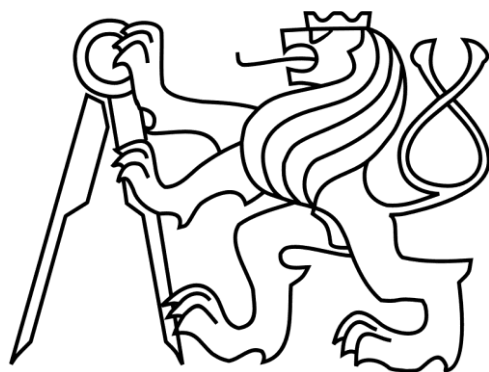


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA MATERIÁLOVÉHO
INŽENÝRSTVÍ A CHEMIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2022/23

MICHAL RAMBOUSEK

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení prof. Ing. Milenou Pavlíkovou, Ph.D. Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

.....

podpis

Rád bych poděkoval své vedoucí práce prof. Ing. Mileně Pavlíkové, Ph.D. za celkové vedení, metodické pokyny, rady a připomínky. Mé poděkování také patří Ing. Adamu Pivákovi a Ing. Martině Záleské, Ph.D. za pomoc i podporu v průběhu měření a následně psaní experimentální části práce. Dále děkuji prof. Ing. Zbyšku Pavlíkovi Ph.D. za zprostředkování odborné literatury a pomoc při vyhodnocení výsledků experimentální části práce.

Tato práce byla řešena v rámci projektů GAČR č. 21-06582S „Experimentální a počítačová analýza transportu, akumulace a krystalizace solí v nehydrofobizovaných omítkových maltách“, SGS23/153/OHK1-002/23/ „Výzkum a vývoj stavebních kompozitů vyšších užitných vlastností“ a pomocí přístrojového vybavení získaného z podpory projektů MŠMT OPVVV: „Obnova infrastruktury laboratoří Stavební Fakulty ČVUT“ CZ.02.2.67/0.0/0.0/16_016/0002526 a „Vytvoření infrastruktury pro inovované doktorské studijní programy Fyzikální a materiálové inženýrství“ (CZ/ENG) CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_017/ 0002623.

Vlastnosti a trvanlivost lehkých maltových
směsí obsahujících pemzu jako minerální
plnivo

Properties and durability of lightweight mortar
mixtures containing pumice as mineral filler

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Rambousek Jméno: Michal Osobní číslo: 494851
Zadávací katedra: K123 - Katedra materiálového inženýrství a chemie
Studijní program: B3651 - Stavební inženýrství
Studijní obor/specializace: 3608R008 - Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Vlastnosti a trvanlivost lehkých maltových směsí obsahujících pemzu jako minerální plnivo

Název bakalářské práce anglicky: Properties and durability of lightweight mortar mixtures containing pumice as mineral filler

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte maltové směsi na bázi vápenného hydrátu a hydraulického vápna, jako minerální plnivo použijte pemzu. Z navržených záměsí připravte vzorky, na vytvrzených tělesech stanovte základní materiálové, fyzikální, mechanické, tepelně-technické a trvanlivostní parametry. Záměsí porovnejte mezi sebou z pohledu trvanlivosti a odolnosti proti krystalizaci solí.

Seznam doporučené literatury:

A.E. Charola, Salts in deterioration of porous materials – an overview, Journal of the American Institute for Conservation 39, 327-343 (2000).

T. Tribulová, P. Kotlík, Preparation of mortars for restoration of architectural monuments, Ceramics – Silikáty 56, 269-279 (2012).

L.M. Silva, R.A. Ribeiro, J.A. Labrincha, V.M. Ferreira, Role of lightweight fillers on the properties of a mixed-binder mortar, Cement and Concrete Composites 32, 19–24 (2010).


M. Khandaker, A. Hossain, Properties of volcanic pumice based cement in lightweight concretes, Cement and Concrete Research 34, 283–291 (2004).


Jméno vedoucího bakalářské práce: prof. Ing. Milena Pavlíková, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 22.2.2023

Termín odevzdání BP v IS KOS: 22.5.2023

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“.

22.2.2023
Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)

Anotace:

Používání maltových směsí na bázi vápenného hydrátu a hydraulického vápna má tisíciletou tradici. Nicméně současnost klade na aplikaci tradičních materiálů nové nároky. Vzhledem k rostoucím požadavkům na úsporu energie při vytápění lze tyto směsi modifikovat lehčeným plnivem a připravit tak lehké maltové směsi, které najdou uplatnění v podobě tepelně izolačních omítek. Další možnost, jak uplatnit lehké maltové směsi, je v podobě lehčených malt pro sanační účely. Stěžejní část práce předkládá experimentální metody použité pro charakterizaci vstupních surovin i připravených maltových směsí. Ty byly zhotoveny z vápenného hydrátu a hydraulického vápna s 25, 50, 75 a 100% objemovou náhradou křemičitého písku pemzou. U vytvrzených těles byly sledovány zejména tepelné, vlhkostní a trvanlivostní charakteristiky a byla posouzena možnost jejich uplatnění v praxi.

Klíčová slova: *vzdušné vápno, přirozeně hydraulické vápno, lehčené maltové směsi, pemza, materiálové vlastnosti, odolnost, trvanlivosti.*

Abstract:

Contemporary times have placed new demands on the use of traditional materials. Due to the increasing demands for energy saving in heating, these mixes can be modified with lightweight fillers to obtain lightweight mortars that can be used as thermal insulation plasters. Another possible use of lightweight mortars is in the form of lightweight mortars for remediation purposes. The experimental part of the thesis presents the experimental methods used to characterize the input raw materials and the prepared mortar mixtures. These were made from lime hydrate and hydraulic lime with 25, 50, 75 and 100% by volume replacement of silica sand with pumice. In particular, the thermal, moisture and durability characteristics of the cured bodies were monitored and the possibility of their application in practice was assessed.

Key words: *air lime, natural hydraulic lime, lightweight mortar mixtures, material properties, resistivity, durability.*

Obsah

Seznam použitých symbolů

Seznam zkratk

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Úvod | 5 |
| 1.1 | Cíl práce | 7 |
| 2 | Teorie | 8 |
| 2.1 | Vápenná pojiva | 8 |
| 2.1.1 | Vápenný hydrát | 10 |
| 2.1.2 | Přirozeně hydraulické vápno | 14 |
| 2.2 | Plniva | 15 |
| 2.2.1 | Tradiční materiály | 15 |
| 2.2.2 | Lehká plniva | 17 |
| 2.3 | Používání a trvanlivost lehčených omítek..... | 22 |
| 3 | Experimentální část | 24 |
| 3.1 | Metody použité pro charakterizaci vstupních surovin..... | 24 |
| 3.2 | Použité vstupní suroviny | 25 |
| 3.3 | Příprava vzorků..... | 31 |
| 3.4 | Charakterizace lehčených malt..... | 33 |
| 3.4.1 | Základní materiálové parametry | 36 |
| 3.4.2 | Mechanické vlastnosti..... | 40 |
| 3.4.3 | Prostup vodní páry miskovou metodou | 42 |
| 3.4.4 | Kapilární absorpce..... | 46 |
| 3.4.5 | Tepelně technické parametry | 48 |
| 3.4.6 | Stanovení sorpčních izoterem | 53 |
| 3.5 | Trvanlivost a odolnost vůči krystalizaci solí | 53 |
| 4 | Závěr | 60 |
| 5 | Použitá literatura | 61 |

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam použitých symbolů

| | | |
|-----------------|--|-----------------------------------|
| H_M | [-] | Hydraulický modul |
| V | [m ³] | Objem |
| ρ_{mat} | [kg/m ³] | Hustota matrice |
| ρ_V | [kg/m ³] | Objemová hmotnost |
| ρ_s | [kg/m ³] | Sypná hmotnost |
| ρ_w | [kg/m ³] | Hustota vody |
| Ψ | [-; %] | Pórovitost |
| Ψ_o | [-; %] | Otevřená pórovitost |
| m_d | [g] | Hmotnost vysušeného vzorku |
| m_w | [g] | Hmotnost vodou nasyceného vzorku |
| m_a | [g] | Archimedova hmotnost |
| β_d/f_c | [N/mm ²] | Pevnost v tlaku |
| f_{cf} | [N/mm ²] | Pevnost v tahu za ohybu |
| Δm_{12} | [kg/s] | Změna hmotnosti v čase |
| RH | [-; %] | Relativní vlhkost |
| g | [kg/m ² ·s] | Hustota difúzního toku |
| G | [kg/s] | Difúzní tok |
| W_p | [kg/m ² ·s·p _a] | Propustnost vodní páry |
| Z_p | [m ² ·s·p _a /kg] | Difúzní odpor |
| δ | [kg/m·s·p _a] | Součinitel difúzní vodivosti |
| μ | [-] | Faktor difúzního odporu |
| D | [m ² /s] | Součinitel difúze vodní páry |
| R | [J/kg·mol] | Molární plynová konstanta |
| w_{sat} | [kg/m ³] | Kapilární obsah nasycené vlhkosti |
| A | [kg/m ² ·s ^{1/2}] | Absorpční koeficient vody |

| | | |
|----------------|-----------------------|--------------------------------------|
| K | [m ² /s] | Součinitel vlhkostní vodivosti |
| λ | [W/(m·K)] | Součinitel tepelné vodivosti |
| C _v | [J/m ³ ·K] | Objemová tepelná kapacita |
| C _p | [J/kg·K] | Měrná tepelná kapacita |
| a | [mm ² /s] | Měrná tepelná vodivost |
| w | [-; kg/kg] | Hmotnostní vlhkost |
| c ₀ | [mol/l] | Počáteční koncentrace |
| c ₁ | [mol/l] | Ustálená koncentrace |
| c _b | [mol/l] | Hodnota (koncentrace) vázaných iontů |

Seznam zkratk

| | |
|-------------|---|
| ETICS | Kontaktní zateplovací systém |
| STP | Stavebně-technický průzkum |
| NHL | Přirozeně hydraulické vápno |
| HL | Hydraulické vápno |
| LWA | „Lightweight aggregate“ lehké plnivo |
| ASR | „Alkali-silica reaction“ alkalicko křemičitá reakce |
| REF | Referenční vzorek pouze s písčítým plnivem |
| VWR | Vzorek s pemzou a vápenným hydrátem |
| NHLWR | Vzorek s pemzou a přírodním hydraulickým vápnem |
| DRY/WET CUP | Transport vodní páry miskovou metodou |

1 Úvod

Použití vápna jako stavebního pojiva je dohledatelné z dob středověku, dokonce i starověku. Postupně se získané znalosti a zkušenosti v těžbě, pálení i hašení vápna předávaly po generace, což vedlo k výraznému zlepšení výsledného produktu [1]. Jedná se o tradiční pojivo, kdy se za posledních pár století složení a vlastnosti znatelně neměnily, pouze se odlišovala povrchová úprava v podobě různých architektonických stylů. Různé druhy vápen nacházejí uplatnění v podobě omítek či malt, kombinují se do záměsí s různými typy pojiv, lze je modifikovat přísadami a příměsemi. S rozvojem technologie výroby cementu se od 60. let minulého století začaly prosazovat vápenocementové či cementové omítky a malty, protože měly výrazně vyšší mechanické pevnosti a trvanlivost oproti klasickým vápenným omítkám. Tato technologická změna bohužel přinesla řadu problémů v oblasti oprav starobylých budov. Proto na doporučení památkářů a materiálových technologů dochází k rehabilitaci pojiv čistě vápenných a na bázi hydraulického vápna [2], [3].

Zásadním kritériem pro nově aplikovaný materiál při sanačních pracích je jeho kompatibilita s původními materiály ve stávajícím objektu. Z tohoto důvodu památkáři preferují používat vápenná pojiva oproti pojivům cementovým, i když vápenná pojiva vykazují nižší mechanické parametry. Nicméně vápenné omítky vynikají vyšší paropropustností, tudíž umožňují rychlejší vysychání zdiva a udržení příjemného vnitřního klimatu. Doporučená pórovitost, nad 40 %, poskytuje prostor pro krystalizaci solí bez následných mechanických poruch, a také snižuje energetickou náročnost budovy, neboť uzavřený vzduch v pórech působí jako tepelný izolant [2], [4].

Vhodné tepelně-technické parametry jsou, vedle trvanlivosti, druhým nejdůležitějším požadavkem na malty i omítky. Dnes je pro zateplení budov nejvíce rozvinutá technologie zateplovacího obvodového pláště ETICS, který ale není možné použít pro rekonstrukce a sanace památek, neboť by porušil původní kulturní a architektonický záměr objektu. Požadavky na zateplení budovy tedy přebírá obvodová, nejčastěji zděná konstrukce, a právě vrstva aplikované vnější sanační či tepelně-izolační omítky [5].

Základním podkladem pro zpracování návrhu rekonstruované budovy je stavebně technický průzkum (STP), který dokumentuje současný stav konstrukcí a materiálů. Výsledkem STP je soupis všech poruch či degradací a návrh jejich sanačních opatření. Bohužel, ani kvalitně provedená sanační omítka nemá dlouhou životnost, pokud nejsou dle stavebně technického průzkumu zrealizovány potřebné nedestruktivní, nebo destruktivní, metody pro stabilizaci objektu. Sanační omítka se nejčastěji aplikuje až po provedení zmíněných sanačních metod, hlavně po snížení vlhkosti celého objektu, a je tedy nejčastěji posledním sanačním krokem restaurované budovy [6].

Požadavky na navrhování, přípravu a provádění sanačních omítek jsou uvedeny v ČSN EN 998-1 [7] a ČSN EN 1745 [8]. Podrobnější informace jsou dále uvedeny ve směrnici WTA 2-9-04 [9].

Požadavky na sanační omítky:

- 1) Vysoká porozita $\psi > 40$ [%].
- 2) Faktor difúzního odporu vodní páry $\mu < 12$ [-].
- 3) Hloubka penetrace vody ≤ 5 [mm].
- 4) Součinitel tepelné vodivosti $\lambda \leq 0,45$ [W/(m·K)].
- 5) Pevnost v tlaku (K. CS II), $1,5 \leq \beta_d \leq 5$ [N/mm²].

Experimentální část práce je zaměřena na výzkum nového typu sanační tepelně-izolační vápenné maltové směsi obsahující pemzu jako minerální lehčené plnivo. Právě lehčené plnivo díky své vysoké pórovitosti zajišťuje nízký difúzní odpor vodní páry a také snižuje součinitel tepelné vodivosti, následně tak i celkový součinitel prostupu tepla.

V odborných publikacích jsou prezentovány lehčené malty i omítky, které jako lehčené plnivo obsahují např. recyklované plasty, lávu, zeolit, keramzit nebo expandovaný perlit. Oproti zmíněným materiálům pemza zatím nemá stabilní uplatnění jako lehčené plnivo, neboť ještě nejsou známy všechny její vlastnosti, hlavně trvanlivost v dlouhodobém měřítku [10], [11], [12], [13].

Tato bakalářská práce je zaměřena na stanovení základních materiálových charakteristik nového typu vápenných maltových směsí obsahujících pemzu jako minerální plnivo a na experimentální ověření vhodnosti jejich použití v praxi.

1.1 Cíl práce

Cílem bakalářské práce bylo připravit vzorky lehčené maltové směsi na bázi čistého vápna (vápenného hydrátu) a přírodního hydraulického vápna. Použitým plnivem byla přírodní pemza, která postupně nahrazovala křemičitý písek. Objem náhrady kameniva činil 0, 25, 50, 75 a 100 %. Na připravených vzorcích byly měřeny základní, mechanické, tepelné i vlhkostní materiálové vlastnosti. Vyhodnocení výsledných hodnot měření může sloužit k porovnání s normovými hodnotami malt a omítek a jejich možnou aplikací v praxi.

Jednotlivé materiálové vlastnosti byly stanoveny pomocí přístrojů a měřících zařízení v laboratořích Materiálového inženýrství a chemie, Fsv ČVUT v Praze.

2 Teorie

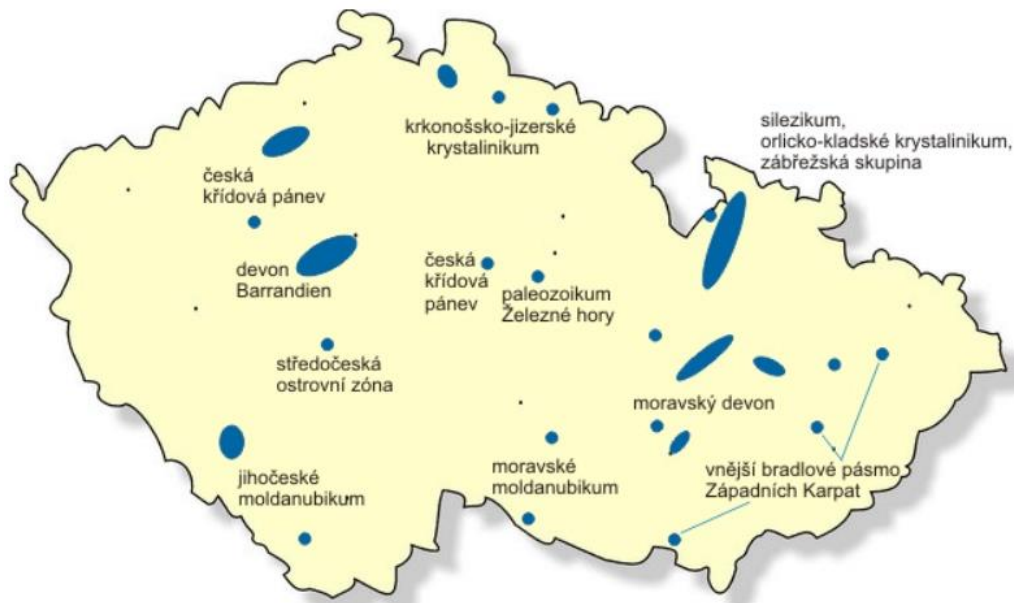
2.1 Vápenná pojiva

Vápno se na území dnešní České republiky začalo používat ve formě omítek koncem 9. století. Vápenné povrchové úpravy jsou doloženy z církevních staveb a reprezentativních či obytných budov vyšší společenské třídy. Nejstaršími dochovanými církevními stavbami na našem území jsou velkomoravské kostely, konkrétně kostel v Modré u Velehradu obsahoval známky použití tenkovrstvé vnitřní omítky pocházející z přelomu 9-10. století nazývané „líčka“ [1]. Nejstarší doklad o výrobě vápna pochází z Břevnovského kláštera v Praze kolem roku 1000 n.l. [14].

Důkazem středověké techniky přípravy vápna je nález jámy ve Starém Městě u Uherského Hradiště. Zemní jáma vyhloubená na přelomu 13-14. století prokazuje vývojové tendence v technice pálení vápna použitím jámy jako šachtové pece. Později byla technologie šachtové pece zdokonalena, avšak současný typ kruhových a rotačních pecí na pálení vápna byl vynalezen až v 19. století [1].

Rozmach vápenictví nastal za vlády Karla IV., v průběhu 14. století, zejména díky výstavbě Nového Města pražského [15]. Doloženy jsou vápenky v Podolí, Bráníku, Zlíchově a Radlicích. Právě vápno vyráběné z podolských a branických vápenců, dnes označované jako přírodní hydraulické, proslavilo Čechy i v zahraničí. Původně se označovalo jako Staroměstské vápno a bylo exportováno na stavby do Italských Benátek, Amsterdamu nebo i Londýna pod názvem „Pasta di Praga“ [14].

Naše území je bohaté na zdroje vápenců a dolomitů, vápenictví se tedy rozvíjelo po celém území Čech, Moravy i Slezska. Mnoho významných vápenek se nacházelo v Pošumaví, Železných horách a Podkrkonoší. Nelze opomenout Moravské vápenky v Jeseníkách, Štramberku, Tlumačově, v oblasti Moravského krasu, Brně a v Mikulově [14]. Dnešní podstatné zdroje vápenců na území České republiky jsou prezentovány na Obr. 1.



Obr. 1 Zdroje vápence a dalších cementářských surovin na území ČR [16]

Výroba kvalitního hydraulického vápna se datuje až na konec 18. století a je spojena s rozvojem analytických chemických metod umožňujících prvkový rozbor vápenců, který provedl Louis Joseph Vicat [15]. V Čechách bylo páleno významné hydraulické vápno rodinným podnikem Hergetů ze Zlíchova známé pod názvem „Kurovina“, neboť surovina pocházela z lomu u Kurovic [14]. V druhé polovině 19. století se k nám z Tyrolska dováželo vápno Kufsteinské ze slínkových vápenců, jehož použití je známé např. z omítek v Národním divadle v Praze [1].

S rozvojem průmyslové výroby v první polovině 19. století bylo používání vápna opět na vzestupu, dokud jeho aplikace neomezil vzestup cementových pojiv. Vzhledem k vysoké ceně a rapidní rychlosti tuhnutí cementových směsí (před používáním sádrovce jako zpomalovače) se ale nadále upřednostňovaly tradiční vápenné technologie pro omítání [14].

Kromě stavebního odvětví se vápno hojně využívá v hutnictví, chemickém průmyslu nebo zemědělství [14].

Základními surovinami pro výrobu vápna jsou vápence a dolomity. Hlavní složkou v těchto horninách je kalcit-uhličitan vápenatý (CaCO_3). Výskyt čistých vápenců v přírodě není běžný. Nejčastěji se kalcit

v horninách vyskytuje s různými příměsemi, jako jsou např. jíly, nerosty nebo organické hmoty [17].

2.1.1 Vápenný hydrát

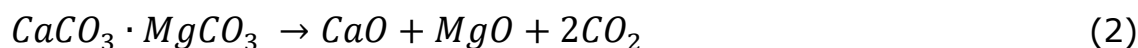
Pro výrobu vzdušného vápna se v ČR těží čisté vápence, které obsahují 95-100 % CaCO_3 . Základní rozdělení vápenců a dolomitů podle obsahu minerálů a chemického složení je zobrazeno v Tab. 1 dle ČSN 72 1210 [18]. Z těchto surovin vznikne po výpalu vzdušné vápno, které tuhne a je stálé pouze na vzduchu.

Tab. 1 Rozdělení vápenných surovin [19]

| Název | Obsah minerálu [%] | | Chemické složení [%] | |
|---------------------|--------------------|---------|----------------------|-----------------|
| | kalцит | dolomit | CaCO_3 | MgCO_3 |
| Vápenec | 100-90 | 0-10 | 100-95,4 | 0-4,6 |
| Dolomitický vápenec | 90-50 | 10-50 | 95,4-77,1 | 4,6-22,9 |
| Vápnitý dolomit | 50-10 | 50-90 | 77,1-58,8 | 22,9-41,2 |
| Dolomit | 10-0 | 90-100 | 58,8-54,3 | 41,2 -5,7 |

Celková produkce těžby vápence a dalších cementářských surovin činila v roce 2021 11,01 mil. tun. Jednalo se tak o 1,7 % pokles oproti předešlému roku 2020. Celková produkce vápna u nás od roku 1996 klesá vzhledem k celostátnímu šetření přírodních zdrojů. Nejdůležitějším zdrojem vápenců v ČR je oblast Devon Barrandien nacházející se ve Středních Čechách. V této oblasti se těží vápence s průměrným obsahem CaCO_3 cca 98 %, které se označují jako čisté až vysokoprocenní. Další podstatné zdroje vápenců a jiných cementářských surovin lze vyčíst z Obr. 2 [16]. Od roku 2017 je v ČR evidovaný ustálený počet 85 ložisek, z kterých je v provozu pouze 22, neboť některá ložiska zasahují do Chráněných krajinných oblastí [20].

Vápno se vyrábí kalcinací vápence v šachtové nebo rotační peci, na kvalitu vyrobeného pojiva má vliv zejména teplot výpalu a následné hašení. V závislosti na dosažené teplotě výpalu lze ze stejné suroviny získat různé mineralogické složení, a tudíž i odlišné vlastnosti vápenných pojiv. Při výpalu za nižších teplot se dosáhne vyšší reaktivnosti nehašeného vápna, proto se za standardních podmínek výpal provádí při teplotách 1 000-1 100 °C [21]. Rozklad vápence, popř. dolomitického vápence, lze popsat následujícími chemickými rovnicemi:



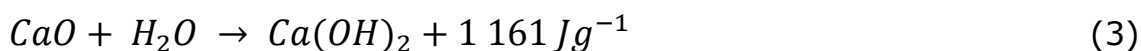
Dle teploty výpalu rozdělujeme vápna na měkce a tvrdě pálená. Měkce pálené vápno respektuje historický výpal ve vápenných pecích s teplotami do 1 050 °C. Výsledným produktem je tak vápno charakteristické vysokou porozitou, nízkou objemovou hmotností a velkým měrným povrchem, který zajišťuje reaktivnost pojiva. Tvrdě pálené vápno vzniká za teplot vyšších než 1 050 °C. Obecně lze konstatovat, že vápno pálené za vyšších teplot dosahuje menší reaktivnosti. Horní hranice možné teploty výpalu je 1 250 °C. Při překročení této teploty může dojít ke vzniku „přepalu“ a vzniku slabě hydraulického pojiva. Pokud je reaktivita vápna významně snížena, může navíc docházet k hydrataci až dodatečně v již zatvrdlém pojivu.

Rozdělení vypáleného čistého vzdušného vápna, sestávajícího převážně z oxidu vápenatého bez jakékoliv hydraulické nebo pucolánové příměsi, je zobrazeno v Tab. 2, dle ČSN EN 459-1 [22].

Tab. 2 Druhy bílých vápen

| Označení | Značení | Chemické složení [%] | |
|---------------|---------|----------------------|---------|
| | | CaO + MgO | MgO |
| Bílé vápno 90 | CL 90 | ≥ 90 | ≤ 5 (7) |
| Bílé vápno 80 | CL 80 | ≥ 80 | ≤ 5 (7) |
| Bílé vápno 70 | CL 70 | ≥ 70 | ≤ 5 (7) |

Vypálené vápno se následně nechá reagovat s vodou, tzv. hašení vápna, za vzniku hydroxidu vápenatého dle rovnice:



Je nutné zajistit, aby hydratace páleného vápna neprobíhala v již zatvrdlé omítce či maltě, jelikož produkt této reakce má větší objem. Docházelo by k jevu označovanému jako „vystřelování“ omítky.

Hašené vápno se z páleného vápna vyrábí dvěma způsoby označovanými podle množství použité vody jako suché či mokré hašení. Proces suchého hašení, probíhající za přidání minimálního množství vody (60-70 l/100kg vápna), se používá pro hašení tvrdě páleného vápna. Výsledným produktem je suchý vápenný hydrát [21]. Druhým způsobem je mokré hašení, při kterém se vápno smíchá s nadbytkem vody za maximální hydratační teploty do 100 °C. V případě použití mokrého hašení pro tvrdě pálené vápno by mohlo dojít k tzv. „utopení“, které se později projevuje expanzí nehydratovaného CaO a následným odlupováním omítkové vrstvy. Výsledným produktem mokrého hašení je suspenze hydroxidu vápenatého ve vodě, jinak nazývaná jako vápenná kaše. Tento druhý způsob se využívá zejména pro měkce pálené vápno, které má po odležení výborné reologické vlastnosti [15].

Suchý vápenný hydrát by měl být skladován za kladných teplot po dobu maximálně 6 měsíců, aby nedocházelo ke karbonataci, reakci s CO₂. Naopak, doba skladování vápenné kaše z čistého nehydraulického vápna není omezená a lze konstatovat, že čím je delší, tím má pojivo lepší vlastnosti (např. v zatvrdlém stavu dosahuje vyšších pevností). Podmínkou tohoto tvrzení je vhodné skladování za teplot nad bodem mrazu a ochrana před ztrátou vlhkosti. Zlepšování vlastností delším odležením je možné jen pro vzdušná vápna. V případě hydraulických vápen by časem došlo ke zhoršení kvality a tvrdnutí vápenné směsi [18], [15].

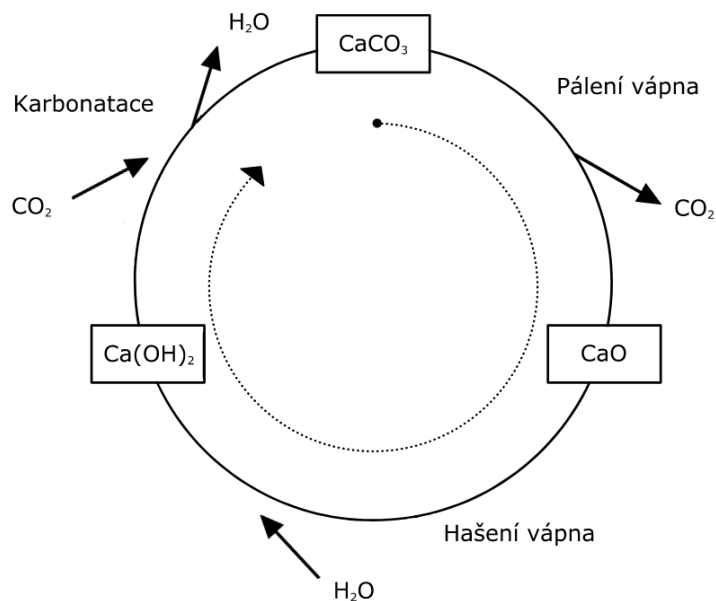
Konečnou fází vápenného cyklu je tzv. karbonatace a zpevnění pojiva. Hydroxid vápenatý přirozeně reaguje s oxidem uhličitým obsaženým ve vzduchu a přebytečná záměsová voda se zároveň vsakuje do podkladu i odpařuje. Dochází ke vzniku uhličitanu vápenatého a zatvrdnutí záměsi, což lze popsat rovnicí [21]:



Vzdušné vápno se tradičně aplikuje ve formě omítek, které mají výbornou propustnost pro vodní páru. Modifikované omítky mohou mít zvýšenou odolnost vůči krystalizaci solí, sníženou propustnost vody či zlepšené tepelně-technické parametry.

Nevýhodou vzdušných vápenných omítek jsou nízké mechanické pevnosti, které jsou jedním z důvodů, proč se začaly používat omítky vápenocementové, či jen cementové.

Celý chemický cyklus od těžby suroviny až po výsledný produkt karbonatace lze shrnout schématem na Obr. 2.



Obr. 2 Schéma cyklu uhličitanu vápenatého

2.1.2 Přirozeně hydraulické vápno

Přirozeně hydraulické vápno, značené NHL (natural hydraulic lime), vzniká pálením vhodných nerostných surovin. Nejčastěji se používají jílové a křemičité vápence. Tyto suroviny obsahují hydraulické oxidy, konkrétně SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 , zajišťující hydraulicitu výsledné vápenné směsi [23]. Na rozdíl od NHL, u hydraulického vápna značeného HL se dostatečného množství hydraulických oxidů dosahuje přidáním vhodných příměsí [22].

Vypalováním jílovitých, či křemičitých vápenců, vznikají za vyšších teplot (do 1250 °C) slínekové minerály, které udělují vápnu hydraulické vlastnosti [22]. Jelikož teplota výpalu nedosahuje teploty slinutí, nevzniká trikalciumpsilikát (cca 1 350 °C), který je hlavním nositelem pevnosti v cementovém slínku. NHL tedy obsahuje belit ($\beta\text{-C}_2\text{S}$), kalcium aluminát (CA) a dikalcium ferit (C_2F).

Vzhledem k tradičnímu využívání lokálních surovin je přirozeně hydraulické vápno často aplikovaným omítkovým pojivem. Bohužel, u nízko hydraulických omítek dochází časem k maskování hydraulických složek, konkrétně C_2S a CA, a proto je přesná identifikace historických hydraulických malt i omítek komplikovaná. S ohledem na lokální materiálovou těžbu bylo chemické složení NHL v různých lokalitách odlišné, a v případě mísení se mnohdy v pojivu vyskytovaly poruchy i degradace. Typickým příkladem jsou trhliny ve vápenných omítkách vzniklé rozdílnou dobou tuhnutí, nebo pevností pojiva.

Tuzemské přírodní hydraulické vápno se v současnosti na našem území vyrábí v omezeném množství, ale rozšířený je prodej dovezeného vápna z Německa či Francie.

Vezmeme-li v potaz nevýhody čistého vápenného pojiva v podobě nízkých pevností a nevýhody cementových pojiv spojené s vysokým difúzním odporem, může být aplikace přírodního hydraulického vápna vhodnou alternativou. Použití NHL spojuje výhodné vlastnosti čistého vápna a cementu a uspokojuje tak i požadavky památkářů, kteří nejčastěji bývají proti použití cementu na renovaci historických budov [24].

Rozdělení přirozeně hydraulických vápen dle značení a pevností je stanoveno v ČSN EN 459-1, viz Tab. 3 [22].

Tab. 3 Druhy přirozeně hydraulických vápen

| Označení | Značení | Pevnost v tlaku po 28 dnech [Mpa] |
|---------------------------------|---------|-----------------------------------|
| Přirozeně hydraulické vápno 2 | NHL 2 | $\geq 2 \leq 7$ |
| Přirozeně hydraulické vápno 3,5 | NHL 3,5 | $\geq 3,5 \leq 10$ |
| Přirozeně hydraulické vápno 5 | NHL 5 | $\geq 5 \leq 15$ |

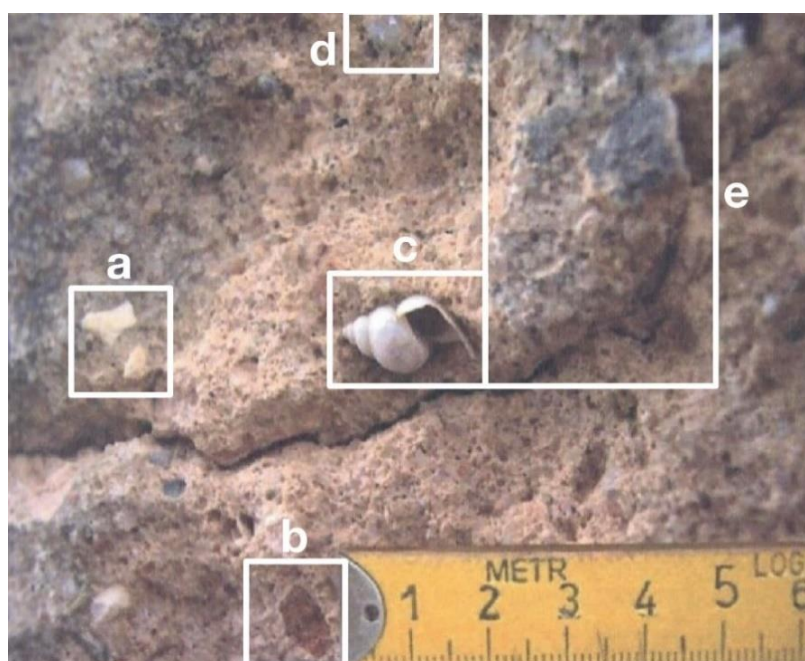
2.2 Plniva

Ačkoliv se plniva považují za neaktivní složku maltových směsí, jejich výběr je pro výslednou maltu stejně podstatný, jako volba vhodného druhu pojiva. Plnivo se spolu s pojivem podílí na pevnosti, tvrdosti a struktuře omítek, a ovlivňuje tak požadované stavebně-fyzikální vlastnosti [2].

2.2.1 Tradiční materiály

Jako plniva do malt se v dřívějších dobách nejčastěji používalo kamenivo nacházející se v blízkosti stavby, aniž by se podrobně zkoumaly jeho vlastnosti. Využívání lokálních surovinových zdrojů bylo ekonomicky výhodné, ale mělo za následek různorodost malt, co se týče struktury, složení i barevnosti. Na našem území se tradičně nejvíce používalo snadno dostupné, běžně se vyskytující, křemenné kamenivo neboli písek, či štěrkopísek. Historická plniva také obsahovala různé příměsi, jakými byly např. živce, slídy, či jíly [1]. Zejména hlinité frakce byly žádanou příměsí, neboť zlepšují fyzikálně-chemické vlastnosti po zatvrdnutí vápenných malt [18].

Použité plnivo, jeho struktura a vlastnosti, značně ovlivňuje výslednou životnost a odolnost omítek i malt. Významnou měrou se zde odráží také velikost, tvar a zastoupení zrn. Historické maltové směsi byly v tomto ohledu velmi dobře navrženy. Nalezneme v nich drobné příměsi (drcená cihla, popel, struska), frakce písku 0-4 mm i štěrkopísky s frakcemi nad 8 mm. Poměrně časté zastoupení mají také větší úlomky kameniva [18].



Obr. 3 Struktura historické malty. a) vápenec, b) cihla, c) ulita, d) sklářský stříp, e) úlomek horniny

Na Obr. 3 je možné pozorovat uplatnění výše zmíněných příměsí v maltové směsi včetně ulity, neboť schránky mořských živočichů se často v přímořských oblastech do malt cíleně přidávaly. Dále je patrné jednotlivé zastoupení kameniva od písku a šterkopísku až k větším částem hornin. Do malt se také jako plnivo přidávaly keramické materiály, např. úlomky cihel, nebo cihelná drť.

Dnes se omítky navrhují se zřetelem na jejich účelné použití a vhodnou aplikaci a tomuto trendu se přizpůsobuje také patřičně zvolený typ plniva, jeho zrnitost a zastoupení jednotlivých frakcí. Například bylo zjištěno, že pro zvýšení odolnosti, tedy snížení otevřené pórovitosti, je důležité, aby písky obsahovaly alespoň 15% podíl zrn frakce do 0,25 mm. Obsah nejmenší frakce, tedy odplavitelných částic, je také limitovaný na maximálně 5% podíl v maltové směsi. Pro jádrové omítky se pak nejčastěji využívají zrnitostní frakce 0-4 mm. Pro vrchní omítkovou vrstvu je požadována frakce jemnější, a proto se na štukové omítky používá max. rozměr zrna 1 mm [2]. Na rozdíl od malt pro zdění je nejvhodnějším tvarem plniva pro omítky kamenivo s nepravidelnými ostrohrannými zrny. Tuto podmínku splňují různé

druhy lehčených kameniv, ale hlavně přírodní pemza, která je aplikovaným pojivem v experimentální části práce [18].

2.2.2 Lehká plniva

Hlavní složkou zajišťující celkové vylehčení maltové směsi je kamenivo, které má objemovou hmotnost do 2 000 kg/m³, anebo sypnou hmotnost do 1 200 kg/m³. Tato definice pórovitého kameniva značeného LWA („lightweight aggregate“) je stanovena v ČSN EN 13055.

Dle výše zmíněné normy lze LWA rozdělit do čtyř kategorií podle zdroje:

Kat. I – Přírodní pórovité kamenivo (např. pemza, tuf) [25].

Kat. II – Umělé pórovité kamenivo vyrobené z přírodních materiálů (např. expandovaný jííl, expandovaný perlit) [25].

Kat. III – Umělé pórovité kamenivo recyklované či z vedlejších produktů průmyslových procesů (např. expandovaná vysokopecní struska, expandované sklo) [25].

Kat. IV – Pórovité kamenivo jako vedlejší produkt průmyslových procesů (např. škvára, popílek) [25].

Použitím lehkého (pórovitého) kameniva lze docílit zlepšení tepelně-technických parametrů, tedy vyrobit tzv. tepelně izolační malty či omítky. Vyšší pórovitost plniva je také vhodná v případě, že se jedná o zasolený objekt, neboť umožňuje krystalizační rozpínání solí bez následného porušení struktury.

Aplikace lehkého kameniva však s sebou nese řadu nevýhod. První a hlavní z nich je snížená mechanická pevnost, která může být problémem hlavně pro malty na zdění. Zadruhé je třeba sledovat nasákavost kameniva a množství záměsové vody v maltové směsi. Nadbytečné množství záměsové vody ve směsi způsobuje nižší pevnosti a větší smrštění. Proto se nejčastěji používá minimální množství vody, které zajistí hydrataci a zároveň je dostačující pro zpracování. Často se tím opomíjí potřeba nadbytku vody pro zaplnění

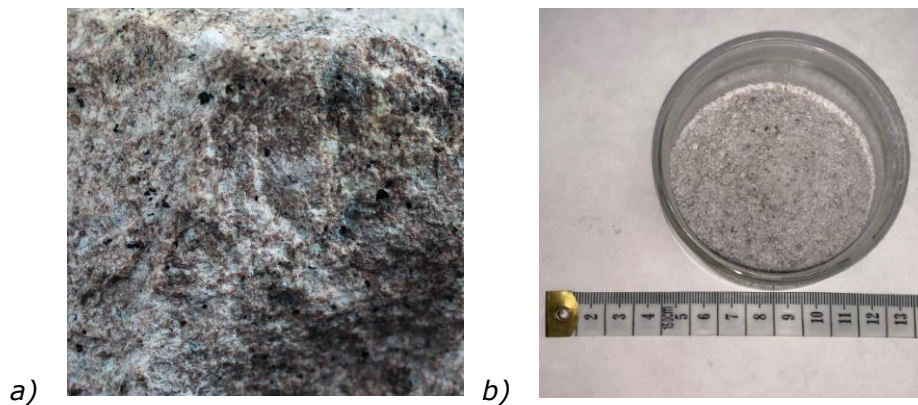
pórů v případě použití lehčeného kameniva a tím dochází k nedostatečné hydrataci maltoviny. Přírodní pórovitá kameniva jako např. pemza vykazují navíc kolísání objemové hmotnosti a nestejnorodosti vlastností vzniklé způsobem těžby a především drcením hornin [2], [15].

„Lehká malta je malta, jejíž objemová hmotnost po zatvrdnutí ve vysušeném stavu je menší než 1500 kg/m³. Lehké malty se mají zhotovovat s kamenivem z perlitu, pemzy, expandovaného jílu, expandované břidlice nebo zpěněného skla. Jiné materiály lze použít pouze tehdy, pokud se prokáže jejich vhodnost“ [26].

Perlit

Perlit, nazývaný také „ryolitové sklo“, je původem vulkanická hornina. Tekuté magma vyvřelé na povrch bylo ochlazeno tak rychle, že jeho struktura nestihla zkrystalizovat. Vzhledem k rychlému tuhnutí také nestačila z horniny uniknout vnitřně vázaná voda, cca 2-5 % [11]. Právě díky internímu obsahu vody ve struktuře je možná výroba tzv. expandovaného perlitu. Při ohřívání vytvářející se vodní pára způsobí puchnutí a následné rozpínání materiálu. Výsledný expandovaný perlit má 5 - 10x větší objem [23].

Ve stavebnictví se expandovaný perlit považuje za umělé pórovité kamenivo vyráběné z přírodního perlitu. Skelná textura připomíná drobné vzájemně propojené perličky vzniklé vnitřním pnutím při prudkém chladnutí. Objemová hmotnost perlitu je 1600-2000 kg/m³. Oproti tomu expandovaný perlit má objemovou hmotnost 80-150 kg/m³ [11]. Vzhledem ke své nízké sytné i objemové hmotnosti se používá na tepelně-izolační omítky, nebo na dutinovou výplň keramických cihel [4]. Dalšími výhodnými vlastnostmi jsou nehořlavost, odolnost proti mrazu či zdravotní nezávadnost. Expandovaný perlit je tak díky svým vlastnostem jedním z nejpoužívanějších lehčených kameniv ve stavebnictví [11].



Obr. 4. a) přírodní a b) expandovaný perlit

Tufy a Tufity

Tufy jsou horniny vulkanického původu, přesněji značené jako pyroklastické, patřící do skupiny vyvřelých hornin. Postupnou sedimentací na suchu horniny tvrdnou a konsolidují za vzniku tufů, jejichž tmel je tvořen sopečným popelem. Tufity se od tufů liší svým vznikem i následnou materiálovou strukturou. Nejčastěji vznikají sedimentací do vodního prostředí, kde se mísí původní pyroklastický materiál s klastickými sedimenty za dodatečného zpevnění výsledných tufitů.

Vzhledem ke špatné jakosti a různorodosti tufů na našem území nemáme nyní žádné aktivně těžené ložisko. Na nerostné suroviny jako jsou tufy je bohaté Slovensko, převážně ve střední části v oblasti Západních Karpat [11].

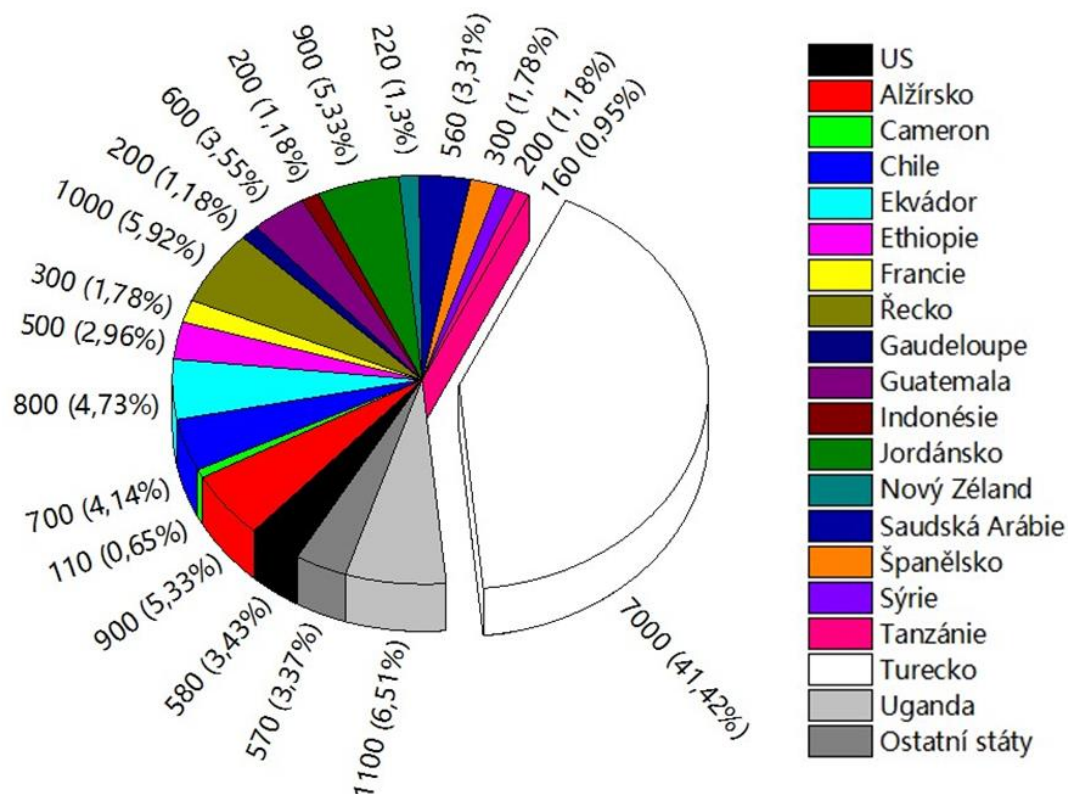
Objemová hmotnost tufů se pohybuje v širokém rozmezí 1000-1600 kg/m³. Při objemové hmotnosti suchého křemičitého písku cca 1700 kg/m³ [27] se tedy při použití tufů jako náhrady plniva jedná o menší vylehčení v porovnání s expandovaným perlitem ($\rho_v = 80-150$ kg/m³). Kromě ne zcela efektivního využití jako pórovitého kameniva lze tufy uplatnit jako běžný stavební štěrk nebo písek. Tufy jako stavební materiál se tak běžně využívají v okolí jejich surovinového zdroje např. v horských oblastech [11].

Pemza

Pemza je zvláštním druhem pyroklastických hornin bílé až šedohnědé barvy, popisovaná jako křemičitá či magmatická skelná pěna [28]. Struktura pemzy, často označovaná jako „puchýřovitá“, naznačuje, že se jedná o vysoce pórovitý materiál. Pórovitost je důsledkem uvolňování plynů z vyvřelého magmatu, její hodnota činí 73-85 %. Matrice tedy může mít až jen 15% zastoupení [11].

Vzniká podobně jako tufy i lehké lávy, ale mineralogické složení je částečně odlišné. Oproti lehkým lávám se pemza skládá z menšího podílu křemene, více zastoupený je periklas (MgO) i alkálie (K₂O, Na₂O). Od tufů se zásadně odlišuje schopností vysychat bez vzniku objemových změn. Vzhledem k tomu, že se jedná o materiál se silnou hygroskopicitou (pohlcováním vlhkosti), je objemová stálost velmi důležitou vlastností. [11]

V přírodě se pemza vyskytuje jako volná zrna štěrkopískového charakteru o velikosti zrn od milimetrů po několik centimetrů [11]. Pemza nachází své uplatnění jako lehčené kamenivo především díky hojnému světovému výskytu a šetrnosti těžby vůči přírodnímu prostředí [29]. V ČR se nachází pouze surovinné ložisko netěžitelného charakteru v Českém Středohoří [11], ve světě se pemza nejvíce těží v Turecku a Ugandě. Producenti pemzy v celosvětovém měřítku, vycházející z výsledků Amerického geologického průzkumu minerálních komodit za rok 2021, jsou prezentováni na Obr. 5 [30].



Obr. 5 Zobrazení světové těžební produkce pemzy

Z historického pohledu je pemza velmi známým materiálem. Nejstarší doklady o použití pemzy jako plniva lze najít v konstrukcích z dob Římského impéria, tedy kolem počátku prvního tisíciletí. Právě výhodné vlastnosti pemzy, zejména její nízkou objemovou hmotnost, využili Římané při stavbě klenby Pantheonu [31]. V současné době je pemza rehabilitována, vyzdvihují se např. její mechanické vlastnosti, chemické chování a odolnost vůči agresivnímu prostředí. S výhodou může být aplikována jako lehčené plnivo do malt a omítek [10].

Jako přírodní minerální plnivo vykazuje také vysokou požární a chemickou odolnost, minimální expanzní chování při zmrazovacích cyklech a díky vysoké pórovitosti i značné tepelně izolační chování.

Na výzkum materiálových vlastností pemzy bylo napsáno mnoho odborných vědeckých článků. Tapan například ve své práci studoval efekt pemzového plniva v omítkách vystavených zrychlené ASR („alkali-silica reaction“). Při 30% náhradě křemičitého plniva pemzou poklesla reaktivnost o 65,71 % po 3 dnech [32].

Değirmenci a Yilmaz [33] prozkoumali vliv pemzy jako plniva na mechanické vlastnosti omítek vystavených vysokým teplotám. 100% náhrada pemzy za křemičitý písek měla za následek až 5x vyšší zbytkovou únosnost v tlaku na vzorcích vystavených žáru 900 °C v porovnání s referencí obsahující pouze křemičitý písek. Dále zkoumali vliv pemzy na mrazuvzdornost omítek. Zjistili, že po 25 cyklech zmrazování na -20 °C po dobu 4 h a rozmrazování ve vodě po dobu 4 h, došlo jen k 6% poklesu pevnosti pro vzorek s křemičtým pískem, ale dokonce k 11% nárůstu pevnosti v případě omítek s pemzou. Při vystavení cyklům s větší teplotní odchylkou dojde ke ztrátě pevnosti i pro pemzu, ale v menší míře při porovnání s křemičtým pískem.

Kabay s kolegy studovali smršťovací chování betonu s 50 a 100% náhradou plniva za pemzu. Z výsledků vyplývá, že vysoušecí smršťování je větší s vyšší náhradou plniva [34].

2.3 Používání a trvanlivost lehčených omítek

Lehčené omítky jsou nejčastěji aplikovány na rekonstruované a restaurované objekty, které vzhledem ke své vysoké vlhkosti zdiva zároveň obsahují i rozpuštěné soli. Používání lehčených omítek pro sanační účely je proto podmíněno materiálovými kritérii, zejména aby byla zajištěna požadovaná trvanlivost a odolnost aplikovaných omítek a malt.

Vysoká pórovitost, a s ní související vysoká difúzní propustnost, jsou v případě lehčených omítek výhodnými vlastnostmi, neboť zajišťují „dýchání“ konstrukce a odvádění vlhkosti do exteriéru. Vysoká pórovitost dále umožňuje krystalizaci solí ve struktuře omítek, např. chloridů, dusičnanů a síranů, aniž by došlo k poškození a porušení materiálu. Trvanlivost sanačních omítek je tak deklarovaná po dobu 15-20 let, zatímco v případě použití cementových omítek dojde k povrchovému porušení nejčastěji již v průběhu prvního roku [35]. Soli nejsou jedinými degradačními činiteli omítek. Při vysokém obsahu vlhkosti a koncentrace solí vzniká ideální prostředí pro růst a rozmnožování bakterií, mikromycet, aktinomycet a řas. V zóně vlhkého zdiva se tak vyskytuje minimálně 10^7 - 10^8 buněk bakterií a kvasinek na 1g omítky [6].

Čistě vápenné lehčené omítky bohužel nelze uplatnit na sanační práce, protože zpravidla dosahují nízkých pevností. Směrnice WTA 2-9-04 [9] udává minimální pevnost v tlaku po 28 dnech 1,5 MPa. Vzhledem k tomu, že cementové omítky nespĺňují požadavky na vysokou porozitu a difúzní propustnost, použití přirozeně hydraulického vápna do lehčených omítek může být vhodnou alternativou [18]. S pevnostmi omítek přímo souvisí odolnost proti mrazu, cyklickému klimatickému zatížení i působení solí [35].

Lehčené malty se, kromě rekonstrukčních prací, uplatňují také na tepelně izolační omítky, neboť uzavřený vzduch je tepelným izolantem se součinitelem tepelné vodivosti 0,026 W/(m·K) při teplotě 20 °C [36]. Lehčené omítky, vzhledem ke své tloušťce, snižují součinitel prostupu tepla jen nepatrně, ale vytváří souvislý plášť omezující tepelné mosty a zvyšující protipožární odolnost budovy [35].

Z již publikovaných prací lze zmínit Pavlíka s kolektivem, kteří zkoumali materiálové vlastnosti omítek se vzdušným vápnem a vylehčujícím plnivem v podobě expandovaného skla nebo drcené lávy [37], [12]. Dále například Vyškvařil s kolektivem posuzovali vápenné omítky s perlitem a jejich aplikaci pro rekonstrukční účely. Výsledkem použití drcené lávy i expandovaného perlitu jako maltového plniva bylo snížení objemové hmotnosti, zvýšení pórovitosti a snížení difúzního odporu. Obě práce kladně posoudily možnou aplikaci malt na sanační či tepelně izolační omítky [13].

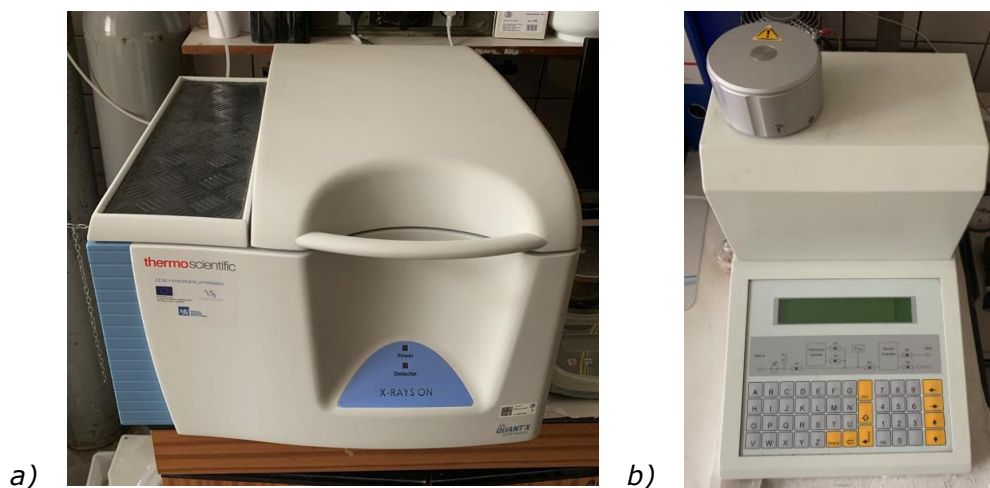
3 Experimentální část

Nejprve byly analyzovány všechny vstupní suroviny pro přípravu lehčených maltových směsí, následně byly připraveny záměsi s 25, 50, 75 a 100 % objemovou náhradou písku pemzou a referenční směs obsahující pouze písek. Zatvrdlé maltové směsi byly charakterizovány pomocí základních fyzikálních a materiálových parametrů. Pro posouzení trvanlivosti a odolnosti byly stanoveny vazebné izotermy chloridů a síranů.

3.1 Metody použité pro charakterizaci vstupních surovin

U všech vstupních surovin bylo nejprve naměřeno prvkové složení pomocí Spektrometru Thermo Scientific™ ARL™ QUANT 'X EDXRF, Obr. 6 a).

Dále byla stanovena hustota matrice pomocí héliového pyknometru ATC Thermo Fisher Scientific s integrovaným řízením teploty s přesností $\pm 0,01$ °C, Obr. 6 b).

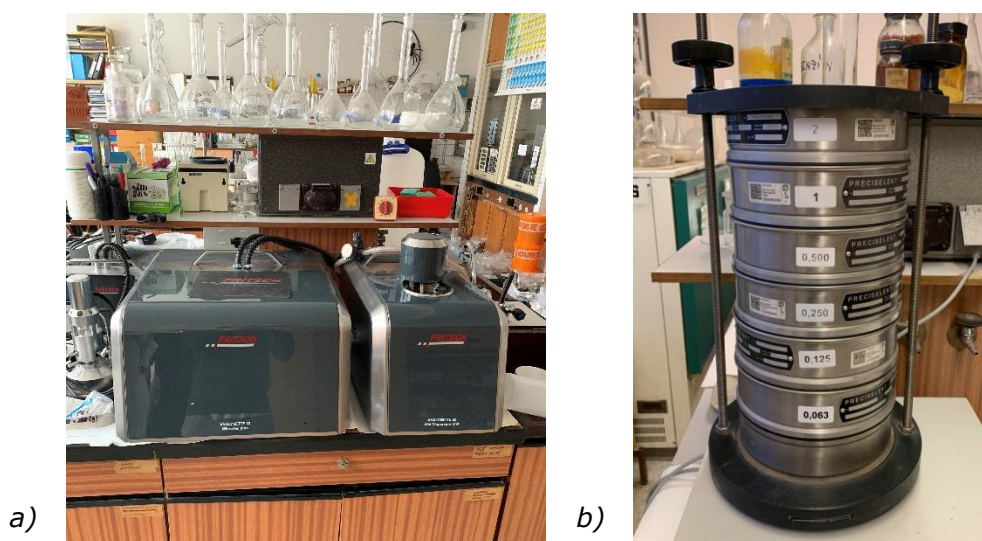


Obr. 6. a) Spektrometr EDXRF, b) Pyknometr ATC TFS

Materiály byly do měřicí komory pyknometru vkládány ve vysušeném stavu za ustálené hmotnosti. Hmotnost vzorků byla měřena na váze OHAUS Discovery s přesností na 5 desetinných míst.

Měrný povrch použitých vápenných pojiv byl stanoven permeabilní metodou pomocí Blainova přístroje dle ČSN EN 196-6 [38].

Velikost částic použitých plniv byla stanovena pomocí síťového rozboru s použitými síty velikosti ok 2-1-0,5-0,25-0,125-0,063 mm, dle ČSN EN 933-2 [39]. V případě jemných částic, tedy vápenných pojiv, byla velikost zrn stanovena pomocí laserového analyzátoru částic ANALYSETTE 22 MicroTec plus, FRITTSCH. Obě použité zařízení jsou zobrazena na Obr. 7.



Obr. 7 Stanovení velikosti zrn pomocí a) laserového analyzátoru
a b) prosévací metody

3.2 Použité vstupní suroviny

Vápenná pojiva

Pro přípravu lehčených maltových směsí byla vybrána dvě pojiva, která splňují požadavek na pojiva vhodná pro sanace a rekonstrukce historických budov. Prvním z použitých pojiv bylo vzdušné vápno CL 90-S z vápenky Čertovy schody u Berouna. Jedná se o vápno hašené suchým způsobem s minimální zbytkovou vlhkostí. Materiálové vlastnosti jsou ve shodě s normou EN 459-1 pro uplatnění na stavební vápno. Druhým použitým pojivem bylo přírodně hydraulické vápno CALCIDUR NHL 3,5 od firmy Otterbein, NSR. Surovinou pro jeho výrobu je mušlový vápenec obsahující dostatečné množství hydraulických oxidů. Podmínkou třídy NHL 3,5 je dle ČSN EN 459-1 pevnost v tlaku

min. 3,5 [MPa] po 28 dnech. Firma Otterbein uvádí přibližnou hodnotu 4,8 [MPa] po 28 dnech, splňující normový limit [40].

Použité hydraulické vápno je zatříděno do patřičné kategorie podle hydraulického modulu. Hydraulický modul udává hmotnostní poměr mezi oxidem vápenatým a hydraulickými oxidy. Nízká hodnota hydraulického modulu znamená vysokou hydraulicitu daného vápna.

Hydraulický modul přirozeně hydraulického vápna CALCIDUR NHL 3,5 byl stanoven ze zjištěného chemického složení, Tab. 6, jako:

$$H_M = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} = \frac{59,87}{12,76 + 4,12 + 1,47} = 3,26 [-] \quad (5)$$

Hydraulickým modulem rozdělujeme vápna na [21]:

Silně hydraulická: $H_M = 1,7 - 3$

Středně hydraulická: $H_M = 3 - 6$

Slabě hydraulická: $H_M = 6 - 9$

Vzdušná: $H_M > 9$

Použité přirozeně hydraulické vápno tedy spadá do kategorie středně hydraulických vápenných pojiv.

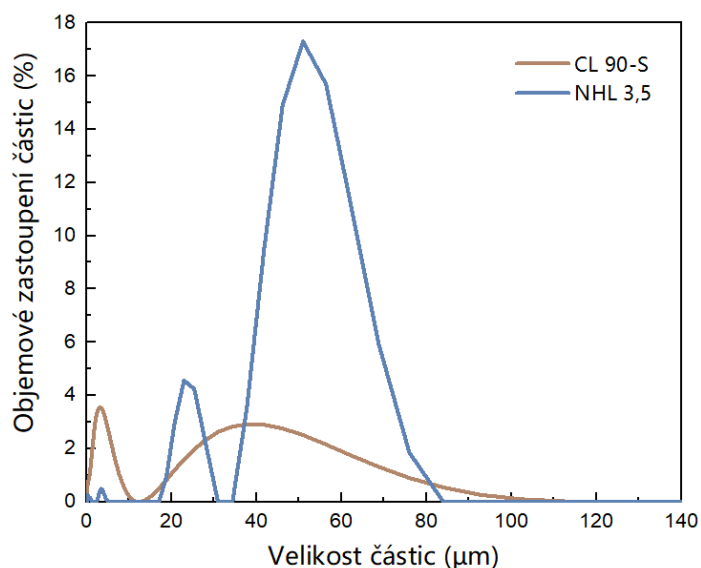
Dle technického listu je patrné vhodné použití přírodního hydraulického vápna na malty či omítky novostaveb, ale také na sanované a památkové objekty. NHL neobsahuje cement ani sádku, pevnosti tak závisejí pouze na vlastnostech a složení těžného vápence.

Základní materiálové vlastnosti aplikovaných pojiv jsou prezentovány v Tab. 4.

Tab. 4 Základní vlastnosti vápenných pojiv

| Pojivo | $\rho_{\text{syp vol}}$ [kg/m ³] | $\rho_{\text{syp set}}$ [kg/m ³] | ρ_{mat} [kg/m ³] | Měrný povrch [m ² /kg] |
|---------|---|---|---|---|
| CL 90-S | 469,3 | 536,4 | 2210,7 | 2211,0 |
| NHL 3,5 | 670,8 | 827,5 | 2590,1 | 1090,0 |

Velikost částic použitých vápenných pojiv je patrná z grafického výsledku laserové analýzy, Obr. 8. Přirozeně hydraulické vápno má vyšší objemové zastoupení větších zrn oproti vápennému hydrátu. Tento výsledek také potvrzuje nižší měrný povrch pro vápno NHL 3,5.



Obr. 8 Křivka zrnitosti vápenných pojiv

Plniva

Jako základní plnivo byl vybrán křemenný písek od firmy Filtrační písky s.r.o sídlící v obci Chlum u Český Lípy. Objemová hmotnost suchého kameniva byla 1670 kg/m³ [13]. Kamenivo o velikosti částic 0-2 mm bylo připraveno ze tří zrnitostních frakcí PG1 (0-0,5 mm), PG2 (0,5-1 mm) a PG3 (1-2 mm) v poměru 1:1:1, jak ukazuje Obr. 9.

PG1 (0-0,5 mm) **PG2** (0,5-1 mm) **PG3** (1-2 mm)



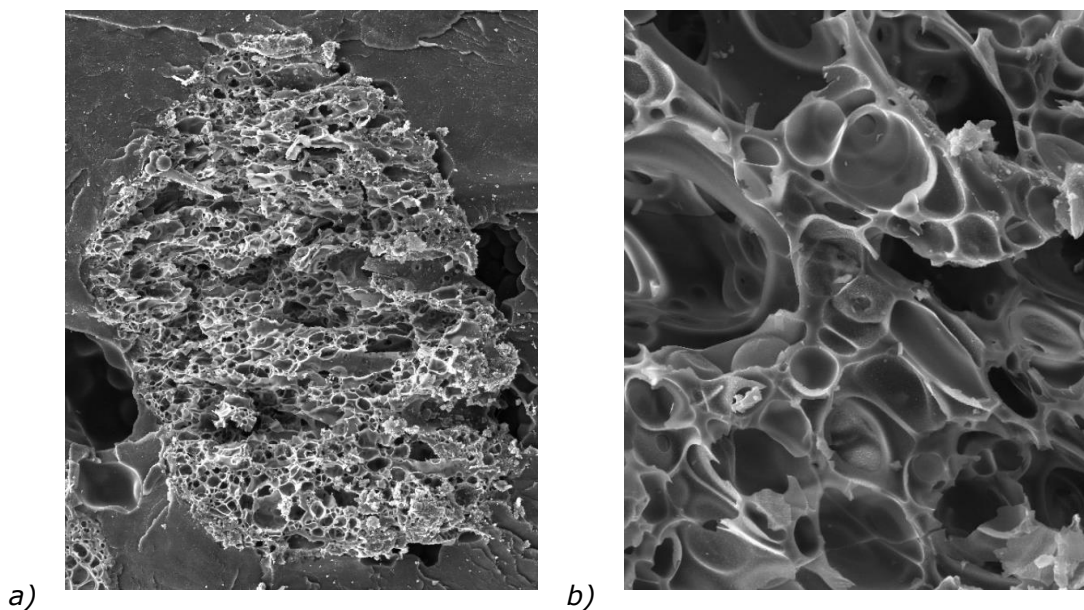
Obr. 9 Frakce křemičitého písku

Jako lehké plnivo byla použita pemza těžená společností Vulcatec Riebensahm GmbH NSR, se zrnitostí frakcí 0-2 mm, Obr. 10.



Obr. 10 Přírodní pemza frakce 0-2 mm

Na mikroskopických snímcích, měřené elektronovým mikroskopem TESCAN MIRA se zvětšením 200x a 1000x, je možné pozorovat materiálovou strukturu přírodní pemzy, Obr. 11. Vzorek pemzy byl zalit epoxidovou pryskyřicí a po ztuhnutí zlomen, proto je zobrazena vnitřní struktura pemzových zrn.



Obr. 11 Mikroskopické snímky pemzy se zvětšením a) 200x a b) 1000x

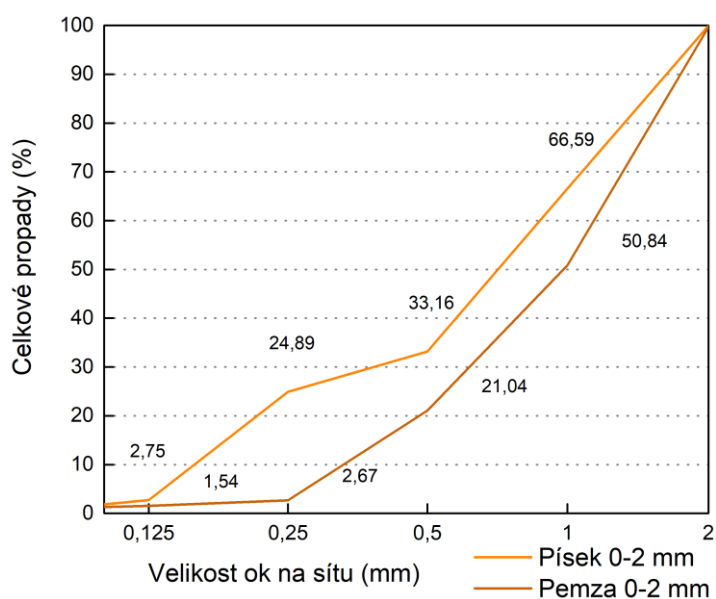
Ze základních materiálových parametrů je patrné, že pemza jako plnivo již pouze svou matricí vylehčí směs o cca 30 %. Sypná hmotnost byla stanovena v plastových odměrných válcích ve volně sypaném i setřeseném stavu. Pro získání setřeseného (zhutněného) stavu byla použita vibrační deska, postup je doporučen v normě ČSN EN 1097-3 [41]. Výsledky sypných hmotností při postupném hutnění jsou prezentovány v Tab. 5.

Tab. 5 Základní vlastnosti použitých plniv

| Pojivo | ρ_{mat} [kg/m ³] | ρ_s [kg/m ³] | | |
|----------------|---|-------------------------------|------|------|
| | | Doba hutnění [s] | | |
| | | 0 | 30 | 60 |
| Křemenný písek | 2647 | 1657 | 1922 | 1927 |
| Pemza | 1857 | 411 | 484 | 501 |

Ze získaných hodnot je patrné, že sypná hmotnost pemzy je nižší než 1200 kg/m³, tudíž podle normy ČSN EN 13055 může být označena jako minerální lehké plnivo [25].

Obr. 12 porovnává granulometrické křivky křemenného písku i přírodní pemzy stanovené prosévací metodou dle ČSN EN 933-2 [39].



Obr. 12 Křivka zrnitosti pro křemenný písek a přírodní pemzu

Prvkové složení všech použitých materiálů v podobě pojiv i plniv je prezentované v Tab. 6.

Tab. 6 Složení vstupních surovin v oxidické formě

| | CL 90-S | NHL 3,5 | Písek | Pemza |
|--------------------------------|---------|---------|-------|-------|
| SiO ₂ | 0,92 | 12,76 | 96,30 | 55,70 |
| Al ₂ O ₃ | 0,71 | 4,12 | 3,14 | 21,53 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,39 | 1,47 | 0,04 | 2,30 |
| CaO | 68,09 | 59,87 | 0,01 | 0,74 |
| MgO | 1,33 | 2,79 | 0,37 | 0,15 |
| K ₂ O | 0,48 | 1,13 | 0,02 | 4,75 |
| Na ₂ O | 0,11 | 0,09 | 0,01 | 10,78 |
| P ₂ O ₅ | 0,05 | 0,15 | 0,04 | 0,08 |
| TiO ₂ | 0,10 | 0,05 | 0,11 | 0,30 |
| SO ₃ | 0,19 | 0,15 | 0,01 | 0,07 |

3.3 Příprava vzorků

Připravované vzorky lze rozdělit do dvou hlavních skupin dle použitého pojiva. První skupinu zastupují směsi s čistým vzdušným vápnem CL 90-S, pro druhou skupinu je pojivem přírodní hydraulické vápno NHL. Použitým plnivem je křemičitý písek a přírodní pemza v různých procentuálních poměrech.

Každá skupina obsahuje celkem 5 různých záměsí, přesněji referenční vzorek bez náhrady plniva a dále 4 směsi s 25, 50, 75 a 100% objemovou náhradou písku pemzou.

Tab. 7 a Tab. 8 prezentují výsledné receptury záměsí a jejich značení. Jak je patrné, vzrůstal objem záměsové vody se zvyšující se náhradou plniva. Aby bylo možné porovnat vlastnosti jednotlivých záměsí, bylo množství záměsové vody stanoveno pro konstantní zpracovatelnost, která byla ověřena zkouškou rozlivu. Doporučený rozliv je 160 ± 5 mm, na střešacím stolku, podle normy ČSN 1015-3 [42]. Do množství záměsové vody byla zahrnuta hmotnost vody potřebná k nasycení daného objemu pemzy.

Zkoumané typy záměsí jsou pojmenovány zkratkami vystihujícími aplikovaná pojiva i plniva. Směsi se vzdušným vápnem jsou značené VWR (V=vápno, WR=vulkanit) a směsi s hydraulickým vápnem NHLWR (NHL=přírodní hydraulické vápno, WR=vulkanit).

Tab. 7 Receptura směsí se vzdušným vápnem CL 90-S

| | | VWR REF | VWR 25 | VWR 50 | VWR 75 | VWR 100 |
|----------------|------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Vápenný hydrát | [g] | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Křemenný písek | [g] | 400 | 300 | 200 | 100 | 0 |
| Pemza WR | [g] | - | 26,5 | 53 | 79,5 | 106 |
| Voda | [ml] | 107 | 120 | 130 | 143 | 155 |

Tab. 8 Receptura směsí s přírodním hydraulickým vápnem

| | | NHLWR REF | NHLWR 25 | NHLWR 50 | NHLWR 75 | NHLWR 100 |
|-------------------|------|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| NHL 3,5 | [g] | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Křemenný písek | [g] | 340,2 | 255 | 170 | 85 | 0 |
| Pemza WR | [g] | - | 22,5 | 45 | 67,5 | 90 |
| Voda | [ml] | 75,1 | 87 | 95 | 105 | 112 |

Postup výroby vzorků lze shrnout v následujících bodech:

- 1) Příprava forem a impregnace ricinovým olejem.
- 2) Smíchání vápenného pojiva s vodou a zapnutí míchačky (rychlost I, čas t=0-30 s).
- 3) Nepřerušované míchání po dobu 30 s, vsypání kameniva (rychlost I, čas t= 30-60 s).
- 4) V čase t=60-90 s přepnutí na rychlost II.
- 5) Pozastavení míchání-ruční promíchání v čase t=90-120 s.
- 6) Závěrečné promíchání směsi na rychlost II v čase 120-180 s.
- 7) Naplnění forem a ruční zhutnění s dopadem na podložku z výšky 5 cm (celkem 10 setřesů)
- 8) Ošetřování
- 9) Po dvou dnech odformování a vložení na rošt do nádoby s vodou na dně pro zajištění vysoké vlhkosti s teplotou okolí 22 ± 2 °C.

Vzorky byly vyrobeny ve formě standardních trámců o rozměrech 40x40x160 mm a válců o výšce cca 30 mm a průměru cca 110 mm, Obr. 13. Celkem bylo zhotoveno 50 vzorků, které byly podle dané metody měření zaizolovány po obvodu epoxidovou pryskyřicí, část z nich byla nařezána na krychle o délce hrany cca 40 mm pro následné použití na měření nasákavostí. Později byly zbylé trámce nařezány na kvádry o výšce 15 mm pro potřeby dalších měření.



Obr. 13 Vyrobené vzorky



Obr. 14 Vzorky po řezání

3.4 Charakterizace lehčených malt

Experimentální měření probíhalo na vzorcích s ustálenou vysušenou hmotností v klimatizovaných laboratořích při 23 ± 2 °C a $30 \pm 5\%$ relativní vlhkosti. V případě stanovení parametrů transportu vodní páry byly vzorky ustálené při dané relativní vlhkosti ovzduší, měření probíhala dle dané metody při ustálené teplotě a zvolené relativní vlhkosti. V tab. 9 jsou souhrnně prezentovány nejistoty měření pro jednotlivé stanovované parametry. Přehled metod použitých pro charakterizaci lehčených malt shrnuje Tab. 10.

Tab. 9 Souhrnné nejistoty měření jednotlivých parametrů

| Parametr | Jednotky | Značení | Nejistota [%] |
|--------------------------------|--|--------------|---------------|
| Objemová hmotnost | [kg/m ³] | ρ_v | 1,4 |
| Hustota | [kg/m ³] | ρ_{mat} | 1,2 |
| Otevřená pórovitost | [-; %] | ψ_0 | 2,0 |
| Pevnost v tlaku | [MPa] | f_c | 1,4 |
| Pevnost v tahu za ohybu | [MPa] | f_{cf} | 1,4 |
| Difúzní odpor | [-] | μ | 2,8 |
| Absorpční koeficient | [kg/m ² ·s ^{0/5}] | A | 2,3 |
| Součinitel vlhkostní vodivosti | [m ² /s] | K | 2,3 |
| Součinitel tepelné vodivosti | [W/m·K] | λ | 2,3 |
| Objemová tepelná kapacita | [MJ/m ³ ·K] | C_v | 2,6 |

Tab. 10 Metodika

| Typ analýzy | Metoda | Zařízení |
|------------------------------------|--|--|
| Granulometrie | Laserová analýza Prosévání | Analysette 22 Micro tec plus FRITSCH Prosévačka AS 200 Retsch |
| Morfologie | Elektronová mikroskopie | SEM TESCAN MIRA |
| Chemické složení | Rentgenová spektrometrie | Spektrometr Thermo Scientific™ ARL™ QUANT´X EDXRF |
| Odolnost vůči krystalizaci solí | Iontová chromatografie | HPLC WATREX |
| Materiálové parametry | Gravimetrie Pycnometrie Propustnost vodní páry: Dry-Cup, Wet- Cup Kapilární absorpce Stanovení sorpční izotermy | Analytické váhy OHAUS Discovery, digitální posuvné měřítka Mahr Unimetra, sušárna Stericell BMT MMM Group Heliový pycnometr ATC Thermo Fisher Scientific Klimatizační komora Climacell BMT MMM Group Analytické váhy Adventurer Pro OHAUS Klimatizační komora Climacell BMT MMM Group, Analytické váhy OHAUS Discovery |
| Mechanická odolnost | Pevnost v tahu za ohybu Pevnost v tlaku | Mechanický lis FP 100 Hecket |
| Tepelně-technické parametry | Nestacionární metoda | Isomet 2114 Applied Precision, Bratislava |

3.4.1 Základní materiálové parametry

Základními měřenými materiálovými parametry byly objemová hmotnost, hustota a otevřená pórovitost.

Objemová hmotnost byla měřena gravimetrickou metodou na trámcích o rozměrech cca 40x40x160 mm a kvádrech o rozměrech cca 40x40x15 mm, dle ČSN 1015-6 [43]. Měření bylo provedeno manuálně pomocí posuvného měřidla vždy na 3 místech pro šířku, výšku i délku trámce. Hmotnost trámců ve vysušeném stavu byla stanovena na analytické váze OHAUS Discovery s přesností tří desetinných míst. Objemová hmotnost poté byla dopočítána jednoduchou rovnicí:

$$\rho_V = \frac{m_d}{V} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (6)$$

kde ρ_V je objemová hmotnost [kg/m^3], m_d je hmotnost vysušeného vzorku [g] a V je objem trámce [m^3].

Hustota matrice byla měřena dvěma způsoby. Zaprvé byla stanovena na úlomcích vzorků velikosti cca 0,5 cm pomocí héliové pyknometrie a druhou metodou měření byla vakuová nasákavost.

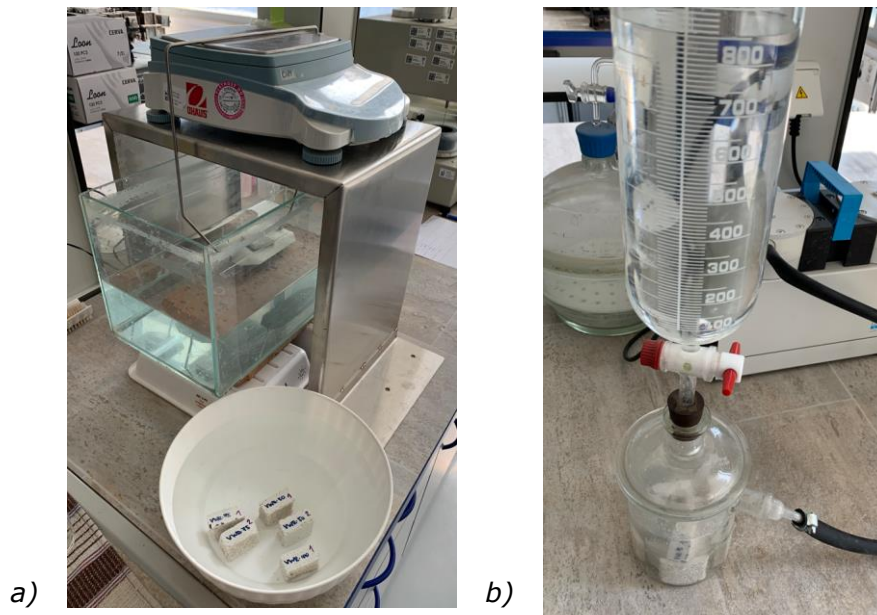
Otevřená pórovitost byla také stanovena dvěma metodami. Nejprve byla hodnota pórovitosti dopočítána z předešlých stanovených hodnot ze vztahu:

$$\psi_o = 1 - \frac{\rho_V}{\rho_{mat}} \quad [-; \%] \quad (7)$$

kde ψ_o je otevřená pórovitost [-; %], ρ_V je objemová hmotnost [kg/m^3] a ρ_{mat} je hustota matrice [kg/m^3].

Druhou metodou je vakuová nasákavost, díky které dostaneme obsah nasycené vody v pórech vzorků a můžeme tak dopočítat hustotu, objemovou hmotnost i výslednou otevřenou pórovitost. Prvním krokem je vytěsnění vzduchu z vzorků ve vakuové nádobě a poté zalití vzorků vodou. V intervalu 30 min byly vzorky vyndány a

zváženy do jejich hmotnostního ustálení, celkem po 3 vakuových cyklech. Tato metoda se jinak nazývá jako Archimedova, neboť je pro výpočet potřeba zvážit plně nasycené vzorky ponořené ve vodě, na které působí vztlaková síla vody. Měřicí aparatura pro získání Archimedovy hmotnosti je a vakuová nádoba se vzorky je prezentována na Obr. 15.



Obr. 15. a) Měření Archimedovy hmotnosti a b) uspořádání vakuové nasákavosti

Objem vzorku se Archimedovou metodou vypočítá ze vztahu:

$$V = \frac{m_w - m_a}{\rho_w} [\text{m}^3] \quad (8)$$

kde m_w je hmotnost vodou nasyceného vzorku [g], m_a je Archimedova hmotnost [g] a ρ_w je hustota vody pro teplotu 21 °C, tedy 997,99 kg/m³.

Dále byla spočítána otevřená pórovitost dle následující rovnice:

$$\psi_o = \frac{m_w - m_d}{\rho_w \cdot V} [-; \%] \quad (9)$$

Objemová hmotnost je shodně vyjádřena rovnicí 6 a hodnota hustoty matrice se vypočítá následujícím vztahem:

$$\rho_{mat} = \frac{m_d}{V \cdot (1 - \psi_o)} [\text{kg/m}^3] \quad (10)$$

Výsledné základní materiálové charakteristiky prezentované v Tab. 11 jsou vždy aritmetickým průměrem tří měřených vzorků daného složení.

Tab. 11 Základní materiálové vlastnosti

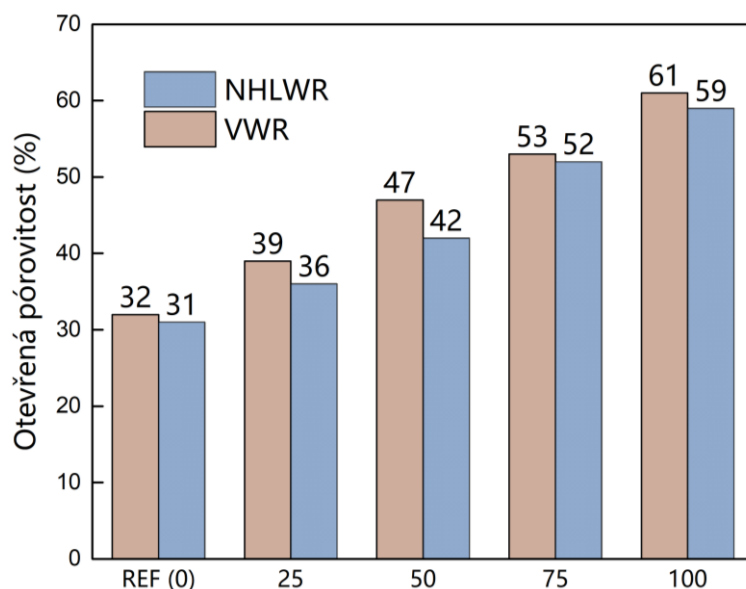
| Héliový pyknometr / Vakuová nasákavost | | | | |
|--|----------------------------------|--------------------------------|-----------------|------------------|
| Vzorek | ρ_v [kg/m ³] | ρ [kg/m ³] | Ψ_o [%] | $+\Psi_o$ [%] |
| VWR REF | 1783 | 2611 | 32 | - |
| VWR 25 | 1547 / 1572 | 2531 / 2392 | 39 / 34 | 18 |
| VWR 50 | 1317 / 1352 | 2461 / 2215 | 47 / 39 | 31 |
| VWR 75 | 1135 / 1131 | 2433 / 2138 | 53 / 47 | 40 |
| VWR 100 | 849 / 866 | 2178 / 1905 | 61 / 55 | 48 |
| NHLWR REF | 1813 | 2625 | 31 | - |
| NHLWR 25 | 1623 / 1638 | 2546 / 2423 | 36 / 32 | 15 |
| NHLWR 50 | 1417 / 1438 | 2463 / 2249 | 42 / 36 | 27 |
| NHLWR 75 | 1139 / 1144 | 2371 / 2036 | 52 / 44 | 40 |
| NHLWR 100 | 911 / 936 | 2235 / 1792 | 59 / 48 | 48 |

Z tabulky je patrné, že hodnoty měření héliovým pyknometrem a vakuovou nasákavostí nejsou shodné. Důvodem je velikost částic či molekul, které zaplňují otevřené póry materiálu. Atom hélia má oproti molekule vody menší průměr, proto je schopný zaplnit i menší póry a následná hodnota hustoty matrice i otevřené pórovitosti je vyšší v porovnání s vakuovou nasákavostí. Výsledky héliové pyknometrie lze

považovat za materiálové hodnoty a výsledky vakuové nasákavosti spíše jako praktickou charakteristiku omítek.

Podle očekávaného předpokladu mají nejvyšší objemovou hmotnost i hustotu matrice referenční vzorky, neboť obsahují jako plnivo pouze křemičitý písek, který má vyšší objemovou hmotnost a nižší otevřenou pórovitost v porovnání s minerální pemzou. Postupnou náhradou objemu původního plniva za pemzu o 25, 50, 75 a 100 % došlo k postupnému vylehčení směsí a poklesu hodnoty objemové hmotnosti i hustoty matrice. V porovnání s referenčním vzorkem klesla objemová hmotnost pro směs s přirozeně hydraulickým vápnem o 48 % a pro vzdušné vápenné směsi o 50 %.

Hodnota otevřené pórovitosti rostla s postupně se zvyšující náhradou plniva, neboť pemza je pórovitější materiál oproti křemičitému písku. Oproti referenční směsi došlo k nárůstu otevřené pórovitosti až o 48 % pro 100 % náhradu plniva. Postupný nárůst otevřené pórovitosti je možné sledovat na následujícím grafu, z kterého jsou patrné lehce vyšší hodnoty pro materiály s vápenným hydrátem oproti NHL, Obr. 16.



Obr. 16 Srovnání otevřené pórovitosti zhotovených vzorků

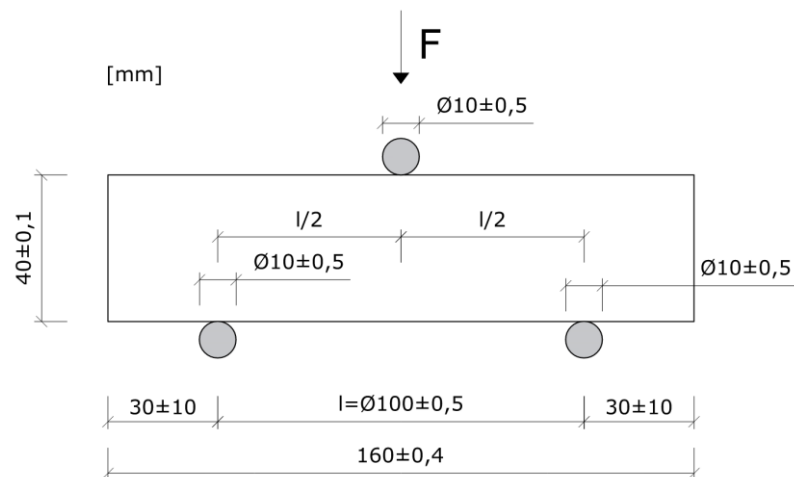
Požadavek, stanovený směrnici WTA 2-9-04 [9] pro hodnotu $\psi_o > 40 \%$, nesplňují pouze modifikované směsi VWR 25 a NHLWR 25. Pro

ostatní modifikované směsi je tato podmínka dostatečné pórovitosti pro aplikaci na zdivo formou sanační omítky splněna.

3.4.2 Mechanické vlastnosti

V průběhu celé životnosti stavby jsou omítky namáhány cyklickými změnami teplot a vlhkosti ovzduší, které materiál mechanicky zatěžují. Krystalizace solí je také rizikovým faktorem, který může působit objemovou expanzí a následným porušením omítkové struktury, podobně jako v případě rozpínání vody při změně skupenství. Mechanické vlastnosti, konkrétně pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku, jsou tedy významnou hodnotou pro zajištění trvanlivosti omítek, měřené mechanickým lisem Heckert FP 100 [6].

Pevnost v tahu za ohybu, značená f_{cf} [MPa], byla měřena hydraulickým lisem na vzorcích o rozměru cca 40x40x160 mm podle požadavků ČSN EN 1015-11 [44]. Zkouška probíhala na tříbodově upevněných vzorcích podle schématu na Obr. 17:



Obr. 17 Zatěžovací schéma pevnosti v tahu za ohybu

Výpočet pevnosti v tahu za ohybu je vyjádřen rovnicí:

$$f_{cf} = 1,5 \cdot \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2} \text{ [Mpa]} \quad (11)$$

kde f_{cf} je pevnost v tahu za ohybu [MPa; N/mm²], F je maximální vynaložené zatížení [N], l je vzdálenost mezi podpěrnými válci [mm], b je šířka zkušebního tělesa [mm] a d je výška zkušebního tělesa [mm].

Pevnost v tlaku značená f_c [MPa], byla měřena hydraulickým lisem na již zlomených trámcích mezi dvěma destičkami rozměru 40x40 mm dle ČSN EN 1015-11. Výsledná pevnost v tlaku se vypočítá jako podíl maximálního vynaloženého zatížení na plochu přítlačné desky [44].

Výsledné pevnosti jsou vždy průměrem tří měřených vzorků stejného složení, jejichž aritmetický průměr je vyjádřen v Tab. 12. Pevnosti byly stanoveny na vzorcích stáří 28 a 365 dní.

Tab. 12 Pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku

| Pevnosti po 28/365 dnech | | | | |
|--------------------------|-------------------|------------------------|----------------|---------------------|
| Vzorek | f_{cf} [MPa] | Δf_{cf} [%] | f_c [MPa] | Δf_c [%] |
| VWR REF | 0,43 / 1,06 | 147 | 1,28 / 2,31 | 80 |
| VWR 25 | 0,35 / 0,74 | 111 | 0,66 / 1,96 | 197 |
| VWR 50 | 0,25 / 0,65 | 160 | 0,51 / 1,62 | 218 |
| VWR 75 | 0,21 / 0,61 | 190 | 0,42 / 1,37 | 226 |
| VWR 100 | 0,14 / 0,55 | 293 | 0,35 / 1,24 | 254 |
| NHLWR REF | 1,12 / 1,86 | 66 | 4,30 / 7,54 | 75 |
| NHLWR 25 | 0,88 / 1,67 | 90 | 2,80 / 7,36 | 163 |
| NHLWR 50 | 0,82 / 1,47 | 79 | 2,49 / 6,35 | 155 |
| NHLWR 75 | 0,80 / 1,38 | 73 | 2,40 / 5,94 | 148 |
| NHLWR 100 | 0,78 / 1,20 | 54 | 1,93 / 5,32 | 176 |

Z Tab. 12 je možné sledovat úbytek pevnosti v tahu za ohybu i pevnosti v tlaku se zvyšující se náhradou pemzy za křemičitý písek. Důvodem je vysoká porozita přírodní pemzy oproti písku, tudíž se materiál stává křehčím a pevnosti se snižují v porovnání s referenční omítkou, a to v případě směsí ze vzdušného i hydraulického vápna. Pevnosti se dle normy ČSN 73 1341 testují nejdříve po 28 dnech. Na

druhém měření po 365 dnech je možné sledovat pevnostní nárůst až 293 % v pevnosti v tahu za ohybu a 254 % v pevnosti v tlaku pro vzorek VWR 100, neboť se projevila karbonatace pojiva. V případě přirozeně hydraulického vápna hodnoty pevností s časem také rostou, protože pojivo postupně dohydratovává.

Směrnice WTA 2-9-04 [9] udává minimální pevnostní třídu CS II pro použití směsí na sanační omítky. Jedná se tedy o pevnostní rozmezí 1,5-5 MPa při 28denním stáří, které nesplňují žádné směsi s použitím vápenného hydrátu jako pojiva. Všechny směsi NHLWR 25-100 spadají do požadované kategorie, i v případě malty se 100% náhradou plniva pemzou.

V případě použití směsí na tepelně izolační omítky je potřeba dle normy ČSN EN 998-1 zajistit minimální pevnost třídy CSI, tedy minimální hodnotu pevnosti v tlaku 0,4 MPa po 28 dnech [7]. Tuto podmínku splňují všechny směsi s pemzou kromě VWR 100, která dosahuje pevnosti jen 0,25 MPa.

3.4.3 Prostup vodní páry miskovou metodou

Transport vodní páry vápennými vzorky byl měřen miskovou metodou dle ČSN EN ISO 12572 [45]. Princip metody spočívá v jednosměrném transportu vodní páry, proto byla použita válcová tělesa o průměru 110 mm a výšce 30 mm, která byla po obvodu izolována epoxidovým nátěrem. Následně byly vzorky zafixovány pomocí technické plastelíny do hliníkových misek, které byly uloženy do klimatizační komory s ustálenou teplotou 23 °C a relativní vlhkostí 50 %.

Měření probíhalo nejprve v podmínkách „Dry Cup“, tudíž misky byly naplněny vysušeným silikagelem, relativní vlhkost 0 – 5 %. Při tomto uspořádání dochází k nárůstu hmotnosti misek, neboť suché prostředí silikagelu absorbuje vlhkost. Dále bylo měření provedeno v uspořádání „Wet Cup“, kdy byl do misky připraven nasycený roztok KNO_3 , který ustavuje relativní vlhkost prostředí 95 %. Při vážení misek je zaznamenán postupný úbytek hmotnosti. Měření misek se vzorky bylo prováděno až do ustálení hmotnosti, tedy hmotnostního rozdílu < 0,1 %. Výsledky jsou vždy aritmetickým průměrem z hodnot pro tři naměřené vzorky stejné záměsi.

Transport vodní páry je popsán součinitelem difúzní vodivosti δ [s], součinitelem difúze vodní páry D [m^2/s] a faktorem difúzního odporu μ [-].

Nejprve byl dle ČSN EN ISO 12572 [45] vypočítán rozdíl hmotnosti v závislosti na čase dle rovnice:

$$\Delta m_{12} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \text{ [kg/s]} \quad (12)$$

kde Δm_{12} je změna hmotnosti v čase [kg/s], m_1 je hmotnost v čase t_1 [kg], m_2 je hmotnost v čase t_2 [kg] a časy t_1 a t_2 jsou doby setrvání vzorků v klimatizační komoře.

Hustotu difúzního toku lze stanovit rovnicí:

$$g = \frac{G}{A} \text{ [kg/m}^2 \cdot \text{s]} \quad (13)$$

kde g je hustota difúzního toku [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$], G je difúzní tok [kg/s] a A je vystavěná plocha vlhkostnímu transportu [m^2].

Propustnost vodní páry je možné dle normy [45] vypočítat jako:

$$W_p = \frac{G}{A \cdot \Delta p} \text{ [kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa]} \quad (14)$$

kde W_p je propustnost vodní páry zohledňující částečný tlak vodní páry [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$] a Δp je rozdíl tlaků mezi prostředím uvnitř misky a v klimakomoře [Pa].

Difúzní odpor je vyjádřen rovnicí:

$$Z_p = \frac{1}{W_p} \text{ [m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa/kg]} \quad (15)$$

kde Z_p je difúzní odpor zohledňující částečný tlak vodní páry [$\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$].

Součinitel difúzní vodivosti je určen rovnicí:

$$\delta = W \cdot d \text{ [kg/m}\cdot\text{s}\cdot\text{p}_a] \quad (16)$$

kde δ je součinitel difúzní vodivosti [kg/m·s·p_a] a d je výška vzorku [m].

Faktor difúzního odporu je dán rovnicí:

$$\mu = \frac{\Delta p \cdot \delta_{air}}{g \cdot d} [-] \quad (17)$$

kde μ je faktor difúzního odporu [-] a δ_{air} je součinitel difúzní vodivosti vzduchu.

Součinitel difúze vodní páry lze vypočítat pomocí rovnice:

$$D = \frac{\delta \cdot R \cdot T}{M_{H_2O}} \text{ [m}^2\text{/s]} \quad (18)$$

kde D je součinitel difúze vodní páry [m²/s], R je molární plynová konstanta 8,314 [J/kg·mol], T je teplota [K] a M_{H_2O} je molární hmotnost vody 0,018 [kg/mol].



Obr. 18 Misky se vzorky v klimatické komoře

Vypočítané parametry transportu vodní páry pro jednotlivé záměsi jsou prezentovány v Tab. 13 a 14.

Tab. 13 Výsledky Dry Cup metody

| Vzorek | $\delta \cdot 10^{-11}$ [kg/m·s·Pa] | μ [-] | $D \cdot 10^{-6}$ [m ² /s] |
|------------|--|--------------|--|
| VWR REF | 1,77 | 11,1 | 2,42 |
| VWR 25 | 2,02 | 10,0 | 2,76 |
| VWR 50 | 2,21 | 9,1 | 3,03 |
| VWR 75 | 2,34 | 8,6 | 3,20 |
| VWR 100 | 2,58 | 7,8 | 3,53 |
| NHL WR REF | 1,56 | 12,9 | 2,14 |
| NHL WR 25 | 1,59 | 12,4 | 2,17 |
| NHL WR 50 | 1,66 | 12,1 | 2,27 |
| NHL WR 75 | 2,27 | 8,9 | 3,10 |
| NHL WR 100 | 2,41 | 8,3 | 3,29 |

Tab. 14 Výsledky Wet Cup metody

| Vzorek | $\delta \cdot 10^{-11}$ [kg/m·s·Pa] | μ [-] | $D \cdot 10^{-6}$ [m ² /s] |
|------------|--|--------------|--|
| VWR REF | 1,87 | 10,5 | 2,56 |
| VWR 25 | 2,19 | 9,1 | 2,99 |
| VWR 50 | 2,24 | 8,9 | 3,07 |
| VWR 75 | 2,91 | 6,9 | 3,98 |
| VWR 100 | 3,28 | 6,1 | 4,48 |
| NHL WR REF | 1,84 | 10,7 | 2,52 |
| NHL WR 25 | 1,89 | 10,4 | 2,59 |
| NHL WR 50 | 2,12 | 9,4 | 2,89 |
| NHL WR 75 | 2,33 | 8,6 | 3,18 |
| NHL WR 100 | 2,77 | 7,2 | 3,79 |

Z výsledků vycházejících z Tab. 13 a 14 je patrný pokles difúzního odporu s tím, jak postupně narůstá objem pemzy ve vzorku. Pro záměsi se 100% náhradou písku v uspořádání dry cup došlo k poklesu difúzního odporu téměř o 30 % v případě směsí na bázi vápenného hydrátu a o 36 % pro směsi s NHL v porovnání s referenčními omítkami. V uspořádání Wet cup je tento pokles 42 % pro omítky ze vzdušného vápna a 33 % pro záměsi z vápna hydraulického. V souladu s tím došlo k nárůstu součinitele difúzní vodivosti i součinitele difúze vodní páry. Tyto materiálové parametry jsou pozitivní z hlediska zajištění paropropustnosti a dostatečného odvodu vlhkosti do exteriéru.

Pokud by se testované lehčené směsi použily jako sanační omítky, určuje směrnice WTA 2-9-04 [9] hranici součinitele difúzního odporu $\mu < 12$. S výjimkou záměsí NHL WR 25-50, všechny připravené záměsi vyhovují difúzním požadavkům pro použití jako sanační omítky.

3.4.4 Kapilární absorpce

Kapilární absorpce (nasákavost) byla měřena dle ČSN EN 1015-18 [46] na vzorcích o rozměrech 40x40x40 mm, které byly po obvodu izolovány epoxidovou pryskyřicí. Nejprve byly vzorky zváženy v suchém stavu, poté byly upevněny do závěsného mechanismu na analytické váze a ponořeny neizolovanou stranou přibližně 5 mm pod vodní hladinu. Narůstající hmotnost vzorků byla následně automaticky zaznamenávána počítačovým programem v intervalu 30 s. Výsledkem měření je křivka kumulativního obsahu vody [kg/m^2] v závislosti na odmocnině z času [$\text{s}^{1/2}$]. Z vynesené křivky je možné stanovit absorpční koeficient vody A [$\text{kg/m}^2\text{s}^{1/2}$] jako směrnici počátečního lineárního nárůstu hmotnosti. Pro výpočet součinitele vlhkostní vodivosti κ [m^2/s] je potřeba stanovit kapilární obsah nasycené vlhkosti w_{sat} [kg/m^3], který získáme z měření vakuové nasákavosti rovnicí:

$$w_{\text{sat}} = \frac{m_w - m_d}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (19)$$

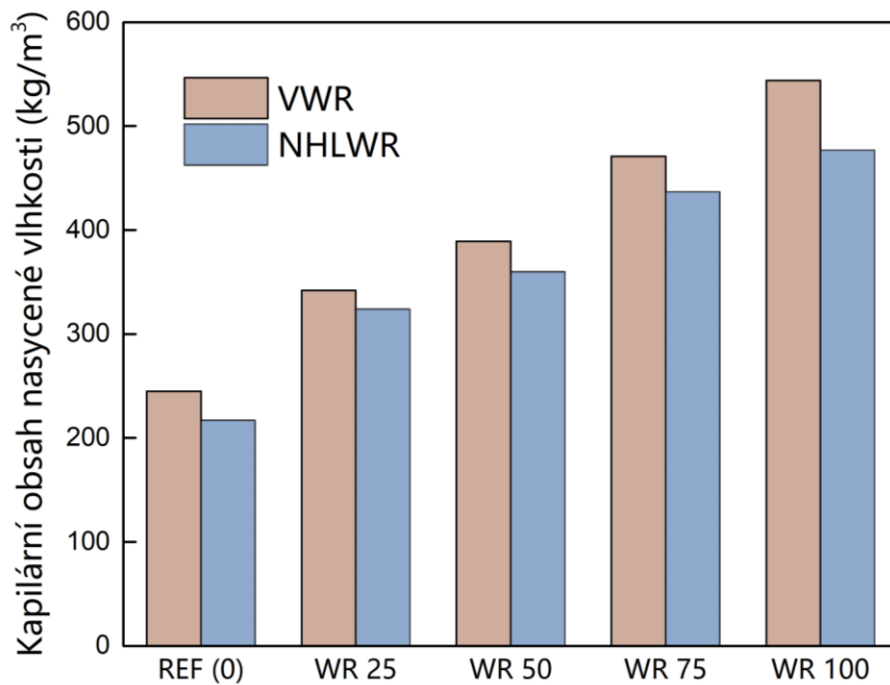
kde w_{sat} je kapilární obsah nasycené vlhkosti [kg/m^3], m_w je hmotnost vodou nasyceného vzorku [g], m_d je hmotnost vysušeného vzorku [g]

a V je objem vzorku [m^3]. Výsledky jsou graficky znázorněny na Obr. 19.

Součinitel vlhkostní vodivosti κ [m^2/s] je následně stanoven rovnicí:

$$\kappa = \left(\frac{A}{w_{sat}}\right)^2 [\text{m}^2/\text{s}] \quad (20)$$

Výsledky prezentované v Tab. 15 jsou vždy aritmetickým průměrem tří vzorků stejné záměsi.



Obr. 19 Závislost kapilárního obsahu nasycené vlhkosti na náhradě plniva

Tab. 15 Vlhkostní parametry

| Vzorek | A [kg/m ² ·s ^{0/5}] | w _{sat} [kg/m ³] | κ·10 ⁻⁷ [m ² /s] |
|------------|---|--|---|
| VWR REF | 0,202 | 245 | 7,33 |
| VWR 25 | 0,215 | 342 | 7,38 |
| VWR 50 | 0,231 | 389 | 7,98 |
| VWR 75 | 0,270 | 471 | 8,46 |
| VWR 100 | 0,292 | 544 | 10,60 |
| NHL WR REF | 0,301 | 217 | 16,92 |
| NHL WR 25 | 0,323 | 324 | 18,91 |
| NHL WR 50 | 0,390 | 360 | 19,97 |
| NHL WR 75 | 0,437 | 437 | 20,30 |
| NHL WR 100 | 0,497 | 477 | 23,91 |

Z Obr. 19 je patrný nárůst hodnoty kapilárního obsahu nasycené vlhkosti pro vzorky s vyšší náhradou původního plniva pemzou. Pro vzorky s vápenným hydrátem došlo mezi referenční směsí a 100% náhradou plniva k 122% nárůstu w_{sat} a pro vzorky s NHL k 120% nárůstu. Zvýšená akumulace vlhkosti v materiálu je pozitivní charakteristikou při použití směsí jako sanačních omítek na restaurování vlhkých objektů.

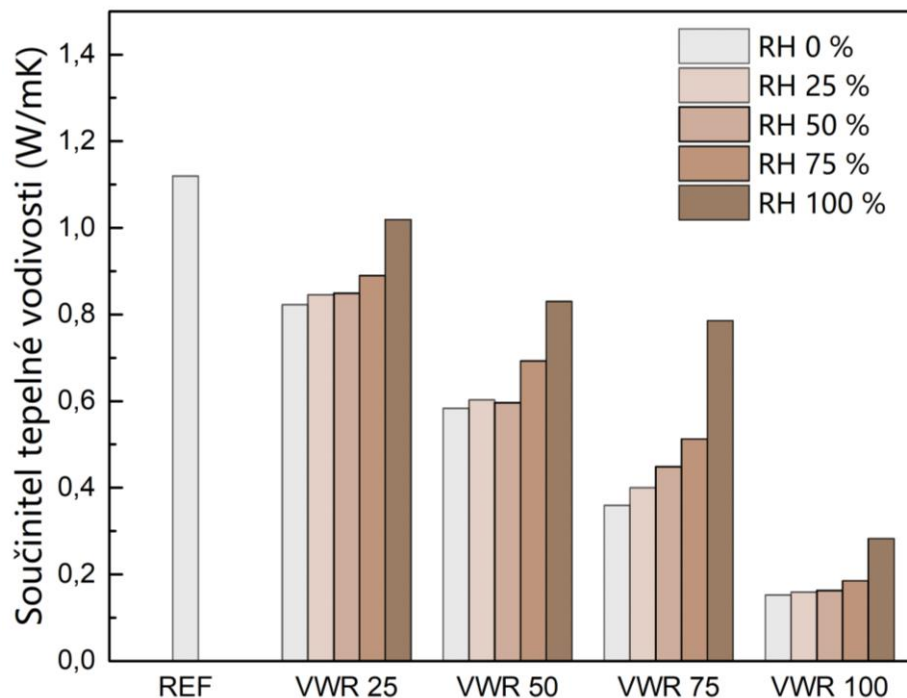
Z Tab. 15 lze vyčíst trend rostoucího absorpčního koeficientu vody s postupnou náhradou plniva. Materiál se 100% náhradou plniva tak kapilárně absorbuje vlhkost rychleji a o větším obsahu v porovnání s referenční směsí pro záměsí s oběma použitými pojivy.

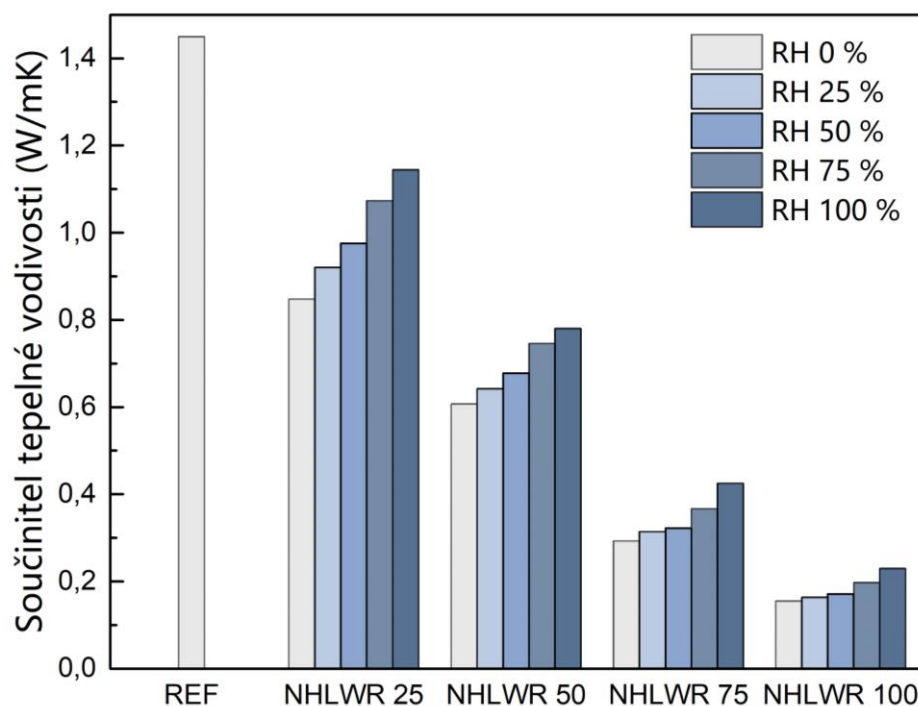
3.4.5 Tepelně technické parametry

Tepelně technické parametry byly na vápenných vzorcích měřeny nestacionární metodou, konkrétně přístrojem Isomet 2114 Applied Precision, Bratislava. Stanovovanými parametry byl součinitel tepelné vodivosti [W/m·K], objemová tepelná kapacita [MJ/m³·K] a měrná tepelná vodivost [mm²/s]. Pro měření dynamickou metodou byly použity dvě povrchové sondy v rozsahu součinitele tepelné vodivosti 0,04-0,3 W/m·K a 0,3-2 W/m·K. Použitými vzorky byly válce průměru

110 a výšky cca 30 mm. Protože hodnoty těchto parametrů výrazně závisí na obsahu vlhkosti materiálu, byla měření provedena na vzorcích s ustáleným obsahem vlhkosti při relativní vlhkosti 0, 25, 50, 75 a 95 %, výsledky jsou prezentované v Tab. 16 a Obr. 20.

Výsledky jsou vždy aritmetickým průměrem z hodnot pro tři naměřené vzorky stejné záměsi. Přesnost měřící metody udává výrobce jako $\pm 5-10\%$ pro součinitel tepelné vodivosti a $\pm 15\%$ pro objemovou tepelnou kapacitu a měrnou tepelnou vodivost. Vzorky byly v jednotlivých stavech relativní vlhkosti prostředí po dobu vždy tří týdnů ponechány v klimatizační komoře a následně váženy až do dosažení ustálené hmotnosti (0,1 % hmotnostního rozdílu).





Obr. 20 Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na relativní vlhkosti okolí

Tab. 16 Měrná tepelná vodivost

| Vzorek | a [mm ² /s], RH [%] | | | | |
|------------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | RH= 0 | RH= 25 | RH= 50 | RH= 75 | RH= 95 |
| VWR REF | 0,86 | 1,12 | 1,33 | 1,47 | 1,59 |
| VWR 25 | 0,82 | 0,85 | 0,85 | 0,89 | 1,02 |
| VWR 50 | 0,58 | 0,60 | 0,60 | 0,69 | 0,83 |
| VWR 75 | 0,36 | 0,40 | 0,45 | 0,51 | 0,79 |
| VWR 100 | 0,15 | 0,16 | 0,16 | 0,19 | 0,28 |
| NHL WR REF | 0,56 | 0,92 | 1,17 | 1,28 | 1,44 |
| NHL WR 25 | 0,85 | 0,92 | 0,98 | 1,07 | 1,14 |
| NHL WR 50 | 0,61 | 0,64 | 0,68 | 0,75 | 0,78 |
| NHL WR 75 | 0,29 | 0,31 | 0,32 | 0,37 | 0,43 |
| NHL WR 100 | 0,15 | 0,16 | 0,17 | 0,20 | 0,23 |

Z Obr. 20 je patrný mírný nárůst součinitele tepelné vodivosti vzorků s vápenným hydrátem i NHL vzhledem k rostoucí relativní vlhkosti okolního prostředí. Současně také dochází k poklesu hodnoty

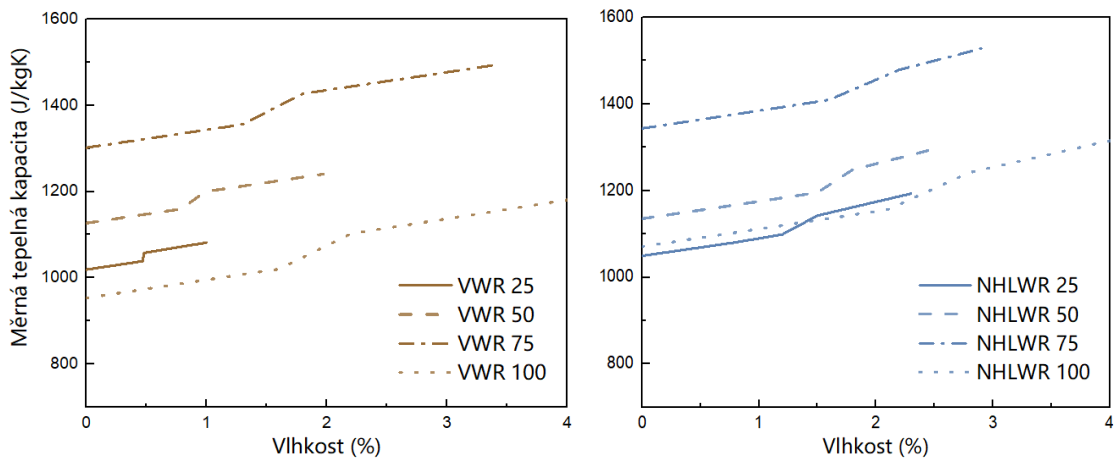
součinitele tepelné vodivosti s postupnou objemovou náhradou původního plniva za pemzu. Pemza dosahuje hodnoty pórovitosti až 85 % [11] a zdatelně tak svými vzduchovými dutinami zlepšuje tepelně-technické parametry zhotovených maltových směsí. Konkrétně 100% náhradou křemičitého písku za pemzu došlo ke snížení součinitele tepelné vodivosti pro vzorky s NHL o 467 % a pro vzorky s vápenným hydrátem o 447 %.

Norma ČSN EN 998-1, vymezuje tepelně technické parametry tepelně izolačních omítek, stanovuje součinitel tepelné vodivosti $\leq 0,1$ W/m·K pro λ_{T1} a $\leq 0,2$ W/m·K pro λ_{T2} [7]. Normový požadavek na součinitel tepelné vodivosti typu „T2“ splňují pouze směsi se 100% náhradou plniva. Tyto záměsi jsou tedy vhodné pro aplikaci na tepelně izolační omítky.

Z tab. 16 je patrný obdobný trend pro hodnoty měrné tepelné vodivosti jako pro součinitel tepelné vodivosti, Obr. 20. Se vzrůstajícím obsahem vlhkosti materiálu dochází k nárůstu hodnot měrné tepelné kapacity, a tudíž ke zhoršení tepelně izolačních schopností materiálu. Čím vyšší je nicméně náhrada písku pemzou, tím méně výrazný je tento vzestup.

Tab. 17 Měrná tepelná kapacita

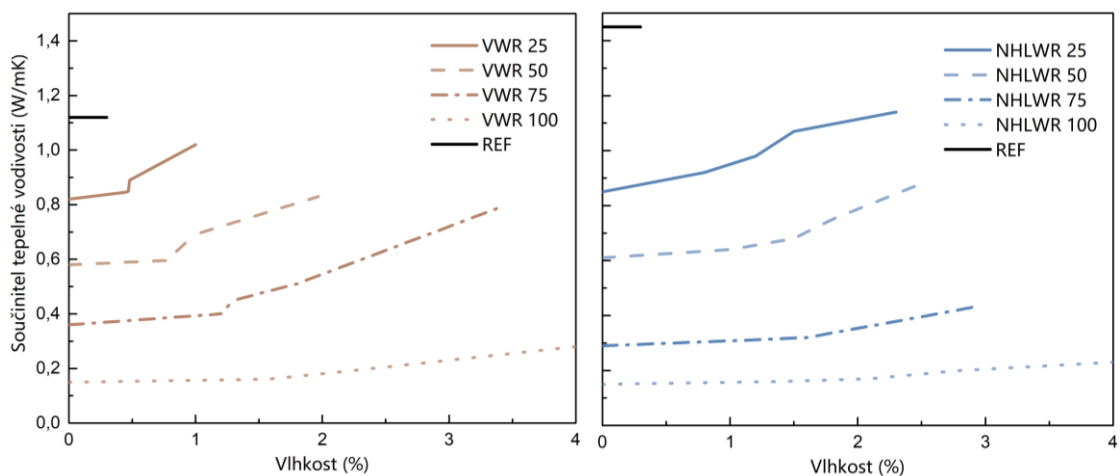
| Vzorek | C_p [J/kg·K], RH [%] | | | | |
|------------|------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | RH= 0 | RH= 25 | RH= 50 | RH= 75 | RH= 95 |
| VWR REF | 890 | 1000 | 1090 | 1170 | 1240 |
| VWR 25 | 1019 | 1038 | 1039 | 1058 | 1082 |
| VWR 50 | 1127 | 1159 | 1160 | 1200 | 1241 |
| VWR 75 | 1302 | 1351 | 1356 | 1427 | 1494 |
| VWR 100 | 953 | 1012 | 1020 | 1102 | 1181 |
| NHL WR REF | 880 | 1010 | 1100 | 1180 | 1250 |
| NHL WR 25 | 1049 | 1080 | 1099 | 1142 | 1193 |
| NHL WR 50 | 1135 | 1175 | 1196 | 1248 | 1296 |
| NHL WR 75 | 1343 | 1388 | 1409 | 1479 | 1527 |
| NHL WR 100 | 1071 | 1128 | 1156 | 1242 | 1315 |



Obr. 21 Závislost měrné tepelné kapacity na obsahu vlhkosti materiálu

Z hodnot naměřené objemové tepelné kapacity byla vypočítána měrná tepelná kapacita pro suchý materiál. Následně pomocí směšovacího pravidla byla stanovena závislost měrné tepelné kapacity na obsahu vlhkosti pro daný materiál, Tab. 17 a Obr. 21.

Výsledky uvedené v Tab. 17 a Obr. 21 charakterizují schopnost zhotovených materiálů akumulovat teplo. Měrná tepelná kapacita se zvyšuje postupně s 25-75% náhradou plniva, ale pro plnou náhradu plniva pemzou došlo k prudkému poklesu. Hodnota objemové tepelné kapacity dále narůstá se zvyšující se vlhkostí materiálu, neboť voda obsažená v pórech má vyšší akumulaci schopnost tepla v porovnání se vzduchem.

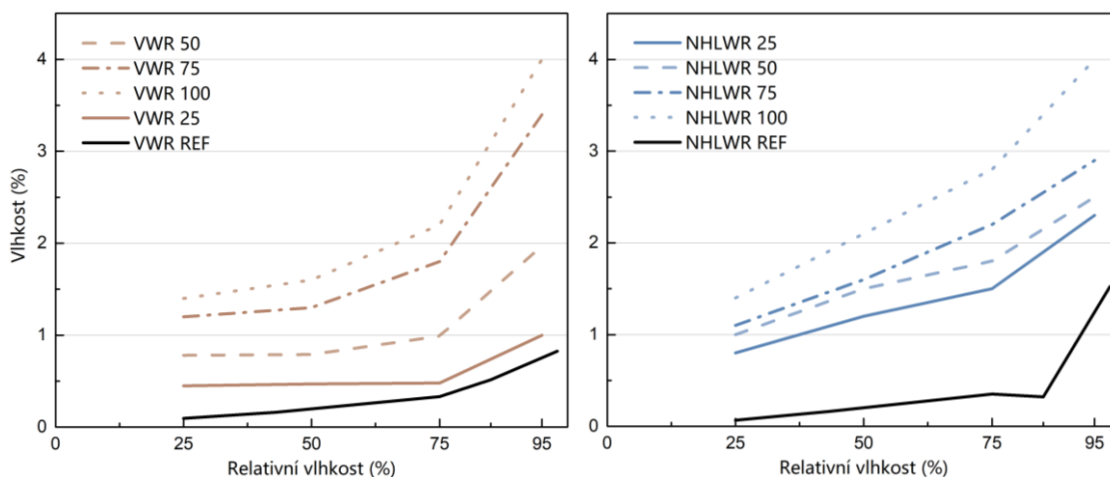


Obr. 22 Závislost součinitele tepelné vodivosti na vlhkosti materiálu

Závislost součinitele tepelné vodivosti na obsahu vlhkosti v materiálu znázorňují křivky na Obr. 22. Hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro vzorky obsahující jako plnivo pouze pemzu se v závislosti na vlhkosti mění jen nepatrně, což je výborné z pohledu tepelně izolačních vlastností materiálu.

3.4.6 Stanovení sorpčních izoterem

Měření sorpčních izoterem bylo prováděno klasickou metodou. Vzorky vysušené do ustálené hmotnosti byly umístěny v klimatizační komoře a postupně byla zvyšována relativní vlhkost při konstantní teplotě 23 °C. Hmotnost vzorků byla sledována až do ustálení, kdy hmotnost se neměnila v rozsahu 0,1 % při dané relativní vlhkosti.



Obr. 23 Sorpční izotermy

Ze známých hodnot počáteční a ustálené hmotnosti při dané relativní vlhkosti byla vypočítána hmotnostní vlhkost daného materiálu. Sorpční izotermy vykazují typický průběh závislosti obsahu vlhkosti materiálu v závislosti na relativní vlhkosti okolního prostředí, Obr. 23. S rostoucím podílem pemzy v maltových směsích narůstá obsah akumulované vlhkosti.

3.5 Trvanlivost a odolnost vůči krystalizaci solí

Korozní efekty solí ve stavebních materiálech souvisejí převážně s jejich krystalizací z roztoků, rekrystalizací pevné fáze, někdy také

s chemickou reakcí. Za normálních podmínek se ve stavebních materiálech nacházejí ionty zřídka, avšak například vzlínáním spodní vody dochází působením kapilárních sil k nárůstu jejich koncentrace a s tím spojenou degradací stavebního materiálu. Pokud jsou přítomny soli v porézním systému stavebního materiálu ve formě roztoku, nehrozí nebezpečí. To nastává v okamžiku vypařování vody, kdy soli krystalizují za formování hydrátů, jejichž krystalizační tlak je vyšší než vazebné síly částic stavebního materiálu, a nastává tak destrukce matrice daného materiálu. Z těchto důvodů je proto nezbytně nutné studovat podmínky transportu a akumulace roztoků solí ve stavebních materiálech. Jedním z nejdůležitějších parametrů, jež umožňuje sledovat akumulaci solí, jsou vazebné izotermy iontů. Ty představují rovnovážný stav mezi obsahem volných iontů v roztoku a množstvím vázaných iontů (fyzikální i chemickou sorpcí) na stěnách pórů v porézním systému [47].

Vazebné izotermy chloridů a síranů byly stanoveny modifikovanou metodou navrženou Tangem a Nilsonem [47]. Jako výchozí koncentrace roztoků byly připraveny roztoky s koncentrací 0,1-1,2% chloridových a síranových aniontů. Pro zjištění přesné koncentrace byla použita kapalinová chromatografie. Zařízení HPLC (WATREX) sestává z vysoce výkonné vakuové pumpy DeltaChrom SDS 150, nástřikové jednotky Kit MIK 010 s ventilem Rheodyne 775i (přesnost $\pm 0,1$ %), 6 cm kolony IC anion I detektoru SHODEX CD5. Jako mobilní fáze byl použitý roztok 4 mM Na_2CO_3 + 1 mM NaHCO_3 + 0,1 mM NaSCN . Vzorek byl vstříkován pomocí Hamiltonovy skleněné stříkačky o objemu 10 μl . Vodivostní signál je zpracováván softwarem SS420 χ . Před vlastní analýzou bylo nezbytné provést kalibraci s využitím standardních roztoků o koncentraci 10, 100 a 1000 mg/l. Podmínky analýzy byly následující: 44,7 °C, 54 bar, průtok 1 ml/min, vodivost mobilní fáze 31 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Metoda měří s přesností do 2 %.

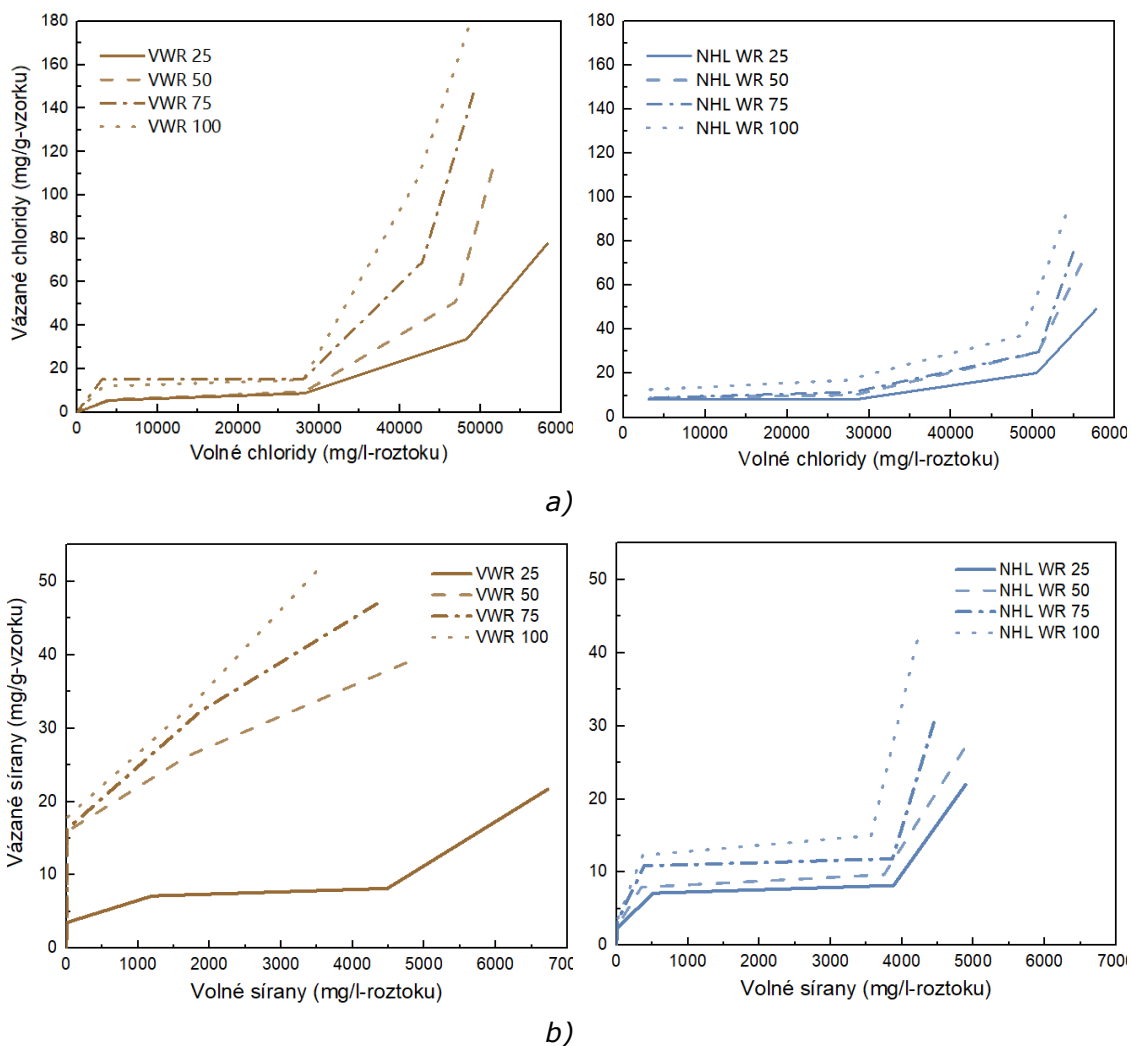
Pro stanovení vazebných izoterm byly připraveny vzorky o rozměrech 40x40x10 mm, které byly vysušeny do ustálené hmotnosti. Následně byly umístěny do plastové váženky a zality 200 ml roztoku NaCl či Na_2SO_4 dané koncentrace. Váženky byly utěsněny parafilmem a ponechány v laboratoři při 25 ± 2 °C po dobu devíti měsíců. Z analyzovaných hodnot počáteční c_0 a ustálené c_1 koncentrace chloridových a síranových aniontů byly vypočítány dle následující

rovnice hodnoty vázaných c_b iontů a byly sestrojeny příslušné vazebné izotermy jako funkce $c_b=c_b(c_f)$

$$c_b = \frac{M_{Cl} \cdot V \cdot (c_0 - c_1)}{m_d} \quad [\text{mol/l}] \quad (21)$$

kde M_{Cl} je molární hmotnost chlóru [g/mol], V je objem roztoku [ml], c_0 , c_1 počáteční a rovnovážná koncentrace roztoku chloridů a síranů [mol/l] a m_d hmotnost vzorku vysušeného v sušárně při 105 °C [g]. Obsah volných chloridů c_f [mol/l], odpovídá hodnotě c_1 .

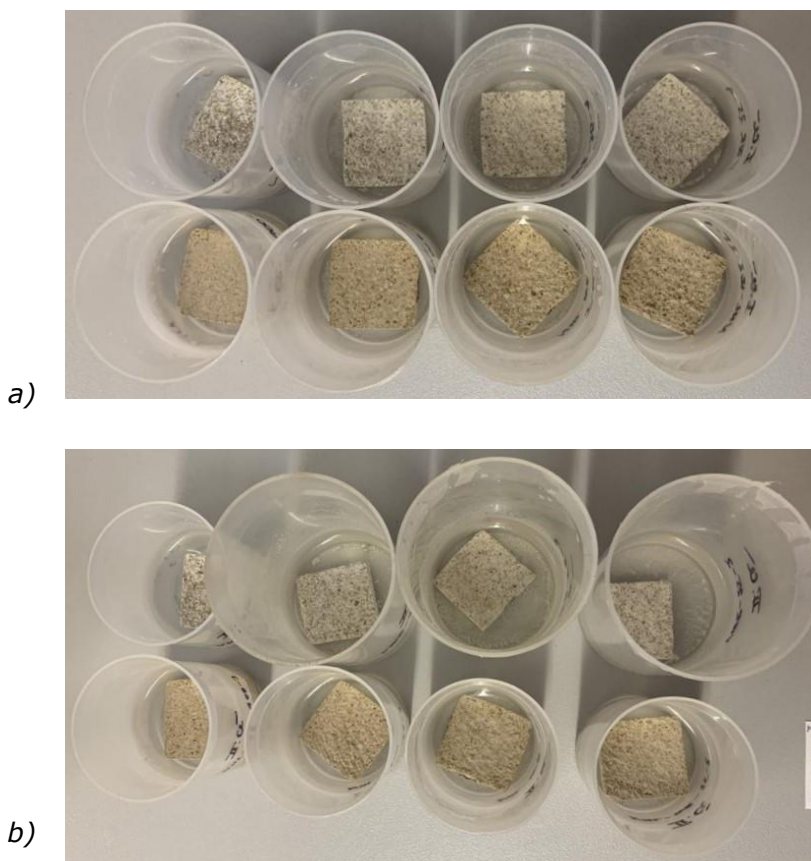
Vazebné izotermy chloridů a sulfidů pro studované omítky ukazují Obr. 24. Tvar křivek odpovídá průběhu BET izoterem, tedy postupně narůstá množství vázaných iontů s koncentrací iontů v roztoku.



Obr. 24. Vazebné izotermy a) chloridů a b) síranů.

Z průběhu vazebných izoterem je patrné, že narůstá sorpční kapacita omítek s vyšším obsahem pemzy. Také je zřetelné, že chloridy s menším poloměrem se do materiálu dostávají snadněji oproti objemnějším iontům síranovým.

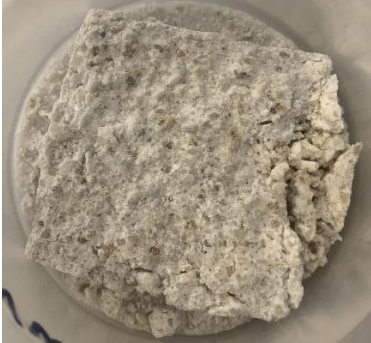

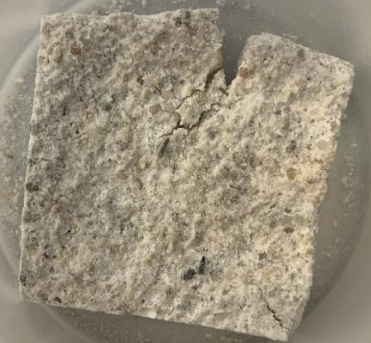

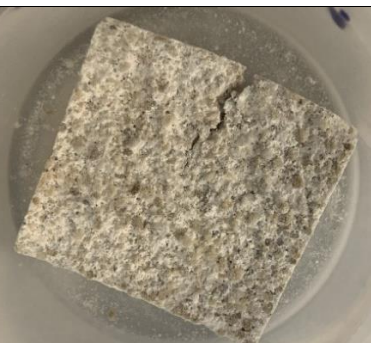



Degradaci materiálu vlivem solí velice jasně dokládají fotografie poškozených vzorků, Obr. 25-27.





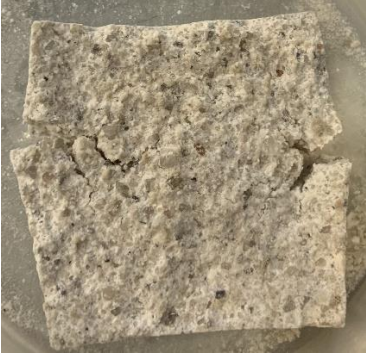





Obr. 25. a) Roztok Cl^- 1% koncentrace a b) 1,2% koncentrace

Vzorky uložené v chloridových roztocích nejevily patrné poškození, a to ani v roztocích o vyšší koncentraci 1 a 1,2 %. U vzorků vystavených působení síranů, Obr. 26 a 27, nebylo pozorováno při nižších koncentracích zřetelné poškození. Avšak od koncentrace 1 % síranových aniontů bylo patrné narušení kompaktnosti vzorků, u vzorků ze vzdušného vápna došlo k celkové destrukci materiálu. Pozitivní je, že omítky z přirozeně hydraulického vápna projevují zvýšenou odolnost vůči působení agresivního prostředí v porovnání se vzorky ze vzdušného vápna, které se zcela rozpadly. Navíc vzorky

z přirozeně hydraulického vápna s více než 50% náhradou pemzou náporu solí zcela odolaly, tudíž vykazují dostatečnou sorpční kapacitu a jsou vhodné pro použití na vlhké zasolené zdivo. Je možné konstatovat, že omítky z přirozeně hydraulického vápna mají zvýšenou odolnost vůči krystalizaci solí oproti vzorkům z vápenného hydrátu.

| [%] | VWR | NHLWR |
|--------|---|--|
| WR-25 |  |  |
| WR-50 |  |  |
| WR-75 |  |  |
| WR-100 |  |  |

Obr. 26 Roztok SO_4^{2-} 1% koncentrace

| [%] | VWR | NHLWR |
|--------|---|--|
| WR-25 |  |  |
| WR-50 |  |  |
| WR-75 |  |  |
| WR-100 |  |  |

Obr. 27 Roztok SO_4^{2-} 1,2% koncentrace

4 Závěr

V rámci komplexní experimentální analýzy byly studovány vlastnosti a odolnost lehčených malt na bázi vzdušného a přírodně hydraulického vápna s částečnou či úplnou náhradou křemičitého kameniva přírodní pemzou. Zjištěné výsledky je možné shrnout následně:

- 1) Malty s vyšší než 50% náhradou písku pemzou vykazují hodnoty otevřené pórovitosti vyšší než 40 %.
- 2) Vápenné malty s pemzou obsahují technologické póry, které snižují výšku kapilární elevace.
- 3) Vápenné malty byly klasifikovány do pevnostní třídy CSI, malty na bázi hydraulického vápna do třídy CSII.
- 4) S vyšší náhradou písku porézní pemzou došlo k nárůstu vlhkostní vodivosti malt a jejich prostupnosti pro vodní páru, což je důležité z pohledu jejich případné aplikace na vlhké zdivo a jeho následné vysoušení.
- 5) Nahrazení písku zvýšilo hygroskopičnost malt.
- 6) Tepelná vodivost malt byla zásadně snížena použitím lehčeného kameniva s omezenou možností transportovat teplo, malty se 100% náhradou písku byly klasifikovány jako tepelněizolační třídy T2.
- 7) Vylehčení malt snížilo závislost jejich tepelné vodivosti na vlhkosti, což je z hlediska jejich aplikace v prostředí s proměnlivými vlhkostními podmínkami pozitivní zjištění.
- 8) Lehčené malty jsou schopny bez poškození akumulovat velké množství ve vodě rozpustných solí.

Závěrem je možné konstatovat, že studované malty lze využít při rekonstrukci historického zdiva včetně případů, kdy jsou kladeny zvýšené požadavky na jejich tepelně-vlhkostní funkci a trvanlivost. Získané výsledky naleznou uplatnění v navazujícím materiálovém výzkumu při vývoji maltových směsí pro specifické stavební aplikace. Stejně tak naleznou uplatnění jako vstupní data pro počítačové simulace transportu a akumulace tepla, vlhkosti a vodorozpustných solí ve zdivu či sanovaných stavebních konstrukcích.

5 Použitá literatura

- [1] HOŠEK, J. a LOSOS L. *Historické omítky: průzkumy, sanace, typologie*. První vydání. Praha: Grada, 2007. Stavitel. ISBN 978-80-247-1395-3.
- [2] BLAHA, M. *Omítky: PROFI & HOBBY*. První vydání. Praha: Grada, 2004. ISBN 80-247-0898-1.
- [3] FARIA, P., HENRIQUES F. a RATO V. *Comparative evaluation of lime mortars for architectural conservation*. *JOURNAL OF CULTURAL HERITAGE*. Univ Nova Lisboa, Fac Ciencias & Tecnol, P-2829516 Caparica, Portugal C3 - Universidade Nova de Lisboa PU - ELSEVIER FRANCE-EDITIONS SCIENTIFIQUES MEDICALES ELSEVIER, JUL-SEP, (3), 338-346. ISSN 1296-2074. Dostupné z: doi:10.1016/j.culher.2008.03.003
- [4] LANK, Jiří a Pavel HLAVÁČEK. *Rekonstrukce fasád*. Brno: ERA, 2006. Stavíme. ISBN 80-736-6072-5.
- [5] FÁRA, P. *Sanace vlhkého zdiva. Za podpory Ministerstva kultury ČR*. Praha: STOP, 2003. ISBN 80-866-5702-7.
- [6] WITZANY, J., ČEJKA T., WASSERBAUER R. a ZINGLER R. *PDR - poruchy, degradace a rekonstrukce*. 2010. V Praze: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 978-80-01-04488-9.
- [7] ČSN EN 998-1: *Specifikace malt pro zdivo- Část 1: Malta pro vnitřní a vnější omítky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [8] ČSN EN 1745: *Zdivo a výrobky pro zdivo- Metody stanovení tepelných vlastností*. Praha-Hostivař: Česká agentura pro standardizaci, 2021.
- [9] Směrnice WTA 2-9-04/D: *Sanační omítkové systémy*. 2007.
- [10] RASHAD, AM. *A short manual on natural pumice as a lightweight aggregate*. *JOURNAL OF BUILDING ENGINEERING*. 2019. Dostupné z: doi:10.1016/j.job.2019.100802

- [11] DROCHYTKA, R. Lehké stavební látky. *Brno: Vysoké učení technické*, 1993. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0514-7.
- [12] PAVLIK, Z., POKORNY J., PAVLIKOVA M., ZEMANOVA L., ZALESKA M., VYSKVARIL M. a ZIZLAVSKY T. Mortars with Crushed Lava Granulate for Repair of Damp Historical Buildings. *MATERIALS. NOV*, 12(21). ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma12213557
- [13] VYŠKVAŘIL, M, PAVLÍKOVÁ M., ZÁLESKÁ M., PIVÁK A., ŽIŽLAVSKÝ T., ROVNANÍKOVÁ P., BAYER P. a PAVLÍK Z. Non-hydrophobized perlite renders for repair and thermal insulation purposes: Influence of different binders on their properties and durability: Influence of different binders on their properties and durability. *CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS*. 2020. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120617
- [14] KOLTLÍK, P., BLÁHA J., DOUBRAVOVÁ K., HEIDINGSFELD V. a ROVNANÍKOVÁ P. Vápno: Monografie STOP. 2001.
- [15] ROVNANÍKOVÁ, P. a MICHINOVÁ D. *Tradiční vápenné technologie-sborník přednášek*. Národní památkový ústav, územní odborné pracoviště v Ostravě, 2009. ISBN 978-80-85034-50-9.
- [16] Mineral commodity summaries of the Czech Republic 2022: Statistical data to 2021. 2022. Dostupné také z: <http://www.geology.cz/extranet/publikace/online/surovinove-zdroje#>
- [17] HELAN, B. a Klement K. Vápno: výroba a použití. První. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1960.
- [18] MICHINOVÁ, D. Příprava vápenných malt v péči o stavební památky. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2006. Materiálově technologické zásady péče o historické stavby. ISBN 80-867-6981-X.

- [19] ČSN 72 1210: Vápenec- Všeobecná ustanovení. Praha 10-Hostivař: Vydavatelství ÚNM, 1984.
- [20] TĚHNÍK, V., NEČAS R. a KUBÁTOVÁ D. Klasifikace vápenců pro využití v průmyslu. Brno: Výzkumný ústav stavebních hmot a.s.
- [21] PAVLÍKOVÁ, M. a KEPPERT M. Chemie: chemie stavebních materiálů. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04237-3.
- [22] ČSN EN 459-1: Stavební vápno-Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [23] SVOBODA, L., BAŽANTOVÁ L., MYŠKA M., NOVÁK J., TOBOLKA Z., VÁVRA R., VIMMROVÁ A. a VÝBORNÝ J. *Stavební hmoty. 2. přeprac. a dopl. vyd.* Bratislava: Jaga, 2007. ISBN 978-80-8076-057-1.
- [24] MICHONOVÁ, D. Několik poznámek k vápnům s hydraulickými vlastnostmi z pohledu památkového technologa. 2016, 5 s.
- [25] ČSN EN 13055: Pórovité kamenivo. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [26] KOHOUT, J., BARTÁK, K. a TOBEK, A. Zednictví: tradice z pohledu dneška. 8. upr. a dopl. vyd. Praha: Grada, 1998. Stavitel. ISBN 80-716-9653-6.
- [27] Objemová hmotnost materiálů. 2019. Dostupné také z: <https://mzpd.cz/objemova-hmotnost-materialu/>.
- [28] STRINGER, M.E. Separation of pumice from soil mixtures. SOILS AND FOUNDATIONS. Univ Canterbury, Dept Civil & Nat Resources Engn, Christchurch, New Zealand C3 - University of Canterbury FU - QuakeCoRE, a New Zealand Tertiary Education Commission; University of Canterbury, AUG, 59(4), 1073-1084. ISSN 0038-0806. Dostupné z: doi:10.1016/j.sandf.2019.05.004
- [29] KARTHIKA, R.B., VIDYAPRIYA V., SRI K.V.N., BEAULA K.M.G., HARINI R. a SRIRAM M. Experimental study on lightweight concrete using pumice aggregate. 43. SRM Easwari Engn Coll,

Dept Civil Engn, Chennai 600089, Tamil Nadu, India C3 - Easwari Engineering College FU - Department of Civil Engineering, SRM Easwari Engineering College, 2021, , 1606 s. ISSN 2214-7853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.09.762

- [30] Mineral Comodity Summaries 2022. Reston, Virginia: U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey, 2022. ISBN 978-1-4113-4434-1. Dostupné také z: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022.pdf>
- [31] RASHAD, A.M. An Overview of Pumice Stone as a Cementitious Material - the Best Manual for Civil Engineer. SILICON. 2020, 551-572. Dostupné z: doi:10.1007/s12633-020-00469-3
- [32] TAPAN, M. USE OF PUMICE AND SCORIA AGGREGATES FOR CONTROLLING ALKALI SILICA REACTION. PHYSICOCHEMICAL PROBLEMS OF MINERAL PROCESSING. Yuzuncu Yil Univ, Nat Resources Van Lake Basin Res & Applicat Ctr, TR-65080 Van, Turkey C3 - Yuzuncu Yil University PU - OFICYNA WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ, 2014, 50(2), 467-475. ISSN 1643-1049. Dostupné z: doi:10.5277/ppmp140204
- [33] DEGIRMENCI, N. a YILMAZ A. Use of pumice fine aggregate as an alternative to standard sand in production of lightweight cement mortar. *Ndian Journal of Engineering & Materials Sciences*. Engineering and Architecture Faculty, Balikesir University, Cagis Campus 10145, Turkey, 2011, 61-68.
- [34] KABAY, N., KIZILKANAT A.B. a TUFEKCI M.M. Effect of Prewetted Pumice Aggregate Addition on Concrete Properties under Different Curing Conditions. *PERIODICA POLYTECHNICA-CIVIL ENGINEERING*. Yildiz Tech Univ, Dept Civil Engn, Istanbul, Turkey C3 - Yildiz Technical University PU - BUDAPEST UNIV TECHNOLOGY ECONOMICS, 2016, 60(1), 89-95. ISSN 0553-6626. Dostupné z: doi:10.3311/PPci.7767
- [35] SVOBODA, L. Stavební Hmoty. Praha, 2018.
- [36] ČSN 73 0540-4: Tepelná ochrana budov- Část 3: Návrhové hodnoty veličin. Praha: Český normalizační institut, 2005.

- [37] PAVLÍK, Z., PAVLÍKOVÁ M., ZÁLESKÁ M., VYŠKVAŘIL M. a ŽIŽLAVSKÝ T. Lightweight thermal efficient repair mortars with expanded glass (EG) for repairing historical buildings: The effect of binder type and EG aggregate dosage on their performance: The effect of binder type and EG aggregate dosage on their performance. *ENERGY AND BUILDINGS*. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2022.112526
- [38] ČSN EN 196-6: Metody zkoušení cementu-Část 6: Stanovení jemnosti mletí. Česká agentura pro standardizaci, 2019.
- [39] ČSN EN 933-2: Zkoušení geometrických vlastností kameniva-Část 2: Stanovení zrnitosti-Zkušební síta, jmenovité velikosti otvorů. Česká agentura pro standardizaci, 2021.
- [40] CALCIDUR NHL 3,5 Otterbein: Technický list. Großenlüder, 2016. Dostupné také z: https://cornishlime.co.uk/wp-content/uploads/2020/06/CALCIDUR-NHL-35___2016-07-12_en.pdf
- [41] ČSN EN 1097-3: Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva-Část 3: Stanovení sypané hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1999.
- [42] ČSN EN 1015-3: Zkušební metody malt pro zdivo-Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku). Praha: ČSN EN 1015-6: Zkušební metody malt pro zdivo-Část 6: Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty, 2000.
- [43] ČSN EN 1015-6: Zkušební metody malt pro zdivo-Část 6: Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1999.
- [44] ČSN EN 1015-11: Zkušební metody malt pro zdivo-Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku. Česká agentura pro standardizaci, 2020.

- [45] ČSN EN ISO 12572: Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků-Stanovení vlastností prostupu vodní páry-Misková metoda. Česká agentura pro standardizaci, 2018.
- [46] ČSN EN 1015-18: Zkušební metody malt pro zdivo-Část 18: Stanovení koeficientu kapilární absorpce vody v zatvrdlé maltě. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [47] TANG, L. a NILSSON L.O. Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pasters and mortars: Cement and Concrete Research 23. 1993.

Seznam obrázků

| | | |
|---------|---|----|
| Obr. 1 | Zdroje vápence a dalších cementářských surovin na území ČR | 8 |
| Obr. 2 | Schéma cyklu uhličitanu vápenatého | 13 |
| Obr. 3 | Struktura historické malty. a) vápenec, b) cihla, c) ulita, d) sklářský stěp, e) úlomek horniny | 15 |
| Obr. 4 | a) přírodní a b) expandovaný perlit | 18 |
| Obr. 5 | Zobrazení světové produkce pemzy | 20 |
| Obr. 6 | a) Spektrometr EDXRF, b) Pyknometr ATC TFS | 23 |
| Obr. 7 | Stanovení velikosti zrn pomocí a) laserového analyzátoru a b) prosévací metody | 24 |
| Obr. 8 | Křivka zrnitosti vápenných pojiv | 26 |
| Obr. 9 | Frakce křemičitého písku | 26 |
| Obr. 10 | Přírodní pemza frakce 0-2 mm | 27 |
| Obr. 11 | Mikroskopické snímky pemzy se zvětšením a) 200x a b) 1000x | 27 |
| Obr. 12 | Křivka zrnitosti pro křemenný písek a přírodní pemzu . | 28 |
| Obr. 13 | Vyrobené vzorky | 31 |
| Obr. 14 | Vzorky po řezání | 31 |
| Obr. 15 | a) Měření Archimédovy nasákavosti a b) uspořádání vakuové nasákavosti | 35 |
| Obr. 16 | Srovnání otevřené pórovitosti zhotovených vzorků | 37 |
| Obr. 17 | Zatěžovací schéma pevnosti v tahu za ohybu | 38 |
| Obr. 18 | Misková sestava v klimatické komoře | 43 |
| Obr. 19 | Závislost kapilárního obsahu nasycené vlhkosti na náhradě plniva | 46 |
| Obr. 20 | Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na relativní vlhkosti okolí | 48 |

| | | |
|---------|---|----|
| Obr. 21 | Závislost měrné tepelné kapacity na obsahu vlhkosti v materiálu | 50 |
| Obr. 22 | Závislost součinitele tepelné vodivosti na vlhkosti materiálu | 51 |
| Obr. 23 | Sorpční izotermy | 52 |
| Obr. 24 | a) Chloridové a b) Síranové vazebné izotermy | 54 |
| Obr. 25 | a) Roztok Cl^- 1% koncentrace a b) 1,2% koncentrace . | 55 |
| Obr. 26 | Roztok SO_4^{2-} 1% koncentrace | 56 |
| Obr. 27 | Roztok SO_4^{2-} 1,2% koncentrace | 57 |

Seznam tabulek

| | | |
|---------|--|----|
| Tab. 1 | Rozdělení vápenných surovin | 9 |
| Tab. 2 | Druhy bílých vápen | 11 |
| Tab. 3 | Druhy přirozeně hydraulických vápen | 14 |
| Tab. 4 | Základní vlastnosti vápenných pojiv | 25 |
| Tab. 5 | Základní vlastnosti použitých plniv | 28 |
| Tab. 6 | Složení vstupních surovin v oxidické formě | 29 |
| Tab. 7 | Receptura směsí se vzdušným vápnem CL 90-S | 30 |
| Tab. 8 | Receptura směsí s přírodním hydraulickým vápnem ... | 30 |
| Tab. 9 | Souhrnné nejistoty měření jednotlivých parametrů ... | 32 |
| Tab. 10 | Metodika | 33 |
| Tab. 11 | Základní materiálové vlastnosti | 36 |
| Tab. 12 | Pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku | 39 |
| Tab. 13 | Výsledky Dry Cup metody | 43 |
| Tab. 14 | Výsledky Wet Cup metody | 44 |
| Tab. 15 | Vlhkostní parametry | 46 |
| Tab. 16 | Měrná tepelná vodivost | 49 |
| Tab. 17 | Měrná tepelná kapacita | 50 |