

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ



BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE

2022

MICHAELA
KUKLOVÁ



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra materiálového inženýrství

**Vlastnosti lehčených malt modifikovaných
CNT s příměsí na bázi PCM.**

**Properties of lightweight mortars with PCM
admixture modified with CNT.**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Michaela Kuklová

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

Vedoucí práce: prof. Ing. Zbyšek Pavlík, Ph.D.

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kuklová Jméno: Michaela Osobní číslo: 486123
Zadávající katedra: K123 - Katedra materiálového inženýrství a chemie
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Vlastnosti lehčených malt modifikovaných CNT s příměsí na bázi PCM.

Název bakalářské práce anglicky: Properties of lightweight mortars with PCM admixture modified with CNT.

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte rešerši se zaměřením na používané typy omítek, materiály s fázovou přeměnou, nanomateriály a možnost jejich využití ve stavitelství. Navrhněte a připravte lehčené malty na bázi hydraulického vápna s příměsí z PCM a modifikujte vlastnosti těchto malt CNT. Na vyrobených vzorcích experimentálně vyhodnoťte materiálové charakteristiky s důrazem na tepelně-technické parametry. Výsledné vlastnosti porovnejte s dostupnou literaturou a okomentujte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] BLAHA, Martin. Omítky. Praha: Grada Publishing, a.s. 2004. ISBN:80-247-0898-1
- [2] MICHOLINOVÁ, Dagmar. Příprava vápenných malt v péči o stavební památky. Praha: Informační centrum ČKAIT. Materiálově technologické zásady péče o historické stavby. ISBN 80-867-6981-X.
- [3] WAQAS Adeel and DIN U. Zia. Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings—A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 18, 2013, Pages 607-625, ISSN 1364-0321, Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211200576X#!>.
- [4] Grafen a analogické anorganické materiály [online]. Ústav anorganické chemie AV ČR, 2012. Dostupné z: <https://cevang.webnode.cz>.

Jméno vedoucího bakalářské práce: prof. Ing. Zbyšek Pavlík, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 1. 2. 2022

Termín odevzdání BP v IS KOS: 15. 5. 2022

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku


Podpis vedoucího práce


Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

1. 2. 2022
Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího práce prof. Ing. Zbyška Pavlíka, Ph.D.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpala, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

.....

Podpis

Poděkování:

Děkuji vedoucímu práce prof. Ing. Zbyšku Pavlíkovi, Ph.D. za jeho odborné vedení a rady, Ing. Adamu Pivákovi a Ing. Martině Záleské, Ph.D. za pomoc při zpracování experimentální části práce a prof. Ing. Mileně Pavlíkové, Ph.D. za návrh tématu práce a její náplně.

Anotace:

Tato práce se zaměřuje na vývoj, přípravu a zkoušení nových typů malt se zlepšenými tepelně-technickými vlastnostmi.

Úvodní část práce se zabývá obecnými charakteristikami maltovin, jejich složením, výrobou a možnostmi použití při rekonstrukci historických budov.

Experimentální část práce je věnována návrhu maltových směsí a popisem zkušebních metod, které byly následně aplikovány na připravených zkušebních tělesech. Zkoumány byly především strukturní vlastnosti, nasákavost, tepelně-fyzikální a pevnostní charakteristiky.

Z realizovaných experimentů vyplývá, že základní materiálové vlastnosti všech zkoumaných směsí splňují požadavky předepsané technickými normami. Náhrada plniva pěnovým sklem způsobila snížení pevnosti v tahu za ohybu i pevnosti v tlaku. Zvýšená pórovitost ovlivnila nasákavost, prostup vodní páry a tepelné parametry studovaných malt.

Klíčová slova: lehčené malty, pěnové sklo, příměsi na bázi PCM, uhlíkové nano-trubice

Abstract:

This thesis describes development, preparation and testing of new types of mortars with enhanced thermal performance.

First part of this thesis is focused on the fundamental characteristics of mortars, their composition, production and possible application in historical buildings.

The experimental part of the presented work deals with design and development of new mortar mixtures, and description of the testing methods used for the characterization of prepared samples. Among all, basic structural, hygric, thermal and mechanical parameters of the prepared mortars were experimentally researched and analysed.

The realised experiments and obtained results show that basic structural parameters comply with the requirements of corresponding technical standards. The silica sand replacement with foam glass caused reduction in both compressive and flexural tensile strength. Increased porosity of mortars greatly affected water absorption, water vapour permeability, and thermal performance of the developed mortars.

Keywords: lightweight mortars, PCM admixture, CNTs, experimental testing

Obsah

Seznam použitých symbolů	9
Zkratky	11
1 Úvod	12
2 Teoretická část	17
2.1. Pojiva.....	17
2.1.1. Hydraulické vápno.....	18
2.1.2. Cement	19
2.1.3. Vápenný hydrát.....	20
2.2. Plniva.....	20
2.3. Přísady	21
2.3.1. Plastifikátory a superplastifikátory.....	21
2.3.2. Speciální přísady	22
2.3.3. Nano-aditiva	22
2.4. Příměsi.....	23
2.4.1. Speciální typ příměsí – PCM	23
2.5. Historické omítky	24
2.5.1. Trvanlivost, vady a poruchy	26
2.5.2. Rekonstrukce historických omítek	27
3 Experimentální část.....	28
3.1. Použité materiály	28
3.2. Příprava vzorků.....	29
3.3. Metody měření	33
3.3.1. Zkouška rozlivu	33
3.3.2. Objemová hmotnost.....	33
3.3.3. Hustota matrice.....	34
3.3.4. Pórovitost.....	35
3.3.5. Tepelné vlastnosti.....	35
3.3.6. Pevnost v tahu za ohybu.....	36
3.3.7. Pevnost v tlaku	37
3.3.8. Dynamický modul pružnosti	38
3.3.9. Kapilární nasákavost	38
3.3.10. Difúze – prostup vodní páry	39

3.3.11.	Nejistoty měření	41
3.4.	Výsledky měření	43
3.4.1.	Zkouška rozlivu	43
3.4.2.	Základní materiálové vlastnosti	43
3.4.3.	Mechanické vlastnosti	46
3.4.4.	Tepelné vlastnosti.....	48
3.4.5.	Kapilární nasákavost	50
3.4.6.	Difúze – prostup vodní páry	53
4	Závěr	54
5	Literatura	56
	Seznam obrázků	60
	Seznam tabulek	61

Seznam použitých symbolů

m	(g; kg)	Hmotnost
A	(m ² ; mm ²)	Plocha
V	(m ³)	Objem
Ψ	(-, %)	Pórovitost
ρ_v	(kg·m ⁻³)	Objemová hmotnost
ρ_{mat}	(kg·m ⁻³)	Hustota
f_c	(MPa)	Pevnost v tlaku
f_t	(MPa)	Pevnost v tahu za ohybu
F	(kN)	Zatěžovací síla
E	(MPa)	Dynamický modul pružnosti
λ	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Součinitel tepelné vodivosti
c_v	(J·m ⁻³ ·K ⁻¹)	Objemová tepelná kapacita
μ	(-)	Faktor difúzního odporu
t	(s)	Čas
Z_p	(m ² ·s·Pa·kg ⁻¹)	Difúzní odpor
W_p	(kg·m ⁻² ·s ⁻¹ ·Pa ⁻¹)	Propustnost vodní páry
p	(hPa)	Atmosférický tlak
S_d	(m; mm)	Ekvivalentní difúzní tloušťka
W_{24h}	(kg·m ⁻²)	Koeficient kapilární absorpce
δ	(kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹ ·Pa ⁻¹)	Součinitel difúze pro vodní páru
κ	(m ² ·s ⁻¹)	Součinitel vlhkostní vodivosti
S	(m ² ·s ^{-1/2})	Průtok
w_{kap}	(kg·m ⁻³)	Kapilární obsah

A_w	$(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2})$	Absorpční koeficient
k	(-)	Součinitel rozměrnosti prostředí ($k=1$)
m_1	(g;kg)	Hmotnost před měřením
m_2	(g;kg)	Hmotnost po měření
m_3	(g;kg)	Hmotnost po 24h nasáknutí
m_0	(g;kg)	Hmotnost vysušeného vzorku
G	(g;kg)	Změna hmotnosti po sobě jdoucích měření
g	$(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2})$	Hustota difúzního toku

Zkratky

PCM . . . Materiály s fázovou přeměnou

CNT . . . Nano-aditiva – uhlíkové nano-trubice

NHL . . . Hydraulické vápno

G100 . . . Směsi se 100% náhradou křemičitého kameniva pěnovým sklem

G50 . . . Směsi s 50% náhradou křemičitého kameniva pěnovým sklem

FG . . . Pěnové sklo

PG . . . Křemičitý písek

PC . . . Portlandský cement

1 Úvod

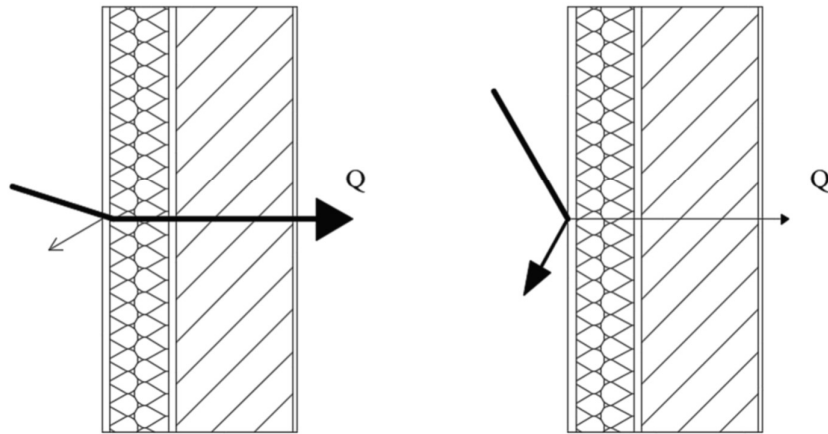
Cílem této práce je vyvinout nové typy omítek, které by měly zlepšené tepelné vlastnosti. Tyto omítky by nebyly aplikovány jen na nové budovy a konstrukce, ale především na ty historické. Měly by splňovat funkci nehydrofobizované sanační omítky s odolností proti krystalizaci solí.

Zateplování objektů v dnešní době představuje až 70 % rekonstrukcí [1]. Zateplení objektu se může provádět jak z exteriérové, tak i z interiérové strany. Prvním krokem při zateplování je správný výběr zateplovacího systému. Projektanti mohou vybírat z metod zateplování tepelněizolačními omítkami, transparentní tepelnou izolací, provětrávaným zateplovacím systémem nebo kontaktním zateplovacím systémem. Provětrávané a kontaktní zateplení je v dnešní době nejčastější. Každá metoda má však své výhody i nevýhody, které je při volbě a návrhu dodatečného zateplení nutné zohlednit.

Zateplení transparentní tepelnou izolací se aplikuje obdobně jako u kontaktního systému. Použitá tepelná izolace propouští sluneční paprsky k povrchu akumulární plochy (stěny) a současně chrání nahromaděnou energii proti úniku do exteriéru, tak zabraňuje tepelným ztrátám. Výhodou transparentního systému je jeho odolnost vůči vysokým letním teplotám, při kterých nedochází k přehřívání stěny. Sluneční paprsky v létě dopadají v takovém úhlu, že se do konstrukce nedostane takové množství energie. Naopak v zimních měsících je prostupující energie žádaná, viz *Obrázek 1*. Nevýhodou této metody je vysoká pořizovací cena samotné tepelné izolace. To je zásadní důvod, proč tento způsob zateplení není dostatečně využíván [2].

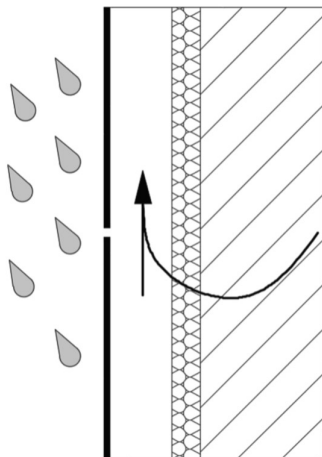
Účinek slunečního záření v zimě
- v zimě výška slunce 20°

Účinek slunečního záření v létě
- v zimě výška slunce 60°



Obrázek 1: Schéma zateplení transparentní izolací

Provětrávaná fasáda, či provětrávaný zateplovací systém, spočívá v oddělení vnějšího fasádního pláště od vnitřní konstrukce s tepelně izolační vrstvou pomocí vzduchové mezery, viz *Obrázek 2*. Vzduchová mezera zajišťuje ideální vlhkostní režim fasády, proto může být použita i na velmi vlhké nebo nedostatečně suché konstrukce. Výhodami tohoto systému je suchá montáž s minimální závislostí na vnějším klimatu a možnost výměny tloušťky izolační vrstvy bez zásahu do vnějšího vzhledu. Na druhou stranu má tento systém vyšší pořizovací cenu oproti kontaktnímu systému. Nejvhodnějším materiálem pro zateplování provětrávaným systémem je minerální vlna, která má výborné tepelné a protipožární vlastnosti [3].



Obrázek 2: Schéma funkce provětrávané fasády

Nejrozšířenější typ zateplení je kontaktní zateplovací systém. Nejčastější materiály, které se při kontaktním zateplení používají, jsou fasádní polystyreny, minerální vata, PUR izolanty a přírodní konopné nebo dřevovláknité izolační desky [4]. Kontaktní zateplovací systém je vhodný pro většinu typů budov, kromě historických objektů, u kterých se dbá na použití podobných materiálů, které se již nachází v konstrukci, a zachování původního vzhledu budovy.

Hlavními požadavky na dodatečné zateplení jsou:

- snížení energetické náročnosti provozu budovy;
- odstranění hygienických závad (plísně);
- zlepšení tepelných a akustických vlastností budovy.

U historických objektů, u kterých není možné použít kontaktní zateplovací systém z vnější strany, je teoreticky možné využít omítek se zlepšenými tepelně-technickými vlastnostmi, a tak částečně eliminovat tepelné ztráty budovy. Použití tepelně-izolačních omítek je závislé na vnějších podmínkách konstrukce, např. vlhkosti, teplotě, srážkách atd. *„Zateplování tepelněizolačními omítkami je prováděno tzn. mokrým procesem, a proto je jejich realizace závislá na vnějším počasí v závislosti na teplotách a vlhkostech vnějšího vzduchu. Tyto systémy mají relativně*

nízký tepelný odpor. Při provádění je třeba přesně dodržovat technologická pravidla, jinak dochází k nerovnoměrnosti v konečných tepelně technických vlastnostech omítky“ [1] .

Tepelně izolační omítky jsou méně efektivní způsob dodatečného zlepšení tepelně-technické funkce než například použití kontaktního zateplení budov (ETICS), ale umožňují zohlednit historický, konstrukčně-technický stav budovy.

Mezi hlavní požadavky na sanační omítky patří zejména vysoká pórovitost, omezená absorpce vody, vysoká propustnost pro vodní páru, dostatečná pevnost, trvanlivost a kompatibilita s původním podkladem. Požadavky na sanační omítky jsou zavedeny v normě EN 998-1 [5] a dále podrobněji specifikovány ve směrnici WTA 2-9-04/D [6].

Pracovníci památkové péče dbají při renovaci na aplikaci takových omítek, které jsou podobné originálním omítkám. Z tohoto hlediska je velmi důležitý správný výběr materiálů, které budou použity na přípravu omítek. Omítky by měly být paropropustné směrem ven, aby se eliminoval prostup vodních pár skrz konstrukci. Nejpoužívanějšími a nejvhodnějšími omítkami, které splňují požadavky památkové péče a jsou dle mnoha výzkumů vhodné, jsou omítky vápenné [7], [8].

V současné době jsou na trhu dostupné omítky hydrofobizované. Hydrofobizované omítky jsou charakteristické svou zvýšenou schopností odolávat vlhkosti vztlínáním z budovy nebo pronikání dešťové vody do konstrukce. Použití hydrofobizovaných omítek u zdiva s vysokým obsahem solí přináší v praxi velká rizika, například vznik solných map a hygroskopické zvlhčení konstrukce. Výkvěty solí vznikají především v oblasti soklů, okapů a svodů dešťové vody ze střechy. Nejčastějším a charakteristickým příkladem jsou výkvěty posypových solí během zimních měsíců. Reakcí chloridu sodného NaCl s vápennou omítkou vzniká oxidchlorid vápenatý $3\text{CaO}\cdot\text{CaCl}_2\cdot 16\text{H}_2\text{O}$. Chlorid při reakci s vodou krystalizuje. Mikroskopická krystalizace zvětšuje objem omítky a dochází tak ke vzniku destrukčních sil, které následně omítku naruší [9]. Charakteristickým složením tepelně izolačních omítek je lehké kamenivo

a vláknité materiály. Dle Barbera [10], 87 % tepelně izolačních omítek na evropském trhu se skládá z organických pěnových materiálů a anorganických vláken. Zbylých 13 % se skládá z přírodních materiálů jako je například korek, dřevěná vlákna, len a sláma. Většina průmyslově vyráběných tepelně izolačních omítek nesplňuje požadavky památkové péče. Lehčené omítky, které jsou zkoumané v této práci, by mohly být možným řešením do budoucna.

2 Teoretická část

Malta, jako stavební materiál, se používá několik stovek až tisíce let pro spojování různých stavebních prvků, k ochraně a zušlechtní stavebního díla. Malta je jeden z nejstarších uměle připravených materiálů, který se ve stavebnictví používá. Můžeme ji rozdělit dle jejího použití a struktury na malty pro zdění a pro omítky (pro vnější a vnitřní omítání), malty spárovací, štukové atd. [11], [12]. Kromě toho se malty používají také na kladení obkladů a keramiky, spárování, sanační a reparační hmoty při úpravě stavebních konstrukcí.

Omítka vzniká zatvrdnutím směsi, která se skládá z pojiv, plniv, vody a speciálních přísad. Skladba omítek je závislá na vlastnostech podkladu a požadavcích kladených na výslednou podobu povrchu. Hlavní funkcí omítky je ochrana zdiva před působením vnějšího prostředí a z vnitřního prostředí zajištění nezávadných zdravotních podmínek [13].

2.1. Pojiva

Pro úspěšné dosažení požadovaných vlastností malty dochází v současné době k formování směsí na bázi kombinace pojiv. Nejčastěji používaná pojiva dle typů omítek jsou vypsána v *Tabulce 1*. Všechny průmyslově vyráběné omítky obsahují určitý podíl zušlechťujících, především organických, přísad.

Vlastnosti jednotlivých malt mohou být z velké části ovlivněny typem pojiv. Pojivo zajišťuje přilnavost (soudržnost se zdivem), pevnost, plastičnost a trvanlivost omítky [2].

Nejčastějšími omítkami v současné době jsou omítky vápenocementové a cementové. Pojiva na bázi vzdušného a hydraulického vápna (NHL) jsou vhodná pro historické zdivo. Historie používání hydraulického vápna sahá daleko do historie [14].

Tabulka 1: Základní typy omítek dle pojiva

Typ pojiva	Typ omítky	Převládající druh pojiva	Obsah použití
minerální	vápenná	vápno, hydraulické vápno	vnitřní omítky, oblast restaurování
	vápenocementová	vápno, cement (obvyklý poměr cca 2:1)	běžné omítky, speciální (sanační, tepelně izolační,
	cementová	cement, vápno ve velmi malém množství lepší zpracování)	spárovací, akustické, protipožární)
	sádrová (vápenosádrová)	sádra (event. vápno)	vnitřní a protipožární omítky
	hliněná	jíl	tenkovrstvé omítky, vysprávky
organické	silikonové	silikátová disperze	vnitřní omítky, zdravé bydlení,
	disperzní (akrylátové)	akrylátová disperze	ekologické, restaurování
	silikátové	vodní sklo, disperze	

2.1.1. Hydraulické vápno

Hydraulické vápno se vyrábí pálením jílových vápenců při teplotách 900–1100°C. Výroba vápna se provádí v šachtových pecích. Vyrobené vypálené vápno se mele a následně rozhašuje. Hydraulická vápna musí obsahovat minimálně 10 % hydraulických složek (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3). Podrobné složení je uvedeno v *Tabulce 2*. Podle zastoupení jednotlivých hydraulických složek se vápna dělí na slabě hydraulická (10-15 % hydraulitů s minimální pevností po 28 dnech zrání 1,5 MPa) a silně hydraulická (nad 15 % hydraulitů s minimální pevností po 28 dnech zrání 4 MPa). U silně hydraulických vápen se rozhašování neprovádí. Hydraulické vápno nabízí několik výhod oproti užití tradičních maltových směsí [12].

Tabulka 2: Příklad chemického složení hydraulického vápna

Složka	(hm. %)
CaO	84,27
SiO ₂	6,67
Al ₂ O ₃	3,70
Fe ₂ O ₃	2,45
MgO	1,93
K ₂ O	0,48
SrO	0,20
TiO	0,19
MnO	0,07
Cl	0,03
P ₂ O ₅	-
SO ₃	-
Na ₂ O	-

2.1.2. Cement

Cement je práškový materiál, který po smíchání s vodou vytvoří cementovou kaši, která vyniká svou hydraulickou schopností tuhnout a tvrdnout pod vodou. Portlandský cement (PC) je směs rozemletého křemičitanového slínku a sádrovce, který se přidává jako regulátor tuhnutí. PC je nejvíce používaným cementem při výrobě betonu a malty. Hlavními slínkovými minerály jsou Alit C₃S, Belit C₂S, Triakalciumaluminát C₃A a Brownmillerit C₄AF [12].

Římský cement byl často používán k výrobě dekoračních omítek na přelomu 19. a 20. století. Římský cement je vypalován z jílových vápenců při teplotách 800–1100 °C. Tento materiál je charakterizován svou vysokou rychlostí tuhnutí. Díky dlouhodobě trvající hydrataci postupně navyšuje svoji pevnost. Jeho další dominantní vlastností je minimální smršťování. Malty s římským cementem nevytvářejí velké praskliny, tudíž je jejich přilnavost k podkladnímu materiálu vyšší než u malt s portlandským cementem [15].

2.1.3. Vápenný hydrát

Také vápenný hydrát se v minulosti běžně používal jako pojivo malt. Vyrábí se tzv. procesem suchého hašení. K pálenému hašenému vápnu se přidá malé množství vody, které je v hasicích vanách s vápnem dokonale promíchané, tak aby vápno zcela zhydratovalo. Přebytečné hydratační teplo způsobí odpaření vody a výsledkem tohoto procesu je vápenný hydrát [16].

2.2. Plniva

Plniva tvoří nedílnou součástí složení malt. Výběr druhu plniv souvisí s požadovanými fyzikálními vlastnostmi malty a jejich předpokládaným použitím. Plniva zajišťují pevnost, tvrdost a strukturu povrchu malt stejnou měrou jako pojiva.

V současné době se v maltách a omítkách nejvíce používají přírodní plniva. Nejčastěji je to křemičité kamenivo o frakci 0–4 mm, které se označuje jako písek.

Pórovitá plniva plně nahrazují přírodní kamenivo. Pórovitá plniva jsou buď přírodní, uměle vyrobená, vyrobená z přírodních zdrojů, vyrobená z vedlejších produktů průmyslových procesů nebo z recyklovaného kameniva. Pórovitá plniva musí splňovat požadavky normy ČSN EN 13055 [17].

Perlitové malty se využívají pro zdění i jako tepelněizolační omítky. Perlit je zrnitý materiál s výbornými tepelněizolačními vlastnostmi i při své nízké objemové hmotnosti. Vyrábí se expandováním vulkanické horniny. Je to nehořlavý materiál odolný do vysokých teplot až do 900 °C [18].

Keramzit je umělé kamenivo, které se vyrábí pálením konkrétního druhu jílu v rotačních pecích při vysokých teplotách. Má charakteristickou pórovitou vnitřní strukturu, která se liší od struktury vnějšího povrchu. Keramzit je nehořlavý, mrazu a voděodolný [18].

Jednou z mnoha variant pórovitého plniva může být pěnové sklo. Vyrábí se ze suroviny používané ve sklářské výrobě nebo z recyklovaného

skla. Směs recyklovaného skla se následně rozemele na mikroskopické částice o velikosti 10–90 mikrometrů. Zahřeje se na teplotu 1000 °C, při které dojde k roztavení sklářského prášku a k oxidaci uhlíkových částic na oxid uhličitý. CO₂ ve formě plynu vytvoří v materiálu mikroskopické bublinky, které až 20x zvětší objem rozdrčeného skla. Pěnové sklo má výborné tepelně-technické vlastnosti, je nehořlavé a odolné proti mrazu, tvarově stálé, odolné proti hmyzu a bakteriím.

Pavlík a kolektiv [19] ve své práci použili lávovou drť jako náhradu kameniva. Použití lávového kameniva výrazně zvýšilo pórovitost u všech zkoušených vzorků, což umožnilo jejich použití na historických budovách a vlhkém zdivu. Zároveň zvýšená pórovitost vedla k poklesu tepelné vodivosti. Díky pucolánové aktivitě jemných částic lávy došlo ke zvýšení mechanické odolnosti s porovnáním s referenčními omítkami s křemičitým pískem.

2.3. Přísady

Na změnu vlastností malt má vliv mnoho anorganických a zejména organických látek. Všechny přísady musí splňovat požadavky normy ČSN EN 934-1 [20]. Mohou být použity pro zlepšení zpracovatelnosti či ke snížení množství záměsové vody. Při jejich aplikaci může být dosaženo také lepších mechanicko-fyzikálních vlastností. Mezi organické přísady patří polysacharidy, bílkoviny, oleje a mastné kyseliny [21].

2.3.1. Plastifikátory a superplastifikátory

Mezi plastifikační přísady lze zařadit chemické látky, které již v malém množství (0,05 – 1 % hmotnosti pojiva) ovlivňují vlastnosti maltových směsí. Plastifikační přísady lze rozdělit z několika různých hledisek, například na kapilárně silně aktivní a kapilárně inaktivní. Plastifikátory především zlepšují zpracovatelnost, strukturu a z ní odvozené materiálové vlastnosti [2].

2.3.2. Speciální přísady

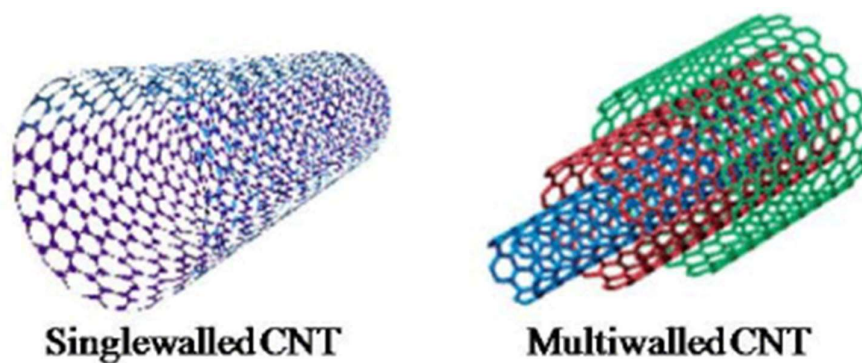
Do této oblasti se řadí například surfaktanty. Jsou to látky, které po přidání do kapalin, snižují povrchové napětí. Zvyšují následně smáčení materiálů a jejich rozptylování ve směsi. Surfaktanty jsou hydrofobní a částečně lipofilní látky, které se shromažďují na okraji molekul a zvětšují tak jejich objem [22]. Existuje několik druhů surfaktantů, které mohou sloužit například jako napěňovače a odpěňovače.

2.3.3. Nano-aditiva

Nanovlákná jsou syntetické materiály s homogenní strukturou, které se připravují pomocí technologie elektrostatického zvlákňování z polymerních roztoků nebo technikami silného zvlákňování. První zmínky o nanomateriálech (NM) pochází již z 9. století z oblasti Mezopotámie, kdy byly stříbrné a měděné částice použity pro třpyt na površích budov. NM dosahují v jednom směru velikosti 10^{-9} m. Nejvíce zkoumanými nanomateriály jsou ty na bázi uhlíku. Díky svým specifickým chemickým, mechanickým a fyzikálním vlastnostem mohou najít uplatnění v mnoha odvětví, jednou z nich je také stavebnictví.

Grafen a jeho deriváty patří do skupiny nanomateriálů s 2 D dimenzí. Grafen je velice pevný materiál s pevností v tahu až 130 GPa, Youngovým modulem pružnosti 1000 GPa a velkým povrchem až $2630 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$. Podle mnoha studií má grafen díky shlukování v kovalentních vazbách s jedním volným elektronem vysokou elektrickou vodivost, jejíž hodnota může dosahovat až $6500 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$. Elektrická vodivost je však závislá na přípravě samotného grafenu.

Další variantou nano-aditiv jsou uhlíkové nano-trubice (CNT), které byly objeveny v roce 1991. CNT mohou být uspořádány v jednonásobných (SWCNT) nebo vícenásobných vrstvách (MWCNT) grafenu, viz *Obrázek 3*. Mechanická pevnost nano-trubic dosahuje hodnot v rozmezí 50 až 500 GPa, modul pružnosti okolo 1,4 TPa u jednovrstvých. U dvouvrstvých trubic dosahuje mechanická pevnost hodnot v rozmezí 10 až 60 GPa a modul pružnosti do 1 TPa [23].



Obrázek 3: Jednovrstvé a více vrstvé nano-trubice; Zdroj: <https://www.cheaptubes.com/the-difference-between-single-walled-and-multi-walled-carbon-nanotubes/>; [cit.2022-04-15]

2.4. Příměsi

2.4.1. Speciální typ příměsí – PCM

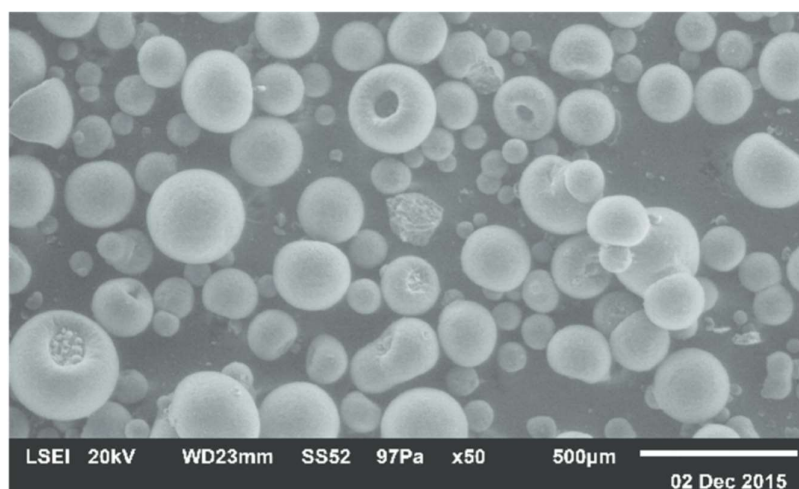
Materiály s fázovou přeměnou označované jako PCM (Phase Change Materials) jsou látky, které jsou schopny skladovat a uvolňovat velké množství latentního tepla za malé teplotní změny. Autoři Sharmy a Sagana [24], kteří se zabývají problematikou PCM, dělí tyto materiály na organické, anorganické a eutektické.

Nejčastěji používaným a známým přírodním PCM je parafín. Skládá se především z rovných řetězců uhlovodíků s bodem tání od 23 do 27°C. Významnými výhodami parafínu je chemická stabilita i po 1500 cyklech přeměn, bezpečnost a nereaktivita, jak uvádí Sharma [24]. Nevýhodou při používání parafínu jsou jeho objemové změny mezi tuhým a tekutým stavem. Mastné kyseliny mají velmi podobné vlastnosti jako parafíny, pouze je jejich cena 2-3krát vyšší. [24]

Mezi nejdéle používané a nejvíce zkoumané PCM spadají hydráty solí, které patří mezi anorganické PCM. Skládají se z vody a solí, které se během tuhnutí proměňují svou strukturu na krystalickou. Nejběžnějšími a velmi levnými hydráty solí je chlorid vápenatý $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ a dekahydrát síranu sodného $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, ten ale podle Abhata [25] ztrácí kapacitu vázat teplo již po 1000 cyklech tání a tuhnutí až o 73 %.

Do skupiny anorganických materiálů s fázovou přeměnou lze dále řadit kovové střepy. Hlavní výhodou kovových PCM dle Khana a kolektivu [26] je jejich vynikající tepelná vodivost a malá změna objemu. Tyto materiály se nejčastěji používají v solárních aplikacích.

Na *Obrázku 4* je zobrazen Micronal DS 5038, který je jedním z druhů materiálů s fázovou přeměnou. Produkt se skládá z polymerních kuliček s parafínovým jádrem.



Obrázek 4: Micronal DS 5038 pod mikroskopem; zdroj:

https://www.researchgate.net/figure/SEM-image-of-BASF-Micronal-DS-5038-X-PCM_fig1_311089537; [cit. 2022-04-05]

2.5. Historické omítky

Historické omítky měly většinou architektonickou a dekorativní funkci. Složení historických omítek se během let měnilo, od čistě přírodních materiálů (jako je hlína) po přísady vzdušného nebo hydraulického vápna v kombinaci s pucolány. Už u omítek z doby bronzové jsou poznatky, že byly použity rozdrčené cihly jako lehčené plnivo [9].

Dle Hoška [27] se v Čechách objevily první zmínky o způsobu omítání rozetřením malty, která vytékala z ložných spár. Nejstarší dochovaná vnější omítka z přelomu 9. a 10. století se nalézá na rotundě v Budči.

Záměr stavitele při použití vápenné malty byl nejen architektonický, ale také budovu chránit.

Vývoj omítek a jejich zpracování můžeme rozdělit do několika významných období. Nejstarším typem jsou omítky jednovrstvé [28]. Nejstarší dochované části omítnutých staveb na našem území pochází z Velkomoravské říše. Hošek a Losos ve své publikaci [9] zmiňují několik staveb, u kterých byla omítka připravena například z prosévaného jemného písku s vysokým obsahem vápenného pojiva. U velkomoravských budov si můžeme všimnout prvních stop vnějšího omítání, vnitřních omítek či nástěnných maleb.

U omítek z románského období se objevil způsob omítání, kdy byla omítka hluboká, nepravidelná a bez dokonalejšího zednického opracování, pouze s vodorovně a svisle naznačenými spárami pro pravidelný spárořez. U románských staveb byla často do maltové směsi přidávána jílovitá příměs, která způsobila nahnědlý až načervenalý barevný podtón [9]. Již z období gotiky jsou známé poznatky, že se malty modifikovaly bílkovinami, přírodními cukry a běžnými přírodními materiály pro zvýšení viskozity, lepivosti a urychlení tvrdnutí [9]. Gotické omítky se charakterizují chaotickým nahazováním jednovrstvé omítky. Pro její výrobu byl často použit neprosévaný písek o vysoké frakci, který způsobil v omítce výrazné rýhy, hůř se nahazovaly a hustá omítková kaše vytvářela na zdivu plastické záclony [27].

Dvouvrstvé a vícevrstvé omítky se objevovaly až od dob renesance. První vrstva vícevrstvé omítky srovnává nerovnosti a nedokonalosti kladení stavebního kamene a svůj povrch má uhlazený a hladký. Této vrstvě se říká jádrová omítka. Druhou vrstvou je štuková omítka, která je výrazně tenčí. Typické omítky v renesančním období se prováděly nástřikem řídkou cementovou maltou na zdivo, na kterou se následně nanasla jádrová omítka z vápenocementové malty. Poslední vrstvu tvořil vápenný štuk [28]. Z tohoto období je znám trend škrábané omítky, která byla levnější a trvanlivější alternativou po malbách. Dle Hoška [9] jsou klasickým příkladem tohoto stylu omítání palácové stavby s prostou

omítkou doplněné o škrábaná „psaníčka“, kdy se do zavadlé omítky v malé hloubce vyškrábe kvádrový rastr nebo jednoduchý obrazce. Tato technologie omítání se nazývá „Sgrafito“, viz *Obrázek 5*.



*Obrázek 5: Sgrafito; zdroj: [http://historie.lusa.cz/obdobi-po-husitskych-
valkach/renesance/detail-psanickoveho-sgrafita/](http://historie.lusa.cz/obdobi-po-husitskych-valkach/renesance/detail-psanickoveho-sgrafita/) [cit.2022-05-06]*

V období baroka a klasicismu se již používaly omítky a malty s hydraulickými vlastnostmi, které měly chránit objekt před stékající vodou. Nejčastěji to byla omítka sádro-vápenná [9], [27].

V meziválečném období vznikla suchá průmyslově vyráběná cementová směs „břízolit“, která byla velmi oblíbeným prvkem v běžném stavebnictví [9].

2.5.1. Trvanlivost, vady a poruchy

Omítka plní svojí funkci – architektonickou a ochrannou před vnějšími vlivy – pouze do té doby, dokud vytváří celistvý plášť s podkladem. Poruchu vnějšího pláště starších budov charakterizuje především ztráta soudržnosti pojiva s plnivem. Ztráta soudržnosti vede k rozpadu struktury omítky, snížení adheze k podkladu a následnému opadávání. Dlouhodobě neudržované omítky vystavené působení prachu, zplodin z atmosféry (SO₂, NO_x), posypové soli (NaCl) a vody, jsou nenávratně poškozeny. Nejvíce namáhaná jsou místa v oblasti soklu, říms a konzolí.

Další výraznou příčinou poruch mohou být prudké změny teplot během letního či zimního období, kdy dochází ke vzniku trhlin a následné ztrátě

adheze k podkladu. Působení záporných teplot v kombinaci s ledem má vliv na objemové změny. Tlak vyvozený zvětšením objemu (až o 8 %) přesahuje mez pevnosti v tahu a vytváří trhliny v omítce [9]. Vzniklé trhliny na povrchu omítky umožňují rychlý a snadný přístup dešťové vody do konstrukce.

2.5.2. Rekonstrukce historických omítek

Na spoustu historických objektů nelze použít zateplovací systém ETICS. Jinou možností tepelné izolace památkově chráněné budovy, u kterých je požadováno zachování původních materiálů a fasádních doplňků, je použití tepelně izolačních omítek s označení T1 a T2 dle normy ČSN EN 998-1 [5]. Tepelná vodivost musí být dle této normy pro malty T1 $\leq 0,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a malty T2 $\leq 0,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Koeficient propustnosti vodních par $\mu \leq 15$.

3 Experimentální část

Cílem bakalářské práce bylo připravit vzorky lehčené malty na bázi přírodního hydraulického vápna s příměsí na bázi PCM, které byly nadále modifikovány pomocí CNT. Experimentálně byly připraveny tři vzorky záměsí s lehčeným plnivem s částečnou či úplnou náhradou křemičitého kameniva, u kterých byly experimentálně studovány strukturální, mechanické, vlhkostní a tepelné vlastnosti. Tyto lehčené vzorky byly porovnány s referenčními vzorky ze směsi s plnivem z křemičitého písku.

3.1. Použité materiály

Hlavní surovinou pro výrobu lehčené malty bylo přírodní hydraulické vápno a pěnové sklo, které bylo použito jako lehčené plnivo, viz *Obrázek 6*. Pro výrobu referenčních vzorků byl použit křemičitý písek.



Obrázek 6: Plnivo – pěnové sklo

Do druhé a třetí směsi byl přidán materiál s fázovou přeměnou, a to konkrétně Micronal DS 5040 (BASF). Ve třetí směsi byly navíc použity specifické obohacující přísady, jako nano-vlákna a surfaktanty. Tyto tři materiály byly smíchány s vodou a pomocí laboratorní hřídelové míchačky smíchány (viz *Obrázek 7*). Použitá nanovlákna (MWNT) byla vyrobena

firmou TimesNano z Číny a měla délku $<10\mu\text{m}$ Komerční název výrobu byl Industrial Grade Multi-walled Carbon Nanotubes. Jako napěňovač byl použit Tween 80 for synthetis od společnosti Merck z Německa. Napěňovač byl přidán za účelem optimální dispergace nanovláken, aby nedošlo k vytváření jejich shluků. Pro odpěňování byl použit 100% aktivní silikonový polymer Antifoam A Concentrate od firmy Sigma.



Obrázek 7: Smíchání příměsí

3.2. Příprava vzorků

V rámci experimentální práce byla jako první připravena referenční maltová směs. Dále byly připraveny a studovány 3 typy maltových směsí s 50% náhradou křemičitého písku (PG) pěnovým sklem (FG) a 3 typy maltových směsí se 100% náhradou písku pěnovým sklem. Složení připravených a dále studovaných maltových směsí je souhrnně uvedeno v *Tabulce 3*.

Tabulka 3: Receptura maltových směsí v (g)

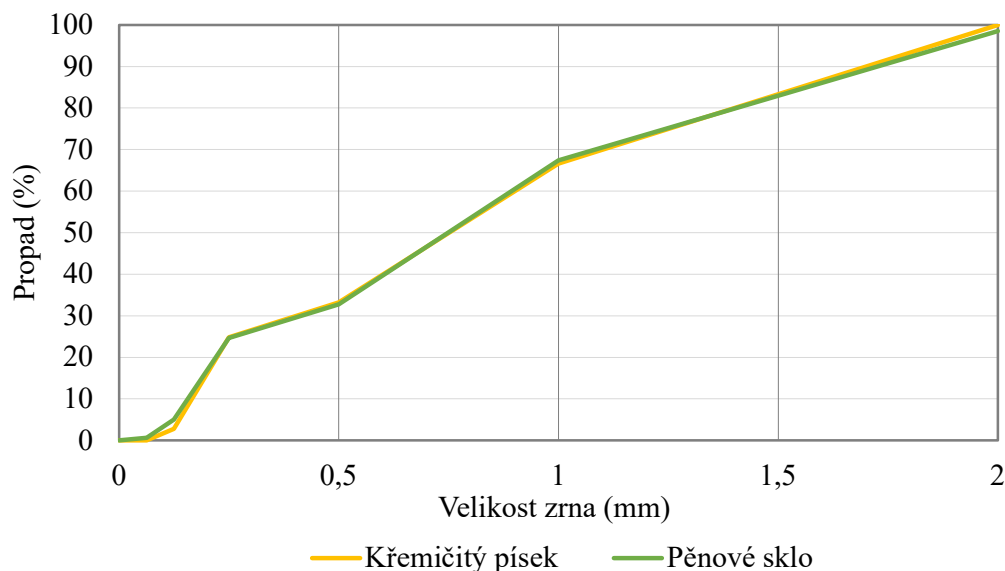
Vzorek	NHL	H ₂ O	PG	FG	PCM	CNT	Tween	Antifoam
NHL_ref	410	308	1394,7	-	-	-	-	-
NHL_G50	2200	770	3029,4	507,1	-	-	-	-
NHL_G50_PCM	2200	900	2423,5	405,6	258,7	-	-	-
NHL_G50_PCM-CNT	2200	1020	2423,5	405,6	258,7	6,6	0,66	0,165
NHL_G100	2000	300	-	921,9	-	-	-	-
NHL_G100_PCM	2000	620	-	737,5	258,7	-	-	-
NHL_G100_PCM-CNT	2000	700	-	737,5	258,7	6	0,6	0,15

Před samotnou přípravou maltoviny s nahrazeným plnivem bylo nutné připravit samotné plnivo – pěnové sklo. Použita byla směs frakcí 2 - 0,5; 0,5 - 0,25 a 0,25 – 0,125, viz *Tabulka 4*. Tato směs byla smíchána s 1,5násobkem hmotnosti pěnového skla vody a ponechána 24 hodin odstát při stálé teplotě. Vysoká pórovitost pěnového skla by totiž mohla ovlivnit proces míchání, čerstvou směs, a následné vlastnosti lehčených omítek.

Tabulka 4: Frakce pěnového skla v (g)

Záměs	frakce			celková hm.
	2-0,5	0,5-0,25	0,25-0,125	kameniva
NHL_G50	339,8	40,7	126,8	507,3
NHL_G50_PCM	271,8	32,5	101,4	405,7
NHL_G50_PCM_CNT	271,8	32,5	101,4	405,7
NHL_G100	617,7	73,6	230,5	921,8
NHL_G100_PCM	494,1	59,0	184,4	737,5
NHL_G100_PCM_CNT	494,1	59,0	184,4	737,5

Poměr frakcí pěnového skla byl upraven tak, aby zrnitost odpovídala zrnitosti křemičitého písku u referenční směsi. Křivky zrnitosti pěnového skla a křemičitého písku jsou zobrazeny na *Obrázku 8*.



Obrázek 8: Křivka zrnitosti pěnového skla

Frakce křemičitého kameniva u referenční směsi a u směsi s 50% náhradou pěnovým sklem je uvedena v *Tabulce 5*.

Tabulka 5: Frakce křemičitého kameniva

Záměs	frakce kameniva			celková hm. kameniva (g)
	PG1	PG2	PG3	
NHL_ref	464,9	464,9	464,9	1394,7
NHL_G50	1009,8	1009,8	1009,8	3029,4
NHL_G50_PCM	807,8	807,8	807,8	2423,5
NHL_G50_PCM_CNT	807,8	807,8	807,8	2423,5

Při přípravě samotných maltových směsí bylo jako první smícháno přírodní hydraulické vápno s vodou po dobu 60 s. Do třetí záměsi byla v tento okamžik přidána směs nano-vláken a surfaktantů. Po 60s míchání bylo přisypáno nasáklé pěnové sklo. U druhé a třetí záměsi byl přidán do

směsi i Micronal DS 5040. Tato směs byla míchána dalších 60 s. Další fázi míchání představovalo ruční promíchání, kdy byly všechny suché části odlepeny od dna pomocí špachtle a směs promíchána. Po ručním míchání byla znovu použita planetární míchačka po dobu 1 minuty na rychlý stupeň. Harmonogram míchání je podrobně uveden v *Tabulce 6*.

Tabulka 6: Časový harmonogram míchání

rychlost míchačky	činnost	začátek	konec
-	Smíchat NHL s vodou	-	0:00
pomalé	po 60 s přidat plnivo	0:00	1:00
rychlé	30 s	1:00	1:30
-	špachtlí očistit strany, ručně promíchat	1:30	3:00
rychlé	promíchat	3:00	4:00

Ze všech směsí byly vyrobeny zkušební trámce o rozměrech 40 mm × 40 mm × 160 mm, kostky o rozměrech 70 mm × 70 mm × 70 mm a kolečka s průměrem 110 mm a výškou 20 mm. Vzorky byly po dvou dnech odbedněny a dále uskladněny v uzavřené nádobě v relativní vlhkosti (95 ± 5) % a teplotě (23 ± 2) °C po dobu 26 dní. Vyrobena zkušební tělesa a jejich finální tvar jsou patrné z *Obrázku 9*.



Obrázek 9: Vzorky NHL_G100

3.3. Metody měření

3.3.1. Zkouška rozlivu

Rozliv maltové směsi byl změřen na střešacím stolku ihned po připravení a řádném míchání směsi dle normy ČSN EN 1015-3 [29]. Před každou zkouškou se horní deska stolku a vnitřní stěny formy navlhčila vodou. Forma ve tvaru kolového kuželu se položila doprostřed desky střešacího stolku. Naplnění formy probíhalo ve dvou vrstvách. Po nanesení jednotlivých vrstev se pomocí dusadla rozprostřela a udusala 10 lehkými údery. Kuželová forma se opatrně krouživými pohyby odstranila a následně se malta 15 údery s frekvencí jednoho úderu za sekundu rozlila.

Průměr rozlivu se pomocí měřidla odečetl, viz *Obrázek 10*. Požadovaný rozliv byl 160 ± 5 mm.



Obrázek 10: Zkouška rozlití

3.3.2. Objemová hmotnost

Objemová hmotnost byla měřena na zkušebních trámcích o rozměrech $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$, dle *Obrázku 11*, které byly vysušeny na ustálenou hmotnost dle normy ČSN EN 1015-6 [30]. Rozměry trámců byly změřeny posuvným měřidlem a zváženy na laboratorní váze. Objemová hmotnost byla vypočtena dle rovnice (1)

$$\rho_d = \frac{m_d}{V}, \quad (1)$$

kde ρ_v je objemová hmotnost ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), m_d je hmotnost vysušeného trámce (kg), V objem trámce získaný výpočtem (m^3).



Obrázek 11: Trámec NHL_G100

3.3.3. Hustota matrice

Hustotu matrice byla měřena na automatickém héliovém pyknometru ATC (Thermo-Scientific), viz *Obrázek 12*, s integrovaným řízením teploty o přesnosti $\pm 0,01$ °C. Do pyknometru byly vloženy vzorky vysušené do ustálené hmotnosti.



Obrázek 12: Pyknometr ATC Thermo-Scientific

3.3.4. Pórovitost

Pórovitost udává objem pórů v materiálu. Pórovitost materiálu byla změřena podle normy ČSN EN 480-11 [31] a dopočtena dle vzorce (2)

$$\psi = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_{mat}}, \quad (2)$$

kde ψ je pórovitost (-), ρ_v objemová hmotnost vzorku ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) a ρ_{mat} hustota materiálu ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

Druhou metodu, která byla použita pro zjištění velikosti pórů, byla rtuťová porozimetrie. K tomuto měření byly použity dva porozimetry Pascal 140 a Pascal 440, viz *Obrázek 13*. Pascal 140 je nízkotlaký porozimetr, který měří velké póry ($116 - 3,8 \mu\text{m}$) pomocí tlaků v rozmezí od vakua do 440 kPa. Pascal 440 měří velmi malé póry ($15 - 0,0036 \mu\text{m}$) při dosažení tlaku až 400 MPa. Měření bylo provedeno na vysušených úlomcích odebraných ze zkušebních trámů. Vzorky měly typicky hmotnost $\sim 1.5 \text{ g}$.



Obrázek 13: Rtuťové porozimetry Pascal 140 a Pascal 440

3.3.5. Tepelné vlastnosti

Pro změření tepelných vlastností byl použit přenosný přístroj ISOMET 2114 (Applied Precision), který umožňuje měřit součinitel tepelné vodivosti λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) a objemovou tepelnou kapacitu c_v ($\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$).

Tepelné vlastnosti byly měřeny na kostkách o rozměrech 70 mm × 70 mm × 70 mm, viz *Obrázek 14*. Měření bylo realizováno při teplotách 10 °C a 40 °C, aby bylo možné zhodnotit vliv fázové změny na tepelné chování malt modifikovaných příměsí PCM.



Obrázek 14: Měření tepelných vlastností pomocí ISOMET 2114

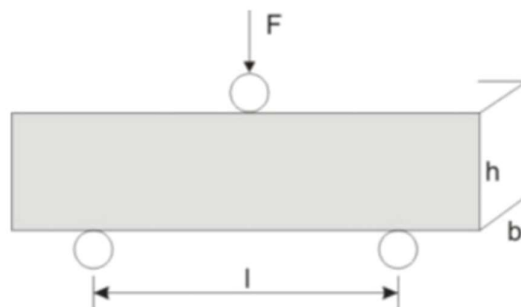
3.3.6. Pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu f_f (MPa) byla měřena pomocí hydraulického lisu dle normy ČSN EN 1015-11 [32]. Zkouška byla provedena na trámčích 40 mm × 40 mm × 160 mm stáří 28 dní, které byly v lisu zatíženy tříbodovým ohybem, jak je zobrazeno na *Obrázku 15*. Hodnota pevnosti v tahu za ohybu přesných rozměrů byla spočítána dle vztahů (4) a (5)

$$f_f = \frac{\max M}{W}, \quad (4)$$

$$W = \frac{1}{6} * b * h^2, \quad (5)$$

kde $\max M$ je maximální moment na rameni 100 mm – rozteč mezi podporami (kNm), f_f pevnost v tahu za ohybu (MPa), W průřezový modul (m^3), b šířka průřezu (m), h výška průřezu (m).



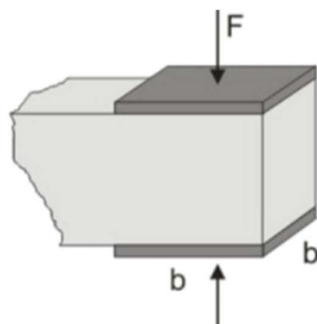
Obrázek 15: Pevnost v tlaku za ohybu; zdroj: https://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=malty_cement_z_k, [cit.2022-04-15]

3.3.7. Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku f_c (MPa) byla měřena pomocí hydraulického lisu dle normy ČSN EN 1015-11 [32] na úlomcích zkušebních trámců 28 dní starých. Zkušební vzorek byl zatížen pomocí destičky 40 mm × 40 mm, dle *Obrázku 16*, do úplného porušení. Z měření byla stanovena síla porušení F (kN). Pevnost v tlaku byla vypočítaná dle rovnice (6)

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (6)$$

kde je f_c pevnost v tlaku (MPa), F maximální síla při porušení vzorku (kN), A plocha vzorku (m²).



Obrázek 16: Pevnost v tlaku; zdroj: https://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=malty_cement_z_k, [cit.2022-04-15]

3.3.8. Dynamický modul pružnosti

Dynamický modul pružnosti byl vypočítán pomocí normy ČSN 73 1371 [7] pomocí přístroje DIO 562 (Starmans Electronics), který pracuje na frekvenci 50 Hz. Modul pružnosti byl měřen na trámcích 40 mm × 40 mm × 160 mm, které byly vysušeny na stálou hmotnost. Dynamický modul pružnosti se vypočítal dle rovnice (7)

$$E_{cu} = \rho_{mat} \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2}, \quad (7)$$

kde je ρ_{mat} hustota ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), v_L impulzová rychlost daného UZ vlnění ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$) a k je součinitel rozměrnosti prostředí ($k=1$).

3.3.9. Kapilární nasákavost

Kapilární nasákavost byla měřena na úlomcích trámů automatickou metodou. Vzorky byly předem opatřeny epoxidovým nátěrem tak, aby voda prostupovala pouze jedním směrem. Vzorky byly připevněny tak, aby byly ponořeny ve vodě do hloubky 5 až 10 mm. Automatický přístroj odečítal každých 30s příbytek hmotnosti studovaných vzorků. Z výsledků byly dopočteny hodnoty jako absorpční koeficient A_w , kapilární obsah w_{kap} a součinitel vlhkostní vodivosti κ .

Absorpční koeficient A_w se spočítal dle rovnice (8)

$$A_w = S \cdot \rho_v \quad (8)$$

kde je A_w absorpční koeficient ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$), S je průtok ($\text{s}^{-1/2}$) a ρ_v je objemová hmotnost ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$).

Kapilární obsah se spočítal rovnicí (9)

$$w_{kap} = (m_2 - m_1) \cdot V^{-1}, \quad (9)$$

kde je w_{kap} kapilární obsah ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), m_2 hmotnost vzorku po měření (kg), m_1 je hmotnost vzorku před měřením (kg) a V je objem vzorku (m^3).

Součinitel vlhkostní vodivosti κ se dopočetl rovnicí (10)

$$\kappa = (A_w \cdot w_{\text{kap}}^{-1})^2 \quad (10)$$

kde je κ součinitel vlhkostní vodivosti ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), w_{kap} kapilární obsah nasycené vlhkosti ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) a A_w absorpční koeficient ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$).

Dále bylo dle normy [33] spočítáno hmotnostní nasycení po 24 hodinách rovnicí (11)

$$W_{24\text{h}} = \frac{(m_3 - m_0)}{m_0}, \quad (11)$$

kde je $W_{24\text{h}}$ hmotnostní nasycení po 24 hodinách ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$), m_0 hmotnost vysušeného vzorku (g), m_3 hmotnost nasáklého zkušební vzorku po 24 hodinách (g).

3.3.10. Difúze – prostup vodní páry

Prostup vodní páry byl studován pomocí miskové metody na kruhových vzorcích o průměru 110 mm. Použit byl postup normy ČSN EN ISO 12572 [34]. Kruhové vzorky byly položeny na misky, do kterých byl nasypán silikagel. Vzorky byly utěsněny pomocí technické plastelíny z důvodu zajištění 1D transportu vodní páry. Jednotlivé vzorky (misky) byly následně umístěny do klimatizační komory, viz *Obrázek 17*, s ustálenými teplotními a vlhkostními podmínkami. V komoře byla udržována $\text{RH} = (50 \pm 5) \%$ a teplota $23 \text{ }^\circ\text{C}$.



Obrázek 17: DRY-CUP metoda – vzorky v klimatické komoře

Dále byla dle normy [34] dopočítána změna hmotnosti za dobu jednotlivého měření rovnicí (12)

$$\Delta m_{12} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1}, \quad (12)$$

kde je Δm_{12} změna hmotnosti za dobu pro jednotlivá stanovení ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$), m_1 hmotnost zkušební sestavy v čase t_1 (kg), m_2 hmotnosti zkušební sestavy v čase t_2 (kg) a t_1 a t_2 časy po sobě jdoucích vážení (s).

Hustota difúzního toku vodních par rovnicí (13)

$$g = \frac{G}{A}, \quad (13)$$

kde je g hustota difúzního toku ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$), G je změna hmotnosti posledních postupných stanovení Δm_{12} v rozmezí $\pm 5\% G$ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$), A je vystavená plocha zkušební vzorku (m^2).

Propustnost vodní páry byla stanovena rovnicí (14)

$$W = \frac{G}{A \cdot \Delta p}, \quad (14)$$

kde je W propustnost vodí páry ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$), G změna hmotnosti (kg), A vystavená plocha vzorku (m^2) a Δp je rozdíl tlaků uvnitř a vně zkušební misky (Pa).

Difúzní odpor byl vyjádřen převrácenou hodnotou propustnosti vodní páry ze vztahu (15)

$$Z = \frac{1}{W}, \quad (15)$$

kde je Z difúzní odpor ($\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa} \cdot \text{kg}^{-1}$) a W propustnost vodí páry ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$).

Součinitel difúzní vodivosti se spočítal vztahem (16)

$$\delta = W \cdot d, \quad (16)$$

kde δ propustnost pro vodní páru ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$), W propustnost vodní páry ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$) a d výška zkušební vzorku (m).

Faktor difúzního odporu μ se určil ze vztahu (17)

$$\mu = \frac{\delta_{\text{air}}}{\delta}, \quad (17)$$

kde je μ faktor difúzního odporu, $\delta_{\text{air}} = 1,88 \cdot 10^{-10}$ (s) součinitel propustnosti pro vodní páru ve vzduchu a δ součinitel propustnosti pro vodní páru materiálu (s), ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$).

3.3.11. Nejistoty měření

Všechna měření jsou měřena s rozšířenými kombinovanými nejistotami, viz *Tabulka 7*.

Tabulka 7: Rozšířené kombinované nejistoty jednotlivých parametrů

Parametr	Symbol	Jednotka	Nejistota (%)
Pevnost v tahu za ohybu	f_f	MPa	1,4
Pevnost v tlaku	f_c	MPa	1,4
Modul pružnosti	E	GPa	2,0
Pórovitost	Ψ	%	2,0
Objemová hmotnost	ρ_v	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1,4
Hustota	ρ_{mat}	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1,2
Absorpční koeficient	A_w	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$	2,3
Součinitel vlhkostní vodivosti	κ	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	2,3
Kapilární obsah	w_{kap}	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2,3
Hmotnostní nasycení po 24 hodinách	$W_{24\text{h}}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	3,5
Součinitel tepelné vodivosti	λ	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	2,3
Objemovou tepelnou kapacitu	c_v	$\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	2,6
koeficient Propustnosti vodních par	μ	-	2,8

3.4. Výsledky měření

3.4.1. Zkouška rozlivu

V *Tabulce 8* jsou vypsány výsledky měření rozlivu jednotlivých směsí.

Tabulka 8: Rozliv

Vzorek	plnivo	rozliv
NHL_ref	PG	160 × 165
NHL_G50	PG+FG	170 × 165
NHL_G50_PCM	PG+FG	155 × 155
NHL_G50_PCM_CNT	PG+FG	155 × 160
NHL_G100	FG	170 × 165
NHL_G100_PCM	FG	155 × 155
NHL_G100_PCM_CNT	FG	160 × 165

Je evidentní, že aplikace PCM snížila zpracovatelnost maltových směsí, nicméně hodnoty rozlivu odpovídají hodnotám, které byly při návrhu malt požadovány. Rozdílná náhrada plniva neměla výrazný vliv na rozliv, hodnoty u 50 % a 100% náhrady u jednotlivých směsí jsou podobné.

3.4.2. Základní materiálové vlastnosti

V *Tabulce 9* se nachází spočítaná objemová hmotnost, hustota matrice a pórovitost jednotlivých směsí lehčené malty po 28 dnech zrání.

Tabulka 9: Základní materiálové vlastnosti

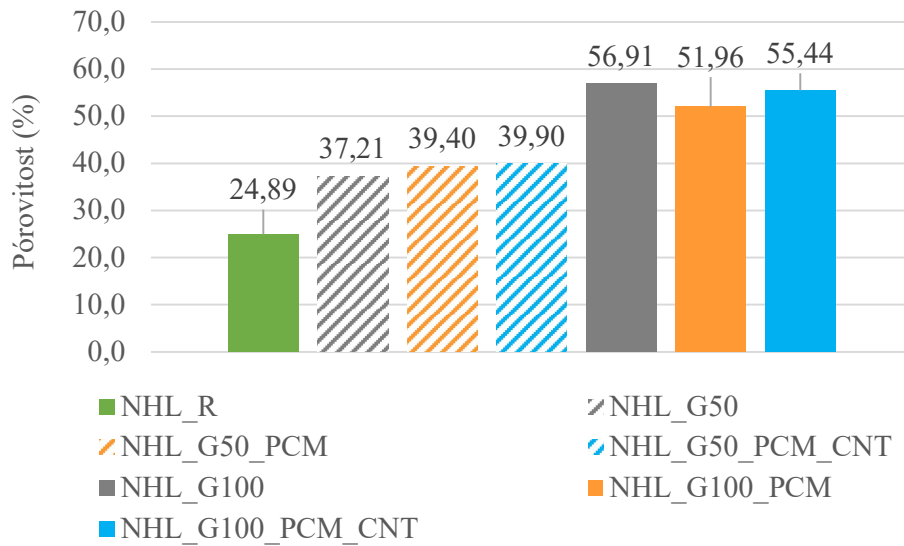
Vzorek	ρ_v ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	ρ_{mat} ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Ψ (%)
NHL_ref	1761 ± 25	2597 ± 31	32,2 ± 0,6
NHL_G50	1413 ± 20	2374 ± 28	40,5 ± 0,8
NHL_G50_PCM	1242 ± 17	2340 ± 29	46,9 ± 0,9
NHL_G50_PCM_CNT	1216 ± 17	2367 ± 33	48,6 ± 1,0
NHL_G100	933 ± 14	2162 ± 26	56,8 ± 1,2
NHL_G100_PCM	843 ± 12	1996 ± 24	57,8 ± 1,2
NGL_G100_PCM_CNT	843 ± 12	1985 ± 24	57,5 ± 1,2

Částečná i úplná náhrada plniva pěnovým sklem snížila objemovou hmotnost a hustotu matrice u všech vzorků. Částečná náhrada snížila objemovou hmotnost o 20 % s porovnáním s referenční směsí, což je důsledek přidání pórovitého materiálu za část písku. U celkové náhrady plniva došlo ke snížení objemové hmotnosti o 47 % v porovnání s referenční směsí. Přidáním PCM došlo k lehkému poklesu objemové hmotnosti i hustoty matrice. U malty NHL_G50 se objemová hmotnost snížila o dalších 10 % a u malty NHL_G100 o 5 % od referenční směsi.

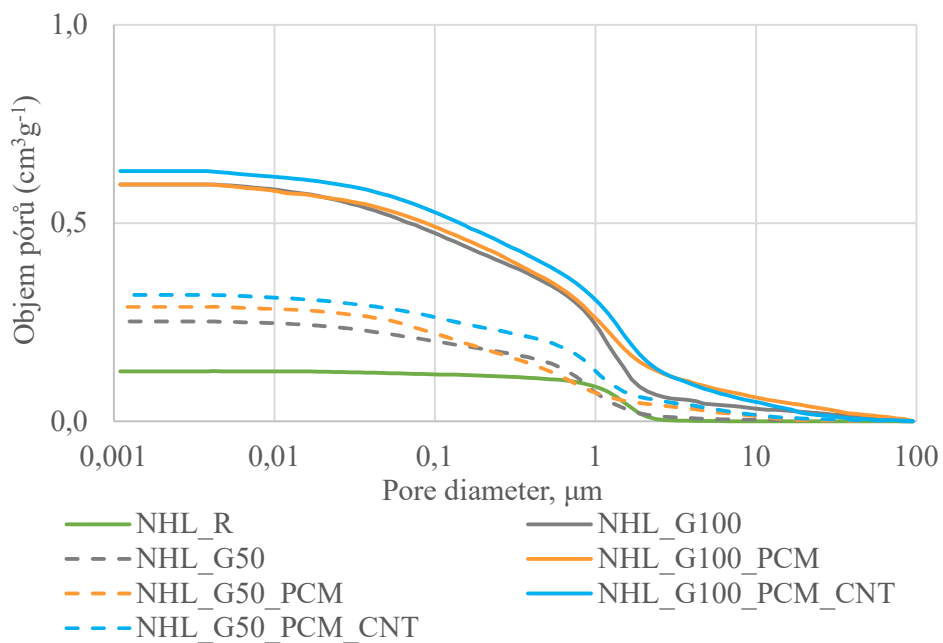
Pórovitost s vyšším obsahem pěnového skla stoupá. U vzorku s 50% náhradou se pórovitost zvětšila o 25 % v porovnání s referenční směsí. U vzorků NHL_G100 došlo ke zvýšení pórovitosti o 76 % od referenční směsi. Přidání PCM a CNT nemělo vliv na pórovitost. Obsah CNT neměl žádný vliv na základní strukturní vlastnosti.

Směrnice WTA 2-9-04/D [6] pro sanační omítky předepisuje pórovitost > 40 %, což všechny směsi modifikovaných malt splnily.

Pomocí rtuťové porozimetrie byla změřena pórovitost, viz *Obrázek 18*, a zastoupení (objem) jednotlivých pórů dané velikosti, viz *Obrázek 19*.



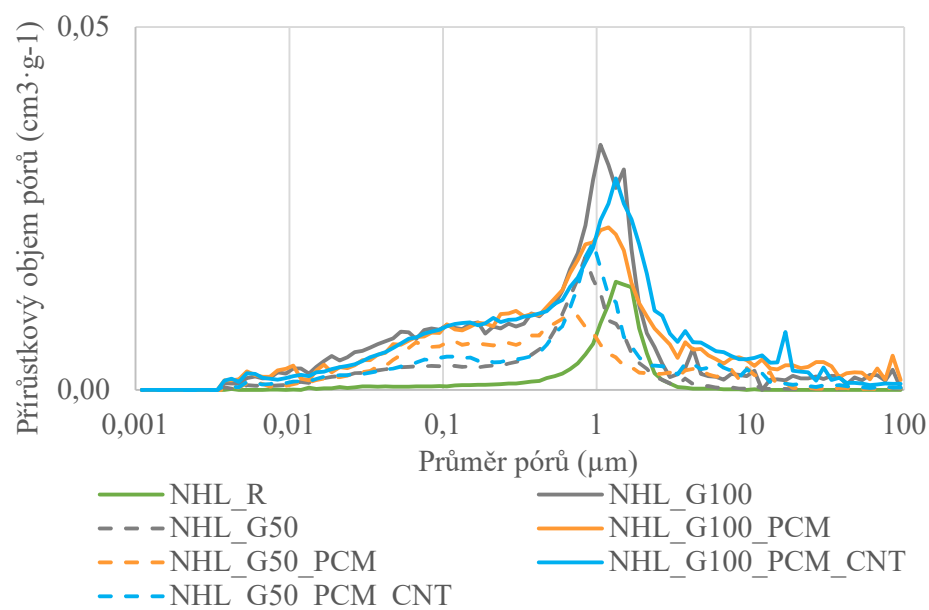
Obrázek 18: Rtuťová porozimetrie – pórovitost



Obrázek 19: Rtuťová porozimetrie – kumulativní křivky distribuce pórů

Z Obrázku 19 je patrné, že rozdílný obsah pěnového skla zvýšil celkový objem pórů. Materiály PCM a CNT nemají zásadní vliv na velikost pórů ani pórovitost směsí, což je také patrné z grafu na Obrázku 20. Přidání PCM ale lehce ovlivnilo distribuci pórů dané velikosti. Hodnoty celkové pórovitosti získané rtuťovou porozimetrií se částečně liší od hodnot spočtených na základě objemové

hmotnosti a hustoty matrice. Rozdíly jsou způsobené zejména principem metod měření a velikostí měřených vzorků.



Obrázek 20: Rtuřová porozimetrie – distribuční křivky

3.4.3. Mechanické vlastnosti

V *Tabulce 10* jsou uvedeny hodnoty pevnosti v tahu za ohybu f_t , pevnosti v tlaku f_c a dynamický modul pružnosti E jednotlivých směsí.

Tabulka 10: Mechanické parametry malt (MPa)

Malta	f_t	f_c	E
NHL_ref	$0,8 \pm 0,01$	$4,6 \pm 0,06$	$4,6 \cdot 10^3 \pm 92$
NHL_G50	$0,7 \pm 0,01$	$3,5 \pm 0,05$	$3,9 \cdot 10^3 \pm 78$
NHL_G50_PCM	$0,8 \pm 0,01$	$3,6 \pm 0,05$	$3,8 \cdot 10^3 \pm 76$
NGL_G50_PCM_CNT	$0,9 \pm 0,01$	$3,9 \pm 0,05$	$4,1 \cdot 10^3 \pm 82$
NHL_G100	$0,9 \pm 0,01$	$3,3 \pm 0,04$	$2,1 \cdot 10^3 \pm 42$
NHL_G100_PCM	$1,0 \pm 0,02$	$3,3 \pm 0,05$	$1,9 \cdot 10^3 \pm 38$
NHL_G100_PCM_CNT	$1,1 \pm 0,02$	$3,7 \pm 0,05$	$2,0 \cdot 10^3 \pm 40$

Částečné či úplné nahrazení plniva pěnovým sklem nemělo zásadní vliv na změnu pevnosti v tahu za ohybu. Největší rozdíl je viditelný u vzorků se 100% náhradou v kombinaci s PCM a CNT. Zde došlo k navýšení pevnosti v tahu o 50 % od referenčního vzorku.

Částečné i úplné nahrazení plniva však způsobilo snížení pevnosti v tlaku u všech vzorků. U 50% náhrady plniva došlo ke snížení pevnosti v tlaku o 24 % u malty NHL_G50. Přidáním PCM a i CNT došlo ke snížení pevnosti o 15 % od referenčního vzorku. Pevnost u vzorků se 100% náhradou plniva se snížila o 28 %. Přidání PCM a CNT materiálů nemělo zásadní vliv na pevnost v tlaku, pokles pevnosti byl v tomto případě 19 %.

Dle normy ČSN EN 998-1 [5] jsou tepelně izolační omítky klasifikované třídami CS I až CS III (f_c pro CS I 0,4 – 2,5 MPa, f_c pro CS II 1,5 – 5 MPa, f_c pro CS III 3,5 – 7,5 MPa). Dle směrnice WTA [6] jsou sanační omítky charakterizované požadavkem $f_c = 1,5 – 5$ MPa při stáří 28 dní, tedy třídou CS II. Všechny studované malty splňují tento požadavek.

3.4.4. Tepelné vlastnosti

Naměřené tepelné vlastnosti jsou uvedeny v *Tabulce 11*.

Tabulka 11: Tepelné vlastnosti omítek při 10 °C a 40 °C

Malta	λ		c_v	
	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)		(J·m ⁻³ ·K ⁻¹)	
	10 °C	40 °C	10 °C	40 °C
NHL_ref (23 °C)	0,831 ± 0,019		1,56·10 ⁶ ± 4,06·10 ⁴	
NHL_G50	0,500 ± 0,012	0,568 ± 0,013	1,53·10 ⁶ ± 3,98·10 ⁴	1,58·10 ⁶ ± 4,11·10 ⁴
NHL_G50_PCM	0,360 ± 0,008	0,400 ± 0,009	1,58·10 ⁶ ± 4,11·10 ⁴	1,65·10 ⁶ ± 3,98·10 ⁴
NHL_G50_PCM_CNT	0,390 ± 0,009	0,425 ± 0,010	1,61·10 ⁶ ± 4,19·10 ⁴	1,69·10 ⁶ ± 4,39·10 ⁴
NHL_G100	0,147 ± 0,003	0,166 ± 0,004	0,64·10 ⁶ ± 1,66·10 ⁴	0,72·10 ⁶ ± 1,82·10 ⁴
NHL_G100_PCM	0,152 ± 0,003	0,172 ± 0,004	0,75·10 ⁶ ± 1,95·10 ⁴	0,84·10 ⁶ ± 2,18·10 ⁴
NHL_G100_PCM_CNT	0,160 ± 0,004	0,175 ± 0,004	0,77·10 ⁶ ± 2,00·10 ⁴	0,87·10 ⁶ ± 2,26·10 ⁴

Tepelné vlastnosti připravených maltových směsí byly měřeny při dvou teplotách a to při 10 °C a 40 °C. Tímto měřením bylo zkoumáno, zda změna skupenství z pevného na kapalné PCM ovlivní tepelné vlastnosti studovaných malt.

U všech vzorků lehčených malt došlo ke snížení součinitele tepelné vodivosti v porovnání s referenční omítkou.

U měření vzorků při teplotě 10 °C došlo ke snížení součinitele tepelné vodivosti o 70 % při plné náhradě plniva pěnovým sklem oproti hodnotám u vzorků s částečnou náhradou plniva. Přidáním PCM došlo k dalšímu snížení součinitele tepelné vodivosti o 28 % u vzorku NHL_G50_PCM. U směsi NHL_G100_PCM přidání PCM nemělo zásadní vliv na součinitele

tepelné vodivosti, zvýšil se pouze o 8 %. Přidání CNT vedlo k dalšímu částečnému zvýšení součinitele tepelné vodivosti, konkrétně o 8 % v případě NHL_G50_PCM_CNT a o 5 % v případě NHL_G100_PCM_CNT.

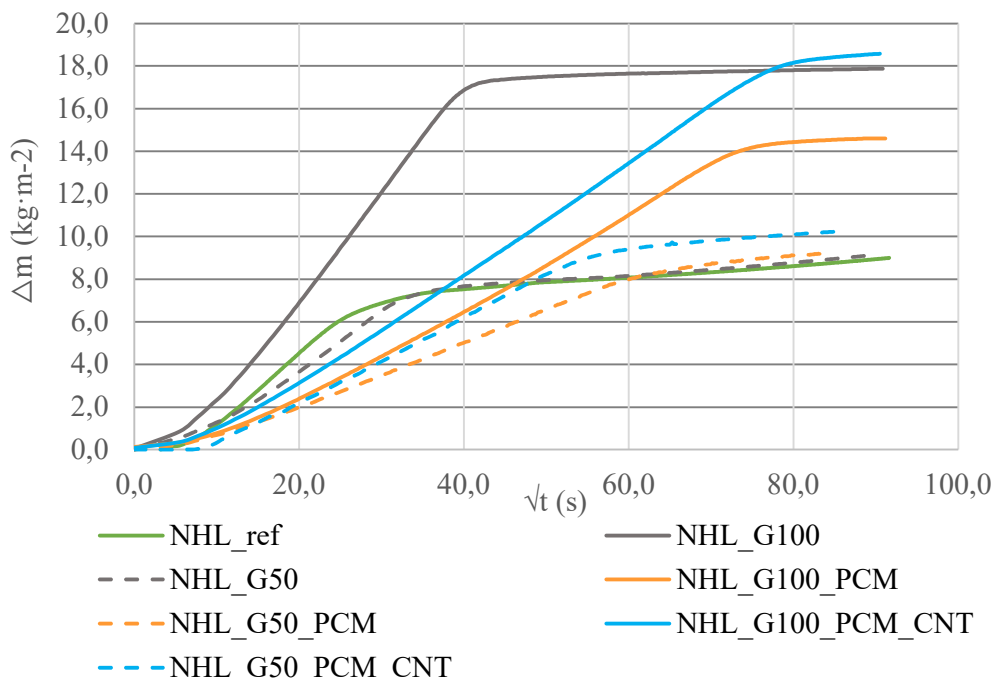
Objemová tepelná kapacita lehčených omítek byla pro 50% náhradu křemičitého písku přibližně stejná, jako u referenční směsi. U omítek se 100% náhradou písku však došlo k jejímu výraznému snížení v důsledku vylehčení porézní struktury malt. Při teplotě 10 °C se objemová tepelná kapacita s plnou náhradou plniva snížila o 61 % oproti NHL_G50, což je důsledek větší pórovitosti směsi v důsledku vyššího zastoupení pěnového skla ve směsi. Přidáním PCM u NHL_G100_PCM způsobilo zvýšení objemové tepelné kapacity o 17.2 %. V případě NHL_G50_PCM byl nárůst objemové tepelné kapacity v porovnání s NHL_G50 pouze 3.3 %. Aplikace CNT vedla k dalšímu navýšení kapacity pro akumulaci tepla, konkrétně o 1.8 % pro NHL_G50_PCM_CNT a o 2.6 % v případě NHL_G100_PCM_CNT.

V porovnání s měřením při teplotě 10 °C byly výsledky pro součinitel tepelné vodivosti a objemovou tepelnou kapacitu získané zkoušením při teplotě 40 °C vyšší. Zde se projevil především vliv fázové změny PCM, který vedl k nárůstu tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity zakomponovaného PCM. Nárůst tepelné kapacity pro maltu NHL_G50_PCM byl 4.4 %, u malty NHL_G100_PCM představovalo zvýšení objemové tepelné kapacity 12 %.

Dle normy ČSN EN 998-1 [5] musí mít tepelně izolační omítky typu T1 součinitel tepelné vodivosti $\lambda_{T1} \leq 0,10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ a typu T2 součinitel $\lambda_{T2} \leq 0,20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Tento požadavek omítek typu T2 splňují pouze omítky se 100% náhradou plniva, které lze tedy v tomto smyslu charakterizovat jako tepelně izolační. Tento požadavek splňovaly omítky i při měření ve zvýšené teplotě.

3.4.5. Kapilární nasákavost

V grafu na *Obrázku 21* jsou znázorněny průběhy křivky nasákavosti získané v rámci sorpčního experimentu, který byl realizován pomocí automatického měření.



Obrázek 21: Průběh nasákavosti jednotlivých vzorků

U vzorků s 50% náhradou plniva pěnovým sklem se nasákavost výrazně nezměnila. Křivka nasákavosti vzorku NHL_G50 odpovídá v počátku sledovaného časového intervalu referenční směsi. Výrazně zvýšená pórovitost u směsi se 100% náhradou plniva způsobila značný nárůst nasákavosti, w_{kap} se zvýšilo o 120 %. Přidáním PCM se naopak nasákavost zpomalila v důsledku hydrofobního charakteru použitého PCM. Použití CNT způsobilo zvýšení bodu nasycení, který znázorňuje zlom křivky a zvýšení vlhkostní vodivosti, viz *Tabulka 12*.

Výsledné měřené i dopočítané sorpční hodnoty jsou souhrnně uvedeny v *Tabulce 12*.

Tabulka 12: Vlhkostní parametry studovaných malt

Vzorek	A_w ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1/2}$)	w_{kap} ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	κ ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
NHL_ref	$0,311 \pm 0,007$	$161,505 \pm 3,415$	$3,71\cdot 10^{-6} \pm 8,53\cdot 10^{-8}$
NHL_G50	$0,322 \pm 0,007$	$163,045 \pm 3,750$	$3,90\cdot 10^{-6} \pm 8,97\cdot 10^{-8}$
NHL_G50_PCM	$0,162 \pm 0,004$	$173,571 \pm 3,992$	$8,80\cdot 10^{-7} \pm 2,04\cdot 10^{-8}$
NHL_G50_PCM_CNT	$0,209 \pm 0,005$	$188,897 \pm 4,345$	$1,23\cdot 10^{-6} \pm 2,83\cdot 10^{-8}$
NHL_G100	$0,481 \pm 0,011$	$355,106 \pm 8,167$	$1,84\cdot 10^{-6} \pm 4,23\cdot 10^{-8}$
NHL_G100_PCM	$0,250 \pm 0,006$	$283,518 \pm 6,521$	$7,80\cdot 10^{-7} \pm 1,79\cdot 10^{-8}$
NHL_G100_PCM_CNT	$0,278 \pm 0,006$	$315,987 \pm 7,268$	$8,16\cdot 10^{-7} \pm 1,88\cdot 10^{-8}$

Pěnové sklo kvůli své vysoké pórovitosti způsobilo zvýšení nasákavosti, a tudíž i zvýšení absorpčního koeficientu pro vodu A_w .

Nahrazením 50% plniva došlo ke zvýšení součinitele vlhkostní absorpce o 3.5 % od referenční směsi. U vzorků se 100% náhradou plniva NHL_G100 se součinitel absorpce zvýšil o 54.7 % od referenční směsi. Přidáním PCM došlo ke snížení součinitele vlhkostní absorpce o 47.9 % u NHL_G50_PCM a o 19.6 % u NHL_G100_PCM od hodnoty referenční směsi, přestože mají vyšší pórovitost a očekával by se přesný opak. Je to z tohoto důvodu, že materiály s fázovou přeměnou jsou převážně hydrofobního charakteru. Přidání CNT nemělo zásadní vliv na změnu součinitele absorpce A_w .

Hodnoty kapilárního obsahu vlhkosti w_{kap} se s náhradou písku pěnovým sklem zvýšily nejvíce u malty NHL_G100 o 119.8 %, u směsi NHL_G50 pouze o 1 %. Přidáním PCM se hodnota kapilárního obsahu vlhkosti

zvýšila o 75.8 % u NHL_G100_100 a u NHL_G50_PCM o 7.5 %, což je důkaz rozdílné pórovitosti analyzovaných malt. V kombinaci PCM a CNT bylo navýšení w_{kap} v porovnání s referenční maltou o 95.6 % u NHL_G100_PCM_CNT a o 17,4 % u NHL_G50_PCM_CNT.

Vypočtené hodnoty vlhkostní vodivosti κ odpovídají experimentálně stanoveným hodnotám A_w a w_{kap} . Typicky, vylehčení omítek pomocí pěnového sklo vedlo ke zvýšení hodnot vlhkostní vodivosti. Ty byly naopak značně redukovány aplikací PCM.

Hodnoty 24hodinové nasákavosti W_{24h} stanovené dle normy ČSN EN 1015-18 [33] a rovnice (11), jsou uvedeny v *Tabulce 13*.

Tabulka 13: 24hodinová nasákavost W_{24h} ($kg \cdot m^{-2}$)

Malta	W_{24h}
NHL_G50	0,26 ± 0,01
NHL_G50_PCM	0,23 ± 0,01
NHL_G50_PCM_CNT	0,24 ± 0,01
NHL_G100	0,40 ± 0,01
NHL_G100_PCM	0,38 ± 0,01
NHL_G100_PCM_CNT	0,39 ± 0,01

U malty se 100% náhrada plniva pěnovým sklem bylo pozorováno zvýšení 24hodinové nasákavosti o 53.8 % v porovnání se maltou s 50% náhradou plniva. Zvýšení nasákavosti způsobila vysoká pórovitost pěnového skla a tím i nárůst celkové otevřené pórovitosti malty NHL_G100. Naopak, přidání PCM snížilo hodnoty 24hodinové nasákavosti, což je v souladu s vlhkostními parametry malt prezentovanými v *Tabulce 12*. Příměs CNT neměla zásadní vliv na změnu koeficientu kapilární absorpce. Z kvantitativního hlediska, malty NHL_G100, NHL_G100_PCM a NHL_G100_PCM_CNT splňují požadavky normy ČSN EN 998-1 [5], kdy musí být hodnota kapilární nasákavosti sanačních omítek po 24 hodinách $W_{24h} \geq 0,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$.

3.4.6. Difúze – prostup vodní páry

V *Tabulce 14* jsou shrnuty hodnoty difúzních parametrů studovaných malt které byly měřeny a následně dopočteny dle normy ČSN EN ISO 12572 [34] metodou dry-cup.

Tabulka 14: Difúzní parametry studovaných malt

Malta	δ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$)	μ (-)
NHL_ref	$1,51 \cdot 10^{-11}$	12,40
NHL_G50	$1,54 \cdot 10^{-11}$	12,20
NHL_G50_PCM	$9,40 \cdot 10^{-12}$	19,99
NHL_G50_PCM_CNT	$1,25 \cdot 10^{-11}$	15,01
NHL_G100	$2,06 \cdot 10^{-11}$	10,57
NHL_G100_PCM	$9,21 \cdot 10^{-12}$	18,52
NHL_G100_PCM_CNT	$1,07 \cdot 10^{-11}$	15,06

Částečnou náhradou plniva pěnovým sklem došlo ke zvýšení propustnosti pro vodní páru o 2 % a snížení faktoru difúzního odporu o 1.6 %. Přidání PCM došlo k nárůstu difúzního odporu malt. U malty NHL_G50_PCM byl nárůst faktoru difúzního odporu v porovnání s referenční maltou o 61.2 % a u malty NHL_G100_PCM o 49.3 %. Použití CNT naopak zvýšilo propustnost omítek NHL_G50_PCM_CNT a NHL_G100_PCM_CNT pro vodní páru. Rozhodujícími faktory, které ovlivnily difúzní parametry malt, byla pórovitost malt a nepropustnost polymerních kapslí sloužících k zapouzdření použitého PCM.

Sanační omítky musí splňovat požadavek směrnice WTA [6], kdy koeficient propustnosti vodních par $\mu \leq 12$. Tento požadavek splňují pouze malty NHL_G50 a NHL_G100. Na základě studia odborné literatury jsou nicméně hodnoty získané pro NHL_G50_PCM_CNT a NHL_G100_PCM_CNT pro sanační omítky zcela postačující.

4 Závěr

V této práci byly studovány a experimentálně stanoveny vlastnosti lehčených malt, které byly modifikovány PCM a příměsí na bázi CNT. Byly naměřeny základní strukturální vlastnosti, mechanické, tepelné a vlhkostní vlastnosti. Z výsledků měření plyne, že:

- 1) aplikace PCM lehce snížila zpracovatelnost čerstvých malt, hodnoty rozlivu jsou však postačující pro aplikaci malt v praxi;
- 2) objemová hmotnost byla s použitím 50% náhrady plniva snížena o 20 %. U směsi se 100% náhradou byla snížena o 47 % od referenční směsi;
- 3) připravené lehčené omítky splňují požadavky směrnice WTA 2-9-04/D na pórovitost;
- 4) všechny zkoumané lehčené malty splňují požadavky mechanických vlastností pro tepelně izolační omítky dle směrnice WTA 2-9-04/D;
- 5) zvýšená pórovitost materiálu zvýšila transport vody v maltovině;
- 6) aplikace PCM naopak snížila všechny studované vlhkostní parametry maltovin;
- 7) malty NHL_G100, NHL_G100_PCM a NHL_G100_PCM_CNT splňují požadavky normy ČSN EN 998-1 na 24hodinovou nasákavost sanačních malt;
- 8) tepelné vlastnosti malt byly cíleně změněny použitím pěnového skla, PMC a CNT; lehčené malty vykazovaly sníženou tepelnou vodivost a je u nich předpoklad, že v rámci fázové změny (entalpie fázové změny) umožní moderovat změny vnitřního prostředí budov; zejména omítky s 50% náhradou písku pěnovým sklem, PCM a CNT vykazují velmi slibné hodnoty objemové tepelné kapacity;
- 9) malty se 100% náhradou plniva byly klasifikovány jako tepelně izolační omítky typu T2.

Z naměřených vlastností a porovnání chování jednotlivých záměsí vyplývá, že použití pěnového skla místo tradičního plniva je dobrou variantou pro výrobu lehčených malt. Všechny požadavky na tepelně izolační a sanační omítky splnila pouze směs NHL_G100, nicméně malty NHL_G100_PCM

a NHL_G100_PCM_CNT jsou také velmi perspektivní materiály nejen pro sanaci zdiva, ale také pro své zlepšené tepelné vlastnosti, které umožňují pasivně moderovat změny teploty v rámci fázové změny použitého PCM.

Výsledky získané v rámci řešení bakalářské práce tak představují cenné informace pro materiálový výzkum i stavební praxi a umožňují cíleně modifikovat vlastnosti maltových směsí pro specifické účely a aplikace.

5 Literatura

- [1] LANK, Jiří a Pavel HLAVÁČEK. *Rekonstrukce fasád*. 1.vydání. Brno: ERA group spol. s.r.o, 2006. ISBN 80-7366-082-5.
- [2] BLÁHA, Martin. *Omítky*. 1.vydání. Praha: Grada, 2004. ISBN 9788024761107.
- [3] Provětrávaná fasáda umožní zdi dýchat a vytvoří ideální klima uvnitř domu. In: *GTrade* [online]. [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: <https://www.gtrade.cz/provetravane-fasady>
- [4] Kontaktní zateplovací systém. In: *Zofi* [online]. [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: <https://eshop.zofi.cz/kontaktni-zateplovaci-systemy>
- [5] *ČSN EN 998-1: Specifikace malt pro zdivo: Část 1: Malta pro vnitřní a vnější omítky*. 1.vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [6] *WTA - Směrnice 2-9-04/D: Sanační omítkové systémy*. Vědeckotechnická společnost pro sanace staveb a péči o památky - WTA CZ.
- [7] *ČSN 73 1371: Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. 1.vydání. Praha: Česká technická Norma, 2011.
- [8] *Technické požadavky na výstavbu: Údržba a obnova historických fasád*. 2010, 8.
- [9] HOŠEK, Jiří a Ludvík LOSOS. *Historické omítky: Průzkumy, sanace, typologie*. 1.vydání. Grada, 2007. ISBN 9788024713953.
- [10] 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 Building*. 2014, 47.

- [11] MICHONOVÁ, Dagmar. *Příprava vápenných malt v péči o stavební památky*. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2006. ISBN 80-867-6981-X.
- [12] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Bratislava: Jaga, 2007. ISBN 978-80-8076-057-1.
- [13] SÝKORA, Ladislav a Jan MAY. *Technologie: Výroba maltovin a betonů*. 1.vydání. Praha: SNTL - NAKLADATELSTVÍ TECHNICKÉ LITERATURY, 1979.
- [14] MICHONOVÁ, Dagmar. Několik poznámek k vápnům s hydraulickými vlastnostmi z pohledu památkového technologa. *Vápenický seminář* [online]. 2016, 5 [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: <https://netusene-souvislosti.npu.cz/pamatky/netusene-souvislosti/ke-stazeni/k%20hydraulickym%20vapnum-na%20web.pdf>
- [15] ČERMÁNKOVÁ, Monika. Suroviny pro výrobu římského cementu. : *Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta* [online]. Olomouc [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/kd2iea/>
- [16] ROVNANÍKOVÁ, P. *Vápno - historie, výroba, vlastnosti*. Ostrava: Tradiční vápenné technologie, Sborník přednášek, 2009. ISBN 978-80-85034-50-9.
- [17] ČSN EN 13055: *Pórovité Kamenivo*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [18] VETCHÝ, Jan. *Lehké betony a malty* [online]. 2015, 5 [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: <https://www.mct.cz/soubor/lehke-betony-a-malty/>
- [19] PAVLÍK, Zbyšek, Jaroslav POKORNÝ, Milena PAVLÍKOVÁ, Lucie ZEMANOVÁ, Martina ZÁLESKÁ, Martina VYŠVAŘIL a Tomáš ŽIŽLAVSKÝ. Mortars with Crushed Lava Granulate for Repair of Damp Historical Buildings. *Materials*. MDPI, 2019, 20.

- [20] ČSN EN 934-1: *Přísady do betonu, malta a injektážní malty - část 1: společné požadavky*. Praha: Česká technická Norma, 2008.
- [21] SEBÖK, Tibor. *Přísady a přídavky do malt a betonů*. 1.vydání. Praha: SNTL - NAKLADATELSTVÍ TECHNICKÉ LITERATURY, 1985.
- [22] Surfactants. In: *Britannica* [online]. Encyclopaedia Britannica, Inc, 2022 [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/surfactant>
- [23] PIVÁK, Adam. *High-performance composites containing layered nanomaterials: Professional debate*. Praha, 2022, 43.
- [24] SHARMA, S.D. a Kazunobu SAGARA. Latent heat storage materials and systems: a review: a review. *Taylor&Francis*. International Journal of Green Energy, 2005, **2005**, 56.
- [25] Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials.: heat storage materials. *Solar Energy* 30. **1983**, 313-331.
- [26] KHAN, M.M.A., R. SAIDUR a F.A. AL-SULAIMAN. *A review for phase change materials (PCMs) in solars absorption refrigeration systems*. Elsevier, 2017, 33.
- [27] HOŠEK, Jiří. *Nauka o materiálech 27: Materiály a technologie pro rekonstrukce staveb*. 2.vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001.
- [28] KOTLÍK, Petr. *Stavební materiály historických objektů*. Praha: Vysoká škole chemicko-technologická v Praze, 2011.
- [29] ČSN EN 1015-3: *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)*. Praha: Česká technická Norma, 2000.
- [30] ČSN EN 1015-6: *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty*. 1.vydání. Praha: Český normalizační institut, 1999.

- [31] *ČSN EN 480-11: Přísady do betonu, malty a injektážní malty - Zkušební metody: Část 11 : Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu.* 1.vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- [32] *ČSN EN 1015-11: Zkušební metody malt pro zdivo - Část 11: Stanovení pevnosti ztvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku.* 1.vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [33] *ČSN EN 1015-18: Zkušební metody malt pro zdivo - Část 18: Stanovení koeficientu kapilární absorpce vody v zatvrdlé malte.* Praha: Česká technická Norma, 2003.
- [34] *ČSN EN ISO 12572: Tepelně vlhkotní chování stavebních materiálů a výrobku - Stanovení vlastností materiálů vodní páry - Misková metoda.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma zateplení transparentní izolací.....	13
Obrázek 2: Schéma funkce provětrávané fasády	14
Obrázek 3: Jednovrstvé a více vrstvé nano-trubice; Zdroj: https://www.cheaptubes.com/the-difference-between-single-walled-and-multi-walled-carbon-nanotubes/ ; [cit.2022-04-15]	23
Obrázek 4: Micronal DS 5038 pod mikroskopem; zdroj: https://www.researchgate.net/figure/SEM-image-of-BASF-Micronal-DS-5038-X-PCM_fig1_311089537 ; [cit. 2022-04-05].....	24
Obrázek 5: Sgrafíto; zdroj: http://historie.lusa.cz/obdobi-po-husitskych-vaalkach/renesance/detail-psanickoveho-sgrafita/ [cit.2022-05-06].....	26
Obrázek 6: Plnivo – pěnové sklo	28
Obrázek 7: Smíchaní příměsí	29
Obrázek 8: Křivka zrnitosti pěnového skla.....	31
Obrázek 9: Vzorky NHL_G100.....	32
Obrázek 10: Zkouška rozlití	33
Obrázek 11: Trámec NHL_G100.....	34
Obrázek 12: Pyknometr ATC Thermo-Scientific.....	34
Obrázek 13: Rtuťové porozimetry Pascal 140 a Pascal 440	35
Obrázek 14: Měření tepelných vlastností pomocí ISOMET 2114.....	36
Obrázek 15: Pevnost v tlaku za ohybu; zdroj: https://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=malty_cement_zk , [cit.2022-04-15].....	37
Obrázek 16: Pevnost v tlaku; zdroj: https://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=malty_cement_zk , [cit.2022-04-15]	37
Obrázek 17: DRY-CUP metoda – vzorky v klimatické komoře.....	40
Obrázek 18: Rtuťová porozimetrie – pórovitost	45
Obrázek 19: Rtuťová porozimetrie – kumulativní křivky distribuce pórů.....	45
Obrázek 20: Rtuťová porozimetrie – distribuční křivky.....	46
Obrázek 21: Průběh nasákavosti jednotlivých vzorků.....	50

Seznam tabulek

Tabulka 1: Základní typy omítek dle pojiva	18
Tabulka 2: Příklad chemického složení hydraulického vápna	19
Tabulka 3: Receptura maltových směsí v (g)	30
Tabulka 4: Frakce pěnového skla v (g)	30
Tabulka 5: Frakce křemičitého kameniva	31
Tabulka 6: Časový harmonogram míchaní	32
Tabulka 7: Rozšířené kombinované nejistoty jednotlivých parametrů	42
Tabulka 8: Rozliv	43
Tabulka 9: Základní materiálové vlastnosti	44
Tabulka 10: Mechanické parametry malt (MPa)	46
Tabulka 11: Tepelné vlastnosti omítek při 10 °C a 40 °C	48
Tabulka 12: Vlhkostní parametry studovaných malt	51
Tabulka 13: 24hodinová nasákavost W_{24h} ($kg \cdot m^{-2}$)	52
Tabulka 14: Difúzní parametry studovaných malt	53