



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STAVEBNÍ**  
**ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

# **VLIV TEPELNĚ VLHKOSTNÍHO ZATÍŽENÍ NA CHOVÁNÍ TEPELNĚ IZOLAČNÍCH A SANAČNÍCH MATERIÁLŮ NA BÁZI SILIKÁTŮ**

INFLUENCE OF THERMAL AND MOISTURE LOADS ON THE BEHAVIOR OF THERMAL INSULATION  
AND REPAIR MATERIALS BASED ON SILICATES

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**LUCIE BOKOVÁ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. JIŘÍ ZACH, Ph.D.**

BRNO 2016



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Lucie Boková
<b>Název</b>	Vliv tepelně vlhkostního zatížení na chování tepelně izolačních a sanačních materiálů na bázi silikátů
<b>Vedoucí bakalářské práce</b>	Ing. Jiří Zach, Ph.D.
<b>Datum zadání bakalářské práce</b>	30. 11. 2015
<b>Datum odevzdání bakalářské práce</b>	27. 5. 2016
V Brně dne 30. 11. 2015	

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Vedoucí ústavu

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## Podklady a literatura

- [1] HALAHYJA, M.; CHMÚRNÝ, I.; STERNOVÁ, Z. Stavebná tepelná technika: tepelná ochrana budov. 1. vyd. Bratislava: Jaga, 1998. 253 s. ISBN 80-88905-04-4.
- [2] ŠŤASTNÍK, S., ZACH, J. Zkoušení izolačních materiálů. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 95 s. ISBN 80-214-2253-X
- [3] Vaverka, J.; Chybík, J., Mrlík, F. Stavební fyzika 2, stavební tepelná technika. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. 420 s. ISBN 80-214-1649-1.
- [4] Kießl, K. Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung. Dissertation Essen 1983.
- [5] Künzeli, H. M. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters. PhD Thesis. Stuttgart: Fraunhofer Institute of Building Physics, 1995.
- [6] Směrnice WTA; 2-9-04/D Sanační omítkové systémy. 1. Vyd. Blansko, 2008. 17 s. ISBN 978-80-02-02103-2.
- [7] Vaněk, L. Vývoj pokročilých tepelně izolačních omítek s možností uplatnění jako sanační omítky dle WTA, Diplomová práce, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Brno 2014.
- [8] Rajchot, V. Vývoj tepelně izolačních a sanačních omítek pro památkovou péči, Diplomová práce, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Brno 2013.

## Zásady pro vypracování

Bakalářská práce bude věnována studiu tepelně vlhkostního chování u tepelně izolačních a sanačních materiálů. Cílem bakalářské práce bude provést rozsáhlou literární rešerši, která bude podkladem pro rozšíření znalostí v oblasti chování pórových silikátových materiálů s nízkou hodnotou součinitele tepelné vodivosti a regulovanými vlastnostmi v oblasti kapilární aktivity. Předmětem rešerše bude také získat poznatky v oblasti modifikace kapilární aktivity lehkých, tepelně izolačních omítek, včetně studia jejich tepelně vlhkostního chování. Získané poznatky z teoretické části bakalářské práce budou následně uplatněny a ověřeny laboratorně na vyvíjených tepelně izolačních a sanačních materiálech na silikátové bázi.

## Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

.....

Ing. Jiří Zach, Ph.D.  
Vedoucí bakalářské práce

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývala studii tepelně izolačních a sanačních materiálů na bázi silikátů. Teoretická část obsahuje literární rešerši provedených výzkumů, které se věnovaly vývoji tepelně izolačních a sanačních omítek s nízkou hodnotou součinitele tepelné vodivosti, včetně studia jejich tepelně vlhkostního chování a modifikace kapilární aktivity. Dále se práce věnuje popisu tepelně vlhkostního chování stavebních materiálů s rozšířením této problematiky na pórovité materiály. Poznatky z teoretické části byly využity v části experimentální, konkrétně při návrhu receptur. Dle navržených receptur byly posléze namíchány vzorky omítek, na kterých byly posléze zkoušeny vybrané vlastnosti. Dosažené výsledky byly dány do kontextu s výsledky vybraných výzkumných týmů z literární rešerše.

## **Klíčová slova**

Tepelně izolační omítka, sanační omítka, tepelná vodivost, tepelně vlhkostní chování, kapilární aktivita, pórovité materiály.

## **Abstract**

Bachelor thesis dealt with the study of thermal insulating and repairing materials based on silicates. The theoretical part includes a literature search of conducted researches, which x focused on the development of thermal insulating and repairing plasters with low thermal conductivity, including the study of their hygrothermal behaviour and modification of capillary activity. Futher there is a description of the hygrothermal behaviour of building materials with the expansion of this issue on porous materials. The knowledge from theoretical part was used in the experimental part, particularly at designing recipes. According to the designed recipes there were blended samples of plasters on which were subsequently tested selected properties. The results were put into context with the results of the research teams from a literature search.

## **Keywords**

Thermal insulating plaster, repairing plaster, thermal conductivity, hygrothermal behavior, capillary activity, porous materials.

## **Bibliografická citace VŠKP**

Lucie Boková *Vliv tepelně vlhkostního zatížení na chování tepelně izolačních a sanačních materiálů na bázi silikátů*. Brno, 2016. 83 s., 4 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Jiří Zach, Ph.D.

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 27. 5. 2016

.....

podpis autora  
Lucie Boková

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Zachovi, Ph.D. za odborné a pedagogické vedení. Dále bych ráda poděkovala zaměstnancům ústavu THD za pomoc při provádění laboratorních zkoušek. V neposlední řadě chci poděkovat své rodině za neúnavnou podporu při mém studiu.

V Brně 2016

Lucie Boková



# Obsah

<b>Úvod</b> .....	<b>11</b>
<b>A. Teoretická část</b> .....	<b>13</b>
<b>1 Omítky</b> .....	<b>13</b>
1.1 Malty pro omítky .....	13
1.2 Dělení malt .....	13
1.3 Základní složky malt .....	15
1.3.1 Pojiva .....	15
1.3.2 Plniva .....	16
1.3.3 Záměsová voda .....	29
1.3.4 Přísady a příměsi .....	29
1.4 Tepelně izolační omítky .....	29
1.4.1 Výzkum tepelně izolačních omítek .....	31
1.4.2 Použití tepelně izolačních omítek z ekonomického a ekologického hlediska .....	34
1.5 Sanační omítky .....	36
1.5.1 Směrnice WTA .....	36
1.5.2 Princip sanačních omítkových systémů .....	36
1.5.3 Použití sanačních omítkových systémů .....	37
1.5.4 Požadavky na sanační omítkové systémy .....	37
1.5.5 Dělení sanačních omítkových systémů .....	38
<b>2 Vlhkostní a difúzní vlastnosti stavebních materiálů</b> .....	<b>40</b>
2.1 Vlhkost ve stavební konstrukci .....	40
2.2 Vlhkost vzduchu .....	41
2.3 Vlhkost materiálu .....	41
2.4 Transport vlhkosti .....	44
2.4.1 Sorpce vodní páry .....	44
2.4.2 Difúze vodní páry .....	45
2.4.3 Vodivost vlhkosti .....	47
2.5 Nasákavost .....	47
2.6 Vzlínavost a kapilární aktivita .....	48
2.6.1 Koeficient kapilární absorpce .....	50

<b>3</b>	<b>Tepelné vlastnosti stavebních materiálů</b>	<b>50</b>
3.1	Součinitel tepelné vodivosti	51
3.2	Měrná tepelná kapacita	52
3.3	Součinitel teplotní vodivosti	52
3.4	Tepelný odpor vrstvy materiálu	53
3.5	Součinitel prostupu tepla	53
3.6	Studie tepelně vlhkostního chování izolačních materiálů	54
<b>B.</b>	<b>Praktická část</b>	<b>57</b>
<b>1</b>	<b>Metodika práce</b>	<b>57</b>
1.1	Návrh receptur	57
1.2	Výroba zkušebních těles	59
1.3	Provedení laboratorních zkoušek a měření	59
1.3.1	Stanovení konzistence čerstvé malty	60
1.3.2	Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty	60
1.3.3	Stanovení objemové hmotnosti suché zatvrdlé malty	60
1.3.4	Stanovení součinitele tepelné vodivosti	61
1.3.5	Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku	61
1.3.6	Stanovení kapilární absorpce vody v zatvrdlé maltě	62
1.3.7	Stanovení hygroskopických sorpčních vlastností	63
1.3.8	Stanovení pórovitosti pomocí rtuťové porozimetrie	63
1.4	Vyhodnocení laboratorních měření	64
1.4.1	Stanovení vlastností v čerstvém stavu	64
1.4.2	Stanovení vlastností v zatvrdlém stavu	65
	<b>Seznam použitých zdrojů</b>	<b>77</b>
	<b>Seznam tabulek</b>	<b>82</b>
	<b>Seznam obrázků</b>	<b>82</b>
	<b>Seznam grafů</b>	<b>83</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>84</b>

## Úvod

Problematika energetické náročnosti budov se v dnešní době stále více stává objektem zájmu veřejnosti. Děje se tak z důvodů ekologických, neboť přibližně třetina celosvětové produkce energie je konzumována při užívání budov [1]. Ekonomický faktor je druhým výrazným motivem vedoucím ke snaze snižovat energetickou náročnost budov. Na tento celosvětový trend reaguje řada výzkumných týmů se snahou vyvinout nové tepelně-izolační materiály či zdokonalit vlastnosti materiálů známých. Předmětem této bakalářské práce bylo mimo jiné i získání poznatků z výzkumu vybraných vědeckých týmů u nás (výzkumné týmy z VUT) i v zahraničí (Coridaldesi a kol.; Romaniega Pineiro a kol.; San-Antonio Gonzales a kol.; Ferrándiz-Mas a kol.; Buratti a kol.; Ioculano a kol.; Ashour a kol.; Koksal a kol.; Kekec a kol.; Bianco a kol.).

Z hlediska energetické náročnosti budov je klíčovou částí konstrukce její obvodový plášť. Zateplovací systémy, které se dnes na stavbách užívají, jsou z tepelně izolačního hlediska velmi účinné. Jejich použití je však omezené zejména u historických objektů, které jsou často památkově chráněny, kde je snaha zachovat původní vzhled fasády přednější než energetické ztráty. V těchto případech se nabízí tepelně-izolační omítka jako vhodná alternativa kontaktního zateplovacího systému.

I přes skutečnost, že jejich účinnost z tepelně-izolačního hlediska není taková jako u ostatních zateplovacích systémů, nabízí tepelně-izolační omítky řadu výhod. Zpracovatelnost je stejná jako u klasických omítek a jejich aplikace je možná i na nevyrovnaný či zakřivený podklad. Jejich použití je tedy vhodné pro libovolné architektonické řešení obvodového pláště budovy. Hodnota tepelné vodivosti těchto omítek je většinou více než desetkrát nižší než u klasických omítek [2]. Díky rozptylu hodnot faktoru difúzního odporu těchto omítek, který vykazuje většinou hodnotu v rozmezí 5 a 15, je použití tepelně-izolačních omítek možné i na obvodové pláště postižené kapilárně vzlínající vlhkostí z podzákladí při nižším stupni zvlhčení, což je častý jev u historických budov. Další významným produktem jsou sanační omítky, které se vyznačují vysokou pórovitostí, díky které je možné vlhkost ze zdiva odvádět ve formě vodní páry, avšak povrch omítky zůstane suchý a nepoškozený.

Při výzkumu tepelně-izolačních a sanačních materiálů je důležitým aspektem správný popis transportu vlhkosti v daném materiálu. Zejména u pórovitých materiálů, kde se na transportu vlhkosti podílí více fyzikálních dějů, je nutné tyto děje správně pochopit a popsat, čemuž je také věnovaná část této práce.

Cílem této bakalářské práce bylo provést rozsáhlou literární rešerši sloužící jako podklad pro rozšíření znalostí v oblasti chování pórových silikátových materiálů s nízkou hodnotou součinitele tepelné vodivosti a regulovanými vlastnostmi v oblasti kapilární aktivity, které lze využít jako tepelně izolační a sanační materiály. Poznatky nabyté v teoretické části byly následně využity a ověřeny laboratorně.

## A. Teoretická část

### 1 Omítky

Omítka se definuje jako finální povrchová vrstva zdícího materiálu, která se aplikuje na svislé i vodorovné konstrukce. Omítky mají funkci ochrannou, tepelně-izolační a v neposlední řadě estetickou, neboť eliminují nerovnosti podkladního materiálu a vytvářejí hladký povrch [3].

Omítky bývaly užívány jako finální vrstva stavebních konstrukcí již od pradávna. V historii se však do popředí zájmu dostaly v momentě, kdy začaly plnit funkci estetickou. V současné době omítky dotváří vzhled staveb a zlepšují vlastnosti zdiva. Omítka je tvořena vrstvou malty, která má požadovanou tloušťku. V současnosti se, díky ekonomickým hlediskům a požadavkům na rychlost výstavby, dostává do popředí průmyslové zpracování stavebních hmot a prefabrikace. Z důvodů urychlení a zjednodušení procesu výstavby, došlo ke vzniku tzv. suchých omítkových směsí celých omítkových systémů, jejichž vývoj nadále probíhá [4].

#### 1.1 Malty pro omítky

Omítky se zhotovují z malty, což je stavivo připravené z drobného kameniva, pojiva a někdy i s přídavkem přísad či příměsí. Tato směs je následně rozmíšena s vodou na požadovanou konzistenci [5]. Přísady a příměsi jsou do omítek přidávány za účelem zajištění požadovaných vlastností omítek. Čerstvá malta má nejčastěji formu plastické kaše, výjimečně tekuté konzistence [3].

#### 1.2 Dělení malt

V literatuře se objevuje několik způsobů dělení malt. Průmyslově vyráběné malty se dělí podle účelu použití na malty pro zdění a malty pro vnitřní a vnější omítky. Malta pro zdění je dle ČSN EN 998-2 definována jako směs jednoho nebo více anorganických pojiv, kameniv, vody a někdy příměsí a/nebo přísad používaná pro ukládání, spojování a spárování zdiva [6]. Maltu pro vnitřní a vnější omítky definuje ČSN EN 998-1 jako směs jednoho nebo více

anorganických pojiv, kameniv, vody a někdy příměsí a/nebo přísad používaná pro vnitřní a vnější omítky [7]. Kromě těchto dvou hlavních skupin jsou známy malty pro výrobu keramických dílců, stykové a spárovací, malty pro kladení dlažeb a obkladů, malty záливkové a malty sanační či reparační [5].

Malty pro vnitřní a vnější omítky jsou podle záměru výroby rozděleny na návrhové malty podle volby výrobce a předpisové malty [5].

Norma ČSN EN 998-2 dělí malty pro vnitřní a vnější omítky podle vlastností a/nebo použití na obyčejné malty pro vnitřní/vnější omítky, lehké malty pro vnitřní/vnější omítky, barevné malty pro vnější omítky, malty pro jednovrstvé vnější omítky, sanační malty pro vnitřní/vnější omítky a tepelněizolační malty pro vnitřní/vnější omítky [6].

Dále norma ČSN EN 998-2 třídí zatvrdlé malty podle vlastností [6]:

Tab. 1: Třídění podle vlastností zatvrdlé malty dle ČSN EN 998-2 [6]

Vlastnosti	Kategorie	Hodnoty
Rozsah pevnosti v tlaku po 28 dnech	CS I	0,4 N·mm <sup>-2</sup> až 2,5 N·mm <sup>-2</sup>
	SC II	1,5 N·mm <sup>-2</sup> až 5,0 N·mm <sup>-2</sup>
	CS III	3,5 N·mm <sup>-2</sup> až 7,5 N·mm <sup>-2</sup>
	CS IV	≥ 6 N·mm <sup>-2</sup>
Kapilární absorpce vody	W 0	není předepsána
	W 1	$C \leq 0,40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-0,5}$
	W 2	$C \leq 0,20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-0,5}$
Tepelná vodivost	T 1	$\leq 0,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
	T 2	$\leq 0,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Podle objemové hmotnosti malty ve vysušeném stavu dělíme na malty tepelně izolační (do 1100 kg·m<sup>-3</sup>), vylehčené (do 1600 kg·m<sup>-3</sup>), obyčejné (do 2300 kg·m<sup>-3</sup>) a těžké (nad 2300 kg·m<sup>-3</sup>) [8].

Zatvrdlé malty se podle pevnosti v tlaku dělí do tříd. Jsou označovány písmenem M a hodnotou pevnosti v tlaku v N·mm<sup>-2</sup>, kterou překračují [6].

Tab. 2: Třídy malty dle ČSN EN 998-2 [6]

Třída	M 1	M 2,5	M 5	M 10	M 15	M 20	M d
Pevnost v tlaku [N·mm <sup>-2</sup> ]	1	2,5	5	10	15	20	d
d je výrobcem deklarovaná pevnost v tlaku větší než 20 N·mm <sup>-2</sup> a vyjádřená jako násobek 5							

Dále malty dělíme podle způsobu přípravy. Prvním způsobem je malta připravená ze surovin přímo na stavbě. Suroviny se naváží a smísí v míchačce přímo na staveništi. Tato varianta je nejlevnější, neboť odpadají náklady za dopravu. Požadované vlastnosti výsledné omítky však nemusí být vždy splněny z důvodů nedodržení přesného poměru vstupních surovin. Další variantou je příprava malty pro omítky ze suché maltové směsi (SMS), předem průmyslově vyrobené, která je dopravena na stavbu, kde se smíchá s vodou. Suchá maltová směs může být ve formě volně ložené směsi uložená v sile a následně přepravovaná cisternou, nebo plněna do pytlů. Třetí variantou je malta v pastovité formě, která již obsahuje všechny složky i vodu, a v takovéto formě je dopravena na staveniště [3].

### 1.3 Základní složky malt

Jak již bylo řečeno, malty jsou směsí základních složek: pojiva, plniva a vody, případně jsou přidávány příměsi a přísady. V této kapitole budou rozebrány jednotlivé složky.

#### 1.3.1 Pojiva

Pojivy označujeme látky, které po smíchání s vodou s časem tuhnou, až vytvoří plastickou hmotu. Po smísení s plnivou vytváří tvárnou směs, která má po zatvrdnutí dostatečnou pevnost a další požadované vlastnosti [8].

První skupinou pojiv jsou vzdušná pojiva, která po rozmísení s vodou tuhnou a tvrdnou, a jsou stálá pouze ve vzdušném prostředí. Do této skupiny patří například vzdušné vápno, sádra, sádrová pojiva a hořečnatá maltovina [8].

Druhou skupinou jsou hydraulická pojiva, která tuhnou a tvrdnou i pod vodou a mohou být vystavena trvalým účinkům vody. Příkladem hydraulického pojiva je například hydraulické vápno a portlandský cement [8].

Pro omítky se také využívá hliněných pojiv nebo pojiv na bázi silikátů, silikonů nebo akrylátů [9].

V posledních letech je tendence nahrazovat cement alternativními pojivy z důvodů energetické náročnosti výroby cementu. Příkladem alternativního pojiva je popílek, metakaolin, jemně mletá struska, křemičité úlety [9].

### 1.3.2 Plniva

Druhou základní složkou malt jsou plniva. Jako plniva do malt pro omítky jsou používány písky s granulometrií do 1,2 nebo 4 mm. Křivka zrnitosti vyjadřuje závislost zastoupení jednotlivých frakcí písku. Směs složená z větších frakcí bude mít velkou mezerovitost, naproti vysoký podíl jemných částic zaručuje maltu o větší plasticitě, ale zároveň větší spotřebu pojiva, neboť zrna mají větší povrch. Takováto malta bude zároveň víc náchylná k smrštění, což ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti zatvrdlé omítky. Obsah jílových částic v omítkových maltách má být menší než 3 % [3].

Z těchto důvodů se do malt volí písek s plynulou granulometrickou křivkou. Používají se písky těžené křemenné, nebo křemenné s podílem živců a omezeným obsahem jílu. Jílovité částice jsou zrna s velikostí do 0,002 mm a zaručují optimální plasticitu malty. Jako plnivo v suchých maltových směsích se používají drcené vápencové písky [3].

Vysoký podíl jílových částic má za následek náchylnost omítky k smrštění a tvorbě trhlin, jak již bylo uvedeno výše. Z těchto důvodů se v minulosti do malt přidávala přírodní vlákna jako sláma, pazdeří či zvířecí chlupy, která jsou dnes nahrazována zejména polypropylenovými vlákny [3].

V dnešní době se dále jako plniva nejčastěji používají expandovaný perlit, drcená PUR pěna, pěnové sklo, pemza či pěnový polystyren [9].

Mezi plniva se řadí i látky, které mají barvicí schopnost. Jsou to zejména oxidy železa, přírodní hlinky, cihelná nebo kamenná moučka a pigmenty stálé v silně zásaditém prostředí [3].

#### 1.3.2.1 Využití druhotných surovin jako plniv do malt a kompozitů

V dnešní době je kladen stále větší důraz na recyklaci stavebních hmot. Z tohoto důvodu se řada výzkumných týmů zabývá využitelností druhotných surovin jakožto plniv do malt a kompozitů. V následujícím textu jsou výsledky některých výzkumů podrobněji popsány.

- **Drť z PET lahví a vláknový kompozit ze skelných vláken**

Na Univerzitě Politecnica delle Marche v Anconě v Itálii probíhal v posledních letech výzkum lehkých omítek s využitím druhotných surovin jakožto plniv. Konkrétně šlo o drť z PET lahví a vláknový kompozit ze skelných vláken. Mimo



to byl učiněn pokus spojit odpad z PET lahví s dřevitým odpadem za účelem zlepšení funkčních vlastností omítky. Jako doplněk cementu byly využity křemičité úlety. V některých směsích byl cement zcela nahrazen kombinací vápna a hydraulického vápna za účelem zlepšení uhlíkové stopy omítek. Bylo namícháno celkem 12 receptur. Po 28 dnech byla na vzorcích zkoušena pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, objemová hmotnost, odolnost vůči propustnosti vodních par, koeficient kapilární absorpce a součinitel tepelné vodivosti metodou desky [10].

Bylo zjištěno, že se zvyšujícím se množstvím organického odpadu se snižovala pevnost v tlaku a v tahu za ohybu daných vzorků. Minimálních normových hodnot ( $2 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$  pro pevnost v tlaku a  $1 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$  pro pevnost v tahu za ohybu) však bylo dosaženo u všech vzorků. Dále bylo zjištěno, že použitím organických částic a velkého množství provzdušňovací přísady, bylo dosaženo snížení hmotnosti o 65 % a konečné hodnoty objemové hmotnosti se pohybovaly okolo  $700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . U vzorků s maximálním obsahem organických částic, stejně jako u vzorků, kde byl cement nahrazen vápnem a hydraulickým vápnem, bylo pozorováno extrémní snížení součinitele tepelné vodivosti až na hodnotu mírně nižší než  $0,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Z hlediska dalších funkčních vlastností omítek, jako je propustnost vodních par a kapilární absorpce, se směsi s maximálním obsahem organických částic a směsi připravené nahrazením cementu vápnem a hydraulickým vápnem ukázaly být velmi slibné pravděpodobně díky přítomnosti mnoha makropórů získaných přidáním velkého množství provzdušňovací přísady. V poslední řadě byla zkoušena citlivost použitých hydraulických pojiv na sírany. Bylo konstatováno, že zkoušené omítkové malty mohou být využity pro obnovu starého zdiva [10].

- **Minerální vlákna**

Obdobný výzkum využitelnosti druhotných surovin jako plniv do omítkových malt proběhl také na Technické univerzitě v Madridu a je popsán ve článku zveřejněném v roce 2015. Tým tvořili Sonia Romaniega Piñeiro, Mercedes del Río Merino a Cristina Pérez García. Tento tým vědců navázal na přechodí studie zaměřené na zpevnování omítek a sádrových materiálů pomocí různých vláken, což má za následek zvýšení pevnosti v tahu za ohybu a snížení pevnosti v tlaku v porovnání s omítkami bez použití vláken. V uvedeném

výzkumu byly jako plniva do sádrové omítky využity druhotné suroviny v podobě minerálních vláken z konkrétního staveniště v Madridu. Jednalo se o vlákna z minerálních panelů ze skelných vláken, které nejsou hydrofilní a jsou potaženy vrstvou silného papíru s funkcí parozábrany, a které se využívají jako izolační materiál pro dvouplášťové fasády. Dále šlo o panely z čedičových vláken, které se používají jako izolace pro vnitřní příčky. Oba druhy vláken byly podrobeny stejnému recyklačnímu procesu, což bylo drcení po dobu 2 minut ve stroji o výkonu 1500 W a frekvenci 50780 Hz. Oba druhy vláken se vyznačovaly tloušťkou do 0,05 mm a jejich délka se pohybovala od 10 do 30 mm. Bylo namícháno 14 receptur s využitím čedičových vláken a 11 receptur s využitím skelných vláken, v obou případech s vodním součinitelem 0,6 a 0,8 a obsahem vláken od 1 do 10 %. V případech 10% obsahu vláken byla u obou typů vláken negativně ovlivněna zpracovatelnost, proto bylo nutné přidat aditiva. Na jednotlivých trámečcích byla zjišťována tvrdost v jednotkách Shore C, objemová hmotnost v suchém stavu, pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu [11].

Bylo zjištěno, že ačkoli minerální vlákna obtížně absorbují vodu, vykazují dobrou kompatibilitu se sádrovou omítkou a jsou ve vzorcích rozmístěny rovnoměrně. Dále bylo zjištěno, že použitím čedičových vláken v sádrové omítce se zvýší objemová hmotnost až o 6,75 % oproti referenčnímu vzorku. Při použití skelných vláken došlo ke zvýšení objemové hmotnosti o 6,07 %. Hodnota tvrdosti Shore C se zvyšovala v závislosti s obsahem minerálních vláken ve vzorcích a maxima dosáhla při požití 4 % minerálních vláken. V obou případech pak byla hodnota tvrdosti o více než 10 % větší než u referenčního vzorku. Hodnota pevnosti v tahu za ohybu byla závislá na obsahu minerálních vláken a maximální hodnoty překonaly referenční vzorek o 34,88 % s použitím skelných vláken a 26,58 % s použitím čedičových vláken. Hodnoty pevností v tlaku u vzorků s použitím obou vln byly nižší než u referenčního vzorku, avšak ve všech případech byly vyšší než  $6 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ , což je minimální hodnota dle EN 13279-1. Zkoumané směsi tedy mohou být využity jako omítky či speciální omítky pro stavbu. Závěrem bylo konstatováno, že odpadní skelná vlákna jsou v porovnání s čedičovými vlákny více vhodná jako plnivo do nových sádrových kompozitů bez snižování jejich mechanických vlastností [11].



Obr. 1: Čedičová vlákna před a po zpracování [11]

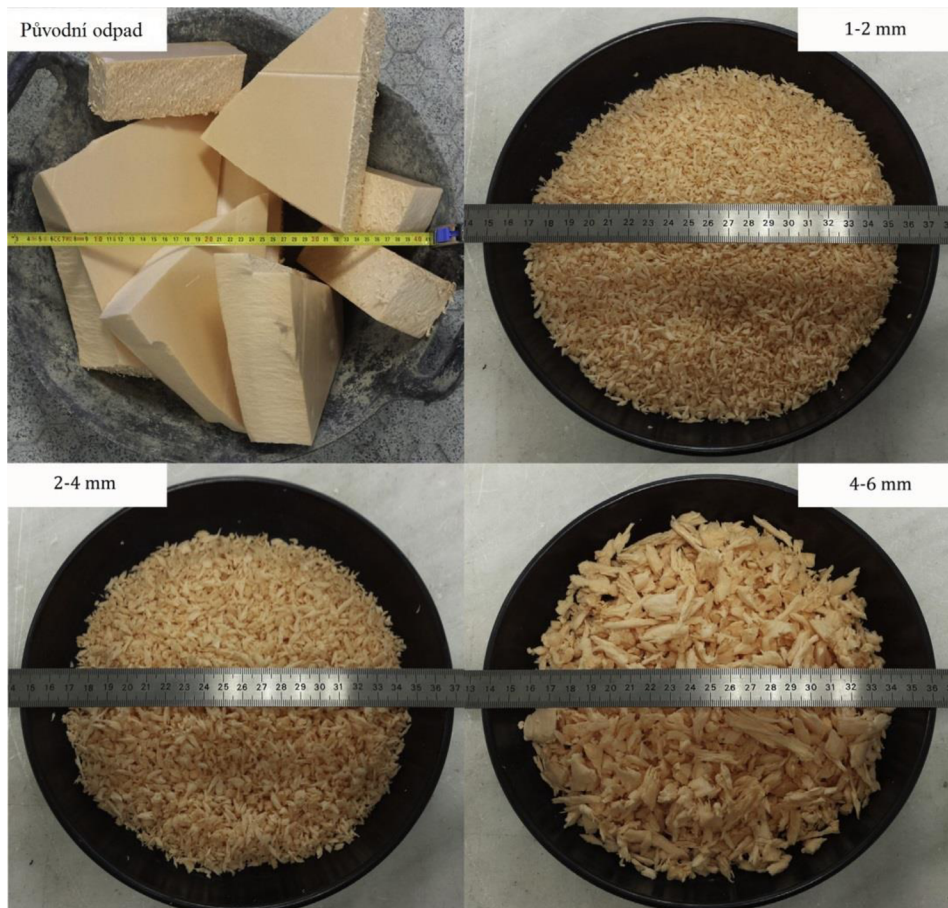
- **Extrudovaný polystyren**

Souběžně s již zmíněným výzkumem probíhal na stejné univerzitě v Madridu výzkum lehkého materiálu na bázi sádry a odpadního extrudovaného polystyrenu (XPS) s vylepšeným tepelným chováním. Ačkoli je extrudovaný polystyren jedním z nejvíce používaných syntetických polymerů ve stavebnictví, v současné době se, díky vysokým nákladům, recykluje méně než 30 % tohoto odpadu. Tým ve složení Alicia San-Antonio-González, Mercedes Del Río Merino, Carmen Viñas Arrebola, Paola Villoria-Sáez provedl vůbec první studii využitelnosti odpadního XPS jako lehkého kameniva do sádrových kompozitů [12].

K výrobě zkušebních vzorků byla použita sádra s označením B1 dle EN 13279-1 a odpadní XPS v podobě vyhozených izolačních materiálů z okolních staveb s tepelnou vodivostí mezi 0,033 a 0,036  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  a objemovou hmotností v rozmezí 35 až 100  $kg \cdot m^{-3}$ . Polystyren byl mechanicky rozdrčen a proset sítím za účelem získání tří hlavních frakcí: 1-2 mm, 2-4 mm a 4-6 mm. Byly vyrobeny vzorky s 1%, 2%, 3% a 4% obsahem XPS a se sedmi kombinacemi frakcí: 4-6 mm; 2-4 mm; 1-2 mm; 0,5 % 4-6 mm + 0,50 % 1-2 mm; 0,75 % 2-4 mm + 0,25 % 1-2 mm; 0,5 % 2-4 mm + 0,5 % 1-2 mm; 0,75 % 2-4 mm + 0,25 % 1-2 mm. Všechny vzorky měly poměr voda/sádra v souladu s EN 13279-1. Kromě toho byl vytvořen referenční vzorek bez obsahu XPS. Na vzorcích byly provedeny zkoušky kapilární absorpce, objemové hmotnosti v suchém stavu, povrchové tvrdosti Shore C, pevnosti v tahu za ohybu a tlaku po 7 dnech a tepelné vodivosti dle EN 13279-2 [12].

Bylo zjištěno, že použití XPS jako plniva ovlivňuje dobu tuhnutí a zpracovatelnost sádrového kompozitu. Se zvyšujícím se procentem XPS

v sádrové matici dochází ke snižování objemové hmotnosti až o 29,59 % (u kompozitu s kombinací 3 % frakce 2-4 mm a 1 % frakce 1-2 mm). SEM analýza potvrdila, že propojení XPS a sádrou je akceptovatelné, navíc sádrový kompozit s obsahem XPS dosahuje nižších hodnot kapilární absorpce. Rozložení XPS v sádrové matici zajistí vysokou povrchovou drsnost zvyšující se s množstvím obsaženého XPS. Tento jev ovlivňuje povrchovou tvrdost Shore C, která klesá s obsahem XPS. Přidáním velkého množství XPS bylo pozorováno snížení pevnosti v tahu až o 57,91 % a v tlaku až o 74%. Kromě toho většina kompozitů s 3% obsahem XPS nesplnila minimální požadavky na pevnost v tlaku dle evropských norem. Pokud jde o tepelnou vodivost, přídavek vysokého procenta XPS o frakcích 4-6 mm a 2-4 mm způsobil snížení součinitele tepelné vodivosti až o 37,6 %. Bylo konstatováno, že tento lehký materiál může být mimo jiné použit pro výrobu prefabrikovaných sádrových desek pro příčky [12].



Obr. 2: Použité frakce XPS [12]

- **Expandovaný polystyren**

V porovnání s výzkumem probíhajícím v Madridu, kde byl jako plnivo využít odpadní extrudovaný polystyren, zkoumal v posledních letech tým vědců pod vedením V. Ferrándiz-Mas (University of Alicante, Španělsko) využití odpadního expandovaného polystyrenu (EPS) jako plniva do lehkých environmentálně udržitelných cementových malt. Faktory a interakce, které ovlivňují tyto malty, byly studovány pomocí experimentální statistické metody ad-hoc návrhu na základě D-optimálního kritéria. Tato metoda umožňuje modifikovat více faktorů současně, což snižuje počet experimentů v porovnání s jinými metodami. Byly studovány čtyři faktory na několika úrovních: typ EPS (dvě úrovně), obsah EPS (dvě úrovně), přidané přísady (tři úrovně), typ cementu (tři úrovně). Dále byly studovány dva druhy kameniva. Byly provedeny zkoušky zpracovatelnosti, obsahu vzduchu, pevnosti v tlaku, přídržnosti, sypané hmotnosti a kapilární absorpce [13].

Expandovaný polystyren je inertní uhlovodíkový termoplast, který se díky svým vlastnostem, jako je nízká objemová hmotnost, dobré tepelně izolační vlastnosti, a odolnost proti vlhkosti, používá v mnoha aplikacích. Množství odpadního EPS se zvyšuje v důsledku rostoucího využívání tepelných a zvukových izolací, balení potravin apod., proto více než 30 zemí podepsalo mezinárodní dohodu pro maximalizaci opětovaného využití EPS [13].

Při výzkumu byly použity tři typy cementu: portlandský cement CEM I 52,5R, portlandský cement s příměsí strusky CEM II/A-S 42,5N a cement obsahující granulovanou vysokopeční strusku CEM III/A 42,5N. Dále byly použity dva typy písku s rozdílnou zrnitostí a mineralogií: standardní křemičitý písek s objemovou hmotností  $1770 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a vápencový písek s objemovou hmotností  $1850 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Byly použity dva druhy EPS – základový a práškový. Rozdíl mezi nimi spočíval zejména ve velikosti částic. Oba druhy byly získány mechanickým mletím a prosíváním recyklovaného EPS. 100 % částic základového EPS prošlo sítím o velikosti oka 1 mm a jejich sypaná hmotnost byla  $13 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Částice práškového EPS prošly sítím o velikosti ok 0,5 mm a měly mírně vyšší sypanou hmotnost  $22 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Dále byla přidána provzdušňovací přísada (A, BASF Rheomix 934), retenční přísada (R, TER CELL HPMC 15 MS PF), superplastifikátor (S, BASF Rheomix GT 205 MA) a disperzní polymer (V, VINNAPAS 5028 E) [13].

Na jednotlivých maltách byly provedeny zkoušky rozlitím. Malty vyrobené z křemičitého písku z kombinací faktorů A1B3C3D1 měly nejnižší hodnoty rozlití (do  $157,3 \pm 4$  mm). Bylo zjištěno, že na zpracovatelnost malty má vliv geometrie a velikost částic EPS, dále obsah a kombinace příměsí a typ cementu. Naopak druh použitého písku neměl na zpracovatelnost vliv [13].

Tab. 3: Faktory a úrovně vybrané pro experiment [13]

Faktor	Počet úrovní	Úroveň	
Typ EPS	2	A1	práškový EPS
		A2	základový EPS
Obsah přidaného EPS	3	B1	40
		B2	50
		B3	60
Obsah přísad	3	C1	0,8A/0,1R/0,8S/6V
		C2	0,4A/0,1R/0,5S/6V
		C3	0,3A/0,1R/0,4S/6V
Typ cementu	3	D1	CEM I
		D2	CEM II
		D3	CEM II

Co se týče pevnosti v tlaku, jevíly se pro malty s použitím křemičitého písku nejlepší kombinace s přidáním 40 či 60 % EPS a to A1C1D2 ( $11,7 \pm 1,1 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ) a A2C1D2 ( $13,0 \pm 1,1 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ). Malty s obsahem přidaného EPS 50 % se ukázaly méně vhodné v porovnání s maltami, kde přídavek EPS byl 40 a 60 %, neboť jejich pevnost v tlaku klesla o 35,7 % (A1), respektive 39,2 % (A2) [13].

Koeficient kapilární absorpce vody (C90) byl u malt obsahující křemičitý písek významně ovlivněn všemi faktory s výjimkou obsahu EPS. U malt obsahující vápencový písek byly všechny faktory významné, což svědčí o vlivu typu písku na koeficient kapilární absorpce. Malty vyrobené z vápencového písku byly klasifikovány dle EN 998-1 jako W2, což znamená, že dosahovaly hodnot  $C90 \leq 0,20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-0,5}$  [13].

Zvolená kombinace faktorů měla vliv na všechny vlastnosti, kromě přídržnosti. Malty vyrobené z křemičitého písku vykazovaly hodnotu rozlití mezi 168 a 180, objemová hmotnost byla mezi 1280 a 1110  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a koeficient kapilární absorpce mezi 0,025 a 0,279  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-0,5}$ . Díky těmto vlastnostem jsou zmiňované malty vhodné pro komerční použití [13].

### 1.3.2.2 Omítky na bázi aerogelu

Na univerzitě v Italské Perugii proběhl výzkum týmu Buratti, Moretti, Belloni, Agosti, jehož náplní bylo zkoumání tepelného a akustického chování omítek na bázi aerogelu. Granulovaný silikátový aerogel byl smíchán s přírodní omítkou v několika procentech. Tento materiál je izolační a zároveň propustný pro vzduch díky použití přírodního páleného vápna a aerogelu, což je vysoce porézní materiál s velmi nízkou hodnotou součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$ . Hodnota  $\lambda$  byla zjišťována měřidlem tepelného toku dle EN ISO 12667 s ohledem na procento granulovaného aerogelu. Přírodní omítka bez aerogelu vykazovala hodnotu součinitele tepelné vodivosti okolo  $0,50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . S ohledem na procento přidaného aerogelu (80 – 99 %) se snížila hodnota součinitele  $\lambda$  až na  $0,050 - 0,014 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . S rostoucím obsahem aerogelu však díky vysoké poréznosti aerogelu dochází ke zhoršení mechanických vlastností omítky. Za dobré komerční řešení lze považovat omítku s 80 % granulovaného aerogelu ( $0,050 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ). Díky aplikaci této nové omítky může být snížena hodnota součinitele prostupu tepla  $U$  různých zdí o 6 až 20 % v závislosti na druhu stratigrafie. Tyto výsledky byly zjištěny experimentálním měřením in-situ metodou infračervené termografie po nanesení omítky na bázi aerogelu z interiéru. Tato omítka může být aplikována z interiéru i exteriéru, a to v novostavbách i starších stavbách za účelem zlepšení jejich tepelně izolačních vlastností [14].

### 1.3.2.3 Přírodní vlákna

V posledních desetiletích se mnoho studií zaměřuje na použití přírodních vláken jako náhrady za vlákna syntetická ve vyztužených kompozitech a maltách. Přírodní vlákna jsou využívána v mnoha stavebních materiálech díky jejich přednostem, jako jsou dobré mechanické vlastnosti, nízká cena, nízká objemová hmotnost, nízká tepelná vodivost a recyklovatelnost [15].

- **Abaková vlákna**

Tým vědců ve složení Fabio Iucolano, Domenico Caputo, Flavio Leboffe, Barbara Liguori (Università Federico, Neapol, Itálie) prováděl studii chování sádrového kompozitu s obsahem abakových vláken, jejíž výsledky byly zveřejněny v roce 2015 [15].

Abaka je vlákno z listů banánovníku textilního (*Musa textilis*). Jejím suchým a čistým vláknům se obvykle říká manilské konopí [16]. Při výzkumu byl zjišťován účinek abakových vláken na mechanické vlastnosti sádrové matrice. Dále byl zkoumán účinek různých povrchových úprav vláken. Vlákna byla podrobena různým chemickým ošetřením (destilovaná voda, NaOH roztok a EDTA roztok, což je roztok kyseliny ethylendiamintetraoctové) pro modifikaci vlastností a zlepšení přilnavosti k sádrové matrici. Jejich účinky byly zkoumány rastrovacím elektronovým mikroskopem a mechanickými zkouškami, jako je tahová zkouška a třibodový ohyb. Ošetření vláken roztoky NaOH a EDTA mělo za následek zhoršené mechanické chování kompozitu, naopak vlákna ošetřená destilovanou vodou vykazovala lepší přilnavost k matrici. Dále bylo zjištěno, že přídavek abakových vláken do sádrové matrice nemá vliv na tuhnutí směsi a přídavek 2 hmotnostních % abakových vláken vede k zlepšení houževnatosti kompozitu [15].

- **Slaměná vlákna**

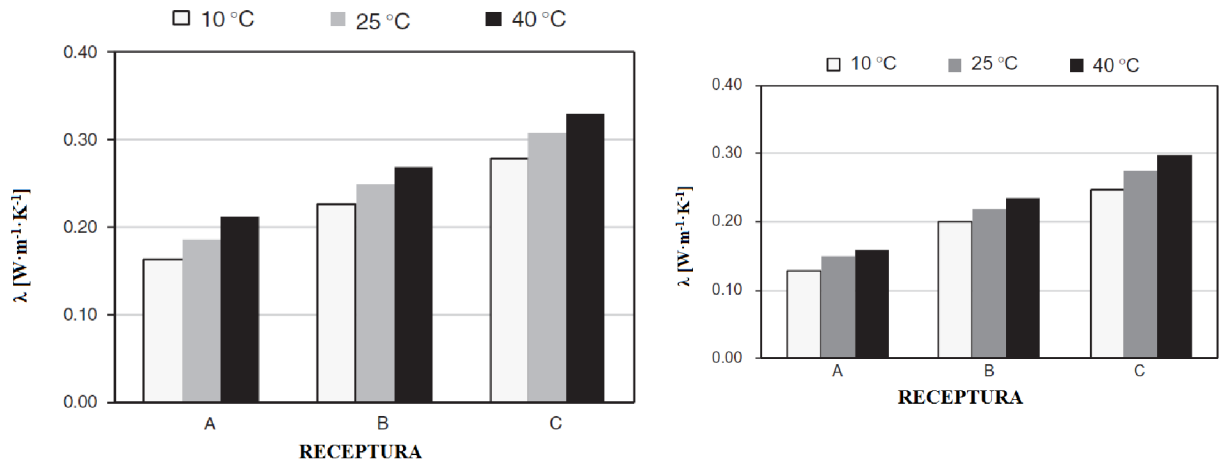
Podobná studie zkoumající využití přírodních vláken, jakožto výztuže do kompozitů, proběhla již v roce 2010. Tým ve složení T. Ashour (Egypt), H. Wieland (Německo), H. Georg (Německo), F. Bockisch (Německo), W. Wue (Rakousko) však jako matrici použil hlínu, na rozdíl od výzkumu v Neapoli, kde byla použita sádra. Použitá vlákna byla slaměná a dřevěná [17].

Studie byla zaměřena na měření tepelné vodivosti některých přírodních omítkových malt, které by mohly být využity pro budovy stavěné z balíků slámy. Malty se skládaly ze soudržné zeminy (31 % jílu < 2  $\mu\text{m}$ ; 22 % nánosů 20-63  $\mu\text{m}$  a 47 % písku 63-2000  $\mu\text{m}$ ), písku a slámy, přičemž sláma sloužila jako rozptýlená výztuž. Byly využity tři typy vláken, a to slaměná vlákna z pšenice, slaměná vlákna z ječmene a dřevěné hobliny. Průměrná délka vláken byla 5 cm, přičemž hobliny byly dlouhé kolem 2 cm. Bylo provedeno měření součinitele tepelné vodivosti metodou desky dle EN 12667. Bylo zjištěno, že tepelná vodivost všech zkoušených materiálů klesala se zvyšujícím se obsahem vláken a rostla se zvyšujícím se obsahem písku. Výsledky měření současně ukázaly, že hliněný kompozit vyztužený vlákny z pšenice, se ze všech použitých vláken jeví jako nejlepší z hlediska tepelně izolačních vlastností [17].



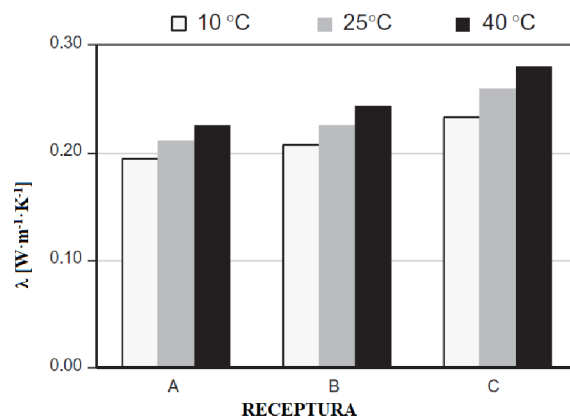
Tab. 4: Složení jednotlivých receptur [17]

Receptura	Dřevěné piliny			Vlákná z pšenice			Vlákná z ječmene		
	Zemina %	Písek %	Vlákná %	Zemina %	Písek %	Vlákná %	Zemina %	Písek %	Vlákná %
A	25	0	75	25	0	75	25	0	75
B	25	25	50	25	25	50	25	25	50
C	25	50	25	25	50	25	25	50	25



Obr. 3: Grafická závislost součinitele tepelné vodivosti na receptuře pro vlákna z ječmene [17]

Obr. 4: Grafická závislost součinitele tepelné vodivosti na receptuře pro vlákna z pšenice [17]



Obr. 5: Grafická závislost součinitele tepelné vodivosti na receptuře pro dřevěné piliny [17]

### 1.3.2.4 Lehká kameniva jako plniva do malt a kompozitů

Za účelem snížení objemové hmotnosti a zlepšení tepelně izolačních vlastností může být do malty jako plnivo přidáno lehké pórovité kamenivo.

- **Lehké malty s expandovaným vermikulitem a křemičitými úlety**

Turečtí vědci zkoumali v roce 2015 kombinovaný efekt expandovaného vermikulitu a křemičitých úletů na lehké cementové malty při okolních a zvýšených teplotách. Vermikulit je lehké kamenivo na bázi slíd, které po zahřátí na teplotu 650-1000 °C, zvětší svůj objem 8 až 30krát z důvodů přeměny mezivrstvé a strukturální vody na páru [1].

Výzkumný tým tvořili Fuat Koksall (Bozok University, Yozgat, Turecko), Osman Gencel (Bartın University, Bartın, Turecko) a Mehmet Kaya (Sakarya University, Sakarya, Turecko). V této studii byly zkoumány fyzikální, mechanické, tepelné vlastnosti a mikrostruktura vyrobených malt. Poměr vermikulit/cement (v/c) byl u zkoušených malt 4, 6, 8. Křemičité úlety byly přidávány v poměrech 0 %, 5 %, 10 %, 15 % v rámci každého v/c poměru. Celkem bylo připraveno 114 vzorků o velikosti 40×40×160 mm, které byly vystaveny teplotám 300, 600 a 900 °C. Bylo pozorováno, že u nových receptur s křemičitými úlety vzrostla pevnost v tlaku a v tahu za ohybu a trvanlivost za vysokých teplot. Objemová hmotnost malty v ztvrdlém stavu se pohybovala v rozmezí 1200 a 780 kg·m<sup>-3</sup>. Pórovitost malty se rostla mezi 28,9 % a 43,2 % v závislosti rostoucím poměru v/c. Absorpce vody byla závislá na obsahu vermikulitu ve směsi, díky jeho vysoké pórovitosti, a pohybovala se mezi 24,2 až 40,6 %. Pevnost v tlaku při okolních teplotách nabývala hodnot mezi 3,9 a 16,4 N·mm<sup>-2</sup>. Součinitel tepelné vodivosti klesal v závislosti na poměru v/c až na 0,257 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>. Přítomnost křemičitých úletů v maltě zlepšovala její mechanické vlastnosti, zatímco přítomnost expandovaného vermikulitu zlepšovala tepelně izolační vlastnosti. Kombinací těchto materiálů se zvýšila odolnost malty proti zvýšeným teplotám a bylo konstatováno, že expandovaný vermikulit se jeví jako dobrý ohnivzdorný materiál [1].

- **Malty pro tepelně izolační omítky na bázi Thermosilitu a úletového popílku**

Na Ústavu technologie stavebních hmot a dílců, Fakulty stavební, Vysokého učení technického v Brně probíhá od roku 2009 výzkum zaměřený na vývoj extrémně lehkých tepelně izolačních omítek na bázi vápenné kaše a lehkého pórovitého kameniva. Dlouhodobým cílem je získat omítku s velmi nízkou objemovou hmotností (250 až 500 kg·m<sup>-3</sup>), velmi nízkou hodnotou součinitele

tepelné vodivosti ( $\lambda \leq 0,08 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) a vysokou otevřenou pórovitostí (okolo 50%). Hlavní důraz byl kladen na výběr vhodného kameniva. Nakonec se ukázala vhodná kombinace Thermosilitu a úletového popílku [18].

Thermosilit je lehké kamenivo na bázi expandovaného vulkanického skla, které má strukturu skelných pelet. Mechanické vlastnosti tohoto kameniva jsou lepší než u expandovaného perlitu, proto může být dosaženo vyšší míry vylehčení s dodržáním požadovaných mechanických vlastností ztvrdlé malty. Thermosilit se dodává ve dvou frakcích: jemné frakci (NF-P) a hrubé frakci (N-P). Sytná hmotnost je závislá na frakci a pohybuje se mezi 40 a 120  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  [18].

Za účelem zlepšení zpracovatelnosti malty v čerstvém stavu a zvýšení tepelně izolačních vlastností byly využity cenosféry, což jsou lehké frakce úletového popílku. Cenosféry byly získány z elektrárenského úletového popílku praním a následným sušením na 105 °C. Sytná hmotnost cenosfér je okolo 410  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  [18].

V článku zveřejněném v roce 2010, který popisuje experimenty prováděné Jiřím Zachem, Rudolfem Helou a Martinem Sedlmajerem, jsou vyvíjené tepelně izolační omítky hodnoceny pozitivně. Materiál měl objemovou hmotnost mezi 300 a 425  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Zkoušky mechanických vlastností potvrdily pozitivní účinek metakaolinu, který může s kombinací vápenné kaše, která působí jako účinný aktivátor, úplně nahradit cement a mechanické vlastnosti dosahují téměř dvojnásobných hodnot. Navzdory skutečnosti, že všechny požadavky na mechanické vlastnosti nebyly zcela splněny, bylo konstatováno, že zkoušený materiál má potenciál pro využití v oblasti nízkoenergetických budov a zateplení stávajících budov pro svou nízkou hodnotu  $\lambda$  a absenci polymerního plniva (EPS). Vysoká otevřená pórovitost a nízká objemová hmotnost z něj dělají materiál s vysokým potenciálem odstraňování vlhkosti z konstrukcí [18].

### 1.3.2.5 Vulkanické materiály jako plniva do malt a kompozitů

Výzkum zabývající se využitelností vulkanického materiálu z vyhaslé sopky Mount Erciyes v Turecku prováděl v roce 2014 Bilgehan Kekeç (Selçuk University, Konya, Turecko). Cílem bylo zjistit, zda je tento materiál vhodný jako plnivo do tepelně izolačních omítkových malt. K testování byly vybrány 3 vzorky

ignimbritů vyprodukované sopečnou aktivitou Mount Erciyes, na nichž byly rozdílné petrografické vlastnosti sledovány pomocí polarizační mikroskopie [19].

Bloky přivezené z lomu byly drceny čelistovým drtičem a mlety v kolovém mlýně na frakci 0-4 mm. Zastoupení jednotlivých zrn o určité velikosti bylo definováno síťovým rozbořem. Rozdrcená zrna byla smíchána s cementem, vodou a vápnem. Omítkové směsi byly vyrobeny v tomto složení: 80 hmotnostních % drcených ignimbritů, 1,7 hmotnostních % cementu a 2,5 hmotnostních % vápna. Porézní struktura vzorků ignimbritů přímo ovlivňovala tepelnou kapacitu a distribuce velikosti zrn ovlivňovala mechanické vlastnosti omítky. Připravená omítka se nanášela ve vrstvě 1 cm na desku o známých vlastnostech, přičemž všechny receptury byly nanášeny na stejnou desku a byl vykonán test v tepelně izolační kabině. Vzorek byl umístěn na rozhraní teplé a studené komory a počáteční teplota obou komor byla stejná. Následně se začal zahřívat zdroj v teplé komoře a teplota obou komor se zvyšovala, přičemž teploty byly měřeny pomocí termočlánků po dobu 240 minut. Bylo zjištěno, že největší ohřev studené komory nastal u neomítnuté desky (13 °C). Nejlepších výsledků dosáhl vzorek s použitím Ignimbitu-P, kdy se studená komora ohřála pouze o 5 °C. U vzorků s obsahem Ignimbitu-B a Ignimbitu-G se studená komora ohřála o 9 °C [19].

Na základě těchto výsledků bylo konstatováno, že ignimbrity lze díky jejich pórovité struktuře využít jako plnivo do malt pro výrobu tepelně izolačních omítek [19].

Tab. 5: Mineralogické složení vzorků [19]

Typ ignimbitu	Mineralogické složení [%]		Textura
G	Plagioklas	25,0	Porfyrická
	Vulkanické sklo	69,0	
	Klinopyroxén	5,0	
	Opakní minerály	1,0	
P	Plagioklas	10,0	Porfyrická
	Vulkanické sklo	81,0	
	Klinopyroxén	7,0	
	Opakní minerály	2,0	
B	Plagioklas	8,0	Porfyrická
	Vulkanické sklo	79,0	
	Klinopyroxén	3,0	
	Intraklasty	10,0	

### 1.3.3 Záměsová voda

Záměsová voda k výrobě omítek musí být nezávadná. Bez omezení je možno použít pouze pitnou vodu z vodovodního řádu [9]. Velmi nevhodná je voda s obsahem organických látek pocházejících z rozkladných procesů, fekálního znečištění nebo výluh z humózních půd. Záměsová voda pro přípravu malt musí splňovat stejné vlastnosti jako záměsová voda do betonu uvedené v normě ČSN EN 1008 - *Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu* [3].

### 1.3.4 Přísady a příměsi

Přísady a příměsi jsou látky, které v malém množství přidáváme do malty a tím měníme její vlastnosti v čerstvém stavu či finální vlastnosti zatvrdlé malty [9].

Již v minulosti měli lidé snahu do omítkových směsí přidávat různé suroviny a tím modifikovat jejich vlastnosti. Jednalo se například o ovocné šťávy, pivo, vejce, tvaroh nebo zvířecí krev [3].

V současnosti najdeme na trhu velké množství přísad a příměsí, které rozlišujeme podle účelu použití. Jedná se o urychlovací a zpomalovací přísady, plastifikační přísady, provzdušňovací a odpěňovací přísady, adhezivní a retenční přísady. Dále jsou to různé pigmenty mající probarvovací funkci nebo disperzní výtzuž zvyšující objemovou stálost malty při vysychání [9].

## 1.4 Tepelně izolační omítky

Tepelně izolační omítky jsou využívány především jako náhradní varianta vnějších kontaktních zateplovacích systémů v případech, kdy tyto systémy není možno použít. Svými parametry zlepšují tepelně technické vlastnosti obvodového pláště, a to díky nízké hodnotě součinitele tepelné vodivosti. Tepelně izolační omítky mohou být využity jako primární zateplovací systém, jako doplněk jiného zateplovacího systému, nebo se používají lokálně k eliminaci tepelných mostů například v okolí okenních rámců. Lze je aplikovat v interiéru i exteriéru, a to i dodatečně. Tepelně izolační omítky musí mít mimo nízké hodnoty součinitele tepelné vodivosti také značnou paropropustnost. Dále musí umožnit snadné a rychlé omítání a vytvořit smršťovací trhliny během

vysychání. V neposlední řadě musí být lehké, aby je bylo možné nanášet ve více vrstvách [4].

Nízkých hodnot součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$  dosahují tepelně izolační omítky díky dostatečně velkému obsahu vzduchu v maltové směsi. Potřebná pórovitost je zajištěna pomocí provzdušňovacích a napěňovacích přísad nebo vylehčením malt plnivý jako jsou keramzit, expandovaný perlit, skleněné dutinové kuličky, aj [5].

Výhodou tepelně izolačních omítek je fakt, že tvoří souvislý povrch fasády a tím zabraňují vzniku tepelných mostů. Tato varianta zateplení také umožňuje zateplit konstrukci složitějších či oblých tvarů. Výhodou je i protipožární odolnost. Nevýhodou je jejich tepelně izolační účinnost, která je výrazně menší oproti dodatečným zateplovacím systémům na bázi pěnového polystyrenu nebo minerální vlně. Další nevýhodou je jejich omezená tloušťka, která je většinou omezena na 50 – 60 mm [5].

Co se týče aplikace tepelně izolačních omítek, na stavbu se nejčastěji dodávají jako suchá maltová směs, která se poté smíchá s vodou, k čemuž se používá samospádová míchačka nebo ruční elektrické míchadlo. Před samotným nanášením je důležité zajistit, aby byl podklad pevný, soudržný, suchý, drsný, bez prachu, nátěrů a výkvětů. Poklad nesmí být vodoodpudivý a jeho nasákavost musí být rovnoměrná. Aplikace probíhá následujícím způsobem. Malta se nanáší na minimálně 3 dny starý cementový postřík a natahuje se pomocí lžice a latě mezi připravené omítníky. Maximální tloušťka jedné vrstvy je 30 cm. V případě potřeby se aplikují dvě vrstvy, mezi nimiž předepisuje výrobce časový odstup. Po vytvrdnutí následují finální úpravy jako je zarovnání povrchu a úprava povrchu tenkovrstvými omítkami [4].

Tepelně izolační omítky představují řešení, které může být aplikováno na historické budovy. Přestože jsou historické budovy vyňaty z povinnosti přijímat zvláštní energetické standarty, je žádoucí, aby tvořily přijatelné podmínky, co se týče kvality vnitřního prostředí a energetické náročnosti. Zpracovatelnost tepelně izolační omítky je podobná jako u omítky tradiční. Jsou vhodné pro jakékoliv architektonické a konstrukční řešení. Mimoto se vyznačují hodnotou faktoru difúzního odporu  $\mu$  mezi 5 až 15. Z tohoto důvodu je možné použít tepelně izolační omítky na stávající zdivo postižené kapilárně vztlínající vlhkostí, což je častý problém historických budov. Tepelně izolační omítky je

možné rozdělit do dvou kategorií podle typu pojiva a to tepelně izolační omítky s přírodními pojivy (např. přírodní hydraulické vápno) a tepelně izolační omítky s cementovými či umělými pojivy [2].

#### 1.4.1 Výzkum tepelně izolačních omítek

V současnosti jsou zkoumány stále nové druhy tepelně izolačních omítek s cílem snížení jejich tloušťky a tepelné vodivosti [2].

Jeden z výzkumů proběhl také v Turíně v roce 2014, kdy výzkumný tým tvořili L. Biancoa, V. Serraa, S. Fantuccia, M. Duttob, M. Massolinoba. Tento výzkum byl zaměřen na omítky na bázi přírodního hydraulického vápna (klasifikovaným dle EN 459-1:2010 jako NHL 2), s plnivem získaným z kukuřičných klasů a s expandovaným perlitem. Tyto omítky jsou vhodné pro izolaci historických budov, neboť jsou aplikovány z interiéru. Přírodní plnivo tvořilo ve směsi 43 % (33 % kukuřičné klasy a 10 % expandovaný perlit) a hrálo dvojí roli: zaprvé využitím odpadního materiálu přispělo k zlepšení izolačních vlastností a zadruhé byly zlepšeny mechanické vlastnosti omítky. Výzkum probíhal v laboratoři, kde byl měřen součinitel tepelné vodivosti metodou měřidla tepelného toku, i v terénu na vybrané budově v Turíně, kde byly použity dvě identické místnosti s orientací na stejnou světovou stranu. V jedné místnosti byla na obvodovou stěnu aplikována tepelně izolační omítka o tloušťce 60 cm, druhá místnost zůstala referenční stěna bez této omítky. Prostřednictvím sond bylo provedeno kontinuální měření tepelného toku, povrchové teploty a teploty vzduchu dle ISO 9869-1:2014. Následně proběhly výpočty součinitele prostupu tepla [2].

Výzkumníky v Turíně bylo zjištěno, že použitá tepelně izolační omítka dosahovala hodnot součinitele tepelné vodivosti 2,5 až 3× nižších než běžná omítka, což vedlo k snížení energie procházející stěnou o 20 až 40 %. Výzkum nadále pokračuje s cílem tyto hodnoty ještě snížit, nicméně, tyto vlastnosti dělají z nové tepelně izolační omítky konkurenceschopné řešení pro zateplení historických budov [2].

Jak již bylo zmíněno, výzkum zaměřený na tepelně izolační omítky probíhá také na Fakultě stavební VUT v Brně. Článek zveřejněný v roce 2013 pojednává o výzkumu prováděném společně s Fakultou stavební ve Vídni,

na kterém spolupracovali Jitka Hroudová, Jiří Zach, Rudolf Hela a Azra Korjenic. Výsledkem byla simulace chování tepelně izolační omítky na bázi silikátů, která je vhodná pro tepelnou izolaci interiéru a zároveň sanaci budov. Směs se skládala z kameniva na bázi expandovaného obsidiánu, vápenného hydrátu s přídavkem metakaolinu a nakonec byl přidán úletový popílek. Jako přísady byly přidány celulóza a Tylovis. Pro vyhodnocení tepelně vlhkostního chování omítkové směsi na reálné konstrukci byl využit výpočtový program WUFI® 2D. Vzhledem k tomu, že vyvíjená omítka by měla být uplatněna jako doplněk ke kapilárně aktivním interiérovým zateplovacím systémům v problematických detailech, byl pro výpočet vybrán detail okenního ostění. Konstrukce byla monitorována po období 1. 10. 2009 až 1. 9. 2012 [20].

Z provedených počítačových simulací bylo zjištěno, že v zimním období se v tepelně izolační omítce neakumulovala vlhkost a zároveň se zlepšila funkčnost zdiva v problematických detailech, jako jsou okenní a dveřní ostění. Bylo konstatováno, že tato omítka může být použita samostatně, nebo jako součást vnitřního, izolačního, kapilárně aktivního systému [20].

V článku zveřejněném v roce 2015 je popsán výzkum prováděný Jitkou Hroudovou, Jiřím Zachem a Martinem Sedlmajerem zabývající se vývojem kapilárně aktivních tepelně izolačních omítek vhodných pro historické budovy. Bylo zkoumáno vlhkostní chování zkušebních směsí tepelně izolačních a sanačních omítek na bázi obyčejných i alternativních pojiv. Bylo vyrobeno 10 testovacích směsí s lehkým kamenivem ve formě expandovaného obsidiánu a jako pojiva byly použity v daném poměru následující materiály: vápenný hydrát (LH), cement (CEM) a alternativní pojivo reprezentována metakaolinem (MET) a úletovým popílkem (FA). Dále byly použity přísady methylcelulóza, provzdušňovací přísada, a další složky. Obsah vody byl takový, že rozlití čerstvé malty nabývalo hodnot 140 až 150 mm. V referenční směsi označené R-CEM byl jako pojivo použit cement. Ve směsích Met 1 a Met 2 byl jako pojivo použit metakaolin a rozdíl byl pouze v obsahu vody. Směsi Met-LH 1 a Met-LH 2 využívali jako pojivo metakaolin a vápenný hydrát v poměrech 1:2,2 a 1:4,4. Směsi Met-LH-AL 1, Met-LH-AL 2 a Met-LH-AL 3 byly navrženy s poměry metakaolin/úletový popílek 1:3, 3:1 a 1:1. Poslední dvě směsi Met-LH-AI a LH-FA-AI byly navrženy s použitím hliníkového prášku jako provzdušňovací

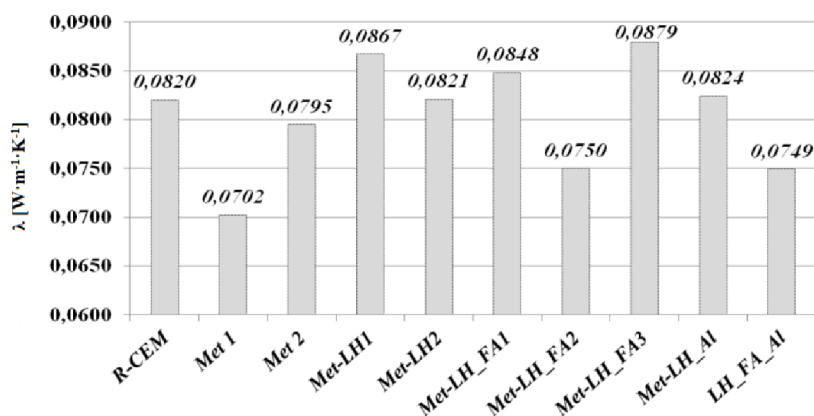


přísadou za účelem zvýšení porozity. Na čerstvých maltách byly vykonány zkoušky objemové hmotnosti čerstvé malty dle EN 1015-6, konzistence rozlitém dle EN 1015-3 a obsahu vzduchu dle EN 1015-19. Na ztvrdlých maltách byly vykonány zkoušky objemové hmotnosti dle EN 1015-10, pórovitosti dle ČSN 72 5010, koeficientu kapilární absorpce dle EN 1015-18 a tepelné vodivosti podle ISO 8301 a EN ISO 8894-1 [21].

Bylo zhodnoceno, že zkoušené tepelně izolační omítky na bázi alternativních pojiv vykazovaly dobré fyzikální a tepelně izolační vlastnosti. Vlhkostní chování bylo zkoumáno prostřednictvím koeficientu kapilární absorpce a difúzního odporu. Absorpce vody a pórovitost vzorků byly také důležité vlastnosti poskytující informace o struktuře vzorků. Směs Met 1 se ukázala vhodná pro použití i jako sanační omítka, neboť splňovala většinu požadavků směrnice WTA 2-9-04/D a dosáhla nejlepších hodnot ve srovnání s ostatními směsi. Nebyl splněn pouze požadavek na hloubku průniku vody, což by se muselo dodatečně řešit vhodnými hydrofobizačními přísadami [21].

Tab. 6: Vlastnosti čerstvých malt [21]

Směs/Vlastnost	R-CEM	Met 1	Met 2	Met-LH1	Met-LH2	Met-LH_FA1	Met-LH_FA2	Met-LH_FA3	Met-LH_AI	LH_FA_AI
Objemová hmotnost [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	850	670	760	760	770	820	770	700	800	860
Obsah vzduchu [%]	21	27	28	22	35	32	30	40	28	28
Hodnota rozliti [mm]	145	40	140	140	140	145	140	140	140	140



Obr. 6: Grafické znázornění součinitele tepelné vodivosti pro jednotlivé směsi [21]

Tab. 7: Vlastnosti zatvrdlých malt [21]

Směs/Vlastnost	R-CEM	Met 1	Met 2	Met-LH1	Met-LH2	Met-LH_FA1	Met-LH_FA2	Met-LH_FA3	Met-LH_AI	LH_FA_AI
Pórovitost [%]	58,4	62,2	80,1	69,7	75,2	68,9	73,4	76,6	77,4	70,2
Propustnost pro vodní páru [%]	5,8	5,8	6	5,8	6,3	6,4	6	5,2	5,3	5,5
Koeficient kapilární absorpce [kg·m <sup>-2</sup> ·min <sup>-0,5</sup> ]	2,4	1,3	2,7	0,2	0,6	1,3	1,9	0,9	1,1	1,3
[kg·m <sup>-2</sup> ]	29,7	24,7	30,7	10,7	22,3	29,6	30,7	23,9	24,4	26

#### 1.4.2 Použití tepelně izolačních omítek z ekonomického a ekologického hlediska

Aspektem, který ovlivňuje výběr mezi klasickou či tepelně izolační omítkou, je také ekologické či ekonomické hledisko jejího použití. Analýzou těchto hledisek se zabývali Robert Dylewski a Janusz Adamczyk z Univerzity v Zielone Górze z Polska. Jejich cílem bylo posoudit, zda je výhodné použití tepelně izolačních omítek na bázi EPS a granulované pemzy namísto klasické cementové omítky. Jako nástroje pro ekologickou analýzu byly použity metoda posuzování životního cyklu (LCA) a čistý ekologický efekt. Metoda LCA pracuje s vyčíslením všech environmentálních dopadů spojených s produktem během celého jeho životního cyklu. Čistý ekologický efekt pro životní prostředí se získá jako rozdíl mezi ekologickým účinkem a zatížením na životní prostředí [22].

Bylo zjištěno, že omítka na bázi granulované pemzy má dobré tepelně izolační vlastnosti ( $\lambda = 0,068 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), čímž zlepšuje tepelně izolační vlastnosti stěn a snižuje spotřebu tepelné energie při užívání budovy. Čistý ekonomický efekt je pro tuto omítku pozitivní již po dvou letech s použitím elektrického kotle a po pěti letech s použitím plynového kotle. V případě použití cementové omítky s elektrickým kotlem by byl čistý ekonomický efekt pozitivní až za 30 let. V případě užití cementové omítky s jinými zdroji vytápění nebude čistý ekologický efekt pozitivní ani po 50 letech [22].

Co se týká ekonomického hlediska, bylo zjištěno, že ekonomické zisky získané při použití tepelně izolačních omítek jsou několikanásobně vyšší než při použití omítky cementové. Bohužel však tyto zisky zcela nepokrývají náklady vynaložené za aplikaci omítky. Největší část nákladů je hrazena v případě použití elektrického kotle jako zdroje tepla (asi 22 % pro omítky na bázi granulované pemzy a 25 % pro omítky na bázi EPS [22]).

Jakákoli nově vyvinutá tepelně izolační omítka musí dosahovat určitých parametrů, aby byla konkurenceschopná na trhu. Italský tým Barbero, Dutto, Ferrua provedl v roce 2012 obsáhlou analýzu evropského trhu produktů tepelně izolačních omítek. Pro tyto účely byly produkty rozděleny do tří kategorií: tepelně izolační omítky na bázi cementových a umělých pojiv, tepelně izolační omítky na bázi cementu a plniva z expandovaných minerálů a tepelně izolační omítky na bázi přírodního hydraulického vápna. Tyto produkty byly porovnávány prostřednictvím čtyř parametrů: sypaná hmotnost, objemová hmotnost zatvrdlé malty, tepelná vodivost a cena na metr čtvereční aby bylo dosaženo předem určené hodnoty konečného tepelného odporu  $R_x = 1,0 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ . Bylo zhodnoceno, že průměrná cena za  $\text{m}^2$  s předpokladem stejného tepelného chování byla 32 Euro/ $\text{m}^2$  u produktů na bázi cementu a 53 Euro/ $\text{m}^2$  u produktů na bázi hydraulického vápna. Z důvodů spravedlivého průzkumu nebyly zveřejněny názvy porovnávaných komerčních produktů, protože cílem nebylo určit nejlepší a nejhorší produkt, ale určit vlastnosti, které musí splňovat nová tepelně izolační omítka, která by měla vstoupit na trh. Požadovanými vlastnostmi tedy jsou zejména cena, která by se měla pohybovat mezi 45 až 60 Euro za  $\text{m}^2$  a objemová hmotnost zatvrdlé malty, která by měla být menší než  $250 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Dále je požadovaná velmi nízká vodní absorpce a vysoká propustnost pro vodní páru. Dále jsou důležitými aspekty požadavky na aplikaci, jakými jsou malá tloušťka se stejnou mírou tepelné izolačnosti, rychlá a jednoduchá aplikace pomocí stroje, aplikace rozšířená na mnoho oblastí (staré budovy, občanská či průmyslová výstavba), možnost aplikovat omítku na různý podklad (cihelné zdivo, beton, smíšené zdivo), všestranné použití omítky v interiéru i exteriéru. Zmíněné vlastnosti jsou předpoklady pro úspěšné včlenění nově vyvinuté tepelně izolační omítky na trh [23].

## 1.5 Sanační omítky

Sanační omítky se využívají k povrchové úpravě zdiva s vysokým obsahem vlhkostí a solí. Jde o omítky, které mají vyšší pórovitost, vyšší propustnost pro vodní páru a sníženou kapilární nasákavost než omítky cementové, vápenocementové a vápenné. Tyto vlastnosti mají pozitivní vliv na mrazuvzdornost a odolnost omítek proti působení vodorozpustných solí. Zároveň se zvyšuje životnost povrchové úpravy na 15 až 20 let [5].

### 1.5.1 Směrnice WTA

Vlastnosti sanačních omítek popisují nejpodrobněji směrnice společnosti WTA (Vědecko-technická společnost pro údržbu budov a památkovou péči v SRN). První vydání směrnice je z roku 1985. Aktuální české znění bylo vydáno v roce 2004 společností WTA CZ. Sanační omítky jsou již uvedeny jako typ omítek v normě ČSN EN 998-1. Tento typ omítek je také akceptován v rámci evropské normalizace, ale zatím neexistuje norma, která by tuto oblast popisovala tak detailně, jako směrnice WTA, proto se používá i v praxi při návrhu, definici parametrů, zkoušení a aplikaci sanačních omítek. Technická směrnice WTA 2-2-91 nabízí podklady pro výrobce, projektanty, prováděcí firmy a investory [24].

### 1.5.2 Princip sanačních omítkových systémů

U sanačních omítek je díky vhodnému pórovému systému a jeho vnitřní hydrofobizaci výrazně snížen kapilární transport vlhkosti ze zdiva ve srovnání s procesem difuze vodní páry. Vlhkost ze zdiva tedy může na povrch prostupovat jen ve formě vodní páry. Díky výše uvedeným vlastnostem může vlhkost ze zdiva vniknout do sanační omítky WTA pouze do hloubky několika milimetrů a vypaří se. Vykrytalizované soli, které byly do omítky vneseny prostřednictvím vlhkosti, se poté ukládají v pórovité struktuře omítky a její povrch zůstává suchý a bez výkvětů. Současně vysoká paropropustnost sanační omítky příznivě ovlivňuje vysychání zdiva a na rozdíl od ostatních omítek není paropropustnost účinkem ukládání solí dlouhodobě ovlivněna, což znamená, že vykrytalizované soli netvoří zábranu proti dalšímu vysychání [25].

### 1.5.3 Použití sanačních omítkových systémů

Sanační omítky se využívají v případech, kdy by docházelo k brzké degradaci klasických vápenných nebo vápenocementových omítek. První případ je izolace zdiva podzemních prostor z kamene, kdy je obtížné provést dodatečnou izolaci zdiva. Dalším případem použití sanační omítky je situace, kdy po provedení dodatečné izolace zůstává zdivo stále vlhké a počítáme s jeho vysycháním až na 10 měsíců. Sanační omítku aplikujeme i v případech, kdy je ve zdivu zvýšený obsah škodlivých solí, jejichž hydroskopičnost způsobuje zvýšený obsah vlhkosti ve zdivu, a to i přes přítomnost dodatečné izolace. Sanační omítky aplikujeme v neposlední řadě taky na místa silně smáčená odstříkující vodou, například sokly. Použití sanačních omítek je vhodné kombinovat s dalšími metodami snižování vlhkosti ve zdivu jako je obnova hydroizolací, aplikace provětrávaných vzduchových systémů či drenáží [24].

### 1.5.4 Požadavky na sanační omítkové systémy

Sanační omítky WTA obsahují převážně hydraulická pojiva, neboť je nutné, aby relativně rychle a dostatečně ztvrdly a vyschly. Použití vzdušných pojiv, latentně hydraulických pojiv či pucolánů je z hlediska splnění těchto požadavků problematické [25].

Sanační systémy umožňují podle potřeby vytvářet souvrství omítek, přičemž každá vrstva se vyznačuje specifickými vlastnostmi.

První vrstvou je podhoz. Tato vrstva má zajistit přilnavost k podkladu. V praxi se podhoz většinou nenanáší na celý povrch zdiva nýbrž sít'ovitě. Na podhoz jsou kladeny speciální mechanicko-fyzikální požadavky jenom v případech, kdy je plocha zakrytí podhozem větší než 50 % celkové omítané plochy zdiva [24].

Další vrstvou je podkladní omítka, která vyrovnává nerovnosti podkladu (vyrovnávací omítka) nebo slouží k akumulaci solí, v případech, kdy je podklad vysoce zasolen (pórovitá jádrová omítka). Sanační omítka WTA může být použita jako podkladní omítka, pokud nepřesáhne celkovou tloušťku 40 mm (s výjimkou spár ve zdivu) [25].

Poslední vrstvou je sanační omítka WTA, která se ve většině případů nanáší ve vrstvě 20 mm, přičemž v kombinaci s porézní jádrovou omítkou může být tloušťka pouze 15 mm. U vícevrstvých systémů je předepsaná tloušťka jedné

vrstvy minimálně 10 mm a celková tloušťka by neměla překročit 40 mm (s výjimkou spár) [25].

Tab. 8: Požadavky na podkladní a sanační omítku WTA [25]

Vlastnost	Jednotka	Podkladní omítko WTA	Sanační omítko WTA
<b>Čerstvá malta</b>			
Konzistence čerstvé malty	mm	170 ± 5	170 ± 5
Obsah vzduchových pórů	%	> 20	> 25
<b>Ztvrdlá malta</b>			
Objemová hmotnost suché malty	kg·m <sup>-3</sup>	-	< 1400
Koeficient propustnosti vodní páry μ	-	< 18	< 12
Pevnost v tlaku	N·mm <sup>-2</sup>	> Pevnost v tlaku sanační omítky	1,5 – 5,0
Pórovitost	%	> 45	> 40
Hloubka průniku (penetrace) vody	mm	> 5	< 5
Kapilární absorpce vody za 24 h	kg·m <sup>-2</sup>	> 1,0	> 0,3

### 1.5.5 Dělení sanačních omítkových systémů

V článku zveřejněném v roce 2008 v časopise Construction and Building Materials uvedl tým autorů C. Groot, R. van Hees, T. Wijffels z Nizozemska dělení sanačních omítkových systémů, při kterém vycházel z poznatků získaných z projektu Evropské unie KOMPAS. Dle autorů je možné sanační omítky rozdělit do následujících pěti kategorií [26]:

- **Transportní omítkové systémy (1,2)**

Jde o omítkové systémy sloužící k přepravě solného roztoku. Solný roztok migruje ze zdiva skrze omítku a vykrytalizuje na povrchu. Tato kategorie se dále dělí na rychlé a pomalé transportní omítky. Rychlost transportu solného roztoku je závislá na pórovitosti omítky. Nízká pórovitost vede k nízké rychlosti transportu. Pórovitost ovlivňuje zrnitost písku, typ a obsah pojiva. Ve studiích bylo prokázáno, že novodobé cementové omítky vedou vlhkost velmi pomalu. Také průmyslově vyráběné malty, s využitím lehkého kameniva a přísad zadržujících vodu, vykazují pomalý transport [26].

- **Akumulační omítkové systémy (3)**

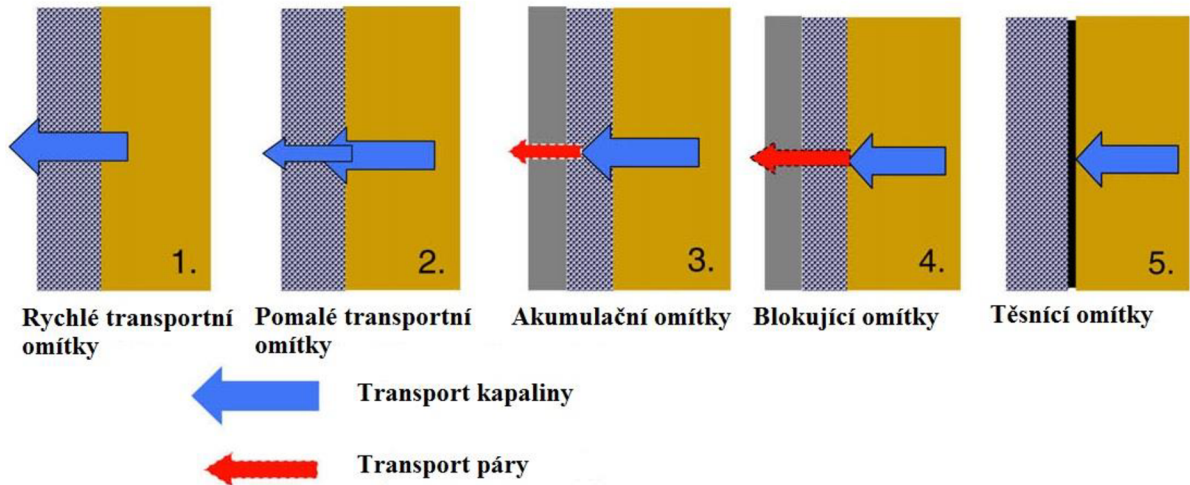
Jsou to systémy, které by měly být schopny adsorbovat solný roztok ze zdiva a nechat ho vykrytalizovat uvnitř malty bez viditelných důkazů na povrchu. Obecně platí, že jde o dvouvrstvé systémy. Akumulovat sůl uvnitř omítky je esteticky výhodné, přináší to však i rizika. Tyto omítky jsou vyrobeny z prefabrikovaných či premixovaných malt s vysokou otevřenou pórovitostí, které bylo dosaženo použitím provzdušňovacích přísad a pórovitého kameniva. V rámci prevence migrace solného roztoku do vnější vrstvy omítky se do této vrstvy přidávají vodoodpudivé přísady. Z tohoto důvodu je akumulace schopnost limitovaná a životnost omítkového systému omezená. Použitím pórovitého kameniva se snižuje pevnost omítky, což má vliv na trvanlivost. Lehké kamenivo je také náchylné k popraskání díky velkému smrštění při sušení. Tyto malty vyžadují pečlivé ošetřování, aby se zamezilo smršťovacím trhlinám [26].

- **Blokující omítkové systémy (4)**

Tyto hydrofobní systémy jsou navrženy tak, aby solný roztok udržely ve zdivu, a rozhraní zdivo/omítka mohla překonat pouze vodní pára a jejím prostřednictvím dochází k pomalému sušení. Tento jev je podmíněn přítomností vodoodpudivé přísady. Je však třeba zdůraznit, že transport vodní páry je pomalejší proces ve srovnání s transportem vodního roztoku soli [26].

- **Těsnící omítkové systémy (5)**

Jde o extrémně nepropustné systémy, které znemožňují transport vodě ve formě kapaliny ani ve formě páry přes rozhraní zdivo/omítka. Toho je dosaženo aplikací živičné vrstvy na rozhraní zdiva a omítky [26].



Obr. 7: Rozdělení sanačních omítkových systémů dle projektu KOMPAS [26]

## 2 Vlhkostní a difúzní vlastnosti stavebních materiálů

Při studiu tepelně izolačních a sanačních materiálů je nezbytné zabývat se vlhkostními a difúzními vlastnostmi těchto materiálů, neboť ovlivňují další materiálové vlastnosti, jako jsou objemová hmotnost, mrazuvzdornost, měrná tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita, pevnost a pružnost. Vlhkost ve stavebním materiálu souvisí s přítomností pórového systému v jeho objemu. Pórovité materiály se prakticky v suchém stavu nevyskytují [5].

### 2.1 Vlhkost ve stavební konstrukci

Ve stavebních konstrukcích jsou rozlišovány následující formy vlhkosti [27]:

- **Vlhkost technologická** – je vnášena do konstrukcí při realizaci stavby tzv. mokkými procesy;
- **Vlhkost zemní** – je vnášena do konstrukce z okolní zeminy, která je v bezprostředním styku s konstrukcí. Bývá problémem zejména u starší zástavby, u novostaveb se eliminuje provedením kvalitní hydroizolace;
- **Vlhkost srážková** – jde o vlhkost v podobě deště, sněhu, námrazy. Jejím šíření lze částečně zabránit vhodnou povrchovou úpravou vnějších povrchů, např. hydrofobizační nátěry, oplechování, obklady;



- **Sorpční vlhkost** – je přijímána z okolního vzduchu díky hygroskopickým vlastnostem materiálu a je závislá na kolísání relativní vlhkosti vzduchu;
- **Zkondenzovaná voda** – vzniká srážením vodní páry ve vzduchu a vodní páry prostupující konstrukcí. K srážení dochází na povrchu nebo uvnitř konstrukce;
- **Provozní vlhkost** – vzniká při užívání objektu v prostorech, kde probíhají mokré procesy (praní, vaření, průmyslová výroba, živočišná výroba, umývárny). Ochranou proti provozní vlhkosti je kvalitně provedená vodotěsná povrchová úprava stěn a izolace podlah.

## 2.2 Vlhkost vzduchu

Vlhkost vzduchu může být popsána těmito veličinami [27]:

- **Částečný tlak  $p_b$**  – dle Daltonova zákona se skládá z částečného tlaku suchého vzduchu  $p_v$  a částečného tlaku vodní páry  $p_d$

$$p_b = p_v + p_d \text{ [Pa]} \quad (1)$$

- **Absolutní vlhkost  $f$**  - vyjadřuje množství vodní páry  $u$  ve vzduchu o objemu  $V$

$$f = \frac{u}{V} \text{ [g} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (2)$$

- **Relativní vlhkost** – vyjadřuje stupeň nasycení vzduchu vodní párou

$$\varphi = \frac{p_d}{p_{d''}} \cdot 100 = \frac{f}{f''} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (3)$$

$p_{d''}$  - tlak nasycené vodní páry [Pa]

## 2.3 Vlhkost materiálu

Vlhkost materiálu ovlivňuje jeho tepelnou vodivost. S rostoucí vlhkostí se zvyšuje součinitel tepelné vodivosti daného materiálu. Voda v pórech vlhkého materiálu má hodnotu součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$  přibližně  $0,58 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , což je asi 25krát vyšší hodnota, než vzduch. V důsledku přítomnosti vlhkosti ve stavebních materiálech dochází ke zvětšování kontaktních plošek v pórech, což může mít negativní vliv na tepelně izolační schopnosti [27]. Při studiu vlhkosti na úrovni materiálu pracuje norma ČSN 73 0540-1 s pojmy [28]:

- **Objemová hmotnost**

Objemová hmotnost v suchém stavu:

$$\rho_d = \frac{m_d}{V} [kg \cdot m^{-3}] \quad (4)$$

Objemová hmotnost materiálu v definovaném stavu (vlhkost, stlačení):

$$\rho = \frac{m}{V} [kg \cdot m^{-3}] \quad (5)$$

$m_d$  – hmotnost materiálu v suchém stavu [kg]

$m$  – hmotnost materiálu v definovaném stavu [kg]

- **Hmotnostní vlhkost**

$$u = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100 [\%] \quad (6)$$

$m$  – hmotnost materiálu ve vlhkém stavu [kg]

$m_0$  – hmotnost materiálu v suchém stavu (zdánlivě suchém stavu) [kg]

- **Objemová vlhkost**

$$\psi = \frac{V_w}{V} \cdot 100 = \frac{u \cdot \rho_0}{\rho_w} \cdot 100 [\%] \quad (7)$$

$V_w$  – objem volné vlhkosti v materiálu zjištěné sušením [ $m^3$ ]

$V$  – objem materiálu [ $m^3$ ]

$\rho_0$  – objemová hmotnost materiálu v suchém stavu [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

$\rho_w$  – hustota vody ( $\rho_w = 997,6 kg \cdot m^{-3}$  při  $23^\circ C$ )

$u$  – hmotnostní vlhkost materiálu [%]

Problematika vlhkostního chování pórovitých materiálů není ani v dnešní době zcela prozkoumaná. Jednou z publikací, ve které se toto téma objevuje, je disertační práce Hartwiga M. Künzela. Autor zde popisuje mimo jiné i ukládání a transport vlhkosti v pórovitých materiálech.

Pórovitý materiál může teoreticky absorbovat vlhkost až do stavu, kdy jsou všechny jeho póry naplněny vodou. Tento fakt však neposkytuje informaci o tom, jaká je jeho skutečná skladovací kapacita vlhkosti za přirozených podmínek. Proto je důležité vytvořit spojení mezi obsahem vody v pórovitém materiálu a okolními podmínkami. Existence závislosti obsahu vody v materiálu a klimatických podmínek je předpokladem pro matematické modelování skladovací vlhkostní kapacity. Aby bylo možné odvodit takovou funkci, rozlišuje Künzel tři oblasti vlhkosti, které se mohou v pórovitém materiálu vyskytovat [29]:

- **Oblast A**

Jde o oblast sorpční vlhkosti nebo hygroskopické vlhkosti, která se pohybuje v rozmezí od suchého stavu do cca 95% relativní vlhkosti. Je zde obsažena voda získaná ze sorpce vodní páry až do stavu rovnováhy [29].

- **Oblast B**

Jedná se o oblast kapilární vlhkosti, která navazuje na oblast sorpční vlhkosti a sahá až k volnému nasycení vodou [29].

Nad každou vodní hladinou je tlak vzduchu. Přímo pod meniskem kapiláry dosahuje kapilární tlak nejvyšších hodnot. Může být vyšší i než barometrický tlak v mikrokapilárách, důsledkem čehož vznikne napětí v tahu a následné zvednutí hladiny vody [29].

V pórovitých stavebních materiálech může tento sací tlak překročit tlak vzduchu bez tvorby bublinek páry. Z důvodu silného uspořádání molekul vody v kapilárách je voda schopna absorbovat tahová napětí. Tímto jevem lze také vysvětlit, jak mohou stromy dopravovat vodu vzlínáním do výšky větší než 10 metrů [29].

Při pozorování pórového systému stavebních materiálů pod mikroskopem se jeví válcový kapilární model nevhodný, protože ačkoliv při malém zvětšení póry vypadají kulovitě, při větším zvětšení již mají tvar špičatých jehel. S pomocí podmínek termodynamické rovnováhy je možné spočítat vztah mezi relativní vlhkostí nad konkávně zahnutou hladinou vody a rozvíjejícím se kapilárním tlakem. Tento vztah je také znám jako Kelvinův vzorec [29]:

$$\varphi = \exp\left(-\frac{p_k}{\rho_w \cdot R_D \cdot T}\right) \quad (8)$$

$\varphi$  – relativní vlhkost vzduchu [%]

$p_k$  – kapilární tlak [Pa]

$\rho_w$  – hustota vody [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

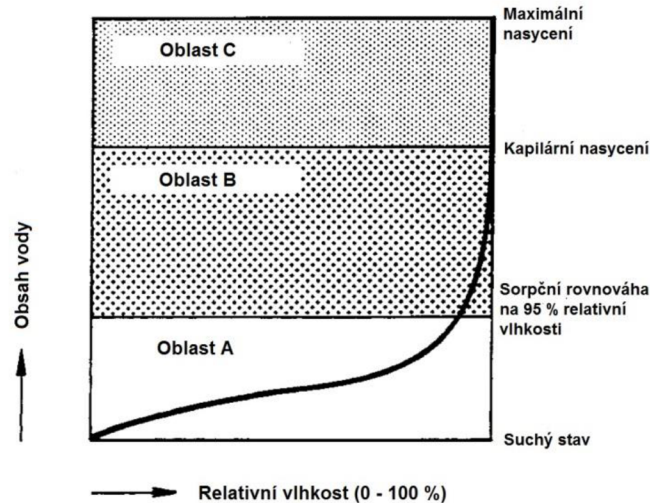
$R_D$  – plynová konstanta pro vodní páru [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

$T$  – absolutní teplota [K]

- **Oblast C**

Jedná se o přesycenou oblast, kde již nemůže být dosaženo normálního sání, či ho může být dosaženo pouze po velmi dlouhou dobu rozpuštěním zapouzdřeného póru vzduchu ve vodě. V praxi lze této oblasti dosáhnout pomocí difúze v teplotním gradientu, v laboratoři ho lze dosáhnout

prostřednictvím sání pod tlakem. V této oblasti, která leží nad stavem volného nasycení vodou a míří ke stavu naplnění všech pórů, již nejsou žádné další stavy rovnováhy. V této oblasti je relativní vlhkost 100 % [29].



Obr. 8: Schématický diagram ukládání vlhkosti v hygrokopickém kapilárně aktivním stavebním materiálu [29]

## 2.4 Transport vlhkosti

K transportu vlhkosti v materiálu může docházet třemi způsoby. Jedná se o sorpci vodní páry, difúzi vodní páry a vodivost vlhkosti [27].

### 2.4.1 Sorpce vodní páry

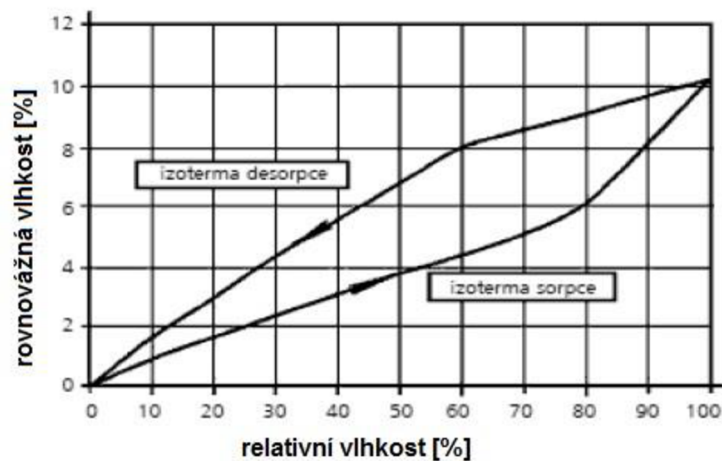
Sorpce vlhkosti je jev, kdy materiál přijímá vlhkost pohlcováním vodní páry obsažené ve vzduchu [5].

Sorpce se skládá ze tří jevů [27]:

- **Adsorpce** je způsobena mezimolekulárními Van der Waalsovými silami, kterými se navzájem přitahují molekuly tuhých látek a vodní páry. Dochází ke vzniku mezimolekulárních vrstev na stěnách pórů. Jejichž počet závisí na relativní vlhkosti vzduchu  $\phi$ . Při změně relativní vlhkosti často dochází k objemovým změnám v materiálu. V jemných pórech se shromažďuje voda, jejíž hladiny jsou v jednotlivých pórech zakřivené a nad nimi je menší částečný tlak vodní páry než nad rovinnou vodní hladinou. Zdvih vody v úzkých pórech způsobí kapilární síly. Vodní páry difundují k zakřivenému povrchu vodní hladiny a zde kondenzují, což nazýváme kapilární kondenzací.

- **Absorpce** je jev, kdy se kapalná nebo plynná fáze vstřebává difúzí a vedením vlhkosti dovnitř tuhé fáze.
- Při **chemisorpci** se uplatňují chemické vazby vody a tuhého materiálu.

Roste-li částečný tlak vodní páry v okolním vzduchu, dochází k sorpci, a pokud částečný tlak vodní páry klesá, dochází k desorpci. Vlhkost, při níž materiál v čase nevykazuje přírůstek ani úbytek vlhkosti, se nazývá rovnovážná sorpční vlhkost. Sorpční vlhkost nabývá nejvyšších hodnot, pokud je okolní vzduch zcela nasycen vodními parami, a potom ji nazýváme vlhkostí hygroskopickou [27].



Obr. 9: Typický průběh izotermy sorpce a desorpce [5]

## 2.4.2 Difúze vodní páry

Difúze je schopnost pronikání molekul plynu, páry nebo kapaliny mezi molekuly pórovitého materiálu. Dochází k ní, jestliže pórovitý materiál odděluje dvě prostředí s rozdílem částečných tlaků [5].

Vodní pára difunduje každou látkou, jejíž mezimolekulární prostory jsou větší než jejich střední volná dráha. Pro vodní páru je volná dráha molekul 27,8 nm. Ve stavebních materiálech rozlišujeme mikrokapiláry a makrokapiláry.

V mikrokapilárách ( $d < 10^{-7}$  m) dochází ke kapilární kondenzaci. A pohyb vodní páry se řídí zákonem efúze (tj. pohyb plynu v malých otvorech).

V makrokapilárách ( $d > 10^{-7}$  m) ke kapilární kondenzaci nedochází, vodní pára se pohybuje podle zákona difúze [27].

Difúzní vlastnosti materiálu je možné popsat těmito veličinami [5, 28]:

- **Součinitel difúzní vodivosti  $\delta$**  vyjadřuje schopnost materiálu propouštět

vodní páru difúzí a běžně se udává v sekundách. Normové hodnoty udává ČSN 73 0540 a pohybují se od dokonalé parotěsnosti, kdy  $\delta \approx 0$  s (např. hydroizolační materiály, kovy, sklo) až do  $\delta \approx 0,17 \cdot 10^{-9}$  s (např. rohože z minerálních vláken). Součinitel difúze vodní páry pro vzduch je  $\delta = 0,178 \cdot 10^{-9}$  s pro teplotu +20 °C. Velikost součinitele difúzní vodivosti závisí na teplotě (s rostoucí teplotou stoupá), na vlhkosti (s rostoucí vlhkostí klesá), a na množství, velikosti a otevřenosti/uzavřenosti a vzájemné propojenosti pórů.

- **Faktor difúzního odporu  $\mu$**  vyjadřuje relativní schopnost materiálu propouštět vodní páru difúzí.

$$\mu = \frac{1}{N \cdot \delta} \quad (9)$$

$\delta$  – součinitel difúzní vodivosti [s]

$N$  – přibližná hodnota difúzního odporu vzduchu  $5,45 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-1}$  závisící na teplotě

Návrhové a charakteristické hodnoty  $\eta$  vybraných materiálů uvádí ČSN 73 0540-3.

- **Ekvivalentní difúzní tloušťka  $s_d$**  se používá zejména k vyjádření difúzních vlastností povrchových úprav, např. sanačních omítek, nátěrových systémů apod.

$$s_d = \mu \cdot d \text{ [m]} \quad (10)$$

$\mu$  – faktor difúzního odporu [–]

$d$  – tloušťka materiálu [m]

- **Difúzní odpor materiálu  $Z_d$**  slouží ke stanovení množství z kondenzované vodní páry v konstrukci a je definován vztahem při užití veličin vztažených k částečnému tlaku vodní páry:

$$Z_d = \frac{1}{W_p} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (11)$$

$W_p$  – propustnost vodní páry [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ ] = [ $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ]

Propustnost vodní páry se vypočítá ze vztahu:

$$W_p = \frac{g}{\Delta p_v} \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}] \quad (12)$$

$g$  – hustota ustáleného difúzního toku vodní páry [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$\Delta p_v$  – rozdíl částečných tlaků vodní páry bezprostředně při povrchu [Pa]

### 2.4.3 Vodivost vlhkosti

Jde o schopnost materiálu vést kapalnou vlhkost k jeho povrchu, kde dochází k vypařování nebo difuzi do okolí. Jsou rozlišovány dva typy vodivosti vlhkosti [5, 27]:

- při rozdílu objemových hmotností pohybující se vlhkosti se hovoří o gradientu parciální hustoty
- při rozdílu teplot se hovoří o teplotním gradientu.

Při gradientu parciální hustoty a nulovém teplotním rozdílu je hustota toku kapalně vody dána vztahem:

$$q_{mt1} = -\chi_u \cdot \rho_s \cdot \frac{du}{dx} [kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}] \quad (13)$$

$\chi_u$  – součinitel vlhkostní vodivosti při vlhkostním spádu [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]

$\rho_s$  – objemová hmotnost suché látky [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

$\frac{du}{dx}$  – vlhkostní gradient [ $kg \cdot kg^{-1} \cdot m^{-1}$ ]

Pokud existuje v konstrukci také teplotní gradient, pak je pohyb vlhkosti v kapilárách dán ještě gradientem teploty:

$$q_{mt2} = -\chi_u \cdot \rho_s \cdot \chi_t \cdot \frac{dt}{dx} [kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}] \quad (14)$$

$\chi_t$  – měrná vlhkostní vodivost při teplotním gradientu [ $K^{-1}$ ]

$\frac{dt}{dx}$  – teplotní gradient [ $K \cdot m^{-1}$ ]

## 2.5 Nasákavost

Norma ČSN 73 0540-1 definuje nasákavost jako množství vody na  $m^2$  nasáklé materiálem definované vlhkosti za definovanou dobu při jeho částečném ponoření do vody. Tato norma rozlišuje nasákavost krátkodobou  $W_p$  a dlouhodobou  $W_{l,p}$  [28]:

$$W_p = \frac{m_{24} - m_0}{A_p} [g \cdot m^{-2}] \quad (15)$$

$m_{24}$  – hmotnost materiálu po 24 hodinách krátkodobého částečného ponoření do vody [g]

$m_0$  – počáteční hmotnost materiálu, ustálená za dobu nejméně 6 hodin při laboratorní teplotě [g]

$A_p$  – plocha spodního povrchu materiálu [ $m^2$ ]

$$W_{l,p} = \frac{m_{28} - m_0}{A_p} [g \cdot m^{-2}] \quad (16)$$

$m_{28}$  – hmotnost materiálu po 28 dnech dlouhodobého částečného ponoření do vody [g]

## 2.6 Vzlinavost a kapilární aktivita

Vzlinavost neboli kapilarita je vlastností pórovitých materiálů a vyjadřuje se rozdílem výšek hladiny kapaliny v kapilárách proti hladině kapaliny, do které je materiál ponořen. Kapilární a sorpční síly způsobí, že kapalina v materiálu vystoupá nad čáru ponoru. Jde o tzv. kapilární elevaci. Výška, do které kapalina vystoupí, závisí na struktuře materiálu, na velikosti pórů, na rychlosti odpařování kapaliny do ovzduší a na době po kterou je materiál v kapalině částečně ponořen. V první fázi dochází k rychlému vzlinání kapaliny, postupem času se vzlinání zpomaluje [5].

Kapilárně aktivní materiál se vyznačuje schopností vodní absorpce prostřednictvím kapilárních sil. Jestliže materiál tuto schopnost nemá, jde o materiál hydrofobní. Pokud přijde kapilárně aktivní stavební materiál do kontaktu s vodou v tekutém skupenství, začne absorbovat vodu, až dosáhne stavu volného nasycení. Když se dostane do kontaktu s jinou superhygroskopickou látkou, dojde také k výměně vlhkosti až do stavu rovnováhy. V tomto případě se předpokládá, že menší kapiláry mají větší kapilární síly a proto odsávají vodu z velkých kapilár, dokud se všechny póry do určitého průměru v obou materiálech nenaplní vodou. Zpravidla v tomto stavu rovnováhy obsahy vody v obou stavebních materiálech spojených kapilární aktivitou nejsou stejné. Pro kvantitativní vyjádření kapilárních sil se běžně používá válcový kapilární model. Kapilární tlak se potom vypočte z rovnice [29]:

$$p_k = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos\Theta}{r} \quad (17)$$

$p_k$  – kapilární tlak [Pa]

$\sigma$  – povrchové napětí [ $N \cdot m^{-1}$ ]

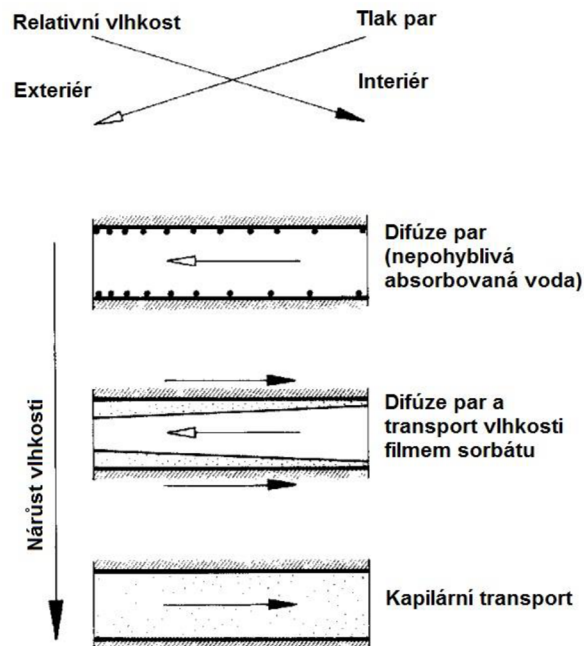
$\Theta$  – smáčecí úhel [°]

$r$  – poloměr kapiláry [m]

Interakce difúze vodní páry a transportu kapalné vlhkosti v pórovitých hygroskopických stavebních materiálech lze dobře popsat na obrázku 10. Při pohledu na kapiláru v prvku lze zjistit, že v zimních podmínkách je teplota na vnitřní straně budovy, a tím i tlak par, vyšší než na vnější straně. Vzhledem k tomu, že vlhkost je často vyšší na vnější straně, probíhá gradient relativní vlhkosti či obsahu vody opačným směrem. V případě, že stavební prvek je suchý, probíhá difúze par v kapiláře pouze zevnitř ven. Voda absorbovaná ve stěnách zůstává nepohyblivá díky vysokým adhezivním silám. Když začne



celková vlhkost stoupat, pórovité stěny jsou pokryty filmem sorbátu, který je tlustší na vnější straně z důvodů vyšší relativní vlhkosti v exteriéru než v interiéru [29].



Obr. 10: Schématický diagram transportu vlhkosti v pórovitém hygroscopickém stavebním materiálu [29]

Avšak čím je film tlustší, tím více se stávají mobilnější molekuly vody pohybující se z oblasti tlustějšího filmu do oblasti s tenčím filmem. Tento proces je nazýván povrchová difúze. Jeho řídicím gradientem je sací tlak nebo relativní vlhkost. Díky tomu je povrchová difúze, stejně jako kapilární vedení, součástí transportu kapalné vlhkosti namísto difúze vodních par, jak bývá často předpokládáno. V dotyčné kapiláře redukuje povrchová difúze, která probíhá opačným směrem než difúze vodních par, vlhkostní transport zevnitř ven a když celková vlhkost vzroste, tento vlhkostní transport je dokonce obrácen prostřednictvím nástupu kapilárního vedení. Krus a Kießl potvrzují, že tato hypotéza založená na kapilárním modelu je skutečně platná. Předpokladem však je, že transport páry a transport kapaliny se vzájemně neovlivňují. Tento předpoklad platí v oblasti sorpční vlhkosti u většiny stavebních materiálů, protože difúze páry probíhá hlavně většími póry, zatímco transport kapaliny probíhá nezávisle na difúzi par prostřednictvím mikropórů a stěnami pórů [29].

### 2.6.1 Koeficient kapilární absorpce

Stanovení koeficientu kapilární absorpce vody v zatvrdlých maltách obsahující minerální pojiva a běžná pórovitá kameniva popisuje norma ČSN EN 1015-18. Koeficient kapilární absorpce vody se stanovuje na trámečcích z malty za stanovených podmínek při atmosférickém tlaku. Trámečky se vysuší do ustálené hmotnosti a poté se jedna plocha zkušebního tělesa ponoří do vody o hloubce 5 až 10 mm. Tělesa se nechají ponořena po určitou dobu a stanovuje se přírůstek jejich hmotnosti [30].

Pro jiné než sanační malty se koeficient kapilární absorpce vody rovná směrnici sklonu přímky mezi dvěma hodnotami měření po 10 a 90 minutách a vypočítá se ze vztahu [30]:

$$C = 0,1(M2 - M1) \quad (18)$$

*C – koeficient kapilární absorpce [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-0,5}$ ]*

*M1 – hmotnost nasáklého zkušebního tělesa po 10 minutách [g]*

*M2 – hmotnost nasáklého zkušebního tělesa po 90 minutách [g]*

Jen pro sanační malty se absorpce vody měří v  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$  po 24 hodinách a vypočítá se ze vztahu [30]:

$$C = 0,625(M3 - M0) \quad (19)$$

*C – koeficient kapilární absorpce [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ]*

*M0 – hmotnost vysušeného zkušebního tělesa [g]*

*M3 – hmotnost nasáklého zkušebního tělesa po 24 hodinách [g]*

Výška nasáklé vody se udává v milimetrech. Jednotlivé hodnoty koeficientu kapilární absorpce vody  $C$  se vypočítají s přesností  $0,05 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-0,5}$  nebo  $0,05 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ . Z jednotlivých hodnot se vypočítá průměrná hodnota kapilární absorpce vody  $C_m$  [30].

## 3 Tepelné vlastnosti stavebních materiálů

Vlastnosti stavebních materiálů, které popisují vedení tepla, je možné rozdělit na tepelně-fyzikální (tepelná vodivost a tepelná kapacita) a na tepelně-technické (součinitel teplotní vodivosti a tepelný odpor vrstvy materiálu, součinitel prostupu tepla) [5].

Při návrhu stavebních konstrukcí a jejich tepelně technickém posouzení se pracuje s normovými, charakteristickými a výpočtovými hodnotami [31].

**Normová hodnota** je statisticky vyhodnocená číselná hodnota z naměřených hodnot tak, aby zahrnovala variabilitu způsobenou výrobním procesem, a nebyla běžně překročena s předem stanovenou spolehlivostí [31].

**Charakteristická hodnota** je hodnota stanovená normalizovaným postupem, statisticky vyhodnocená číselná hodnota z naměřených hodnot tak, aby zahrnovala variabilitu způsobenou výrobním procesem [31].

**Výpočtová hodnota** je číselná hodnota stanovená na základě normové nebo charakteristické hodnoty pomocí koeficientů. Výpočtové hodnoty se dle ČSN 73 0540 určují třemi způsoby. Je to buď přímé odečtení z tabulek fyzikálních vlastností, nebo výpočtem hodnot na základě charakteristických a normových hodnot a podmínek působení, či z parametrů získaných certifikací výrobků [31].

### 3.1 Součinitel tepelné vodivosti

Tepelná vodivost vyjadřuje schopnost látky přenášet teplo vedením a jedná se o nejvýznamnější parametr stavebních materiálů z hlediska stavebně tepelné techniky. Tepelná vodivost je charakterizována součinitelem tepelné vodivosti  $\lambda$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]. Hodnota součinitele teplotní vodivosti představuje tepelný tok, který se vedením šíří krychlí o hraně 1 m, jejíž protilehlé stěny mají rozdíl teplot 1 K a přitom nedochází k deformaci teplotního pole [32].

Na součinitel tepelné vodivosti působí různé vlivy, z nichž nejdůležitější jsou [32]:

- **Hustota a objemová hmotnost, pórovitost** - je téměř všeobecnou zákonitostí, že hodnota součinitele tepelné vodivosti klesá s klesající objemovou hmotností. Tato zákonitost neplatí u materiálu s vysokou pórovitostí, kde konvekční složka v pórech a vzduchových mezerách zvyšuje součinitel tepelné vodivosti a je zde i vliv sálání. Jde např. o pěnový polystyren, který má při objemových hmotnostech okolo  $40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  nejnižší hodnotu součinitele tepelné vodivosti. Při nižších objemových hmotnostech tepelná vodivost roste. Při vyšších hodnotách je zde také rostoucí tendence, stoupání však není tak výrazné [30].
- **Vlhkost** – s rostoucím obsahem vlhkosti v materiálu roste hodnota součinitele tepelné vodivosti. Je důležité, v jakém skupenství se voda

v pórech materiálu vyskytuje. Voda v pórech má přibližně 25krát větší tepelnou vodivost než vzduch.

- **Směr tepelného toku v anizotropních látkách** – jde o látky, které mají v různých směrech různé vlastnosti. Součinitel tepelné vodivosti je při tepelném toku kolmo na vlákna menší, než při tepelném toku rovnoběžně s vlákny.
- **Chemické složení** – anorganické látky, které jsou převážně zásaditého charakteru, mají nižší hodnotu součinitele tepelné vodivosti než kyselé látky.
- **Teplota** – při zvyšování teploty látky se zvyšuje součinitel tepelné vodivosti, což souvisí se zvýšením kinetické energie molekul v látce. Nárůst teploty způsobí nárůst součinitele přestupu tepla v pórech látky a nárůst intenzity sálání.

### 3.2 Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita je důležitou veličinou při výpočtu tepelných vlastností stavebních látek. Jde o teplo potřebné k ohřátí 1 kg dané látky o 1 °C. Měrnou teplotní kapacitu vypočteme ze vztahu [33]:

$$c = \frac{K_x}{m} = \frac{1}{m} \cdot \left( \frac{dQ}{dT} \right) \quad (20)$$

$c$  – měrná tepelná kapacita [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$K_x$  – tepelná kapacita [ $J \cdot kg^{-1}$ ]

$m$  – hmotnost látky [ $kg$ ]

$Q$  – přivedené teplo [ $J$ ]

$T$  – teplota [ $K$ ]

### 3.3 Součinitel teplotní vodivosti

Součinitel teplotní vodivosti vyjadřuje schopnost látky změnit teplotu v určitém místě uvnitř materiálu, jakožto reakce na změnu teploty na povrchu. Součinitel teplotní vodivosti tedy vyjadřuje rychlost vyrovnávání teploty v tělese. Čím je vyšší, tím rychleji se mění teplota uvnitř materiálu vzhledem ke změně teploty na povrchu. Součinitel teplotní vodivosti se určuje experimentálně, nebo vypočítá ze vztahu [32]:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (21)$$

$a$  – součinitel teplotní vodivosti [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]  
 $\lambda$  – součinitel tepelné vodivosti [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]  
 $c$  – specifická tepelná kapacita [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]  
 $\rho$  – objemová hmotnost [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

### 3.4 Tepelný odpor vrstvy materiálu

Veličina tepelný odpor vrstvy materiálu charakterizuje tepelně izolační vlastnosti dané konkrétní tloušťky materiálu. S rostoucí hodnotou tepelného odporu vrstvy materiálu roste i tepelně izolační schopnost této vrstvy. Tepelný odpor vrstvy materiálu se vypočte ze vztahu [5]:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (22)$$

$R$  – tepelný odpor vrstvy materiálu [ $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ ]  
 $d$  – tloušťka vrstvy materiálu kolmá na směr tepelného toku [m]  
 $\lambda$  – součinitel tepelné vodivosti [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

Použitím materiálu s nízkou hodnotou součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$  se dosáhne vysokých hodnot tepelného odporu  $R$ . V těchto případech pak stačí i relativně slabá tloušťka materiálu. Jedná se například o dodatečné zateplování budov pomocí vysoce tepelně izolačních materiálů jako je polystyren, skelná či minerální vlákna [5].

### 3.5 Součinitel prostupu tepla

Součinitel prostupu tepla konstrukcí  $U$  vyjadřuje celkovou výměnu tepla mezi prostory oddělenými od sebe danou konstrukcí o tepelném odporu  $R$ . Součinitel prostupu tepla je dán vztahem [33]:

$$U = \frac{1}{R_i + \sum R + R_e} = \frac{1}{R_T} \quad (23)$$

$U$  – součinitel prostupu tepla [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]  
 $R_T$  – odpor konstrukce při prostupu tepla [ $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ ]  
 $R_i$  – odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce [ $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ ]  
 $R_e$  – odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce [ $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ ]

Dle ČSN 73 0540-2 z roku 2011 charakterizuje tepelně izolační schopnost konstrukce součinitel prostupu tepla  $U$ . V předchozím vydání normy z roku 1994 byla pro charakteristiku tepelně izolační schopnosti konstrukce používána veličina odpor konstrukce při prostupu tepla  $R_T$  [33].

### 3.6 Studie tepelně vlhkostního chování izolačních materiálů

Popisem a simulací tepelně vlhkostního chování různých stavebních materiálů se v posledních letech věnovalo mnoho výzkumných týmů. Z těchto výzkumů budou dále rozebrány ty, které popisují tepelně vlhkostní chování různých typů malt: [34, 35].

Ve článku zveřejněném v roce 2014 popisuje tým autorů z Německa a Švýcarska ve složení B. Villmann, V. Slowik, F. H. Wittmann, P. Vontobel a J. Hovind svoji studii zaměřenou na popis časově závislého šíření vlhkosti ve vysychající cementové maltě pomocí metod neutronové radiografie a inverzní analýzy. Aplikace inverzní analýzy vyžadovala měření časově závislého úbytku hmotnosti vzorků při sušení, zahrnovala numerické simulace sušení a využila evoluční optimalizační algoritmus pro identifikaci parametrů transportu vlhkosti, přičemž bylo využito různých fyzikálních modelů pro odvod vlhkosti. Následně byla provedena metoda neutronové radiografie za účelem validace výsledků [34].

Při aplikaci inverzní analýzy se vychází z předpokládané sady parametrů (materiálových vlastností), na základě kterých je experiment numericky simulován a získané výsledky jsou pak porovnávány s experimentálně získanými. Aby bylo možné kvantifikovat odchylku mezi těmito dvěma výsledky, je nutné spočítat chybu měření. Poté jsou parametry změněny v souladu s optimalizací běžného postupu a experiment je znovu numericky simulován. Tato smyčka se opakuje stále dokola, dokud není dosaženo přijatelné shody mezi modelem a experimentem [34].

Neutronová radiografie může být využita pro stanovení obsahu vlhkosti v materiálu díky principu oslabení neutronů vodíkem. Přítomnost vlhkosti tedy vede ke snížení propustnosti materiálu vůči paprsku neutronů. K experimentům byl využit zdroj neutronového záření SING na Institutu Paula Scherrera ve švýcarském Villigenu [34].

Byly namíchaný tři maltové směsi s různým vodním součinitelem (voda/cement). Vzorky o rozměrech 2×2×8 cm byly odformovány a uloženy pod vodu na 28 dní. Následně byly vystaveny několika cyklům sušení a vlhčení. Poté byla stanovena objemová hmotnost suchých vzorků. Pro stanovení křivky hmotnostního úbytku byly vzorky obaleny ze 4 stran hliníkovou fólií, aby byl

dovolen pouze jednorozměrný transport vlhkosti. Po dalším nasáknutí ve vodní lázni byly vzorky uloženy na více než čtyři týdny v uzavřeném kontejneru nad hladinou vody. Poté byl stanoven obsah nasycené vodní vlhkosti. Některé vzorky byly následně uloženy po dobu pěti měsíců nad solnými roztoky v exsikátorech za účelem stanovení desorpčních izoterem. Vzorky určené pro stanovení vlhkostních profilů pomocí inverzní analýzy a neutronové radiografie byly umístěny do skleněného kontejneru nejprve nad čistou vodu. Na začátku měření byla voda nahrazena roztokem octanu draselného nebo glycerolem, aby byla zaručena potřebná relativní vlhkost vzduchu. Další soubor vzorků se vysušil na 23 °C a 35% relativní vlhkost. Všechny vzorky byly skladovány za téměř izotermických podmínek při průměrné teplotě 22 °C ± 3 °C. Během neutronové radiografie však byly vystaveny výrazně vyšším teplotám [34].

Studie ukázala, že k popisu reálných vlhkostních profilů je potřebné posuzovat transport vlhkosti ve formě vodní páry a vlhkosti ve formě kapaliny samostatně. Modely, které využívaly k popisu obou transportních mechanismů vícenásobné parametry, přinesly téměř stejné výsledky. Pro odhad doby sušení potřebné k dosažení rovnovážného obsahu vlhkosti je použitelný i zjednodušený Fickův zákon, s využitím pouze jednoho parametru. Zanedbání transportu vlhkosti ve formě kapaliny však může vést k podcenění smrštění v důsledku nerovnoměrného vysychání. Výsledky z inverzní analýzy měly být následně potvrzeny neutronovou radiografií. U zkoumaných cementových malt měly z obou metod podobu mírně zakřivených vlhkostních profilů v průřezech vzorků a úbytek obsahu vlhkosti v čase byl podobný. Bylo konstatováno, že inverzní analýza se ukazuje jako vhodná metoda pro stanovení transportu vlhkosti ve formě vodní páry a kapaliny v praxi [34].

Rovněž ve Velké Británii se tým vědců věnoval simulaci tepelně vlhkostního chování izolačních materiálů. Tým ve složení Marincioni, Altamirabi-Medina (University College, London) a Ridley (RMIT University, Australia) zveřejnili v roce 2014 článek, popisující studii zaměřenou na modelování transportu tepla, vzduchu a vlhkosti typických skladeb zdiva s různými interními izolačními systémy. Stěnové systémy byly složeny z provzdušněných jílových bloků, sádrové omítky a z osmi izolačních systémů, z nichž čtyři byly kapilárně aktivní a čtyři konvenční. Izolační systémy byly posuzovány na základě okrajových podmínek teploty a relativní vlhkosti, které byly řízeny tak, aby prostřednictvím

řízené hodnoty tlaku vodní páry, spouštěly difúzi vodní páry a zvyšovaly transport vlhkosti uvnitř zdiva. Vzorke byly vystaveny zimním podmínkám. Pro studii transportu vlhkosti ve vzorcích byla použita metoda rentgenové tomografie a dále analýza dřevěného rámu, kdy vzorky zdiva byly vystaveny přebytku tlaku vodních par. Bylo provedeno měření teploty a relativní vlhkosti na rozhraní zdivo/izolace a data byla použita pro numerické vyhodnocení kapilární aktivity izolačního systému. Výsledky experimentů ukázaly, že izolační systémy odpovídaly rozdílně na stejné okrajové podmínky a intersticiální relativní vlhkost se značně lišila. Rozdíly v tepelně vlhkostním chování nebyly spojeny pouze s materiálem použitým k izolaci, ale i se specifickými vlastnostmi daného izolačního systému. Podobné rozdíly byly také pozorovány při modelování těchto soustav a následném ověření nástroje pro simulaci tepelně vlhkostního chování [35].



## B. Praktická část

### 1 Metodika práce

Praktická část bakalářské práce byla rozdělena do následujících etap:

- Návrh receptur lehkých tepelně izolačních omítek;
- Výroba zkušebních těles;
- Provedení laboratorních zkoušek a měření;
- Vyhodnocení měření a diskuze výsledků.

V rámci experimentální části byly navrženy 3 receptury lehkých, tepelně izolačních omítek s cílem využít nejenom běžně užívané vstupní suroviny, ale také vhodné suroviny alternativní. Dále byly použity různé hydrofobizační přísady za účelem sledování jejich účinku a vlivu na vlhkostní chování omítek. Následně bylo provedeno stanovení základních fyzikálních a tepelně technických vlastností. Poté bylo přistoupeno ke studiu vlhkostního chování vyvinutých materiálů, včetně sledování vlivu vlhkosti na tepelně izolační vlastnosti materiálů.

#### 1.1 Návrh receptur

Návrh receptur byl proveden s ohledem na poznatky získané z rešeršní činnosti, zpracované v teoretické části této bakalářské práce. Byly použity různé hydrofobizační přísady na bázi solí a esterů karboxylových kyselin, za účelem analýzy jejich účinnosti.

Celkem byly navrženy 3 zkušební receptury a pro ověření a porovnání dosažených výsledků byla zhotovena také zkušební tělesa tepelně izolační omítky Baumit ThermoPutz (referenční receptura D), dostupné na stavebním trhu v rámci zemí EU. Tato omítka byla zvolena pro její snadnou dostupnost. Jednotlivé složení receptur je uvedeno v tabulce 9 níže.

Tab. 9: Složení navržených receptur [g]

Složka		Receptura A	Receptura B	Receptura C
Lehké kamenivo Liaver frakce	0,25-0,5	15,8	15,8	15,8
	0,5-0,1	133,3	133,3	133,3
	1-2	220,9	220,9	220,9
Expandovaný perlit frakce	0,315-2,5	12,5	12,5	12,5
Vápenec Vitošov		78,7	78,7	78,7
Vápenný hydrát LB Cemix CL90-S		55,3	55,3	55,3
Cement CEM I 52,5R		41,7	41,7	27,7
Metakaolin MEFISTO K05		27,7	27,7	27,7
Popílek černouhelný Dětmárovice		18,4	18,4	-
Přísady		13,8 <sup>a</sup>	13,8 <sup>b</sup>	12,1 <sup>c</sup>
Čedičová vlákna (rohož ISOVER)		-	12	-
Voda		360	390	370

Pozn. <sup>a</sup> přísady: zlepšující zpracovatelnost (na bázi celulózy), provzdušňovací (olefinsulfonát) a hydrofobizační na bázi oleátů a stearátů, <sup>b</sup> přísady: zlepšující zpracovatelnost (na bázi celulózy), provzdušňovací (olefinsulfonát) a hydrofobizační na bázi oleátů a stearátů – jiný typ než u varianty A, <sup>c</sup> přísady: zlepšující zpracovatelnost (na bázi celulózy), provzdušňovací (Laurylsulfát sodný) a hydrofobizační na bázi vinyl acetátu-ethylenu

Cílem bylo ověření vlastností lehké tepelně izolační omítky s možností využití jako omítky sanační. Snahou bylo vyrobit omítku, která by splňovala následující parametry: objemová hmotnost zatvrdlé malty < 500 kg·m<sup>-3</sup>; pevnost v tlaku v rozmezí 1,5 – 5,0 N·mm<sup>-2</sup>; součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  < 0,1 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>; pórovitost > 40 %; koeficient kapilární absorpce pro sanační malty  $c > 0,3$  kg·m<sup>-2</sup> a hloubka průniku vody < 5 mm, případně koeficient kapilární absorpce pro jiné než sanační malty  $c \leq 0,20$  kg·m<sup>-2</sup>·min<sup>-0,5</sup> (kategorie W2).

Podkladem pro návrh receptury B s přidavkem čedičových vláken byl výzkum Technické univerzity v Madridu, který prokázal, že čedičová vlákna jsou vhodnými plnivými do sádrových kompozitů [11]. Snahou bylo ověřit, zda se tyto vlákna dají použít i jako plnivo do malty pro výrobu lehké tepelně izolační omítky a zda tato malta bude splňovat požadované parametry.

Podkladem pro návrh receptur s využitím alternativních pojiv jako je metakaolin a popílek byl článek popisující výzkum na VUT, který se věnoval vývoji tepelně izolačních omítek na bázi alternativních pojiv, kdy se obě tato

pojiva ukázala pro výrobu tepelně izolačních omítek, metakaolín navíc jako vhodný i pro výrobu omítek sanačních [21].

## 1.2 Výroba zkušebních těles

Při výrobě zkušebních těles byly nejdříve naváženy a smíchány suché složky a poté přidána dávka vody. U receptury B byla navíc do suché směsi přidána vlákna z čedičové izolační rohože, která byla předtím ručně rozcupována. Průměrná délka rozcupovaných vláken (měřená na souboru 30 vláken) byla 10 mm a průměrná šířka byla 0,0113 mm. Na připravených čerstvých maltách byly provedeny následující zkoušky:

- stanovení konzistence čerstvé malty dle ČSN EN 1015-3,
- stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty dle ČSN EN 1015-6.

Následně byla vyrobena zkušební tělesa o rozměrech 40×40×160 mm v počtu 6 těles od každé receptury. Zkušební tělesa byla odformována a poté uložena po dobu zrání v laboratorních podmínkách při teplotě 23±2 °C a relativní vlhkosti 50 %. Na zatvrdlých maltách byly provedeny po 28 dnech zrání následující zkoušky:

- stanovení objemové hmotnosti zatvrdlé malty dle ČSN EN 1015-10,
- stanovení součinitele tepelné vodivosti metodou topného drátu dle ČSN EN ISO 8894-1,
- stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku dle ČSN EN 1015-11,
- stanovení koeficientu kapilární absorpce v zatvrdlé maltě dle ČSN EN 1015-18,
- stanovení pórovitosti pomocí rtuťové porozimetrie,
- stanovení hygrokopických sorpčních vlastností dle ČSN EN ISO 12571.

## 1.3 Provedení laboratorních zkoušek a měření

Zkoušky byly provedeny postupy v souladu s normovými požadavky: ČSN EN 1015-3, ČSN EN 1015-6, ČSN EN 1015-10, ČSN EN ISO 8894-1, ČSN EN 1015-11, ČSN EN 1015-18 a ČSN EN ISO 12571.

### 1.3.1 Stanovení konzistence čerstvé malty

Zkouška byla provedena dle ČSN EN 1015-3 „Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)“.

Rozlití zkušební vzorku, který je umístěn na desku střešacího stolku pomocí kovového kužele, je dosaženo pomocí předepsaného počtu svislých pádů desky stolku. Výsledkem je průměrná hodnota rozlití.

Na předem navlhčenou desku střešacího stolku byl do středu umístěn navlhčený kužel. Kužel byl naplněn ve dvou vrstvách maltou, přičemž každá vrstva byla zhutněna 10 údery dusadlem, a přebytečná malta byla odstraněna špachtlí. Po 15 sekundách se kužel odstranil svislým pohybem a bylo provedeno 15 zdvihů střešacího stolku. Byl změřen průměr koláče ve dvou na sebe kolmých směrech a výsledkem je aritmetický průměr s přesností na 1 mm [36].

### 1.3.2 Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty

Zkouška byla provedena dle ČSN EN 1015-6 „Zkušební metody malt pro zdivo - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty“

Objemová hmotnost čerstvé malty se stanoví jako poměr hmotnosti malty a objemu nádoby, ve které je malta uložena dle vzorce:

$$\rho_v = \frac{m_2 - m_1}{V_v} \quad (24)$$

$\rho_v$  - objemová hmotnost omítky [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

$m_1$  - hmotnost měřicí nádoby [g]

$m_2$  - hmotnost měřicí nádoby naplněné omítkou [g]

$V_v$  - objem měřicí nádoby [l]

Předem zvážená nádoba se z poloviny naplnila zkušební maltou a nádoba se zvedla do výšky 30 mm a pustila volným pádem. Po 10 pádech se nádoba naplnila celá a postup se zopakoval. Přebytečná malta se odstranila špachtlí a nádoba byla zvážena s přesností na 1 g. Z naměřených hodnot byla vypočtena objemová hmotnost a výsledek byl zaokrouhlen na  $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  [37].

### 1.3.3 Stanovení objemové hmotnosti suché zatvrdlé malty

Zkouška byla provedena dle ČSN EN 1015-10 „Zkušební metody malt pro zdivo - Část 10: Stanovení objemové hmotnosti suché zatvrdlé malty“.

Objemová hmotnost suché zatvrdlé malty se stanoví jako poměr hmotnosti vzorku ve vysušeném stavu a objemu, který vzorek zaujímá po ponoření do vody dle vzorce:

$$\rho_v = \frac{m_{s,dry}}{V_s} \quad (25)$$

$\rho_v$  - objemová hmotnost suché zatvrdlé omítky [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]  
 $m_{s,dry}$  - hmotnost zkušební vzorku vysušeného v sušárně [kg]  
 $V_s$  - objem zkušební vzorku [ $\text{m}^3$ ]

Vzorky vysušené v sušárně při teplotě  $105 \pm 5$  °C byly změřeny a zváženy a byla vypočtena objemová hmotnost suché zatvrdlé malty. Výsledek byl zaokrouhlen na  $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  [38].

#### 1.3.4 Stanovení součinitele tepelné vodivosti

Zkouška byla provedena dle ČSN EN ISO 8894-1 „Žárovzdorné materiály – Stanovení tepelné vodivosti - Část 1: Metoda topného drátu (křížové uspořádání a uspořádání s odporovým teploměrem)“.

Jde o nestacionární metodu, která je na rozdíl od metod stacionárních založena na sledování dynamického vývoje teplot. Nepožaduje ustálený teplotní stav, ale sleduje průběh šíření teplotní vlny vzorkem. Pro zjednodušení je tepelný zdroj umístěn v tělese zkušební sondy a měřicí soustava je složena ze dvou ohraničených poloprostorů – zkušební sondy a zkušební vzorku. Tato metoda je obecně označována jako „Metoda horkého drátu“

Byl použit automatický přístroj *Shotherm*, jehož výstupní veličinou je přímo hodnota součinitele tepelné vodivosti zkušební vzorku [39, 40].

#### 1.3.5 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku

Zkoušky byly provedeny dle ČSN EN 1015-11 „Zkušební metody malt pro zdvo - Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku“.

Pevnost malty v tahu za ohybu byla zkoušena na zkušebním lisu, kdy byly vzorky tříbodově zatěžovány.

Lis byl opatřen dvojicí podpěrných válečků, které od sebe byly vzdáleny 10 cm. Na tyto válečky byl položen vzorek kolmo na směr zhutnění. Vzorek byl namáhán třetím válečkem, který byl umístěn doprostřed horní hrany. Zatěžování probíhalo konstantně tak, aby k porušení došlo během 30 až 90

sekund. Pevnost v tahu za ohybu byla vypočtena ze vzorce (21), přičemž dílčí výsledky byly zaokrouhleny na  $0,05 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$  a výsledný průměr na  $0,1 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ .

$$f = 1,5 \cdot \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2} \quad (26)$$

*f* - pevnost v tahu za ohybu [ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ]

*F* - maximální zatížení, které působí na zkušební těleso [N]

*l* - vzdálenost mezi osami podpěrných válců [mm]

*b* - šířka zkušební tělesa [mm]

*d* - výška zkušební tělesa [mm]

Rozlomené poloviny vzorků byly dále použity na stanovení pevnosti v tlaku. Vzorky byly do lisu vkládány kolmo na směr zhutnění mezi dvě tlačné destičky tak, aby přesahovaly minimálně 16 mm. Zatěžování probíhalo konstantní rychlostí  $50$  až  $500 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$  a k porušení mělo dojít během 30 až 90 sekund. Dílčí výsledky byly zaokrouhleny na  $0,05 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$  a výsledný průměr na  $0,1 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$  [41].

$$f_c = \frac{F_c}{A} \quad (27)$$

*f<sub>c</sub>* - pevnost v tlaku [ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ]

*F<sub>c</sub>* - maximální dosažené zatížení [N]

*A* - plocha tlačných desek [ $\text{mm}^2$ ]

### 1.3.6 Stanovení kapilární absorpce vody v zatvrdlé maltě

Zkouška byla provedena dle ČSN EN 1015-18: „Zkušební metody malt pro zdivo - Část 18: Stanovení koeficientu kapilární absorpce vody v zatvrdlé maltě“.

Vzorky byly opatřeny nátěrem Detecha Ekoban a vysušeny do ustálené hmotnosti. Vzorky byly rozlomeny napůl a poté zváženy a ponořeny do nádoby s roštem a vodou, přičemž výška hladiny měla být po dobu zkoušky mezi 0,5 a 1 cm. Vzorky byly vkládány šikmo, aby se odstranily vzduchové bubliny. U všech zkušebních vzorků bylo provedeno stanovení kapilární absorpce jak pro sanační, tak i klasické omítky.

Vzorky pro vyhodnocení jako sanační malty byly vyjmuty z nádoby po 24 hodinách a zváženy. Poté byly podélně rozlomeny a byla změřena výška nasáklé vody s přesností na 1 mm. Koeficient kapilární nasákavosti pro sanační malty se stanoví ze vzorce (19).

Pro vyhodnocení jiných než sanačních malt byly vzorky z nádoby vyjmuty již po 10 minutách, osušeny, zváženy a vráceny zpět. Tento postup byl zopakován i po 90 minutách.

Jednotlivé hodnoty koeficientu kapilární absorpce byly vypočítány s přesností na  $0,05 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-0,5}$  popř.  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ , poté byla stanovena průměrná hodnota kapilární absorpce vody  $c_m$  s přesností na  $0,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-0,5}$  popř.  $0,05 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  [30].

### 1.3.7 Stanovení hygroskopických sorpčních vlastností

Zkouška byla provedena dle ČSN EN ISO 12571: „Tepelně vlhkostní vlastnosti stavebních materiálů a výrobků – Stanovení hygroskopických sorpčních vlastností“.

Vzorky byly vysušeny na konstantní hmotnost. Při udržování konstantní teploty  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  byla zkušební tělesa postupně umísťována do exsikátorů s roztoky o dané relativní vlhkosti. Jednalo se o exsikátor s  $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  s relativní vlhkostí 55 % a exsikátor s roztokem NaCl vykazující relativní vlhkost 76 %. Vlhkost byla stanovena tehdy při dosažení rovnovážného stavu s okolním prostředím. Rovnovážný stav byl zjištěn vážením vzorků až do dosažení konstantní hmotnosti. Hmotnostní vlhkost byla vypočtena ze vztahu [42]:

$$u = \frac{m - m_0}{m_0} \quad (28)$$

$u$  – hmotnostní vlhkost [ $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]

$m$  – hmotnost vzorku [ $\text{kg}$ ]

$m_0$  – hmotnost suchého vzorku [ $\text{kg}$ ]

### 1.3.8 Stanovení pórovitosti pomocí rtuťové porozimetrie

Pórovitost byla stanovena pomocí rtuťové porozimetrie, která je založena na jevu kapilární deprese. Je-li pevná pórovitá látka ponořena do roztoku rtuti, která špatně smáčí (tj. úhel smáčení je větší než  $90^\circ$ ), rtuť vniká do jejich pórů pouze působením vnějšího tlaku. Pro celkový tlak, pod nímž vniká rtuť do pórů, platí Laplaceova-Youngova rovnice ve tvaru [43]:

$$p = h \cdot \rho \cdot g = -\frac{2\gamma \cdot \cos\theta}{R} \quad (29)$$

$h$  – výška sloupce rtuti v póru [ $\text{m}$ ]

$\rho$  – hustota rtuti [ $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

$g$  – tíhové zrychlení [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ]

$\gamma$  – povrchové napětí rtuti v póru [ $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ ]

$\theta$  – úhel smáčení stěn pórů rtuti [ $^\circ$ ]

$R$  – poloměr póru kruhového průřezu [ $\text{m}$ ]

S rostoucím tlakem tedy vniká rtuť do pórů o menších poloměrech. Touto metodou lze měřit velikost a objem pórů kusových a práškových materiálů [43].

## 1.4 Vyhodnocení laboratorních měření

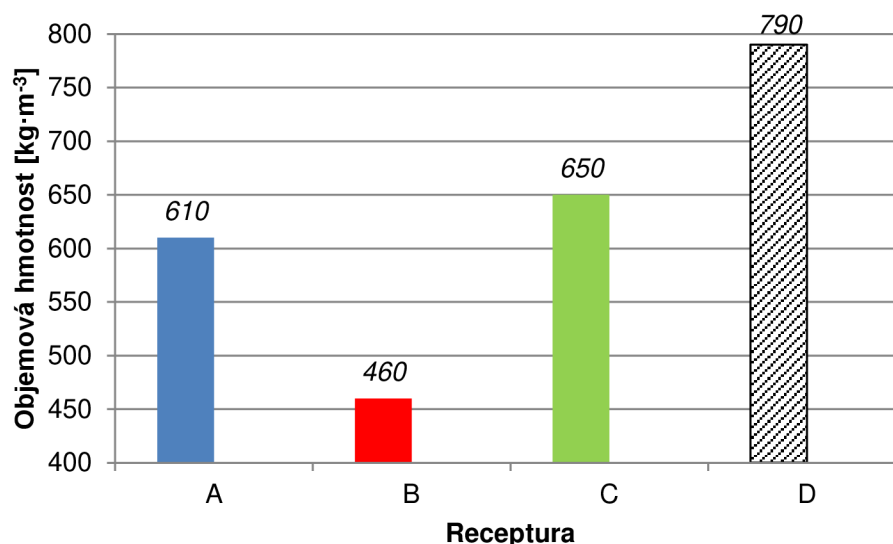
Všechny laboratorní zkoušky byly provedeny dle normových postupů uvedených v předchozí kapitole.

### 1.4.1 Stanovení vlastností v čerstvém stavu

Nejprve byla dle postupu uvedeného v předešlé kapitole stanovena konzistence čerstvé malty rozlitím. Poté byla stanovena objemová hmotnost v čerstvém stavu. Vyhodnocení těchto zkoušek je uvedeno v následující tabulce 10 a vyobrazeno v grafech 1 a 2.

Tab. 10: Naměřené a vypočtené hodnoty – vlastnosti čerstvé malty

Vlastnost	Receptura			
	A	B	C	D
Objemová hmotnost [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	610	460	650	790
Rozlití [mm]	115	130	130	200

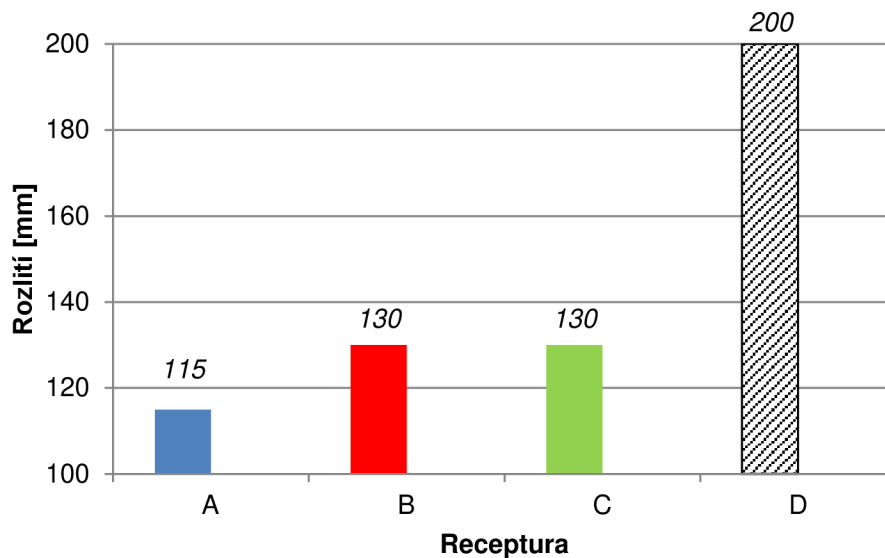


Graf 1: Objemová hmotnost čerstvé malty pro jednotlivé receptury

Na základě zjištěných objemových hmotností u čerstvých malt lze konstatovat, že objemová hmotnost u všech navržených receptur tepelně



izolačních a sanačních materiálů byla nižší než objemová hmotnost čerstvé malty referenční receptury D. Nejnižší hodnota objemové hmotnosti v čerstvém stavu byla stanovena u receptury B,  $460 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .



Graf 2: Hodnota rozliti pro jednotlivé receptury

Nejvyšší hodnotu rozliti 200 mm vykazovala referenční receptura D. U všech navržených receptur (A, B, C) bylo dosaženo nižších hodnot rozliti v porovnání s recepturou D, kdy hodnoty rozliti se pohybovaly v intervale od 115 mm do 130 mm. Tato vlastnost úzce souvisí s množstvím přidané záměsové vody, což bylo potvrzeno. Snahou bylo dosáhnout rozliti 130 mm. Vysoké hodnoty rozliti u receptury D bylo dosaženo díky dávkování záměsové vody dle pokynů výrobce. U receptury A nebyl obsah vody dále regulován na základě vizuálního posouzení konzistence malty a snaze zabránit snížení mechanických vlastností v důsledku vysokého obsahu záměsové vody.

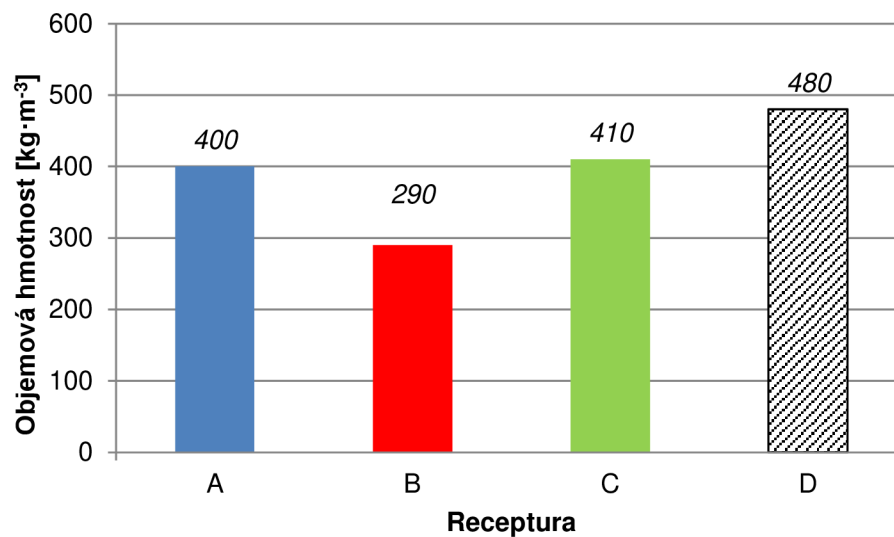
#### 1.4.2 Stanovení vlastností v zatvrdlém stavu

Po 28 dnech zrání v laboratorních podmínkách při teplotě  $23\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  a relativní vlhkosti 50 % bylo na zkušebních vzorcích tepelně izolačních a sanačních materiálů provedeno stanovení objemové hmotnosti v zatvrdlém stavu, stanovení mechanických vlastností, tj. pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku, sorpčních vlastností, stanovení součinitele tepelné vodivosti a stanovení koeficientu kapilární absorpce.

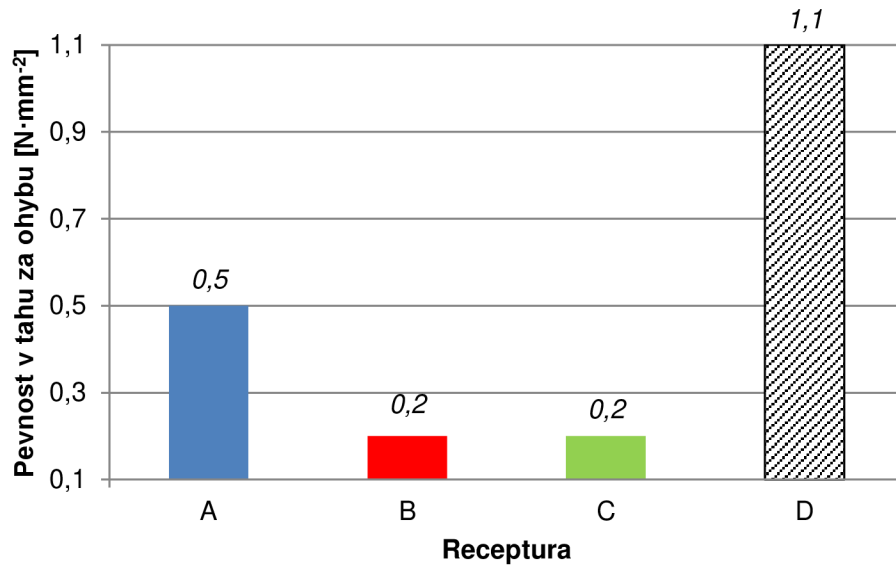
Vyhodnocení základních fyzikálních a mechanických vlastností je uvedeno v následující tabulce 11 a vizuálně v grafech 3, 4, 5.

Tab. 11: Vypočtené hodnoty – vlastnosti zatvrdlé malty po 28 dnech zrání

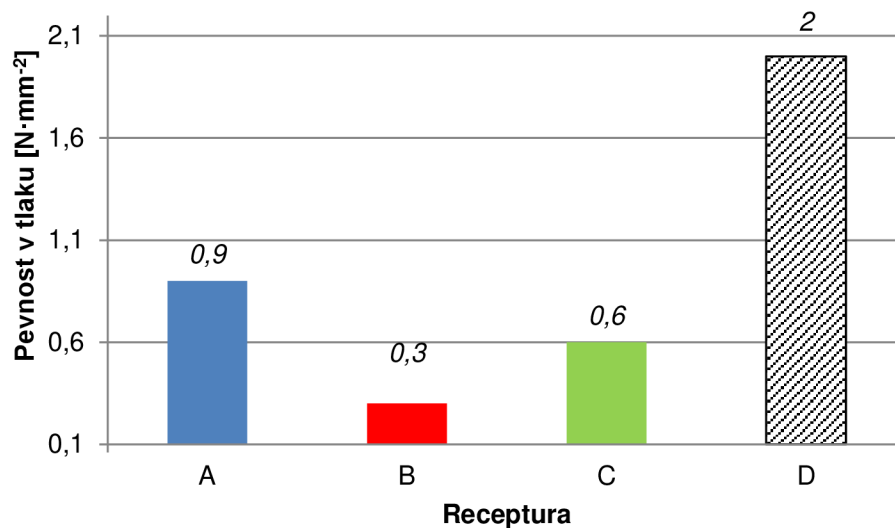
Označení receptury	Objemová hmotnost [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	Pevnost v tahu za ohybu [ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ]	Pevnost v tlaku [ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ]
A	400	0,5	0,9
B	290	0,2	0,3
C	410	0,2	0,6
D	480	1,1	2,0



Graf 3: Objemová hmotnost zatvrdlé malty pro jednotlivé receptury



Graf 4: Pevnost v tahu za ohybu pro jednotlivé receptury



Graf 5: Pevnost v tlaku pro jednotlivé receptury

U receptury A byla stanovena objemová hmotnost v zatvrdlém stavu po 28 dnech  $400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , u receptury B  $290 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , u receptury C  $410 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a u referenční receptury D byla objemová hmotnost nejvyšší,  $480 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Z pohledu mechanických vlastností byly zjištěny hodnoty pevnosti v tahu za ohybu v souladu s objemovou hmotností zkušebních vzorků. Tedy zkušební tělesa s nejvyšší objemovou hmotností vykazovala nejvyšších pevností v tahu za ohybu. Nejlepších mechanických vlastností z navržených receptur

dosahovala receptura A, kdy hodnota pevnosti v tahu za ohybu činila  $0,5 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ , zatímco u vzorků receptury B a C pouze  $0,2 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ .

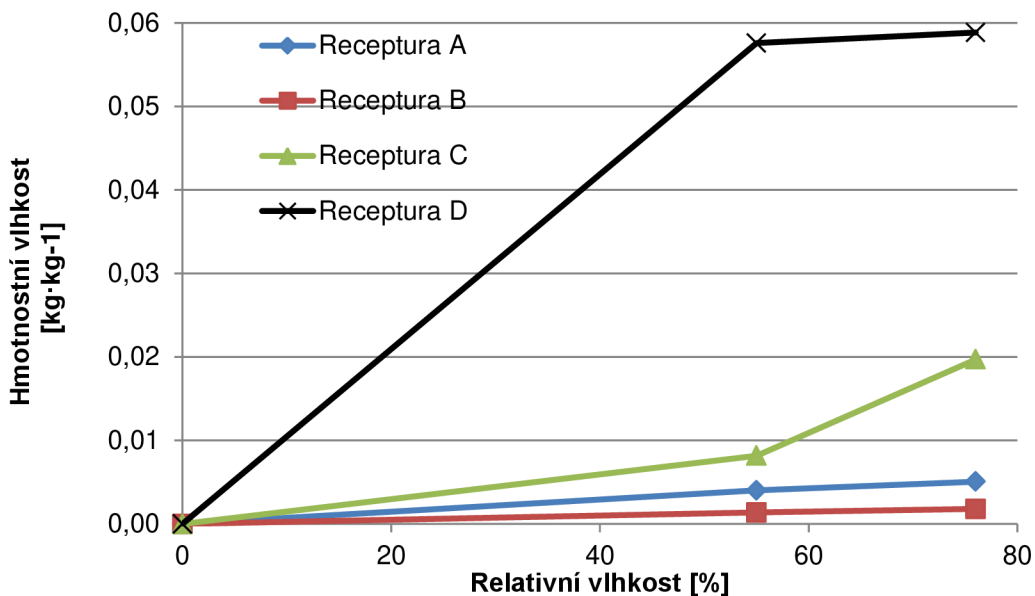
Průměrná hodnota pevnosti v tlaku u receptury A byla  $0,9 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ , u receptury C  $0,6 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$  a u receptury B byl vlivem vyššího obsahu záměsové vody opět zaznamenán pokles na  $0,3 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ , jako tomu bylo v případě pevnosti v tahu za ohybu.

Dále byly stanoveny sorpční vlastnosti zatvrdlých malt, konkrétně hmotnostní vlhkost  $u$ . Vzorky byly kondicionovány v prostředích s relativní vlhkostí 0 %, 55 % a 76 % do ustálení hmotnosti. Vyhodnocení je uvedeno v následující tabulce 12 a grafu 6.

Tab. 12: Vypočtené hodnoty hmotnostní vlhkosti pro jednotlivé receptury

Receptura	$u_{55\%} [\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}]$	$u_{76\%} [\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}]$
A	0,0040	0,0051
B	0,0014	0,0018
C	0,0082	0,0197
D	0,0576	0,0588

S ohledem na vypočtené hodnoty a graf 6 lze konstatovat, že co se týká sorpčních vlastností, vykazovala referenční receptura D vyšší citlivost oproti ostatním navrženým recepturám. Důvodem bylo použití hydrofobizačních přísad. Na základě zjištěných výsledků, lze vyhodnotit jako nejlepší hydrofobizační přísadu tu, která byla použita do receptury B.

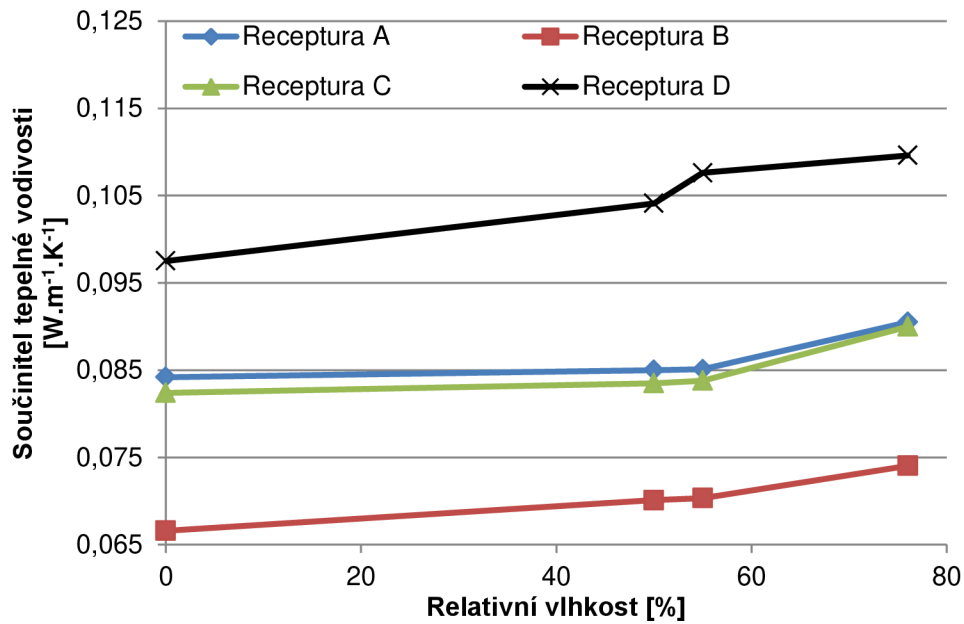


Graf 6: Závislost hmotnostní vlhkosti na relativní vlhkosti pro jednotlivé receptury (vyhodnocení dle ČSN EN ISO 12571)

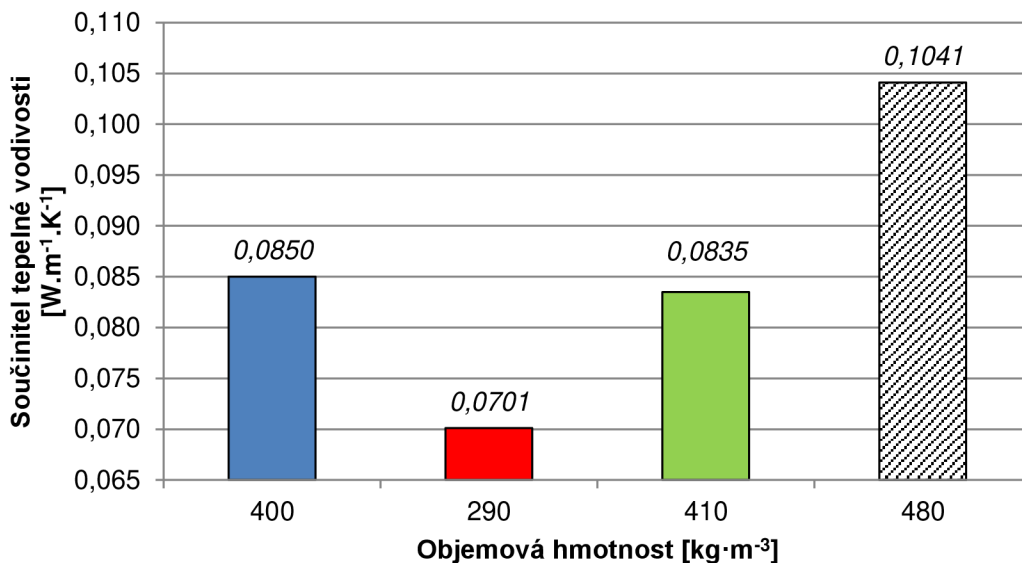
Následně byl stanoven součinitel tepelné vodivosti nestacionární metodou horkého drátu. Součinitel  $\lambda$  se stanovoval nejenom na vzorcích po 28 dnech zrání ( $\lambda$ ), ale také dále ve vysušeném stavu  $\lambda_{0\%}$  (po vysušení při teplotě 103,5 ° C do ustálení hmotnosti, dále při relativní vlhkosti 55 %  $\lambda_{55\%}$  (po ustálení hmotnosti při relativní vlhkosti 55 %) a relativní vlhkosti 76 %  $\lambda_{76\%}$  (po ustálení hmotnosti při relativní vlhkosti 76 %). Vyhodnocení je uvedeno v následující tabulce 13 a v grafech 7 a 8.

Tab. 13: Naměřené hodnoty součinitele tepelné vodivosti

Receptura	$\lambda$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	$\lambda_{0\%}$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	$\lambda_{55\%}$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	$\lambda_{76\%}$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
A	0,0850	0,0842	0,0851	0,0905
B	0,0701	0,0666	0,0704	0,0741
C	0,0835	0,0824	0,0838	0,0900
D	0,1041	0,0975	0,1076	0,1096



Graf 7: Závislost součinitele tepelné vodivosti na relativní vlhkosti pro jednotlivé receptury



Graf 8: Grafické znázornění součinitele  $\lambda$  pro jednotlivé receptury s danou objemovou hmotností

Při pohledu na grafickou závislost součinitele tepelné vodivosti na relativní vlhkosti lze konstatovat, že s rostoucí relativní vlhkostí roste hodnota součinitele tepelné vodivosti.

Z grafu závislosti součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti je zřejmé, že s rostoucí objemovou hmotností součinitel tepelné vodivosti klesá.

Dále byl stanoven koeficient kapilární absorpce  $c$ , a to jak pro případ malty sanační, tak pro malty jiné než sanační – „klasické“. Vyhodnocení těchto zkoušek je uvedeno v následujících tabulkách 14, 15.

Tab. 14: Vypočtené hodnoty koeficientu kapilární absorpce pro sanační malty včetně naměřené výšky nasáklé vody

Vzorek	$m_0$ [g]	$m_{24}$ [g]	$v$ [mm]	$c$ [kg.m <sup>-2</sup> ]	$c$ [kg.m <sup>-2</sup> ]
A-a	53,86	57,8	12	2,4625	2,45
A-b	57,18	61,17		2,4938	
B-a	43,33	44,05	pouze spodní hrana	0,4500	0,50
B-b	39,49	40,51		0,6375	
C-a	64,98	92,51	celý	17,2063	18,60
C-b	75,96	107,95		19,9938	
D-a	61,03	74,83	20	8,6250	8,05
D-b	70,63	82,61		7,4875	

Tab. 15: Vypočtené hodnoty koeficientu kapilární absorpce pro jiné než sanační malty

Vzorek	$m_{10}$ [g]	$m_{90}$ [g]	$c$ [kg.m <sup>-2</sup> .min <sup>0,5</sup> ]	$c$ [kg.m <sup>-2</sup> .min <sup>0,5</sup> ]
A-a	56,1	56,89	0,07900	0,05
A-b	59,42	60,21	0,07900	
B-a	43,68	43,72	0,00400	0,00
B-b	39,97	40,19	0,02200	
C-a	76,45	89,41	1,29600	1,40
C-b	86,95	102,38	1,54300	
D-a	64,91	67,97	0,30600	0,25
D-b	73,41	76,06	0,26500	

Na základě naměřených a vypočtených hodnot lze, při zvážení požadavků na podkladní a sanační omítky WTA (viz *Tabulka 8*), recepturu A označit jako vhodnou pro podkladní a sanační omítky WTA, recepturu B jako vhodnou pro sanační omítky WTA a receptury C a D jako vhodné pro podkladní a sanační omítky WTA. Z hlediska hloubky průniku vody v mm lze však za vhodnou pro sanační omítky označit pouze recepturu B, neboť byla splněna maximální hloubka průniku vody 5 mm.

Při posuzování kapilární absorpce pro jiné než sanační malty, lze dle požadavků ČSN EN 998-2 (viz *Tabulka 1*), receptury A i B zařadit do kategorie

W2 ( $c \leq 0,20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-0,5}$ ), recepturu C do kategorie W0 (hodnota  $c$  není předepsána) a referenční recepturu D do kategorie W1 ( $c \leq 0,40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-0,5}$ ).

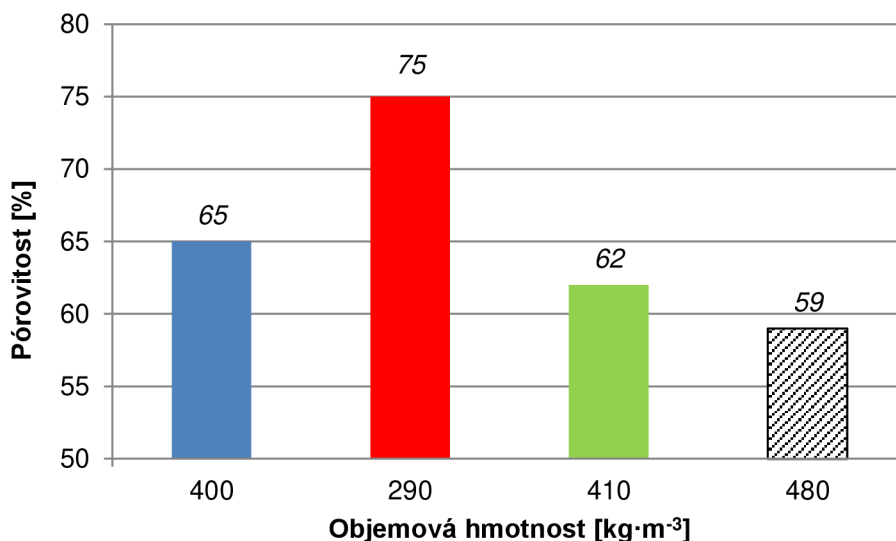
Závěrem laboratorních prací v rámci experimentální části bakalářské práce byla stanovena pórovitost metodou rtuťové porozimetrie. Vyhodnocení této zkoušky je uvedeno v tabulce 16 a grafu 9.

Tab. 16: Hodnoty pórovitosti stanovené pro jednotlivé receptury

Receptura	A	B	C	D
Pórovitost [%]	65	75	62	59

Při zvážení požadavků na podkladní a sanační omítky WTA (viz *Tabulka 8*) lze všechny receptury označit jako vhodné pro podkladní a sanační omítky WTA.

Dle předpokladu se s rostoucí pórovitostí snižovala hodnota objemové hmotnosti zatvrdlé malty, jak lze vidět z grafu 8.



Graf 9: Závislost objemové hmotnosti na pórovitosti



## Závěr

V bakalářské práci byla provedena rozsáhlá literární rešerše výzkumných prací, které se zabývaly vývojem tepelně izolačních a sanačních materiálů na bázi silikátů s rozšířením o problematiku tepelně vlhkostního chování těchto materiálů. Byly také získány poznatky o tepelně vlhkostním chování stavebních materiálů, včetně materiálů pórovitých.

Na základě poznatků získaných z literární rešerše byly posléze v laboratoři namíchány 4 receptury omítek. Receptury A a B obsahovaly stejné množství a frakce lehkého kameniva, stejné množství vápence, vápenného hydrátu, cementu, metakaolinu, plastifikační přísady, provzdušňovací přísady a popílku. Lišily se pouze v typu hydrofobizačních přísad, množství záměsové vody a u receptury B byla navíc do směsi přidána čedičová vlákna, získaná rozcupováním desky ISOVER. Podkladem pro recepturu B byl článek popisující výzkum Technické univerzity v Madridu, který označil čedičová vlákna jako plniva vhodná do sádrových kompozitů [11]. Snahou bylo laboratorně ověřit, zda jsou tato vlákna vhodná i jako plnivo do malt pro výrobu tepelně izolačních omítek a zda by tyto omítky splňovaly požadované parametry. Metakaolin a popílek byly přidány na základě článku popisující výzkum na VUT, který se věnoval vývoji tepelně izolačních omítek na bázi alternativních pojiv, kdy se obě tato pojiva ukázala pro výrobu tepelně izolačních omítek, metakaolin navíc jako vhodný i pro výrobu omítek sanačních [21]. Receptura C se lišila nižším množstvím cementu, absencí popílku a jiným množstvím a typem provzdušňovací a hydrofobizační přísady. Pro ověření a porovnání dosažených výsledků byla zhotovena zkušební tělesa z referenční receptury D (tepelně izolační omítka Baumit ThermoPutz). Tato omítka byla vybrána pro její snadnou dostupnost.

Cílem praktické části bylo ověření vlastností lehké tepelně izolační omítky s možností využití jako omítky sanační. Snahou bylo vyrobit omítku, která by splňovala následující parametry: objemová hmotnost zatvrdlé malty  $< 500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ; pevnost v tlaku v rozmezí  $1,5\text{--}5,0 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ ; součinitel tepelné vodivosti  $\lambda < 0,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ; pórovitost  $> 40 \%$ ; koeficient kapilární absorpce pro sanační malty  $c > 0,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  a hloubka průniku vody  $< 5 \text{ mm}$ , případně koeficient kapilární absorpce pro jiné než sanační malty  $c \leq 0,20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-0,5}$  (kategorie W2).

Na maltách v čerstvém stavu byly provedeny zkoušky konzistence rozlitém a objemové hmotnosti.

Referenční receptura D vykazovala nejvyšší hodnotu rozlité 200 mm. Vysoké hodnoty rozlité bylo dosaženo, díky dávkování záměsové vody dle pokynů výrobce. V porovnání s ní bylo u navržených receptur (A, B, C) dosaženo nižších hodnot v rozmezí 115 mm až 130 mm. Bylo potvrzeno, že hodnota rozlité závisí na množství záměsové vody ve směsi.

Navržené receptury (A, B, C) dosahovaly nižších hodnot objemové hmotnosti čerstvé malty, než referenční metoda D. Nejnižší hodnoty dosáhla receptura B, kdy objemová hmotnost v čerstvém stavu byla stanovena na  $460 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Této hodnoty bylo dosaženo díky obsahu čedičových vláken a vyššího množství záměsové vody.

Po odformování byly zkušební vzorky o rozměrech  $40\times 40\times 160$  mm kondicionovány po dobu 28 dní v laboratorních podmínkách při teplotě  $23\pm 2$  °C, relativní vlhkosti 50 %. Na maltách v zatvrdlém stavu byly provedeny zkoušky objemové hmotnosti, pevnosti v tahu za ohybu, pevnosti v tlaku, stanovení hygroskopických sorpčních vlastností, stanovení součinitele tepelné vodivosti metodou topného drátu, kapilární absorpce vody a pórovitosti metodou rtuťové porozimetrie.

Z pohledu objemové hmotnosti v zatvrdlém stavu, dosahovaly všechny navržené receptury (A, B, C) nižších hodnot než referenční receptura D, kde průměrná hodnota byla  $480 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Vzorky receptury A vykazovaly průměrnou hodnotu objemové hmotnosti  $400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a vzorky receptury B  $290 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Pokles byl způsoben přítomností čedičových vláken. Vzorky receptury C vykazovaly průměrnou hodnotu objemové hmotnosti  $410 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Co se týče objemové hmotnosti v zatvrdlém stavu, splnily všechny receptury stanovený cíl, by objemová hmotnost byla menší než  $500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Zkušební tělesa s nejvyšší objemovou hmotností vykazovala nejlepší mechanické vlastnosti. Nejlepších mechanických vlastností z navržených receptur dosahovala receptura A, kdy průměrná hodnota pevnosti v tahu za ohybu činila  $0,5 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ , zatímco u vzorků receptury B a C pouze  $0,2 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ . Průměrná hodnota pevnosti v tlaku u receptury A byla  $0,9 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ , u receptury C  $0,6 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$  a u receptury B byl vlivem vyššího obsahu záměsové vody opět zaznamenán pokles na  $0,3 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ , jako tomu bylo v případě

pevnosti v tahu za ohybu. Co se vlivu vláken týče, je možné konstatovat, že obsah vláken v receptuře B měl za následek pokles pevnosti v tahu za ohybu o 60,00 % a pevnosti v tlaku o 66,67 %. Při výzkumu Technické univerzity v Madridu vycházely pevnosti v tlaku vzorků s obsahem vláken nižší, než vzorků referenčních. Přítomností vláken však došlo k nárůstu pevnosti v tlaku za ohybu o 26,58 %. V porovnání s navrženými recepturami dosahovala receptura D lepších mechanických vlastností, kdy průměrná hodnota pevnosti v tahu za ohybu byla  $1,1 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$  a v tlaku  $2,0 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ . Navržené receptury nespĺnily stanovený cíl, aby se pevnost v tlaku pohybovala v rozmezí 1,5–5  $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$  a nemohou být z pohledu pevnosti v tlaku klasifikovány jako sanační omítky WTA, neboť nevyhovují požadavku na minimální pevnost v tlaku  $1,5 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ .

Následně byly stanoveny sorpční vlastnosti zatvrdlých malt, konkrétně hmotnostní vlhkost  $u$ . Vzorky byly kondiciovány v prostředích s relativní vlhkostí 0 %, 55 % a 76 % do ustálení hmotnosti. Nejvyšší citlivost k sorpci oproti ostatním vykazovala referenční receptura D. U navržených receptur (A, B, C) se podařilo použitím hydrofobizačních přísad snížit hodnoty hmotnostních vlhkostí. Jako nejúčinnější se ukázala hydrofobizační přísada použitá u receptury B, která byla na bázi oleátů a stearátů, za ní následovala přísada receptury A na stejné bázi avšak jiný typ. Obecně lze říci, že se hydrofobizační přísady na bázi oleátů a stearátů (receptury A, B) ukázaly vhodnější, než přísady na bázi vinyl acetátu-ethylenu (receptura C).

Dále bylo provedeno stanovení součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$ . Součinitel tepelné vodivosti se nejprve stanovil po 28 dnech zrání v laboratorních podmínkách, dále ve vysušeném stavu (po vysušení při teplotě  $103,5 \text{ }^\circ\text{C}$  do ustálení hmotnosti), dále při relativní vlhkosti 55 % (po ustálení hmotnosti vzorků v exsikátoru s roztokem  $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  o relativní vlhkosti 55 %) a relativní vlhkosti 76 % (po ustálení hmotnosti vzorků v exsikátoru s roztokem  $\text{NaCl}$  o relativní vlhkosti 76 %). Dle očekávání hodnota součinitele tepelné vodivosti rostla se zvyšující se relativní vlhkostí. Všechny navržené receptury dosahovaly nižších hodnot součinitele tepelné vodivosti v porovnání s referenční recepturou D, přičemž nejpříznivějších hodnot dosahovala receptura B díky obsahu čedičových vláken. Všechny navržené receptury

(A, B, C) splnily stanovený cíl, aby součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  byl nižší než  $0,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

Dále bylo provedeno stanovení koeficientu kapilární absorpce  $c$ , a to jak pro sanační, tak pro jiné než sanační omítky. Při zvážení požadavků směrnice WTA, dosáhly receptury A, C, D požadovaných hodnot kapilární absorpce pro podkladní a sanační omítky WTA. Receptura B splnila podmínku kapilární absorpce pro sanační omítky WTA. Z hlediska hloubky průniku vody  $v$  mm lze však za vhodnou pro sanační omítky označit pouze recepturu B, neboť byla splněna maximální hloubka průniku vody 5 mm. Zároveň lze opět konstatovat, že i z pohledu hloubky průniku vody se hydrofobizační přísady na bázi oleátů a stearátů (receptury A, B) ukázaly vhodnější, než přísady na bázi vinyl acetátu-ethylenu (receptura C). Stanovený cíl, aby omítka vykazovala hodnotu  $c > 0,3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  a hloubku průniku vody  $< 5 \text{ mm}$  splnila pouze receptura B. Na základě stanovených hodnot koeficientu  $c$  pro jiné než sanační omítky lze dle ČSN EN 998-2 receptury A i B splnily vytyčený cíl a lze je zařadit do kategorie W2 ( $c \leq 0,20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-0,5}$ ), recepturu C do kategorie W0 (hodnota  $c$  není předepsána) a referenční recepturu D do kategorie W1 ( $c \leq 0,40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-0,5}$ ).

V závěru praktické části byla stanovena pórovitost pomocí rtuťové porozimetrie. Výsledky zkoušky potvrdily předpoklad, že s rostoucí pórovitostí klesá objemová hmotnost zatvrdlé malty. Všechny receptury splnily stanovený cíl, aby pórovitost byla větší než 40 %.

S ohledem na výsledky zkoušek lze zhodnotit, do jaké míry byly splněny stanovené cíle na návrh tepelně izolační omítky s možností využití jako omítky sanační. Co se týče objemové hmotnosti zatvrdlé malty a pórovitosti, splnily stanovené parametry všechny navržené receptury (A, B, C). Co se týká koeficientu kapilární absorpce pro sanační malty, splnila stanovený cíl pouze receptura B, pro malty jiné než sanační cíl splnily receptury A a B. S ohledem na mechanické vlastnosti se navržené receptury neosvědčily, neboť žádná z nich nespĺnila stanovené cíle. Zde se eventuálně nabízí prostor pro další výzkum v rámci diplomové práce. Na základě výsledků provedených zkoušek lze konstatovat, nejlepší parametry z navržených receptur vykazovala receptura B. Tato omítka může být použita do prostředí s vyšší vlhkostí, nemůže však být klasifikována jako sanační omítka dle WTA.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] KOKSAL, Fuat, Osman GENCEL a Mehmet KAYA. Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, 88, 175-187 [cit. 2016-02-28]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.04.021. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815004559>
- [2] BIANCO, Lorenza, Valentina SERRA, Stefano FANTUCCI, Marco DUTTO a Marco MASSOLINO. Thermal insulating plaster as a solution for refurbishing historic building envelopes: First experimental results. *Energy and Buildings* [online]. 2015, 95, 86-91 [cit. 2016-02-28]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.11.016. ISSN 03787788. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778814009414>
- [3] ROVNANÍKOVÁ, P., *Omítky*, výrobní server DATASTAVprofi.cz, [cit. 2015-8-8]. Dostupné na WWW: <http://archive-cz.com/page/333313/2012-09-29/http://www.datastavprofi.cz/index.php/odborne-texty/1-clanky/82-omitky>
- [4] FRIDRICHOVÁ, Marcela, Karel DVOŘÁK a Rudolf FRIDRICH. *Omítky*. 1. vyd. Brno: ERA group, 2004. Stavíme. ISBN 80-7366-004-0.
- [5] SVOBODA, L. a KOLEKTIV, *Stavební hmoty*. Bratislava : Jaga group s.r.o., 2004. str. 471. 80-8076-007-1. Dostupné na WWW: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodal/sh/SH3v1.pdf>
- [6] ČSN EN 998-2 - *Specifikace malt pro zdivo - Část 2: Malta pro zdění*, Český normalizační institut, Praha 2011.
- [7] ČSN EN 998-1 - *Specifikace malt pro zdivo - Část 1: Malty pro vnitřní a vnější omítky*, Český normalizační institut, Praha 2011.
- [8] ADÁMEK, J. a KOLEKTIV, *Stavební látky – modul B101-M02 Maltoviny a kamenivo*, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 42 str.
- [9] VANĚK, Lukáš. *Vývoj pokročilých tepelně izolačních omítek s možností uplatnění jako sanační omítky dle WTA*. Brno, 2014. 86 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Jiří Zach, Ph.D.
- [10] CORINALDESI, Valeria, Jacopo DONNINI a Alessandro NARDINOCCHI. Lightweight plasters containing plastic waste for sustainable and energy-efficient building. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, 94, 337-345 [cit. 2016-02-21]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.069. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815300829>
- [11] ROMANIEGA PIÑEIRO, Sonia, Mercedes DEL RÍO MERINO a Cristina PÉREZ GARCÍA. New Plaster Composite with Mineral Wool Fibres from CDW Recycling. *Advances in Materials Science and Engineering* [online]. 2015, 2015, 1-9 [cit. 2016-02-21]. DOI: 10.1155/2015/854192. ISSN 1687-8434. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/amse/2015/854192/>

- [12] SAN-ANTONIO-GONZÁLEZ, Alicia, Mercedes DEL RÍO MERINO, Carmen VIÑAS ARREBOLA a Paola VILLORIA-SÁEZ. Lightweight material made with gypsum and extruded polystyrene waste with enhanced thermal behaviour. *Construction and Building Materials*[online]. 2015, 93, 57-63 [cit. 2016-02-27]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.040. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815005371>
- [13] FERRÁNDIZ-MAS, V., L.A. SARABIA, M.C. ORTIZ, C.R. CHEESEMAN a E. GARCÍA-ALCOCEL. Design of bespoke lightweight cement mortars containing waste expanded polystyrene by experimental statistical methods. *Materials & Design* [online]. 2016, 89, 901-912 [cit. 2016-02-26]. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.10.044. ISSN 02641275. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127515306225>
- [14] BURATTI, Cinzia, Elisa MORETTI, Elisa BELLONI, Fabrizio AGOSTI, C. FABIANI, M. CORNICCHIA a A. ROTILI. Development of Innovative Aerogel Based Plasters: Preliminary Thermal and Acoustic Performance Evaluation. *Sustainability*. 2014, 6(9), 5839-5852. DOI: 10.3390/su6095839. ISSN 2071-1050. Dostupné také z: <http://www.mdpi.com/2071-1050/6/9/5839/>
- [15] IUCOLANO, Fabio, Domenico CAPUTO, Flavio LEBOFFE a Barbara LIGUORI. Mechanical behavior of plaster reinforced with abaca fibers. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, 99, 184-191 [cit. 2016-02-27]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.09.020. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815303810>
- [16] *wikipedia.org.*, [Online], [cit. 2016-3-19]. Dostupné na WWW: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Abaka\\_\(manilsk%C3%A9\\_konop%C3%AD\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Abaka_(manilsk%C3%A9_konop%C3%AD))
- [17] ASHOUR, Taha, Hansjörg WIELAND, Heiko GEORG, Franz-Josef BOCKISCH a Wei WU. The influence of natural reinforcement fibres on insulation values of earth plaster for straw bale buildings. *Materials & Design* [online]. 2010, 31(10), 4676-4685 [cit. 2016-02-28]. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.05.026. ISSN 02613069. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306910003079>
- [18] ZACH, Jiri; HELA, Rudolf; SEDLMAJER, Martin. DEVELOPMENT OF THERMAL INSULATION PLASTERS WITH UTILIZATION OF BY-PRODUCTS.
- [19] KEKEÇ, Bilgehan. Evaluation of the usability of Erciyes Mountain (Kayseri, Turkey) volcanic materials as plaster materials providing thermal insulation. *Arabian Journal of Geosciences* [online]. 2015,8(10), 8943-8950 [cit. 2016-02-27]. DOI: 10.1007/s12517-015-1783-x. ISSN 1866-7511. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s12517-015-1783-x>
- [20] HROUDOVÁ, Jitka, Jiri ZACH, Rudolf HELA a Azra KORJENIC. Advanced, Thermal Insulation Materials Suitable for Insulation and Repair of Buildings. *Advanced Materials Research* [online]. 2013, 688, 54-59 [cit. 2016-03-04]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.688.54. ISSN 1662-8985. Dostupné z: <http://www.scientific.net/AMR.688.54>
- [21] HROUDOVÁ, Jitka, Jiří ZACH a Martin SEDLMAJER. Development of Thermal Insulation, Capillary Active Plasters Suitable for Historical

Buildings. *Advanced Materials Research* [online]. 2015, 1122, 35-38 [cit. 2016-03-04]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1122.35. ISSN 1662-8985. Dostupné z: <http://www.scientific.net/AMR.1122.35>

[22] DYLEWSKI, Robert a Janusz ADAMCZYK. The comparison of thermal insulation types of plaster with cement plaster. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2014, 83, 256-262 [cit. 2016-03-08]. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.07.042. ISSN 09596526. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652614007598>

[23] BARBERO, Silvia, Marco DUTTO, Cinzia FERRUA a Amina PERENO. Analysis on existent thermal insulating plasters towards innovative applications: Evaluation methodology for a real cost-performance comparison. *Energy and Buildings* [online]. 2014, 77, 40-47 [cit. 2016-03-11]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.03.037. ISSN 03787788. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778814002576>

[24] *asb-portal.cz.*, [Online], [cit. 2015-8-8]. Dostupné na WWW: <http://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyrobky/omitky/sanacni-omitky>

[25] WTA CZ směrnice 2-9-04/D, Sanační omítkové systémy, Praha.

[26] GROOT, Caspar, Rob VAN HEES a Tomas WIJFFELS. Selection of plasters and renders for salt laden masonry substrates. *Construction and Building Materials* [online]. 2009, 23(5), 1743-1750 [cit. 2016-02-29]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.09.013. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061808002754>

[27] HALAHYJA, Martin. *Stavebná tepelná technika, akustika a osvetlenie: celoštátna vysokoškolská učebnica pre stavebné fakulty vysokých škôl*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1985, 748 s. Edícia stavebníckej literatúry (Alfa).

[28] ČSN 73 0540-1: *Tepelná ochrana - Část 1: Terminologie*, Český normalizační institut, Praha 2005.

[29] KÜNZEL, Hartwig M. *Simultaneous heat and moisture transport in building components: one- and two-dimensional calculation using simple parameters*. Stuttgart: IRB Verlag, 1995. ISBN 3816741037.

[30] ČSN EN 1015 *Zkušební metody malt pro zdivo - část 18: Stanovení koeficientu kapilární absorpce vody v zatvrdlé maltě*, Český normalizační institut, Praha 2003.

[31] ČSN 73 0540-3: *Tepelná ochrana - Část 1: Návrhové hodnoty veličin*, Český normalizační institut, Praha 2005.

[32] HALAHYJA, Martin, Ivan CHMÚRNÝ a Zuzana STERNOVÁ. *Stavebná tepelná technika: tepelná ochrana budov*. 1. vyd. Bratislava: Jaga, 1998. ISBN 80-88905-04-4.

[33] VAVERKA, Jiří, Josef CHYBÍK a František MRLÍK. *Stavební fyzika*. Brno: VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1649-1.

[34] VILLMANN, B., et al. Time-dependent Moisture Distribution in Drying Cement Mortars. Results of Neutron Radiography and Inverse Analysis of Drying Tests Determination of Moisture Transport Parameters and Moisture Profiles by Inverse Analysis. *Cement and Concrete Research*, 2014, 20.1: 49-62.

[35] MARINCIONI, Valentina; ALTAMIRANO-MEDINA, Hector; RIDLEY, Ian. Performance of internal wall insulation systems-experimental test for the validation of a hygrothermal simulation tool.

[36] ČSN EN 1015 Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešovacího stolku), Český normalizační institut, Praha 2006.

[37] ČSN EN 1015 Zkušební metody malt pro zdivo - část 6: Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty, Český normalizační institut, Praha 1999.

[38] ČSN EN 1015 Zkušební metody malt pro zdivo – část 10: Stanovení objemové hmotnosti suché zatvrdlé malty, Český normalizační institut, Praha 2000.

[39] ČSN EN ISO 8894-1: Žárovzdorné materiály - Stanovení tepelné vodivosti - Část 1: Metoda topného drátu (křížové uspořádání a uspořádání s odporovým teploměrem), ÚNMZ, Praha 2011.

[40] ŠŤASTNÍK, Stanislav a Jiří ZACH. *Zkoušení izolačních materiálů*. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-214-2253-X.

[41] ČSN EN 1015 Zkušební metody malt pro zdivo – část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku, Český normalizační institut, Praha 2000.

[42] ČSN EN ISO 12571 Tepelně-vlhkostní vlastnosti stavebních materiálů a výrobků – Stanovení hygroskopických sorpčních vlastností, Český normalizační institut, Praha 2014.

[43] Urbánková R., Vývoj metody termoporozimetrie polymerních prášků. Brno, 2012. 79 s. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie technologie a vlastnosti materiálů. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Kratochvíla, CSc.

#### Zdroje použity k průzkumu trhu:

[44] HASIT Šumavské vápenice a omítkárny, s.r.o., [Online], [Cit. 2015-11-13]. Dostupné na WWW: <http://www.hasit.cz/>

[45] Weber – Saint-Gobain CZ a.s., [Online], [Cit. 2015-11-13]. Dostupné na WWW: <http://www.weber-terranova.cz/home.html>

[46] Baumit s.r.o., [Online], [Cit. 2015-11-13]. Dostupné na WWW: <http://www.baumit.cz/>



- [47] *Franken Maxit s.r.o.*, [Online], [Cit. 2015-11-13] Dostupné na WWW: <http://www.frankenmaxit.cz/cz>
- [48] *Wienerberger cihlářský průmysl, a.s.*, [Online], [Cit. 2015-11-13] Dostupné na WWW: <http://www.wienerberger.cz/>
- [49] *SAKRET CZ k. s.*, [Online], [Cit. 2015-11-13]. Dostupné na WWW: <http://www.sakret.cz/>
- [50] *LB Cemix, s.r.o.*, [Online], [Cit. 2015-11-13], Dostupné na WWW: <http://www.cemix.cz/>
- [51] *KM Beta a.s.*, [Online], [Cit. 2015-11-13], Dostupné na WWW: <http://www.kmb-profimix.cz/>
- [52] *Profibaustoffe CZ, s.r.o.*, [Online], [Cit. 2015-11-13], Dostupné na WWW: <http://www.profibaustoffe.com/cze>
- [53] *Satsys Technology, a.s.*, [Online], [Cit. 2015-11-13]. Dostupné na WWW: <http://www.izolace-sanace.cz/>
- [54] *Henkel ČR, spol. s.r.o.*, [Online], [Cit. 2015-11-13], Dostupné na WWW: <http://www.ceresit.cz/>
- [55] *Remmers CZ s.r.o.*, [Online], [Cit. 2015-11-13]. Dostupné na WWW: <http://www.remmers-servis.cz/Sanacni-omtky-WTA/>
- [56] *BASF Stavební hmoty Česká republika s.r.o.*, [Online], [Cit. 2015-11-13]. Dostupné na WWW: <http://www.basf-cc.cz/cs/produkty/Zateplovaci/SanacniOmitky/Pages/default.aspx>

## Seznam tabulek

Tab. 1: Třídění podle vlastností zatvrdlé malty dle ČSN EN 998-2 [6].....	14
Tab. 2: Třídy malty dle ČSN EN 998-2 [6].....	14
Tab. 3: Faktory a úrovně vybrané pro experiment [13].....	22
Tab. 4: Složení jednotlivých receptur [17] .....	25
Tab. 5: Mineralogické složení vzorků [19].....	28
Tab. 6: Vlastnosti čerstvých malt [21].....	33
Tab. 7: Vlastnosti zatvrdlých malt [21].....	34
Tab. 8: Požadavky na podkladní a sanační omítku WTA [25].....	38
Tab. 9: Složení navržených receptur [g].....	58
Tab. 10: Naměřené a vypočtené hodnoty – vlastnosti čerstvé malty .....	64
Tab. 11: Vypočtené hodnoty – vlastnosti zatvrdlé malty po 28 dnech zrání.....	66
Tab. 12: Vypočtené hodnoty hmotnostní vlhkosti pro jednotlivé receptury.....	68
Tab. 13: Naměřené hodnoty součinitele tepelné vodivosti .....	69
Tab. 14: Vypočtené hodnoty koeficientu kapilární absorpce pro sanační malty včetně naměřené výšky nasáklé vody.....	71
Tab. 15: Vypočtené hodnoty koeficientu kapilární absorpce pro jiné než sanační malty .....	71
Tab. 16: Hodnoty pórovitosti stanovené pro jednotlivé receptury.....	72

## Seznam obrázků

Obr. 1: Čedičová vlákna před a po zpracování [11] .....	19
Obr. 2: Použité frakce XPS [12] .....	20
Obr. 3: Grafická závislost součinitele tepelné vodivosti na receptuře pro vlákna z ječmene [17].....	25
Obr. 4: Grafická závislost součinitele tepelné vodivosti na receptuře pro vlákna z pšenice [17].....	25
Obr. 5: Grafická závislost součinitele tepelné vodivosti na receptuře pro dřevěné piliny [17].....	25
Obr. 6: Grafické znázornění součinitele tepelné vodivosti pro jednotlivé směsi [21] .....	34
Obr. 7: Rozdělení sanačních omítkových systémů dle projektu KOMPAS [26]	40
Obr. 8: Schématický diagram ukládání vlhkosti v hygroskopickém kapilárně aktivním stavebním materiálu [29].....	44
Obr. 9: Typický průběh izotermy sorpce a desorpce [5] .....	45
Obr. 10: Schématický diagram transportu vlhkosti v pórovitém hygroskopickém stavebním materiálu [29].....	49

## Seznam grafů

Graf 1: Objemová hmotnost čerstvé malty pro jednotlivé receptury .....	64
Graf 2: Hodnota rozlití pro jednotlivé receptury .....	65
Graf 3: Objemová hmotnost zatvrdlé malty pro jednotlivé receptury .....	66
Graf 4: Pevnost v tahu za ohybu pro jednotlivé receptury .....	67
Graf 5: Pevnost v tlaku pro jednotlivé receptury .....	67
Graf 6: Závislost hmotnostní vlhkosti na relativní vlhkosti pro jednotlivé receptury (vyhodnocení dle ČSN EN ISO 12571) .....	69
Graf 7: Závislost součinitele tepelné vodivosti na relativní vlhkosti pro jednotlivé receptury .....	70
Graf 8: Grafické znázornění součinitele $\lambda$ pro jednotlivé receptury s danou objemovou hmotností .....	70
Graf 9: Závislost objemové hmotnosti na pórovitosti .....	72

## Přílohy

## Průzkum trhu tepelně izolačních a sanačních omítek

Tepelně izolační omítky										
Výrobce	Obchodní název	Objemová hmotnost v suchém stavu [kg·m <sup>-3</sup> ]	μ	λ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Pevnost v tlaku (28 dní) [N·mm <sup>-2</sup> ]	Absorpce vody	Tloušťka jedné vrstvy [mm]	Přidrženost [N·mm <sup>-2</sup> ]	Reakce na oheň	Trvanlivost (zmrazování/r ozmrazování)
HASIT	HASIT 852 Wärmedämmputz	≤ 500	≤ 15	≤ 0,12	CSI	W1	20-30	0,1	A1	min. 10 cyklů
WEBER	Weber.Dur Terralit	< 700	≤ 15	0,17	CSII	W1	40	≥ 0,1	A1	min. 25 cyklů
SACRET	SAKRET THP	≤ 600	≤ 15	≤ 0,13	CSI	W1	30 - 50	≥ 0,08	A1	0,75 pro 10 cyklů
SACRET	SAKRET WDP		≤ 15	≤ 0,07	CSI	W1	20 - 50	≥ 0,08	E	0,75 pro 10 cyklů
BAUMIT	Baumit ThermoExtra	cca 280	cca 8	cca 0,09	CSII	W1	20 - 40	≥ 0,05	A1	
BAUMIT	Baumit ThermoPutz	cca 470	cca 8	cca 0,11	CSII	W0	20 - 40	≥ 0,08	A1	
MAXIT	Maxit therm 74 M	> 700	< 20	< 0,10	CSII	W1	10 - 30	≥ 0,08	A1	
MAXIT	Maxit therm 75		< 20	< 0,066	CSI	W1	20 - 50	≥ 0,08	B1	
WIENERBERGER	POROTHERM TO	370		0,10	CSII		10 - 30			
CEMIX	Sanační omítka tepelněizolační 094		≤ 12	≤ 0,20	CSII	W1	30	≥ 0,1	A1	min. 10 cyklů
KM BETA	TO 502		≤ 15	0,12	CSII	W1	30	0,20	A1	min. 10 cyklů
Profibaustoffe	Profi Therm	cca 400	cca 8	0,13	CSI	W0		≥ 0,08	A1	
SATSYS	ThermoUM	400	< 10	0,09	CS II	W1		0,35	A1	min. 15 cyklů
SATSYS	ThermoUM Xtra	390	< 10	0,09	CS II	W2	30 - 35	0,35	A2	min. 15 cyklů

Sanační omítky - podhozy										
Výrobce	Obchodní název	Objemová hmotnost v suchém stavu [kg·m <sup>-3</sup> ]	μ	λ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Pevnost v tlaku (28 dní) [N·mm <sup>-2</sup> ]	Absorpce vody	Tloušťka jedné vrstvy [mm]	Přidrženost [N·mm <sup>-2</sup> ]	Reakce na oheň	Trvanlivost (zmrazování/ro zmrazování)
WEBER	Weber.San podhoz		≤ 20	0,91	CS IV	W0	≤ 5	≥ 0,3	A1	min. 10 cyklů
MAXIT	Maxit San Vorspritz		< 25	< 0,83	CS IV	W0	cca 5	≥ 0,08	A1	
REMMERS	Vorspritzmörtel		18		CS IV	W0	≤ 5	0,08	A1	
BASF	Prince Color® SANO 04		≤ 40	0,82	CS IV	W2		≥ 0,8	A1	min. 25 cyklů

Sanační omítky - podkladní										
Výrobce	Obchodní název	Objemová hmotnost v suchém stavu [kg·m <sup>-3</sup> ]	μ	λ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Pevnost v tlaku (28 dní) [N·mm <sup>-2</sup> ]	Absorpce vody	Tloušťka jedné vrstvy [mm]	Přidržitost [N·mm <sup>-2</sup> ]	Reakce na oheň	Trvanlivost (zmrazování/rozmrazování)
CERESIT	CR 61 - Sanační omítka podkladní	≤ 1300		0,47	CS III	W0	≥ 10	≥ 0,3	A1	
WEBER	Weber.San vyrovnávací WTA	1640	≤ 18	0,44		W0	≥ 10	≥ 0,3	A1	min. 10 cyklů
MAXIT	Maxit San Grund	≤ 1250	< 18	< 0,54	CS II	W1	cca 10	≥ 0,08	A1	
REMMERS	Grundputz		< 15	≤ 0,83	CS III	W0	10 - 40	≥ 0,08	A1	
HASIT	HASIT 208 SANIER - Porenausgleichputz		≤ 18	≤ 0,43	CS II	W2		≥ 0,3	A1	min. 10 cyklů
BASF	Prince Color® SANO 03		≤ 15	0,33	CS II	W0	10 - 40	0,4	A1	min. 25 cyklů

Sanační omítky – povrchové										
Výrobce	Obchodní název	Objemová hmotnost v suchém stavu [kg·m <sup>-3</sup> ]	μ	λ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Pevnost v tlaku (28 dní) [N·mm <sup>-2</sup> ]	Absorpce vody	Tloušťka jedné vrstvy [mm]	Přidržitost [N·mm <sup>-2</sup> ]	Reakce na oheň	Trvanlivost (zmrazování/rozmrazování)
CERESIT	CR 62 - Sanační omítka speciální	cca 890	≤ 15	0,18	CS II		10 - 20	≥ 0,3	A1	
WEBER	Weber.San sanační WTA	1670	≤ 12	0,42		W0	20 - 30	≥ 0,25	A1	min. 10 cyklů
MAXIT	Maxit San Standard	≤ 1250	< 12	< 0,54	CS II	W1	10 - 20	≥ 0,08	A1	
REMMERS	Sanierputz altweiß		≤ 15	≤ 0,27	CS II		20 - 30	≥ 0,08	A1	
HASIT	HASIT 210 SANIER -Wandputz		< 12	≤ 0,38	CS II		?	≥ 0,3	A1	min. 10 cyklů
BAUMIT	Baumit Sanova omítka S – soklová omítka	cca 1500	≤ 15	0,45	CS II		≤ 20	≥ 0,08	A1	-
BASF	Prince Color® SANO 02		≤ 15	0,25	CS II		20 - 25	≥ 0,1	A1	min. 10 cyklů