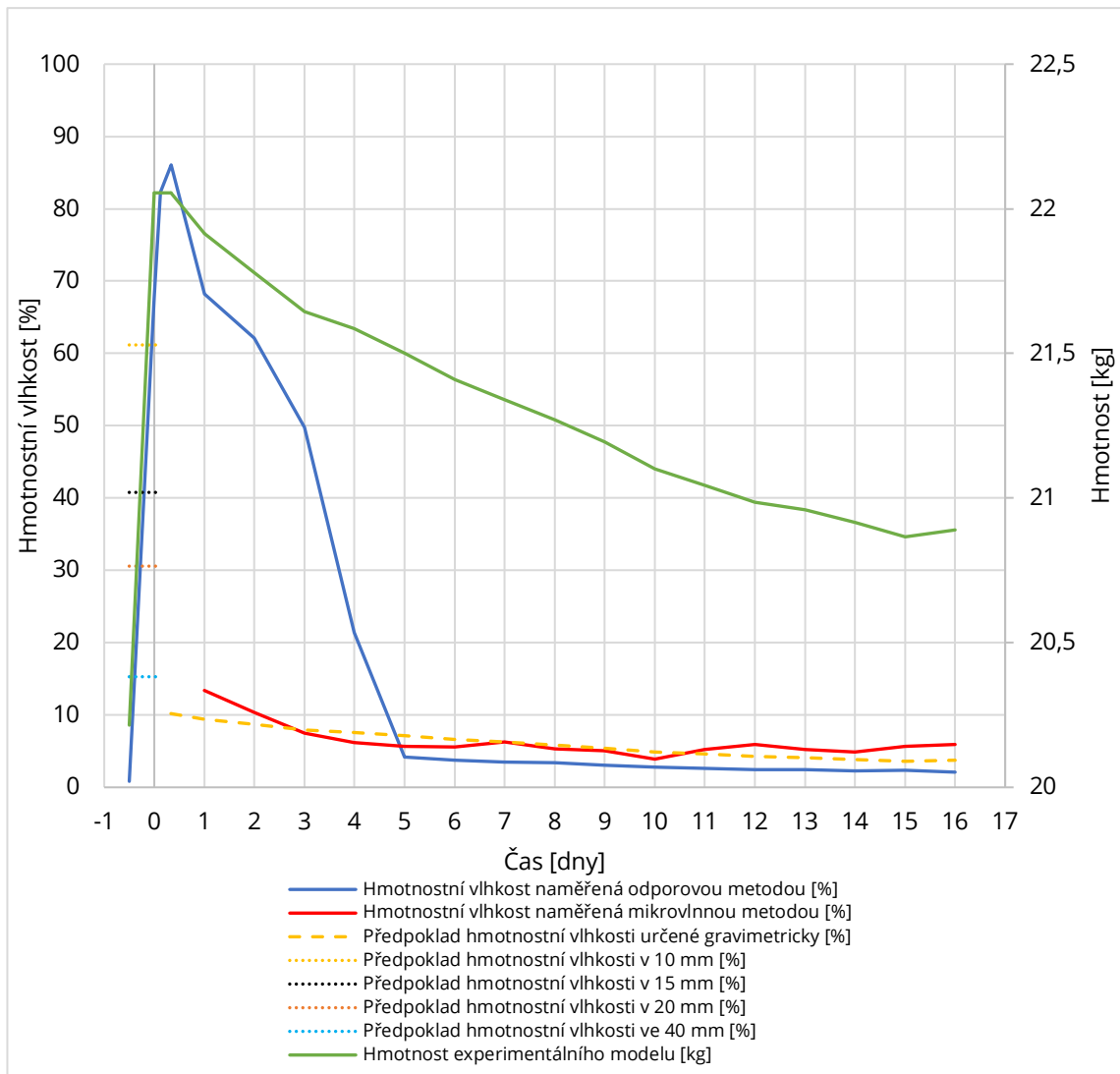
Pro měření obsahu vlhkosti v cihelném zdivu se jeví jako nejvhodnější metoda odporová a mikrovlnná.

Odporová metoda měření vlhkosti je však méně citlivá pro nízké obsahy vlhkosti v konstrukci, podle výpočtu je mezní hodnotou 4,3 % hmotnostní vlhkosti cihelného zdiva. Nepřesnost u měření vlhkosti odporovou metodou nastává, když jsou elektrody v přímém kontaktu s kapalnou vlhkostí a dojde k zobrazování nevyovídajících hodnot.

Pro zjištění potenciálu metod měření bylo vhodné zavést předpoklad, který bude zobrazovat skutečné množství vody v experimentálním modelu v průběhu měření v závislosti na hmotnosti podkladního zdiva v suchém stavu. Tento předpoklad je uveden v grafu níže jako „předpoklad hmotnostní vlhkosti určené gravimetricky“.

Výše uvedený předpoklad hmotnostní vlhkosti určené gravimetricky je však uvažován v celé tloušťce zdiva, a pro kontrolu spolehlivosti měření mikrovlnnou a odporovou metodou měření vlhkosti byl proveden přepočít hmotnostní vlhkosti z celé tloušťky zdiva na hmotnostní vlhkost v různých tloušťkách experimentálního modelu. V grafu níže jsou předpoklady hmotnostní vlhkosti vztaženy k předpokládané tloušťce pro vlhčení.

V grafickém vyhodnocení naměřených hodnot, experimentálního modelu obsahující pouze cihelné zdivo, jsou vyznačeny i výše uvedené předpoklady.



Obrázek 50: Graf naměřených hodnot hmotnostních vlhkostí naměřené odporovou a mikrovlnnou metodou měření vlhkosti, celkové hmotnosti experimentálního modelu a výše uvedených předpokladů o rozložení vlhkosti

Dle grafu uvedeného výše lze vyvodit, že předpoklad hmotnostní vlhkosti v 10 mm téměř odpovídá hmotnostní vlhkosti zjištěné odporovou metodou. Dále lze zjistit, že hmotnostní vlhkost naměřená mikrovlnnou metodou v hloubce 40 mm téměř odpovídá předpokladu obsahu vlhkosti ve 40 mm. Použité metody měření lze tedy považovat za spolehlivé při porovnání předpokládaných a skutečně naměřených vlhkostí v experimentálním modelu cihelného zdiva.

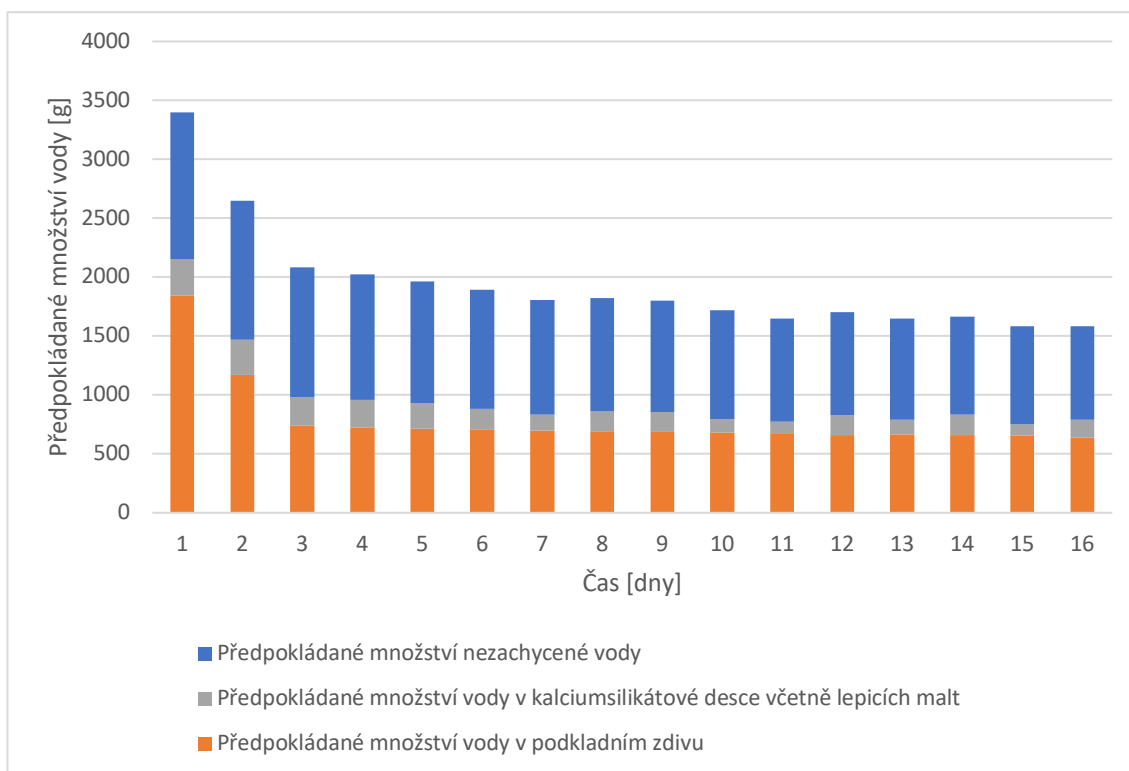
16.5.2 Posouzení metod pro měření obsahu vlhkosti v cihelném zdivu s obkladem

Z naměřených hodnot je nyní možné vyhodnotit, které metody měření vlhkosti je vhodné použít v sendvičových konstrukcích.

U naměřených hmotnostních vlhkostí podkladního zdiva odporovou metodou je patrné zvýšení hmotnostní vlhkosti. Jedná se o lokální zvýšení hmotnostní vlhkosti v oblasti elektrod, ke kterému došlo vlivem kontaktu kapalně vody a elektrod, proto nelze tyto vysoké naměřené hodnoty považovat za vypovídající.

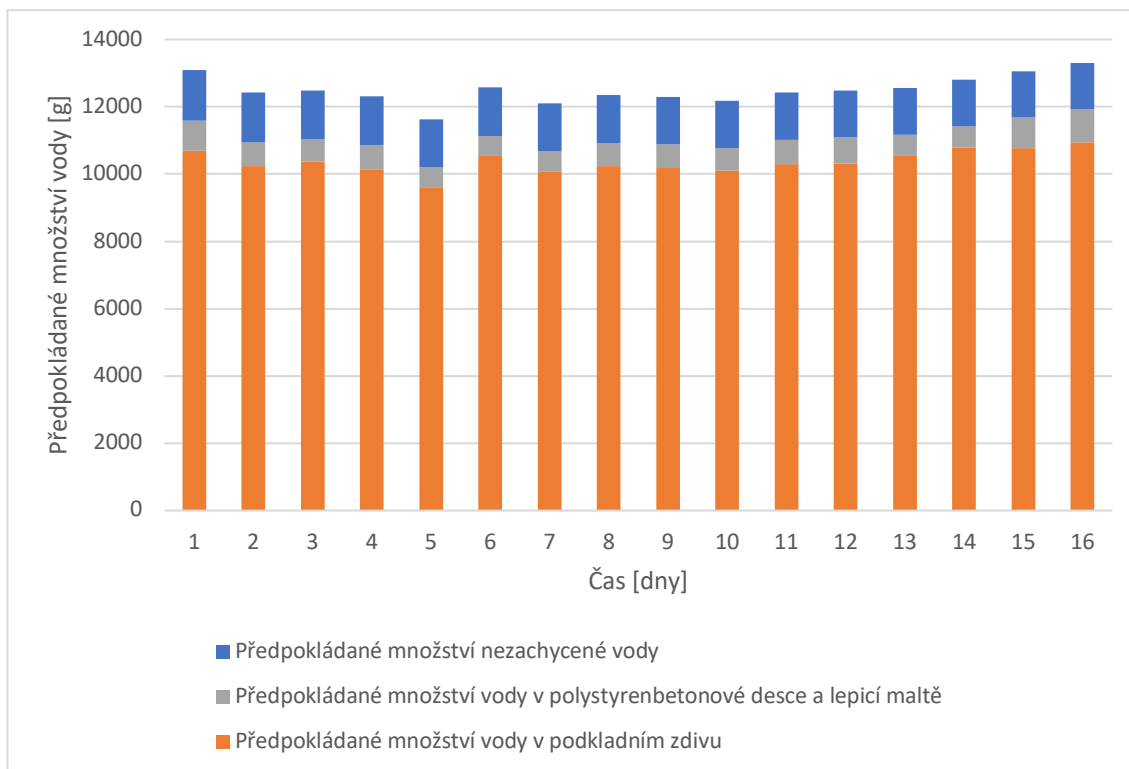
Pro zjištění spolehlivosti metod měření byl zaveden předpoklad, který bude zobrazovat skutečné množství vody v experimentálním modelu v průběhu měření v závislosti na hmotnosti podkladního zdiva a sanační povrchové úpravy (desky s lepicí maltou) v suchém stavu. Součinem naměřené hodnoty hmotnostní vlhkosti podkladního zdiva odporovou metodou a odhadovanou hmotností zdiva v suchém stavu bude získáno předpokládané množství vody v podkladním zdivu v průběhu experimentu. Stejně tak součinem hmotnostní vlhkosti naměřené mikrovlnnou metodou a odhadovanou hmotností desky a lepicích malt v suchém stavu bude vypočítáno předpokládané množství vody v povrchové sanační vrstvě. V experimentálním modelu se nachází i parametr tzv. množství nezachycené vody, která není změřena výše uvedenými metodami, nebo se jedná o vodu odpařenou z povrchu, která je předpokládána o velikosti úbytku hmotnosti v po sobě jdoucích dnech měření.

Tato předpokládaná množství vody v průřezu experimentálních modelů jsou zobrazena v grafech pro každý model obsahující podkladní zdivo a deskovou sanační povrchovou úpravu zvlášť.



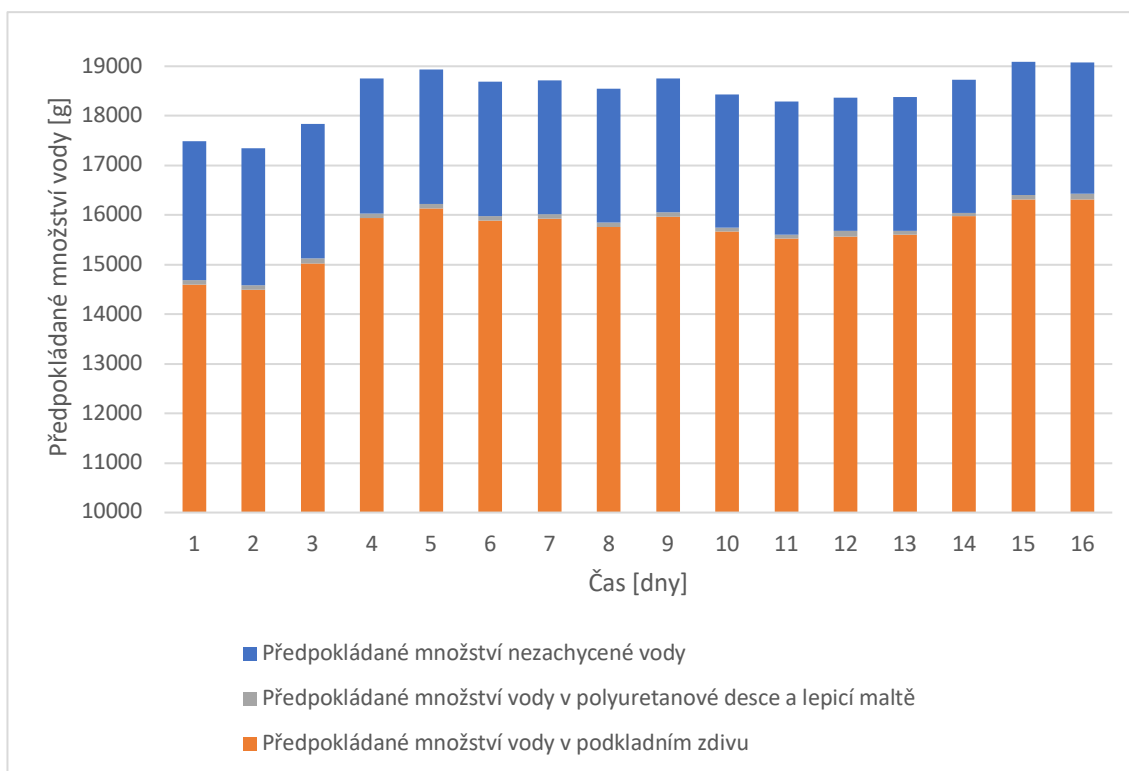
Obrázek 51: Graf předpokládaného množství vody v průřezu experimentálního modelu z podkladního zdiva a kalciumpilátové desky v čase

Z grafu lze vyvodit, že předpokládané množství vody v kalciumpilátové desce se v průběhu experimentu mění výrazněji na počátku měření, což je způsobeno odpařováním záměsové vody z lepicí povrchové malty. V následujícím období zůstává množství vody v desce přibližně stejné. Z cihelného podkladního zdiva dochází k úbytku vody v čase, které se téměř neprojevuje na množství vody v kalciumpilátové desce, jak bylo zjištěno měřením odporovou a mikrovlnnou metodou. Pravděpodobně zde nastává stav, kdy množství vody odpařené z povrchu modelu je stejné s množstvím vody odvedené z podkladního zdiva. Případně by mohla vlhkost saturovat místo, které nebylo zasaženo žádnou z použitých měřicích metod.



Obrázek 52: Graf předpokládaného množství vody v průřezu experimentálního modelu z podkladního zdiva a polystyrenbetonové desky v čase

Předpokládané množství vody v polystyrenbetonové desce v průběhu experimentu se příliš nemění, protože naměřená hodnota hmotnostní vlhkosti mikrovlnnou metodou je v průběhu experimentu velmi podobná. Největší pokles je zaznamenán v prvních dnech měření, který může být způsoben odpařováním záměsové vody z lepicí malty na povrchu desky. Deska je lepena k podkladnímu zdivu na terče, kapilární šíření vlhkosti je tedy omezeno a dochází převážně k difuzi z podkladního zdiva do sanační desky, což je pomalu probíhající proces. Velké množství předpokládané vody v podkladním zdivu souvisí s vysokými naměřenými hodnotami hmotnostní vlhkosti odporovou metodou a v průběhu experimentu se příliš nemění, což může být způsobeno omezením odpařování vody polystyrenbetonovou deskou.



Obrázek 53: Grafické znázornění předpokládaného množství vody v průřezu experimentálního modelu skládajícího se z podkladního zdiva a polyuretanové desky v čase

Předpokládané množství vody v polyuretanové desce se v průběhu experimentu příliš nemění a dosahuje hodnot okolo 95 g na plochu experimentálního modelu, což je způsobeno naměřením velmi podobných hodnot hmotnostní vlhkosti mikrovlnnou metodou v průběhu celého měření. Množství vody v podkladním zdivu u tohoto experimentálního modelu bylo naměřeno ve vysokých hodnotách, které nelze považovat za objektivní údaj. Trend množství vody v podkladním zdivu je však proměnlivý, pravděpodobně z důvodu utěsnění podkladního zdiva celoplošně lepenou polyuretanovou deskou, čímž bylo šíření vlhkosti z podkladního zdiva výrazně omezeno. K nárůstu vlhkosti cihelného zdiva došlo po aplikaci sanačního souvrství obsahující záměsovou vodu. K úbytku vody z modelu došlo zatím pravděpodobně pouze z povrchové lepicí malty na povrchu experimentálního modelu.

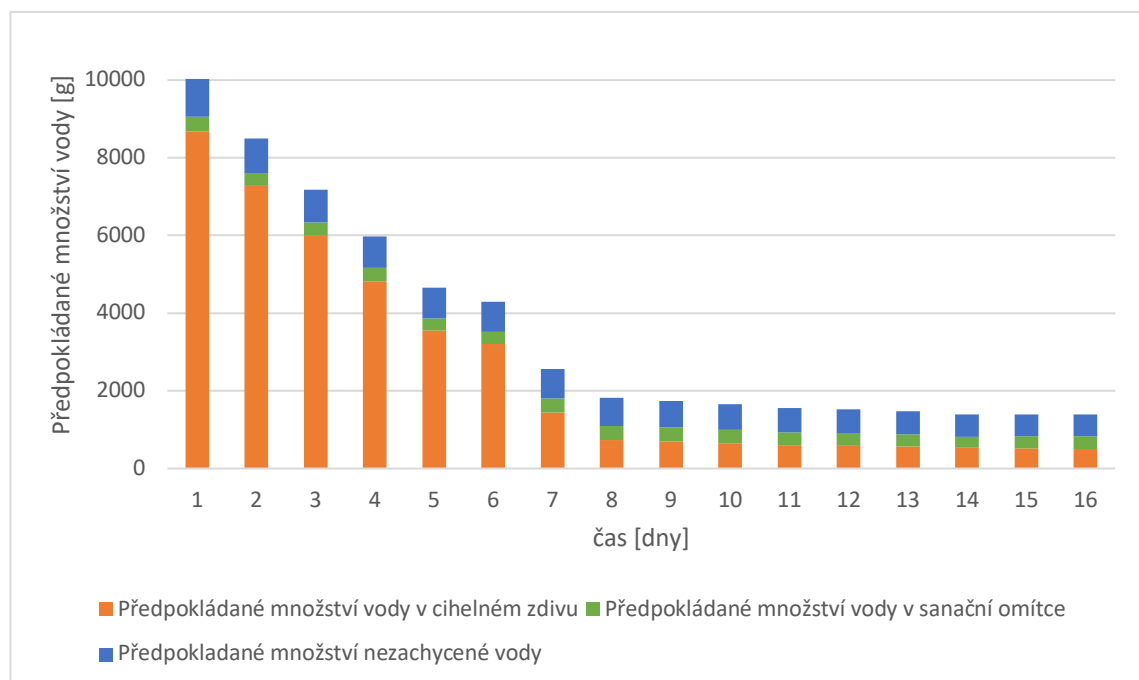
16.5.3 Posouzení metod pro měření obsahu vlhkosti v cihelném zdivu se sanační omítkou

Z naměřeného obsahu hmotnostní vlhkosti mikrovlnnou metodou můžeme, po teoretickém odhadu hmotnosti sanační omítky v suchém stavu, zavést předpoklad, že součinem výše uvedených hodnot může být zjištěno přibližné množství vody nacházející se v sanační omítce.

Odporovou metodou měření vlhkosti v cihelném podkladu byla zjištěna hmotnostní vlhkost, kterou lze také pomocí přibližné (dopočítané z dostupných podkladů) hmotnosti zdiva v suchém stavu přepočítat na množství vody, které se v podkladním zdivu nachází.

Do tohoto předpokladu však vstupuje další parametr tzv. voda nezachycená, která není změřena výše uvedenými metodami, nebo se jedná o vodu odpařenou z povrchu, která je předpokládána o velikosti úbytku hmotnosti v po sobě jdoucích dnech měření.

Předpoklad obsahu množství vody v průřezu modelu skládajícího se z cihelného zdiva a sanační omítky je uveden v následujícím grafu:



Obrázek 54: Grafické znázornění předpokládaného množství vody v průřezu experimentálního modelu skládajícího se z podkladního zdiva a sanační omítky desky v čase

Předpokládané množství vody v podkladním zdivu v prvních dnech měření nelze považovat za závazné, nicméně se toto množství v čase rapidně snižuje. Předpokládané množství vody v sanační omítce se v průběhu měření příliš neodchyluje od 350 g na plochu experimentálního modelu. Z tohoto grafického zobrazení je možné předpokládat, že k vysoušení podkladního zdiva v experimentálního modelu dochází do sanační omítky, v níž se nachází stále přibližně stejné množství vody. Množství úbytku vody z podkladního zdiva se tedy pravděpodobně přibližně rovná množství vody odpařené z povrchu sanační omítky.

16.6 NÁVRH PRO DALŠÍ VÝZKUM

Výsledky měření kapacitní metodou nebyly nakonec kvůli komplikovanosti závislostí vyhodnoceny, přesto se jeví tato metoda jako citlivá a vhodná pro dlouhodobé monitorování obsahu vlhkosti. Při vhodně zvolené velikosti snímačů by tato metoda měření vlhkosti mohla zajistit měření vlhkosti v takových materiálech, do kterých nelze umístit snímače pro odporovou metodu, např. izolační materiály (minerální vata, polystyren).

Při dalším výzkumu měření vlhkosti mikrovlnnou metodou by bylo vhodné se zaměřit na přesnější vypracování kalibračních závislostí pro vyjádření hmotnostní vlhkosti z naměřeného indexu vlhkosti. Tato metoda však není vhodná pro dlouhodobé monitorování vlhkosti v konstrukcích, neboť snímač nelze zabudovat do konstrukce a provádět kontinuální měření.

U odporové metody měření vlhkosti v konstrukcích navrhuji měření hmotnostní vlhkosti v cihelném zdivu v různých hloubkách, což by mohlo upřesnit údaje o šíření vlhkosti ve zdivu, hlavně v případě měření sendvičových konstrukcí.

IV ZÁVĚR

V teoretické části diplomové práce byla rozvedena problematika šíření vlhkosti v porézních stavebních materiálech. Poslední kapitola teoretické části práce uvádí způsoby dlouhodobého monitorování vlhkosti ve stavebních konstrukcích podle dostupné literatury.

Experimentální část diplomové práce se věnuje praktickým měřením při využití odporové, kapacitní, mikrovlnné a gravimetrické metody. Pro experimentální měření bylo zohledněno možné ovlivnění měřeného vzorku měřicími sondami. Při návrhu bylo dbáno na zajištění trvanlivosti snímacího zařízení ve vlhké konstrukci, na mechanickou odolnost při instalaci do měřeného materiálu a v neposlední řadě také na to, aby nenastalo ovlivnění přirozeného šíření vlhkosti ve vzorcích měřicími sondami.

Pro uvedené metody měření byla využita dostupná měřicí technika; u odporové metody bylo nezbytné vyvinout vhodné snímače, které budou spolehlivé pro měření v silikátových stavebních materiálech, neboť použité měřicí zařízení je určeno jako vpichovací měřidlo pro měření vlhkosti dřeva. Pro kapacitní metodu měření vlhkosti bylo nutné vyvinout snímače, které nebudou omezovat vnitřní difuzi v proměřovaném vzorku. Pro měření vlhkosti mikrovlnnou metodou byl použit přístroj, který je vybaven řadou sond pro různé hloubky měření. Jako referenční metoda byla použita metoda gravimetrická vážením experimentálního modelu.

Pro ověření funkčnosti zvolených metod měření vlhkosti jsem zhotovila experimentální modely fragmentů stavebních konstrukcí zohledňující zadání diplomové práce. Experimentální modely obsahují zdivo z cihel plných pálených a cementové malty, simulující vlhké zdivo v reálné konstrukci, a sanační povrchové úpravy ve formě sanační omítky, obkladu z polystyrenbetonových, kalciumsilikátových a polyuretanových desek se systémovými lepicími maltami.

Měření vlhkosti odporovou metodou bylo navrženo pro měření vlhkosti v cihelném podkladním zdivu ve všech experimentálních modelech, v případě použití sanačního obkladu bylo navrženo měření vlhkosti kapacitní metodou ve vrstvě sanační úpravy. Pro mikrovlnnou metodu měření vlhkosti bylo navrženo měřit všechny experimentální modely příložným snímačem opakovaně v jednom místě do hloubky 40 mm od povrchu.

Z provedených experimentů, mohu uvést následující poznatky:

Při použití odporové metody jsem prokázala velmi dobrou měřicí schopnost při měření vlhkosti ve zdivu. Při tom jsem zjistila, že měření při použití zabudovaných elektrod v 10 mm cihelného zdiva vypovídá o vlhkosti pouze v této oblasti. Pro stanovení vlhkosti v celém průřezu zdiva by bylo vhodné umístit více snímačů do různých úrovní od povrchu proměřované konstrukce. Pro zvýšení vlhkosti v podkladním zdivu byla vnesena voda, která v blízkosti elektrod způsobila lokální zvýšení vlhkosti, což způsobilo zkreslený údaj o naměřené hodnotě vlhkosti.

Zjistila jsem, že při vlhkostrním obsahu 4,3 % nastává výrazná změna odporu, proto byla kalibrační křivka sestrojena ze dvou samostatných závislostí tak, aby mohla být v celém vlhkostrním intervalu určena závislost mezi naměřenou hodnotou vlhkosti pro dřevo a vlhkostí měřeného zdiva. Odporová metoda měření vlhkosti ve stavebních materiálech je vhodná pro dlouhodobé sledování hmotnostní vlhkosti v cihelném zdivu a v materiálech, které mohou zajistit dlouhodobý těsný kontakt se snímačem.

Při použití mikrovlnné metody jsem zjistila, že je vhodná pro měření mnoha materiálů, nicméně je nutné vytvoření kalibrační rovnice pro konkrétní měřený materiál, což není vždy možné. Vzhledem k použití příložného

snímače nelze realizovat dlouhodobé kontinuální měření. Předpokladem pro zajištění objektivních výsledků měření je příprava rovného a hladkého povrchu v místě měření.

Při měření kapacitní metodou jsem zjistila, že pro vyhodnocení naměřené kapacity je nutná znalost kapacity pro konkrétní materiál v širokém frekvenčním pásmu, aby bylo možné odvodit vnitřní vlhkost materiálu. Byla vyzkoušena řada korelací mezi naměřenou kapacitou a vlhkostí, ale spolehlivost výsledku byla nízká. Komplikovanost vztahu závislosti si vyžaduje hlubší studium, kde bude využito více parametrů, které mohou o závislosti naměřených hodnot těsněji vypovídat. V rámci diplomové práce nebyla nalezena žádná jednoduchá vazba mezi sledovanými veličinami.

Přesto nese kapacitní metoda měření vlhkosti potenciál pro dlouhodobé monitorování vlhkosti v materiálech, kde nelze použít jinou metodu měření vlhkosti, například v zateplovacích systémech.

Gravimetrickou metodu považuji za referenční metodu, kterou lze ověřit hmotnostní vlhkost v celém modelu, problémem je otázka rozložení vlhkosti v různých vrstvách např. v modelu sendvičové konstrukce, protože lze zjistit hmotnost pouze celého vzorku. V experimentu nebylo možné zvážit podkladní zdivo v suchém stavu, a tak jsem zavedla předpoklady pro hmotnost v suchém stavu.

V SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] *A Guide to the Measurement of Humidity*. London: National Physical Laboratory, The Institute of Measurement and Control, 1996. ISBN 0-904457-24-9

[2] HNILIČKA, Tomáš. *Měřič vlhkosti materiálů*. Pardubice, 2014. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Ing. Jiří Roleček.

[3] ŠŤASTNÍK, S. *Izolační materiály. Vlhkost ve stavebních materiálech*. VUT Brno: VUT Brno, 2006

[4] České vysoké učení technické v Praze. *Sanace vlhkých stavebních konstrukcí* [online]. Praha: Fakulta stavební, Katedra materiálového inženýrství a chemie [cit. 2020-11-20]. Dostupné z: http://tpm.fsv.cvut.cz/vyuka/materialy_izolace/prednaskaVIII_IZMA.pdf

[5] ČERMÁK, Jan. *Studium vlhkostních poměrů ve stěně po aplikaci zateplovacího systému ETICS*. Brno, 2013. 40 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc.

[6] KÜNZEL, Hartwig M. *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Component: One and two-dimensional calculation using simple parameters*. Stuttgart: Fraunhofer Institute of Building Physics, 1995. ISBN 3-8167-4103-7.

[7] ČSN EN ISO 12570. *Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků – Stanovení vlhkosti sušením při zvýšené teplotě*. Praha: Český normalizační institut, 2001.

[8] LESKELÄ, Esa. *MOISTURE MEASURING OF BUILDING MATERIALS*. Oulu University of Applied Sciences, 2013. Master's thesis. Oulu University of Applied Sciences.

[9] POCHMANOVÁ, Petra a Ivan MISAR. *Kontrolní metody pro stanovení vlhkosti podkladních vrstev podlah*. TZB-info [online]. Praha: Topinfo, © 2001-2021, 2011 [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/podlahy/8050-kontrolni-metody-pro-stanoveni-vlhkosti-podkladnich-vrstev-podlah>

[10] HORA, Lukáš. *Porovnání metod měření materiálové vlhkosti ve stavebnictví*. Praha, 2018. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ, Fakulta stavební, Katedra technologie staveb.

[11] Katalog Elbez s.r.o. *Elbez-Tecpel* [online]. Velké Meziříčí: Elbez [cit. 2020-11-30]. Dostupné z: <https://www.elbez.cz/www.elbez.cz/html-cz/>

[12] *GANN kartáčové elektrody M25-300*. In: Eshop Vysoušeče vlhkoměry zvhčovače a topidla: AE vysoušeče: specializovaný e-shop [online]. Plzeň: Vysoušeče.eu [cit. 2020-30-11]. Dostupné z: <https://www.aevysousece.cz/p/189/gann-kartacove-elektrody-m25-300>

[13] *GMK 100 Kapacitní měřič vlhkosti dřeva a stavebních materiálů*. In: GHM-GREISINGER s.r.o. [online]. Praha: GHM-GREISINGER, © 2020 [cit. 2020-11-30]. Dostupné z: <https://www.greisinger.cz/KATALOG-Pristroje-pro-stavebnictvi-Vlhkomery>

- [14] HOBST, Leonard a Lucie VODOVÁ. *SROVNÁVACÍ MĚŘENÍ VLHKOSTI STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ*. BETON TKS [online]. Praha: BETON TKS, 2012, 2012(1), 66-68 [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: https://www.betontks.cz/sites/default/files/2012-1-66_0.pdf
- [15] *TERMOKAMERA, TEPLOTA, VLHKOST – ÚNIKY TEPLA, VLHKOST, PLÍSNĚ*. ENVIC, občanské sdružení [online]. Plzeň: ENVIC, o.s., © 2013 [cit. 2020-11-30]. Dostupné z: <http://www.envic-sdruzeni.cz/stavba-energetika/diagnostika-staveb/termokamera-teplota-vlhkost-co2-mereni-uniku-tepla-vlhkost-plisne.htm>
- [16] Podlahy - TZB-info. *Stavba - TZB-info* [online]. Praha: Topinfo, © 2001-2020 [cit. 30.11.2020]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/podlahy>
- [17] SMOLKA, R.; KALOUSEK, L.; MIZEROVÁ, L. *Physico-mechanical Properties of the Threshold Coupling Made of Secondary Raw Materials for Use in the Rehabilitation and Reconstruction of Buildings*. Advanced Materials Research. 2013. 688(3). p. 193 - 198. ISSN 1022-6680.
- [18] ČSN P 73 0610. *Hydroizolace staveb – Sanace vlhkého zdiva – Základní ustanovení*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [19] *Moisture guard* [online]. Praha: MoistureGuard, © 2018 [cit. 2020-12-1]. Dostupné z: <https://www.moistureguard.cz>
- [20] STOJANOVIĆ, Goran, Milan RADOVANOVIĆ, Mirjana MALEŠEV a Vlastimir RADONJANIN. *Monitoring of Water Content in Building Materials Using a Wireless Passive Sensor*. US National Library of

Medicine [online]. 2010 [cit. 2021-01-02]. Dostupné z:
doi:10.3390/s100504270

[21] Walker, R., Pavía, S. & Dalton, M. *Measurement of moisture content in solid brick walls using timber dowel*. Mater Struct 49, 2549–2561 (2016).
<https://doi.org/10.1617/s11527-015-0667-6>

[22] GÖLLER, A., A. HANDRO, D. HEINRICH, J. LANDGRAF, M. SCHNIEBER, J. WAGNER a LEIPZIG. *Handheld-Mikrowellen-Feuchtemeßgeräte der MOIST-Serie - ein neues Konzept der Materialfeuchtemessung*. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. [online]. Berlin: DGZfP Ausbildung und Training, 1999 [cit. 2020-12-24]. Dostupné z:
http://www.dgzfp.de/Portals/24/PDFs/BBonline/bb_66-CD/bb66_p08.pdf

[23] Základní pojmy. In: *Český metrologický institut* [online]. Brno [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/node/537>

[24] KŘŮMAL, Martin. *Laboratorní zařízení pro dielektrický ohřev kaučuku* [online]. Zlín, 2009 [cit. 2021-01-08]. Dostupné z:
<<https://theses.cz/id/7mu6wc/>>. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Dvořák, CSc.