

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
Fakulta stavební

Katedra materiálového inženýrství a chemie



POUŽITÍ CIHELNÉHO OBRUSU  
V OMÍTKOVÝCH SMĚSÍCH

Disertační práce

Praha, 2017

Ing. Monika Čáchová

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracovala samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího doc. Ing. Martina Kepperta, Ph.D. a doc. Ing. Evy Vejmelkové, Ph.D.

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

.....

podpis

Tímto bych chtěla velice poděkovat doc. Ing. Evě Vejmelkové, Ph.D. za její odbornou pomoc, gramatickou úpravu a především za psychickou podporu. Dále bych chtěla poděkovat svému vedoucímu práce doc. Ing. Martinu Keppertovi, Ph.D. za odborné vedení a to především po chemické stránce. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat za pomoc Ing. Magdaléně Doleželové a Ing. Lence Scheinherrové při měření na přístrojích, které jsou v jejich kompetenci. A na závěr bych chtěla poděkovat svým přátelům (i nepřátelům) a hlavně rodičům, díky kterým jsem se dostala tam, kde jsem.

Použití cihelného obrusu v omítkových  
směsích

Use of Brick Powder in Plaster Mixtures

## **Anotace:**

Cílem této práce je najít vhodné složení omítkové směsi, kde jako další složky vystupují vápenný hydrát a křemičité kamenivo, a současně nalézt perspektivní využití odpadních látek. Recyklovaný jemný cihelný prach se jeví jako vhodná příměs vápenného nebo cementového pojiva v omítkových směsích. Tento odpadní materiál vykazuje dobré pucolánové vlastnosti a aktivně se účastní vznikajících vazeb ve struktuře vyvíjených materiálů. Jemný cihelný prach pochází z výroby tepelně izolačních cihelných bloků. Přínos by tedy měl být nejen ekonomický, ale především ekologický, což je v dnešní době velmi podstatným kritériem. V této práci jsou uvedeny výsledky naměřených materiálových parametrů omítkových směsí s různou procentuální náhradou pojiva (vápenný hydrát) a zároveň plniva (křemičitý písek) jemným keramickým prachem. Konkrétně se jedná o základní fyzikální vlastnosti (vakuová nasákavost a héliová pyknometrie), charakteristiku pórového systému (rtuťová porozimetrie), mechanické vlastnosti, transport kapalné vody a transport vodní páry. Všechny tyto parametry byly zkoumány z hlediska časové závislosti. Také byly podrobněji studovány použité vstupní suroviny. Blíže byly zkoumány pasty, které obsahují pouze vápenný hydrát a cihelný obrus. Na pastách bylo zkoumáno především chování pucolánu, a to pomocí vybraných experimentů. Jedná se o charakteristiku pórového systému, mechanické vlastnosti a termickou analýzu (TG/DSC).

**Klíčová slova:** *vápno, pucolán, cihelný prach, omítka, materiálové charakteristiky*

## **Abstract:**

The main aim of this dissertation is to find progressive composition of plaster mixture consisting of lime hydrate, siliceous aggregates and waste material admixture. Recycled finely ground brick powder appears to be a suitable material for lime or cement plasters. It exhibits good pozzolanic characteristics and actively participates in creation of bonds within the materials' structure. The brick dust primarily comes from the production of a thermal insulating brick blocks. Therefore, not just economic benefit but also ecological would be achieved. In this dissertation, material parameters of plaster mixtures with different dosage of binder (lime hydrate) and filler (siliceous sand) partially substituted by the ceramic dust are experimentally determined and presented. Namely, basic physical properties represented by the vacuum saturation and helium pycnometry method, characteristics of the porous system by mercury porosimetry, mechanical properties, transport of the liquid water and transport of the water vapor and thermal properties. All the presented parameters were studied in proposed time horizon with emphasis on close examination of used raw materials. Pastes containing only lime hydrate and brick powder were researched in more detail. The influence of the pozzolana on the pastes' characteristics was studied using the selected experimental measurements, namely characteristics of the pore system, mechanical properties and thermal analysis (TG/DSC).

**Keywords:** *lime, pozzolana, brick powder, plaster, material characteristics*

## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Přehled současného stavu oboru</b> .....	<b>7</b>
2.1	Historické a restaurátorské omítky.....	7
2.2	Výzkum vápenných past s pucolánovým materiálem.....	9
2.3	Vápenné omítky s pucolánovou příměsí.....	13
<b>3</b>	<b>Technologický vývoj vápenných omítek</b> .....	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>Pucolány</b> .....	<b>21</b>
4.1	Přírodní pucolány.....	22
4.1.1	Vulkanické horniny.....	22
4.1.2	Sedimentární horniny.....	24
4.2	Technogenní pucolány.....	25
4.2.1	Metakaolín.....	26
4.2.2	Jemně mletý cihelný střep.....	27
4.2.3	Popílky.....	27
4.2.4	Mikrosilika.....	29
<b>5</b>	<b>Pucolánová aktivita</b> .....	<b>30</b>
5.1	Metodika stanovení pucolánové aktivity.....	30
5.1.1	Přímé metody pro stanovení pucolánové aktivity.....	31
5.1.2	Nepřímé metody pro stanovení pucolánové aktivity.....	31
<b>6</b>	<b>Popis experimentálních metod</b> .....	<b>33</b>
6.1	Reologické vlastnosti.....	33
6.2	Základní fyzikální vlastnosti.....	33
6.3	Charakteristika pórového systému.....	34
6.4	Termická analýza – Termogravimetrie/Diferenční skenovací kalorimetrie (TG/DSC).....	36
6.4.1	Vyhodnocení termogravimetrického měření.....	37
6.5	Mechanické vlastnosti.....	40
6.5.1	Pevnost v tahu za ohybu.....	40
6.5.2	Pevnost v tlaku.....	40
6.6	Vlhkostní vlastnosti.....	41
6.6.1	Transport vodní páry.....	41
6.6.2	Transport kapalně vody.....	43
6.7	Tepelné vlastnosti.....	43
<b>7</b>	<b>Charakteristika vstupních surovin</b> .....	<b>45</b>
7.1	Vápenný hydrát.....	45

7.2	Křemičité kamenivo .....	47
7.3	Cihelný prach .....	47
<b>8</b>	<b>Optimalizace vápenno-pucolánové směsi.....</b>	<b>52</b>
8.1	Náhrada pojiva .....	52
8.2	Náhrada plniva .....	57
8.3	Náhrada pojiva i plniva .....	62
<b>9</b>	<b>Výsledná zkoumaná směs .....</b>	<b>67</b>
9.1	Složení vápenatých past .....	67
9.2	Navržení omítkových směsí .....	68
<b>10</b>	<b>Výsledky a diskuze studovaných past.....</b>	<b>70</b>
10.1	Charakteristika pórového systému .....	70
10.2	Mechanické vlastnosti .....	76
10.3	Diferenční skenovací kalorimetrie – TG/DSC .....	78
10.3.1	Vyhodnocení termogravimetrického měření.....	85
<b>11</b>	<b>Výsledky a diskuze o výsledných omítkových směsích .....</b>	<b>91</b>
11.1	Základní fyzikální vlastnosti .....	91
11.2	Charakteristika pórového systému .....	94
11.3	Mechanické vlastnosti .....	100
11.4	Vlhkostní vlastnosti.....	101
11.4.1	Transport vodní páry .....	101
11.4.2	Transport kapalně vody .....	104
11.5	Tepelné vlastnosti.....	106
<b>12</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>108</b>



## Seznam použitých symbolů

$c_p$	[J m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> ]	objemová tepelná kapacita
$\kappa$	[m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	součinitel vlhkostní vodivosti
$\lambda$	[W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	součinitel tepelné vodivosti
$\mu$	[-]	faktor difúzního odporu
$d_p$	[m]	průměr pórů
$R$	[J K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup> ]	univerzální plynová konstanta
$\rho$	[kg m <sup>-3</sup> ]	objemová hmotnost materiálu
$\rho_{mat}$	[kg m <sup>-3</sup> ]	hustota pevné matrice
$\rho_l$	[kg m <sup>-3</sup> ]	hustota kapalné vody
$t$	[s]	čas
$T$	[K, °C]	teplota
$\psi_0$	[%]	pórovitost
$m_d$	[kg]	hmotnost materiálu v suchém stavu
$m_w$	[kg]	hmotnost materiálu v nasyceném stavu
$m_a$	[kg]	Archimédova hmotnost
$V$	[m <sup>3</sup> ]	objem
$\gamma$	[mN m <sup>-1</sup> ]	povrchové napětí
$p$	[Pa]	tlak
$\theta$	[°]	kontaktní úhel
$maxM$	[Nm]	maximální moment
$F$	[N]	síla
$W$	[m <sup>3</sup> ]	průřezový modul
$f_f$	[Pa]	výsledná síla
$f_c$	[Pa]	pevnost v tlaku
$A$	[m <sup>2</sup> ]	průřezová plocha
$\delta$	[s]	součinitel difúzní propustnosti vodní páry
$\Delta m$	[kg]	množství páry procházející materiálem
$d$	[m]	tloušťka
$S$	[m <sup>2</sup> ]	plocha
$\Delta p_p$	[Pa]	rozdíl parciálních tlaků nad a pod vzorkem
$D$	[m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	součinitel difúze vodní páry

$D_{vzduch}$	$[m^2 s^{-1}]$	součinitel difúze vodní páry ve vzduchu
$M$	$[kg mol^{-1}]$	molární hmotnost
$A$	$[kg m^{-2} s^{-1/2}]$	vlhkostní absorpční koeficient
$I$	$[kg m^{-2}]$	kumulativní obsah vlhkosti
$w_{sat}$	$[kg m^{-3}]$	obsah nasycené vlhkosti
$a$	$[m^2 s^{-1}]$	teplotní vodivost
$m$	$[kg]$	hmotnost
$l$	$[m]$	vzdálenost
$V_p$	$[cm^3 g^{-1}]$	objem pórů
$w$	$[% m^3 m^{-3}]$	hmotnostní vlhkost
$c$	$[J kg^{-1} K^{-1}]$	měrná tepelná kapacita
$m_0$	$[%]$	relativní změna hmotnosti
$q$	$[W g^{-1}]$	tepelný tok
$\alpha$	$[-]$	stupeň přeměny látky
$N$	$[-]$	řád reakce
$k$	$[-]$	rychlostní konstanta reakce
$n_i^0$	$[mol]$	počáteční látkové množství ve směsi v nulovém čase
$n_i$	$[mol]$	látkové množství ve směsi v čase $t$
$\Delta m_1$ a $\Delta m_2$	$[%]$	úbytek hmotnosti

# 1 Úvod

Omítky jsou součástí úprav povrchů ve stavebnictví již od jeho počátku. Lze je definovat jako vrchní krycí vrstvu jakékoliv části konstrukce, která má především funkci konstrukční, ochranou a v neposlední řadě i funkci estetickou. Historie a vývoj omítek jsou komplikované a nelze je přesně zařadit do architektonických slohů.

Již 7500 let př. n. l. bylo vápno s nepáleným drceným vápencem používáno k ochranným nátěrům v okolí ohnišť [1]. Postupem času se omítky vylepšovaly. Vlastní poznatky se dědily z otce na syna. Každý řemeslník si během své praxe vytvářel i svůj vlastní styl, a toto je jeden z důvodů, proč není jednoduché je jednoznačně zařadit do slohových etap [1, 2]. První zmínky o použití vápna na území České republiky jsou doloženy nalezením pecí na vypalování vápna již z doby kamenné. V 9. století bylo vápno převážně používáno při výstavbách církevních budov [3].

Využití tradičních vápenných pojiv s pucolánově aktivními látkami je deklarováno již od roku 30 př. n. l. Nicméně nová doba s sebou přináší i v této oblasti nové poznatky, které prochází přirozeným vývojem nejen v použití surovin, ale i technologií výroby. Trendem je i znovuobjevení a definování surovin, které byly aplikovány již v minulosti a vyznačovaly se pozitivními účinky při jejich aplikaci. Současný výzkum klade značný důraz na studii kombinací vápna (popř. cementu) a reaktivně minerálních příměsí (pucolánů), jelikož je dokázán významný vliv na průběh reakcí a na výsledný pojivový systém [4].

První zmínky o působení vápna s obsahem sopečného popela či rozdrcených cihel jsou datovány již do období starověku. Poznatku, že taková směs tuhne a tvrdne pod vodou, hojně využívali Řekové, Féničané a hlavně Římané. Ve středověku se bohužel na tuto zkušenost zapomnělo. Až v 18. století byla vydána brožura od Loriga, který popisoval přípravu malty s použitím jemně mleté cihly [5].

Hlavním trendem v současném materiálovém inženýrství je zlepšit vlastnosti tradičních stavebních materiálů, a to s ohledem na životní prostředí a ekonomický dopad. Hlavní snahou je především snížení emisí CO<sub>2</sub>, které se při výrobě vápna nebo cementu uvolňují do ovzduší ve velkém množství [6]. Z tohoto důvodu se jeví jako vhodné alespoň částečně nahradit tato tradiční stavební pojiva vhodnými příměsími. Ideálně se tedy nabízí využití odpadů vznikajících při průmyslové výrobě a vykazujících charakteristiky reaktivních minerálních příměsí. Látek, které druhotně vznikají, je celá řada, např. se jedná o různé popely ze spalování, silikátové odpady, cihelné obrusy atd. [1].

Rozsáhlejší výzkum podporující vývoj omítkových směsí s obsahem pucolánové látky podněcují také památkáři a restaurátoři, kteří požadují při rekonstrukcích historicky významných budov vlastnosti materiálů, vycházející z původního řešení a dodržování původních technologických postupů při jejich aplikaci. Z historického vývoje není zpravidla možné využít cement (aktivně využíván až v první polovině 19. století) pro rekonstrukce, a proto je využíváno vápno s pucolánovými příměsemi. Při výzkumu historických omítek bylo zjištěno, že reaktivní minerální příměsi zvyšují trvanlivost a zlepšují i další vlastnosti těchto materiálů [7, 8].

Hlavními tématy této studie je výzkum materiálových charakteristik vstupních surovin, návrh optimální omítkové směsi, výzkum vápenných past a kombinace klasické vápenné omítky s recyklovaným materiálem – cihelným obrusem. Využitý cihelný prach je druhotný produkt vznikající při výrobě a kalibraci tepelně izolačních cihelných bloků. Jako velmi pozitivní se jeví i fakt, že samotný cihelný obrus vykazuje zastoupení pucolánově aktivních částic. Tato skutečnost podporuje vznik lepších pojivových vazeb, jelikož pucolánově aktivní částice reagují za přítomnosti hydroxidu vápenatého. Pro charakterizaci a lepší porozumění vnitřního vývoje vazeb a reakcí hydroxidu vápenatého s pucolánem byly zkoumány i pasty s různým procentuálním zastoupením hlavních složek. Podrobněji byly zkoumány: charakteristika pórového systému, mechanické vlastnosti a průběh reakcí pomocí termické analýzy.

Logickým navazujícím tématem této práce je také studium vlastností tradiční vápenné omítky s různým procentuálním zastoupením cihelného obrusu. Na omítkách byly měřeny: reologické vlastnosti čerstvých omítkových směsí, základní fyzikální vlastnosti, charakteristika pórového systému, mechanické vlastnosti, transport kapalné vlhkosti a transport vodní páry, tepelné vlastnosti. Vlastnosti studovaných past i omítek byly především studovány v časové závislosti. Cílem této části práce bylo především zjistit, jaký vliv má množství pucolánu na zkoumané vlastnosti, jaká je vhodná procentuální náhrada cihelného obrusu za vápenný hydrát, a to i v delším časovém horizontu [9].

## 2 Přehled současného stavu oboru

### 2.1 Historické a restaurátorské omítky

Jedním z nejčastějších pohledů na výzkum omítkových směsí je historický neboli restaurátorský. Prvotní myšlenka mnoha vědců se týká především úvahy nad historickými budovami a jejich trvanlivostí. Ugurlu a Boke [10] zkoumali z historického hlediska cihelné omítky, které se vyskytovaly ve vlhkém a teplém prostředí (v lázních). Tyto omítky se používaly například v akvaduktech či v podobném vlhkém prostředí. Výsledky ukázaly, že omítka neztratila svou pevnost ani přilnavost k povrchu, díky svým hydraulickým vlastnostem. Dalším příkladem je Maravelaki-Kalaitzaki a kolektiv [11], kteří zkoumali malty na Krétě a posuzovali jejich trvanlivost proti vlhkému a mořskému prostředí. Různé omítky rozdělili do čtyř sekcí: klasická vápna, hydraulická vápna, vápna s umělými pucolány a vápna s přírodními pucolány. Podrobně zjistili složení jednotlivých malt. Doporučení pro rekonstrukci historických malt bylo: využití technologií a surovin, které byly použity při přípravě v historii, neboť by se neslučovaly s novým materiálem. Oba tyto týmy poukazují na fakt, že malty obsahující pucolánové materiály, mají dobrou vlhkostní odolnost.

Isikdag a Topcu [12] nahlíželi na zmíněnou problematiku trochu jinak. Na základě historických nálezů se snažili přiblížit a vylepšit původní složení. Omítka se skládala z různých poměrů vápna, hrubě i jemně nadrcených dlaždic, vysokopecní strusky a vody. Struska byla přidávána za účelem vylepšení fyzikálních a hlavně mechanických parametrů. Dlaždice ve výsledku bohužel vykazovaly nízkou pucolánovou aktivitu a dle očekávání se vlivem vysokopecní strusky zlepšily fyzikální a mechanické vlastnosti materiálu.

Podobně se nechali inspirovat Budak a kolektiv [13]. Ti začali zkoumat vápenné omítky ve dvou historických budovách. Studovali jejich vlastnosti například pomocí XRD, SEM a TGA analýzy. Výsledné hodnoty ukázaly, že materiál vykazoval hydraulické vlastnosti díky použití pucolánových materiálů. Tento tým následně vytvořil čtyři vzorky jílu pocházejících z Turecka. Tyto jíly byly zahřívány na různé teploty (400, 450, 500, 550, 600, 800 a 1200 °C). Výsledné hodnoty ukázaly, že nejvhodnější pro pucolánové kamenivo by byl jíl, který byl zahříván na teplotu 500 °C a 700 °C. Tyto teorie potvrdily i mechanickými zkouškami malty, která obsahovala pucolánové agregáty, které byly vypálené na 600 °C. Tyto malty vykazovaly pevnost v tlaku až 5 MPa.

Vyšší procento vědců uvažovalo nad myšlenkou, že by nahradili nebo vymysleli novou omítkovou směs, která by byla vhodná pro restaurátorské účely. Tato malta by však měla mít

stejně nebo lepší vlastnosti než historická malta, ovšem využívala by novějších materiálů. Vejmelková a kolektiv [14] se zabývali rozsáhlým výzkumem týkajícího se omítek, které obsahovaly metalupkek. Tyto omítky by měly být ve výsledku vhodné pro restaurátorské práce historických budov. V prvním článku se soustředili na výzkum mechanických, vlhkostních, tepelných i základních vlastností a porovnávali různé poměry metalupku (metakaolínu) ve vápenné omítce. V porovnání s referenčním vzorkem (čistou vápennou omítkou) zjistili, že mechanické vlastnosti omítek s metalupkem (metakaolínem) jsou lepší. A jejich cena je minimálně stejná nebo nižší, než u klasických omítek, které jsou používány pro restaurátorské práce. Vlhkostní vlastnosti byly podobné nebo o něco lepší než u samotné vápenné omítky, a opět cena nepřevyšovala náklady u používaných omítek pro rekonstrukce. V druhém článku studovali ještě podrobněji vlastnosti na omítkách s rozdílným procentuálním zastoupením metalupku a snažili se najít omítku, která by měla nejlepší výsledné hodnoty. Po porovnání zjistili, že byla pevnost zvýšena více než 3krát oproti referenční omítce. Dále porovnali součinitel vlhkostní vodivosti, který poklesl o 25 %, a absorpční koeficient, který byl snížen o 20 %. V závěru článku bylo uvedeno možné zlepšení vlhkostních vlastností při použití hydrofobizační příměsi. Naměřené výsledky ukázaly, že omítky s metakaolínem by mohly být možnou náhradou stávajících konkurenčních omítek, které se běžně používají pro rekonstrukce historických budov [15].

Je dost časté využívat pucolánových materiálů, které vytvářejí v kombinaci s vápenným hydrátem kvalitní vazby, a následně se hledá ta nejlepší varianta. Černý a kolektiv [16] porovnávali vlastnosti vápenných malt, do kterých přidávali tři různé druhy pucolánů (metakaolín, rozemletou cihlu a rozemleté sklo). Závěrem tohoto článku bylo, že jsou tyto pucolánové omítky vhodné pro rekonstrukci historických budov. Při porovnání s referenční čistou vápennou omítkou se výrazně zlepšily mechanické vlastnosti, tepelné a vlhkostní vlastnosti vykazovaly podobné nebo o něco málo lepší výsledky. Jediným nepříznivým výsledným parametrem byla vlhkostní roztažnost, která by mohla být zastavena dalším vývojem mechanických charakteristik.

Vejmelková a kolektiv [17] studovali v dalším článku několik druhů komerčních jádrových omítek. Zaměřili se především na mechanické, vlhkostní a tepelné vlastnosti a na životnost takovýchto omítek. Všechny zkoumané komerční omítky dosahovaly vysokých mechanických charakteristik – pevnost v tlaku a tahu za ohybu. Naměřené výsledky ukázaly, že pouze jediný typ komerčních omítek není vhodný pro restaurátorství či podobné opravy, jelikož vykazoval mnohem horších výsledků v odolnosti proti mrazu a v karbonataci.

Pro restaurátory je důležité umět i správně diagnostikovat určité vlastnosti na historických budovách. Někteří se proto stále snaží vylepšovat a zpřesnit standartní zkoušky. Toniolo a kolektiv [18] zkoušeli navrhnout vylepšení pro zkoušku tahu za ohybu. Zabývali se opravami na historických budovách a především rekonstrukcemi omítek. Jejich snahou bylo dosáhnout co možná nejlepší soudržnosti s podkladem. Proto začali zkoumat, zda nebude lepší pro omítky, které jsou určeny na rekonstrukce, používat zkoušku čtyřbodovým ohybem. Čtyřbodový ohyb byl studován na třech komerčních omítkách. Zkouška se ukázala být jako vhodná možnost vyhodnocovat mechanické vlastnosti omítek, které jsou určeny pro opravy historických objektů.

U většiny takto nově navržených omítkových směsí jsou zkoumány především mechanické vlastnosti [11-18]. Z historického hlediska se jedná například o: průzkum omítek používaných ve starých lázních nebo i v jiném vlhkém prostředí [10, 11], porovnání komerčních omítek určených pro restaurátorské práce [17-18] nebo výzkum nově navržených typů omítek vyhrazených pro rekonstrukce historických objektů [13-16]. Při vývoji nových omítkových směsí, které lze využít pro restaurátorské účely, je většina studií zaměřena na využití pucolánových příměsí [11-16].

## **2.2 Výzkum vápenných past s pucolánovým materiálem**

Velice důležité pro výzkum je nejprve pochopit vznikající vazby a chemické reakce mezi základními surovinami. Kombinace vápenného hydrátu a pucolánového materiálu se potvrdila i z historického hlediska (viz. Kapitola 2.1) a je tedy významné na počátku výzkumu určit míru pucolánové aktivity. Každá látka s pucolánovým předpokladem vždy nemusí být vhodná pro budoucí použití v omítkové směsi z důvodu nedostatečné reaktivity mezi jednotlivými vstupními surovinami. To ve svém článku zjistili Matias a kolektiv [19]. Tento tým studoval vápenné omítky obsahující odpadní keramiku. Použili vápenný hydrát CL 90 S a sedm různých druhů keramického odpadu. Pouze některé zkoumané materiály vykazovaly dostatečnou pucolanitu, a proto byly jen některé vzorky vhodné pro další vývoj malt. Závěrem byla shrnuta důležitost výběru správné pucolánové odpadní složky z hlediska dostatečné pucolánové aktivity. Hodnoty mechanických charakteristik vybraných materiálů s dobrými pucolánovými vlastnostmi narůstaly.

Většina vědců studující pucolánové materiály nejdříve experimentuje s jednotlivými vstupními surovinami a již z počátku hledají charakteristiky, které ovlivňují reakci s vápnem.

Takto se například podrobnému studiu věnoval Matias [19], ten také nejdříve studoval reaktivnost samotného cihelného prachu.

Walker a Pavía [20] také zjišťovali například velikost částic, měrný povrch, chemické a materiálové složení na jednotlivých použitých pucolánech. Pasty byly vyrobeny z hydroxidu vápenatého (CL 90 S) a sedmi různých pucolánových materiálů. Zkoumanými pucolány byly: popílek, lupek, mikrosilika, popílek z rýžových slupek, cihelný prach a prach z dlaždic či vysokopecní struska. Prokázali, že měrný povrch pucolánu ovlivňuje spotřebu vody: spotřeba vody se snižuje s rostoucím měrným povrchem. Také zjistili, že při nahrazení vápna pucolánem dochází ke snížení spotřeby vody. Chemické a mechanické zkoušky dokázaly, že amorfni pucolány jsou nejaktivnější – mikrosilika, lupek, popílek z rýžových slupek a struska. Shledali, že hlavním faktorem pro určení pucolánové aktivity je spíše amorfni fáze než obsah  $\text{SiO}_2$  či měrný povrch.

Existuje velké množství metod, které určují pucolánovou aktivitu látek. Dělí se na metody přímé a některé nepřímé. Jednou z nejznámějších přímých metod je tzv. Frattiniho test nebo Chappelleho zkouška. Porovnání metod pro určení pucolánové aktivity zkoušeli Donatello a kolektiv [21] na různých pucolánových materiálech. Použili například metakaolín, křemičitý úlet, popílek, popílky z kalů atd. Pro určení pucolánové aktivity zkoušeli mechanické vlastnosti, Frattiniho test a test s nasyceným vápnem. Korelace mezi vápnem a pucolánem ovlivňuje jejich samotný poměr. Doporučují další studium, které by mělo objasnit, zda při použití superplastifikátoru dojde ke konstantní spotřebě vody. Závěrem uvedli, že nejreaktivnějším pucolánem byl křemičitý úlet a struska, a to v jednodenním testu. Po 7 dnech vykazovaly nejvyšší aktivity opět metakaolín, křemičitý úlet, prach z kalů a popílek. Dalším závěrem také bylo, že sedm dní je příliš dlouhá doba na určení a rozlišení pucolánové aktivity pomocí testu, ve kterém dochází k nasycení vápna. Jejich dalším poznatkem bylo, že výsledky z Frattiniho testu a z mechanických zkoušek se velice dobře doplňují. Test využívající princip nasyceného vápna má nedostatky, a proto doporučují spíše předchozí kombinaci experimentů.

Tuto kombinaci zkoušek zkoušeli i Navrátilová a Rovnaníková [22]. Studovaly především pucolánovou aktivitu a navíc na těchto cihelných omítkách posuzovaly pevnostní charakteristiky. Posuzovaly tři různé cihelné prachy, které by se daly použít jako náhrada ve vápenných pastách/maltách (ve 20 % a 40 %). Závěrem jejich práce bylo, že všechny prezentované cihelné prachy jsou vhodné k náhradě vápenného hydrátu v omítkových směsích.

Další výzkumy poukazují na snahu vylepšit stávající metody určující pucolánové aktivity a dosáhnout tak přesnějších výsledků. Tashima a kolektiv [23] navrhli novou metodu pro



stanovení pucolánové aktivity pomocí měření pH a elektrické vodivosti. Tato metoda se zkoušela při třech různých teplotách (40, 50 a 60 °C). Vápno bylo studováno ve stavu nasycené suspenze. Jako pucolány byly využity dva popílky z rýžových slupek a dva typy zhuštěných křemičitých výparů. Stanovili tři úrovně reaktivity – vysoká, střední a nízká. Pro amorfni rýžové slupky stanovili vysokou úroveň, krystalické rýžové slupky měly nízkou úroveň pucolanity a křemičité prášky dosahovaly nízké a střední reaktivity.

Aubert a kolektiv [24] také vyvinuli metodu, která určuje množství vápna nebo sádry spotřebované po přidání minerálních příměsí. Referenčním materiálem bylo křemičité plnivo, jelikož se jedná o chemicky známou látku. První příměsí byl přírodní pucolán, který pocházel z francouzského lomu. Druhou příměsí byl prach ze směsi odpadních kalů, který pocházel z papírny a dřevařského průmyslu. Jednotlivé suroviny zkoumali pomocí Blainova přístroje (měrný povrch) a také řešili jejich chemické a mineralogické složení. Pomocí této metody dokázali zjistit množství nezreagovaného vápna nebo sádry ve vytvořených pastách. Přesnost této metody byla poměrně nízká (okolo 5 %), což kolektiv považuje za přijatelné pro tento druh vyhodnocení. U zkoumaných surovin stanovili optimální směsi z chemického hlediska: 80 % přírodního pucolánu, 15 % vápna a 5 % sádry nebo 80 % popílku z kalu a 20 % sádry. Závěrem bylo poukázáno na nutnost potřeby výzkumu s dalšími materiály (popílek, metakaolin apod.) a zjištění interakce se zeminou, která by mohla změnit vývoj chemických reakcí výsledné malty.

Podrobně se dají studovat i hydratační reakce a karbonatace hydraulického vápna nebo samotná směs vápna a pucolánu. Tyto vlastnosti jsou také důležité pro další vývoj omítek. Cizer a kolektiv [25] použili tento pohled výzkumu v systému vápno-pucolán. Určili, že pořadí a stupeň těchto reakcí velice ovlivňuje přítomnost vlhkosti. Při zvýšené vlhkosti je rychlejší hydratační proces a naopak karbonatace se zpomaluje. Pro tento výzkum používali termickou analýzu (DTG). Podrobně zkoumali dva druhy hydraulického vápna, směs vápna a metakaolínů a směs vápna s trasem. Zkoumali i mechanické vlastnosti v časové závislosti (14, 28, 60, 90 a 180 dní). Důležitým závěrem bylo, že pro dostatečný nárůst pevnosti je zapotřebí vlhké prostředí. Dále zjistili, že pokud je pucolán velice reaktivní (metakaolin), pak nemusí docházet k dostatečnému vývoji pevnosti omítek, jelikož dochází k fázovým změnám.

V dnešní době je velmi důležité i využití moderní metodiky k určení pucolánové aktivity a to například pomocí termické analýzy. Toho využil Moropoulou a kolektiv [26]. Tento tým se zabíral určením pucolánové aktivity pomocí termické analýzy malt vyrobených z přírodního i umělého pucolánu. Pro tento výzkum vytvořili pasty z vápna a tří typů pucolánů. Jednalo se o jeden přírodní pucolán (z ostrova Milos v Řecku) a dva umělé

vytvořené pucolány (keramický prach a metakaolín). Konkrétně byla použita difrakční termální analýza a termo-gravimetrická analýza (DTA a TG). Pasty byly studovány i v časové závislosti – 3, 7, 14 a 28 dnů. Závěrem bylo, že stanovení pucolánové aktivity pomocí DTA/TG by mohlo být do budoucna dobrým orientačním faktorem. Metakaolín vykazoval nejvyšší reaktivitu a po 14 dnech byla pasta chemicky stálá. Keramický prach s vápnem byl stálý až po 28 dnech. Pasty z přírodního pucolánu vykazovaly vyšší množství  $\text{Ca(OH)}_2$  než pasty s keramickým prachem. Nejvyšší míru spotřeby  $\text{Ca(OH)}_2$  vykazovaly pasty vápno-metakaolín v poměru 1:2 a vápno-přírodní pucolán v poměru 1:3. Tento tým navrhl, že pasty s keramickým prachem by měly být studovány i po 90 a 180 dnech, a že by metoda DTA/TG byla vhodná v kombinaci s mechanickými pevnostmi a XRD analýzou (1, 3 a 6 měsíců).

Nóbrega de Azeredo a kolektiv [27], Ferraz a kolektiv [28], Gameiro a kolektiv [29] a Nežerka a kolektiv [30] zkoumali různými způsoby metakaolín jako pucolánovou příměs v kombinaci s vápenným hydrátem. Tyto studie většinou porovnávaly metakaolín s dalším pucolánovým materiálem. Nežerka a kolektiv [30] porovnávali cihelný prach a metakaolín. Ferraz a kolektiv [28] porovnávali mezi sebou komerční metakaolín a syntetický zeolit. A Nóbrega a kolektiv [27] studovali, zda není vhodnější pucolánový materiál metakaolín z odpadních kalů než klasický metakaolín. Všem vyšlo, že metakaolín je reaktivnější než ostatní studované materiály, až na Nóbrega, který zjistil, že metakaolín vyrobený z kalů vykazuje vyšší reaktivitu než klasický komerční metakaolín. Všechny tyto pucolánové příměsi jsou šetrné k životnímu prostředí, jelikož se většinou jedná o odpadní nebo druhotný materiál. Ferraz a kolektiv [28] uvedli domněnku, že Chapelleho test není vhodný pro syntetický zeolit. Všechny čtyři výzkumné týmy měly v závěru napsané, že zkoumané směsi mají potenciál k vytvoření kvalitních omítkových směsí. Dokonce Ferraz a kolektiv [28] doporučili tyto malty použít při konzervaci historických objektů.

Velkou snahou v dnešní době je nalézat dobré pucolánové materiály, které navíc budou šetrné k životnímu prostředí a budou ještě k tomu výhodné z ekonomického hlediska. Poslední dobou je proto velká snaha získávat popílek například z rýžových slupek či ze slámy cukrové třtiny, kterých je v určitých částech naší planety přebytek. Příkladem je Juan a kolektiv [31], kteří zkoumali pucolanitu rýžových slupek. Popílek z nich vznikl kalcinací tohoto odpadu. Studovali různé teploty výpalu (670, 700 a 750 °C) i různé doby výpalu (2; 2,5 a 3 hodiny). Z této škály vzorků byly vybrány pouze dva a ty rozebrány. Vytvořené pasty byly zkoumány pomocí XRD, kalorimetrie a TG analýzy. Studovali také charakteristiku pórového systému a pevnost v tlaku v 1, 3, 7 a 28 dnech. Jejich obecný závěr byl, že dobrá

lineární korelace mezi pevnostmi malt a past nastává, pokud jsou silné pojivové vlastnosti mezi pucolánem a vápnem.

Moraes a kolektiv [32] zkoumali, jaké pucolánové vlastnosti bude mít prach vytvořený ze slámy cukrové třtiny. Samotný prach byl zkoumán například pomocí X-ray difrakce, mikroskopie nebo byla zjišťována velikost částic a chemické složení. Na pastách (vápno i cement) použili infračervenou mikroskopii, termickou analýzu i zjišťování mechanických vlastností. Ukázalo se, že tento materiál vykazuje vysokou pucolánovou aktivitu.

### **2.3 Vápenné omítky s pucolánovou příměsí**

Následný výzkum omítek s pucolánovou příměsí je logický. V mnoha výzkumech se jedná o zjišťování materiálových charakteristik a změn vlastností vzhledem k vápenné omítce, která neobsahuje žádné další příměsi. Vejmelková a kolektiv [33] tímto způsobem studovali vápenné omítky s přidáním lupkem. Lupek byl použit ve třech různých variantách, jejich rozdíl byl ve velikosti částic. Studované malty s lupkem vykazovaly vyšší mechanické charakteristiky a lepší mrazuvzdornosti než vápenná omítky. Speciální omítky s lupkem vykazovaly nižší hodnoty absorpčního koeficientu a faktoru difúzního odporu než referenční materiál. Tepelné vlastnosti měly srovnatelné charakteristiky. Závěrem bylo, že po přidání hydrofobní přísady by bylo užitečné rozvinout další výzkum.

Těchto výzkumů je opravdu hodně. Pro tuto práci je však nejdůležitější kombinace vápenného hydrátu a cihelného prachu. Již výše bylo zmíněno pár autorů, kteří se tímto problémem zabývali. Ugurlu a Boke [10] a Maravelaki-Kalaitzaki a kolektiv [11] zkoumali tuto kombinaci materiálů z důvodu, že v minulosti byly tyto omítky použity ve vlhkém a teplém prostředí a stále odolávaly času. Isikdag a Topcu [12] využívali drcené dlaždice, což je také určitý způsob využití keramiky. Černý a kolektiv [16] použili drcený cihelný prach v porovnání s dalšími pucolánovými materiály. Stejně tak to učinili Walker a Pavía [20], ve svém výzkumu vápenných past. Matias a kolektiv [19] podobně jako v této disertační práci zkoumali vliv odpadní keramiky.

Čáchová a kolektiv studovali mnoho způsobů, jak nejlépe zakomponovat cihelný prach do vápenných omítek, aby získali nejlepší materiálové charakteristiky a také, aby využili co možná největší množství odpadního cihelného obrusu. Jelikož se jedná o odpadní materiál, byla by tato částečná výměna vápenného hydrátu velice prospěšná jak z ekologického, tak i z ekonomického hlediska.

V jednom ze svých článků Čáchová a kolektiv [34] zjišťují vlastnosti vápenných omítek při nahrazování pojiva (vápenného hydrátu) cihelným ohrusem a to až do 80 %. Výsledné hodnoty ukázaly, že základní vlastnosti se změnily pouze nepatrně. Přidáváním cihelného prachu do vápenné omítky se zvyšovalo množství menších pórů v materiálu. Mechanické vlastnosti měly konvexní charakteristiku – při nepatrném množství cihelného prachu se mechanické vlastnosti oproti referenčnímu vzorku snížily, ale po přidání vyššího množství cihelného ohrusu materiál nabýval naopak vyšších pevností než referenční materiál. Schopnost transportovat vodní páru a kapalnou vodu či akumulovat vodní páry se při přidávání cihelného prachu do vápenné omítky zvyšuje. Nejlepším tepelným izolantem byla omítka s nejvyšším množstvím cihelného ohrusu. Tedy čím větší množství cihelného prachu bylo přidáno, tím lepší vykazoval vzorek tepelně-izolační vlastnosti.

Podobný tým (viz. výše) vytvořil podobné omítky jen s tím rozdílem, že bylo nahrazeno kamenivo cihelným ohrusem (10 %, 30 % a 50 %) a při výrobě dohlíželi na stejný rozliv čerstvých omítkových směsí. Výsledky ukázaly, že se zvyšuje otevřená pórovitost a hustota matrice, pokud se zvyšuje množství obsahu cihelného prachu v omítce. Mechanické vlastnosti se zlepšují po přidání odpadní příměsi a schopnost transportovat vodní páru nebo kapalnou vlhkost se snižuje. A podobně jako v předchozím článku se tepelné vlastnosti zlepšují po přidání cihelného ohrusu do vápenných omítek [35].

Totožný tým zkoumal ještě jeden podobný typ cihelných omítek [36]. Tentokrát bylo nahrazováno pojivo (vápenný hydrát) i plnivo (kamenivo) cihelným ohrusem. Při jejich studii nahrazovali 0 % (referenční materiál), 10 %, 30 % a 50 %. V tomto článku se konkrétně prezentovaly základní fyzikální vlastnosti, charakteristika porézního systému a transport vodní páry. Výsledné hodnoty ukázaly, že otevřená pórovitost a hustota matrice roste s narůstajícím množstvím cihelného prachu, zatímco objemová hmotnost mírně klesá. Z distribuční a kumulativní křivky pórů lze zaznamenat rozdílný obsah pórů – s narůstajícím obsahem cihelného ohrusu narůstá i množství menších pórů v materiálu. Hodnoty faktoru difúzního odporu klesají s rostoucím množstvím jemného cihelného prachu [36].

### 3 Technologický vývoj vápenných omítek

První zmínky o použití rozmíchané hlíny s vodou pro výplň proutěných chalup nebo jako spoj těžených kamenů se datují 8 000 let před naším letopočtem. Hliněné malty měly na počátku své historie největší uplatnění u obytných lidových staveb nebo dokonce hrází. Hliněné omítky se na našem území používaly až do první poloviny minulého století i když s určitým pokrokem. Do omítek se přidávaly různě levné a dostupné komponenty, např. zvířecí chlupy, řezanka apod. Nejznámější je nejspíš tzv. vepřovice, která byla hojně využívána na venkově na našem území. V dnešní době lze vidět i celé obydlí, které jsou vyráběny z podobných materiálů. Jedná se o velký trend vracet se zpět do minulosti a lidé využívají hlínu z okolí stavby či dokonce používají historických postupů a technologií při výstavbě.

První použití nátěrů z vápna na stěny na území České republiky se datují již do doby kamenné. V předrománském období se začala používat směs z jílové zeminy, vody a vápna. Vápno se vyrábělo většinou z lokálních surovin. Příkladem je objev u jedné z částí zdiva kostela Panny Marie - skutečná malta z vápna, písku a kamenné drtě, která pocházela z 11. století [1, 2].

Historický výzkum prokázal, že v předrománské a románské době byla výroba vápna velice nestálá a nestejnorodá. Tyto vlastnosti byly udány jak lokální surovinou, tak i odlišnými technologickými postupy při míchání. Dosti často se stávalo, že většina vápence nebyla vůbec dovypálená či samotný poměr mezi vápennou složkou a hlínou byl nestálý a velice rozmanitý. Dalším rozvojem bylo i používání různých typů výztuže, jakým třeba byly zvířecí chlupy. Následně se také pro lepší zpracovatelnost a regulaci tuhnutí vápna začaly používat různé přísady (mléko, pivo, moč, atd.) [1].

V 18. století se objevila na fasádách sgrafitová technika. Tato technika spočívá v nanesení dvou odlišně barevných omítek. První vrstva se proškrabává, aby se objevila i spodní barevná omítka. Ve stejném období se také podařilo staviteli jménem Palladie vyrobit jednosložkové hydraulické vápno (vápenec z okolí Padovy), které obsahovalo velké množství hydraulických složek. Na našem území v 18. století se vyráběla vápna barnická, podolská, zlíchovská a radlická. Nejznámějším bylo vápno, které se vyrábělo v Praze na Malém Městě. Vyváželo se do Anglie a Itálie pod názvem „pasta di Praga“ a obsahovalo velké množství hydraulických složek. Na mnoha pražských historicky významných stavbách bylo využito vápno kufsteinské z Tyrol, které bylo vysoce hydraulické [1].

Francouz M. Lorient vydal brožuru, ve které popisuje na tehdejší dobu nejúčinnější metodu výroby malty. Dále například uvádí složení omítkové směsi, ve které používá jemně mletou cihlu, jemný roztríděný říční písek a správně uložené hašené vápno. Popisuje i další použité složky, například i jemně semletý pálený jíl.

V roce 1780 Dr. B. Higgins vydal knihu s názvem „Experimenty a pozorování zlepšení složení a aplikace vápenných tmelů a příprava vápna“ [1]. Tento muž také získal patent na vodní tmel, který byl určen pro štuky, omítky či jiné účely. Tato směs obsahovala vápno, šterk, jemný písek, jemný kostní popel a vápennou vodu (1:4:3:1:voda) [1].

Postupem času byla velká pozornost věnována přípravě a technologii vápna, a to jak výběru ložiska, tak hašení a odležení vápna. Angličan John A. Smeaton objevil a formuloval vliv příměsí ve vápnu. Zaměřil se především na jílové složky a dokonce dokázal zjistit jejich podíl ve vápenné složce [1].

Na našem území byly nalezeny malty s relativně vysokou pevností, a to díky mnoha faktorům. Jedním byl obsah hliněné složky v používaném vypáleném vápně, tyto složky totiž dodávaly finálnímu vápnu i hydraulické vlastnosti. A druhým faktorem byly použité kvalitní písky, které na našem území vykazovaly obsah jílových minerálů. Tyto omítky s obsahem jílových složek měly velký potenciál, nevýhodou tohoto materiálu byl však vznik trhlinek při vysychání [2].

Vicat měl také velký podíl na dalším historickém vývoji vápna. Nejenže se ho pokoušel vytvořit pomocí pálení umělé směsi z vápence a jílu (datuje se do roku 1818), ale také vytvořil umělé hydraulické vápno, které se skládalo ze směsi křídly a jílových hlín. Také konstatoval, že jemné a měkké jíly jsou to nejlepší pro výrobu hydraulického vápna. Dalším jeho podílem bylo i konstatování a popis písků, které by měly být používány do omítek a malt [1].

Další rozvoj vápna nastal až v druhé polovině 19. století. Především se jednalo o technologii výroby, která se přesunula ke zdroji kvalitního vápence. A další novinkou bylo i budování kruhových pecí.

Pojem vápno je velice rozsáhlý a lze si pod ním představit mnoho forem. Vápno zahrnuje jak různorodost fyzikálních tak chemických forem oxidu vápenatého a oxidu hořečnatého nebo hydroxidu vápenatého a hydroxidu hořečnatého [1, 37]. Lze ho chápat:

- Pálené vápno – oxid vápenatý  $\text{CaO}$
- Hašené vápno – hydroxid vápenatý  $\text{Ca(OH)}_2$ 
  - Vápenný hydrát suchý

- Vápenná kaše
- Karbidové vápno –  $\text{Ca(OH)}_2$
- Hydraulické vápno – nelze popsat chemickým vzorcem
- Vzdušné vápno – tuhne a tvrdne pouze na vzduchu a je složeno z  $\text{CaO}$  (resp.  $\text{Ca(OH)}_2$ )

### Vzdušné vápno

Vzdušné vápno se vyrábí z vápence nebo dolomitického vápence obsahující nízké množství nečistot, který se rozele a následně vypálí. Tímto způsobem se připraví pálené vápno neboli nehašené vápno. Hlavní složkou páleného vápna je oxid vápenatý ( $\text{CaO}$ ), který vzniká dekarbonací uhličitanu vápenatého (vápence,  $\text{CaCO}_3$ ) [1, 37, 38]:



Pokud vzdušné vápno neobsahuje skoro žádné množství oxidu hořečnatého, pak jej lze nazývat jako „bílé vápno“. Naopak pokud je obsah oxidu hořečnatého ve vápně vysoký, a tudíž ovlivňuje některé jeho vlastnosti, nazýváme ho „dolomitickým vápnem“.

Dekarbonatace nastává při cca 1000 °C. Dolomit (uhličitan hořečnato-vápenatý) dekarbonuje podobně jako samotný vápenec:



Při rychlejším výpalu a při vyšších teplotách by došlo ke vzniku tvrdě páleného vápna, které obsahuje větší krystaly  $\text{CaO}$ . Tento druh vápna se hodí na výrobu autoklávového pórobetonu. Měkce pálené vápno, jelikož je reaktivnější, se hodí na výrobu omítkových směsí a malt. Pokud by při výpalu teplota překročila hodnotu 1100°C, vzniklo by tzv. mrtvé vápno, které s vodou reaguje velice obtížně.

Vypálené vápno se díky hašení přemění na hydroxid vápenatý, při této reakci vznikne z oxidu vápenatého hydroxid vápenatý. Tato reakce je exotermická [38]:



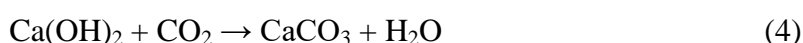
Hašení vápna lze uskutečnit dvěma technologicky rozdílnými postupy. Prvním způsobem výroby je mokré hašení a druhým je tzv. suché hašení. Častější přípravou vápna v historii bylo tzv. mokré hašení. Mokré hašení se provádí tak, že se pokropí vodou svrchní vrstva páleného vápna a to tak, aby teplota reakční směsi byla těsně pod bodem varu vody. Tento

proces je velice technologicky náročný a prakticky ho provádí pouze velice zkušení dělníci. Tímto smícháním vody s páleným vápnem vznikne vápenné mléko, které se cedí přes síto do odležovací jámy. V této jámě postupně ztratí přebytečné množství vody a vznikne bílá až šedá vápenná kaše. Tento technologický postup přípravy vápna byl používán již ve středověku.

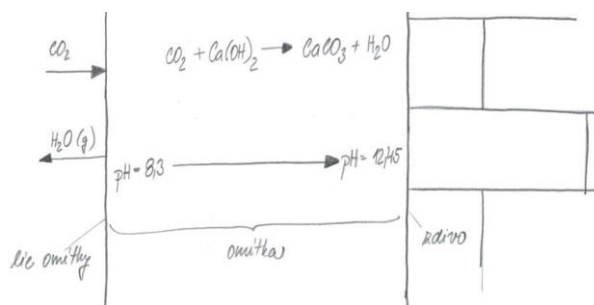
Pokud se při hašení dostane do vápna velké množství vody, tak se rychlost reakce zpomalí a směs se dostatečně neprohřeje. Dochází ke vzniku tzv. utopeného vápna, ve kterém nedochází k rozpadu všech potřebných zrn. Naopak může nastat i tzv. spálené vápno, které vzniká při nedostatku vody při hašení. Z tohoto procesu vzniká rychle připravené a velice nekvalitní vápno. Pokud se takto špatně vyrobené vápno použije v omítkách, dochází k objemovým změnám, které mají za následek vznik trhlinek, puchýřků nebo dokonce samotné oddělení omítky od svého podkladu [39].

V dnešním moderním světě se spíše využívá suchého hašení a vzniklým produktem je vápenný hydrát. Ve speciálním mísicím zařízení (hydrátoru) se voda vlévá na oxid vápenatý. Množství vody je určeno pomocí stechiometrického poměru, vždy se jedná o malý přebytek vody. Přebytečná voda se odpařuje díky vývinu tepla, které nastává při samotné hydrataci. Výsledným produktem je práškový vápenný hydrát obsahující pouze 1 % vody, do kterého stačí na stavbě přidat pouze potřebné množství vody, aby vznikla vápenná kaše. V dnešní době je vápenný hydrát již objemově stálý, jelikož neobsahuje zrna oxidu vápenatého [1, 38, 39].

Tvrdnutí vápna je reakce hydroxidu vápenatého s oxidem uhličitým a vlastně se jedná o karbonataci:



Tato reakce probíhá v omítkách velmi pomalu, jelikož je závislá na prostředí, ve kterém probíhá. Ve vodě je difúzní proces  $\text{CO}_2$  mnohonásobně pomalejší než ve vzduchu [38].



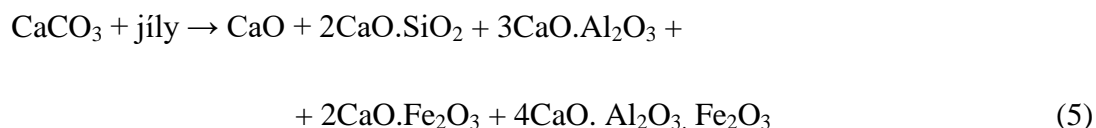
Obrázek 1. Karbonatace vápenné omítky



### Hydraulické vápno

Hydraulické vápno se vyrábí z vápenců, které obsahují jíly, a následným výpalem na teplotu 1100 až 1200 °C (a případném rozhašení na prach). Při takto vysoké teplotě vzniká rozkladem uhličitanu vápenatého (CaCO<sub>3</sub>) oxid vápenatý (CaO). Ten poté reaguje s jílovými minerály, jež obsahují hydraulické oxidy. Hydraulické oxidy jsou oxidy křemičitý (SiO<sub>2</sub>), hlinitý (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) a železitý (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) a jejich obsah ve vápnu je od 10 do 25 %. V jednosložkovém vápně jsou tyto oxidy ve formě hlinitokřemičitanů, křemene a hydratovaných oxidů železa. Tyto oxidy jsou obsaženy i v portlandském cementu, ochotně reagují s vodou a jsou nositeli hydraulického charakteru výsledných produktů. Konkrétně se jedná o složku, kterou nazýváme dikalciumsilikát a ta je z větší části zodpovědná za tyto hydraulické vlastnosti ve vápně [1, 37, 38].

Hydraulické vápno je někde na rozmezí mezi vzdušným vápnem a portlandským cementem. Vápno hydraulické je rozdílné od vzdušného, jelikož obsahuje právě hydraulického sloučeniny. A od portlandského cementu se liší tím, že obsahuje alespoň nějaké množství volného oxidu vápenatého (CaO) a neobsahuje trikaliumsilikát (3CaO.SiO<sub>2</sub> - alit). Tuto sloučeninu neobsahuje hydraulické vápno, jelikož vzniká při teplotě minimálně 1250 °C, významnou rychlostí pak při teplotách ještě vyšších [1, 37].



Parametr, kterým lze charakterizovat hydraulicitu vápna, se nazývá hydraulický modul. Jedná se o poměr obsahu oxidu vápenatého k obsahu hydraulických oxidů, díky kterému lze rozlišovat, zda se jedná o vápno silně, středně nebo slabě hydraulické:

$$H_M = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (6)$$

Silně hydraulickým vápnem rozumíme vápno, které má hydraulický modul v rozmezí 1,7 až 3. V jeho složení lze najít pouze malé množství volného oxidu vápenatého a vlastnostmi je hodně podobný cementům. Výsledný produkt je zapotřebí pouze rozemlít a nemusí se již hasit. Pokud má hydraulický modul hodnoty v rozmezí od 3 do 6, je označováno jako středně hydraulické vápno. Výsledkem suchého hašení není prášek, a proto se musí domlít. Slabě hydraulické vápno má hodnoty hydraulického modulu v rozmezí od 6 do 9 a po suchém hašení se samovolně rozpadá na prášek a není ho již zapotřebí mlít. Pokud hodnota

hydraulického modulu je vyšší než 9 jedná se o vzdušné vápno i přes to, že obsahuje menší množství hydraulických oxidů [1, 39].

Při tuhnutí a tvrdnutí hydraulického vápna dochází nejdříve k hydrataci sloučenin, které vznikly při výpalu oxidu vápenatého a hydraulických oxidů. To vytváří v maltě spojitou síť. Samotná hydratace trvá zhruba 28 dní. Ihned po této reakci probíhá karbonatace hydroxidu vápenatého, a to díky oxidu uhličitým, který je obsažen ve vzduchu. Tato druhá reakce je daleko pomalejší. Ve výsledném produktu obsahuje omítka uhličitán vápenatý a hydratované křemičitany a hlinitany vápenaté. Bylo prokázáno, že karbonatace může probíhat i několik let. Vše záleží na podmínkách, ve kterých se omítka vyskytuje (rovnice 4) [1, 37].

Jak již bylo zmíněno výše, do vápenných omítek byly v historii přidávány různé anorganické příměsi. Jednalo se především o materiály sopečného původu, také známé pod pojmem pucolány. Tyto přírodní materiály měly skvělé doplňující vlastnosti, neboť obsahovaly minerály, které se skládaly především z oxidu křemičitého a hlinitého [37].

## 4 Pucolány

Pojem „pucolány“ lze chápat dvojím způsobem. První pohled je historický. Již ve středověku byla prvně použita směs bílého vápna a sopečného popela. Celá řada národů využívaly pucolány již od nepaměti. Například Féničané používali maltu z vápna a cihelné moučky (700 let před naším letopočtem). Řekové zjistili, že pokud do vápna přimíchali zeminu z ostrova Santorin (sopka Santoriny), malta jim zatvrdla i pod vodou. Avšak nejznámější jsou asi Římané, kteří používali až 75 % sopečného popela od Puteoli do omítkových směsí. V dnešní době je toto město pojmenované Pozzuoli a nachází se nedaleko Neapole v oblasti Kampánie. Odtud pochází označení „pucolán“. Solfatara je kráter v současnosti již nečinné sopky v Neapoli, který v antice pohřbil město Puteoli (Pozzuoli). Z tohoto důvodu byla tato oblast později hojně využívána jako zdroj pucolánu. Pozzolano v italštině znamená tras či „trass“ (trachytový tuf) [1, 37, 40].

Při zjištění, že mleté cihly vykazují také pucolánové vlastnosti podobně jako sopečný popel, tak se začaly v historii přidávat do omítek pro zlepšení užitných vlastností výsledných omítek (vysoká pevnost, kompaktnost, vysoká pórovitost a stálost ve vlhkém prostředí) a využívaly se na konstrukce akvaduktů, vodních nádrží, lázní či jako zdící malta, ale také jako výplňový materiál pro dlážděné podlahy nebo finální omítky vnitřního zdiva veřejných lázní. Římský stavitel Marcus Vitruvius Pollio a Gaius Plinius Secundus ve svých dílech popisují, jak při smísení vápna s pískem od města Pozzuoli a okolí Vesuvu, dokáže tento materiál tuhnout i pod mořskou vodou. Z podobného materiálu byl postaven i Panteon, Koloseum a Konstantinova basilika. Na mostě Pont du Gard u Nimes (jižní Francie) byla použita malta s pucolánem pocházející z 1. století našeho letopočtu. Ve středověku se na využití pucolánu zapomnělo a byly využívány pouze výjimečně [1, 37, 40].

Druhý, současný, pohled je rozdělení pucolánů dle vzniku na přírodní a technogenní neboli uměle vytvořené pucolány. Z chemického hlediska se jedná o materiál, který přináší do směsi hydraulické složky ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Ve své podstatě každý silikátový materiál, který obsahuje amorfni oxid křemitý, event. hlinitany nebo hlinitokřemičitany vápenaté, má jistou míru pucolánové aktivity. Dělení pucolánů:

- dle původu vzniku – přírodní a technogenní
- dle složení – obsahující amorfni oxid křemičitý, křemičitany, hlinitany, železitany.

## 4.1 Přírodní pucolány

Prvními používanými přírodními pucolány byly nejspíš materiály vulkanické (tufy) v podobě již zmíněného sopečného prachu nebo popela, nebo sedimentární (křemelina, tufity). Mezi nejznámější zdroje přírodních sopečných pucolánů patří i v dnešní době oblast v okolí města Pozzuoli poblíž Neapole, ostrov Santoriny v Řecku, rýnský či bavorský tras v Německu a ryolitická pemza v USA. Tyto materiály sopečného původu jsou velice reaktivní a v jejich obsahu je zastoupeno velké množství amorfního oxidu křemičitého. Zbýlý obsah je složen z minerálů obsahujících oxid křemičitý a hlinitý a v malém zastoupení i další oxidy. Amorfní fáze (skelná fáze) je nositelem vysoké reaktivity. Tyto sloučeniny obsahují i další přírodní materiály, které se nachází přirozeně v celistvém stavu. Pro jejich využití je nezbytné je rozmělnit na velmi malé a jemné částice. Příkladem těchto látek, které jsou zapotřebí předpřipravit do reaktivní podoby, a které rozšiřují škálu přírodních pucolánů, jsou:

- opály
- živce
- pemza
- slídy

Tyto suroviny jsou považovány za středně aktivní. Za zmínku stojí i zeolit, který je původem vulkanický tuf a sediment, a z chemického hlediska se skládá z hydratovaných hlinitokřemičitanů obsahující oxid křemičitý, oxid hlinitý a další složky (např. oxid sodný  $\text{Na}_2\text{O}$ ) [1, 40].

### 4.1.1 Vulkanické horniny

Vulkanické horniny vznikají tuhnutím magmatu, které se dostává na povrch zemské kůry. Magma neboli láva je složena z křemičitanové taveniny a je velmi často přeměněna do sklovité fáze. Tyto částice obsahují mikroporézní strukturu. Výslednou pucolánovou aktivitu zásadně ovlivňuje, zda vznikla explozivní (vysoká pucolánová aktivita) nebo neexplozivní (žádná nebo velmi malá pucolánová aktivita) erupcí.

Nezpevněné vulkanické pucolány pocházející z jižní a střední Itálie nazýváme santorinské zeminy. Dále do této skupiny lze zařadit rýnský tras, sklovité ryolity (USA, Indie, Turecko) či sopečný popel (Japonsko, ostrov Tenerife, Anglie, Nový Zéland).

Zpevněné vulkanické pucolány jsou tufy. Zpevnění tufů vznikalo díky zvětrávání a zpevňování pomocí nesoudržných pyroklastických materiálů (tefry). Příkladem jsou neapolské tufy, tufy z ostrova Gran Canaria nebo suevitské trasy (meteorit) [41, 42].

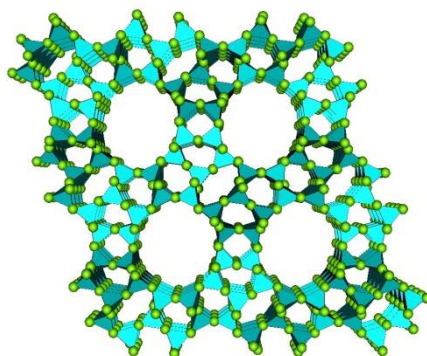


Obrázek 2. Pozůstatek z těžby tufů na Kanárských ostrovech

### **Zeolit**

Zeolit je složen z vulkanických tufů a vulkanoklastických sedimentů, vznikajících reakcí amorfních vulkanických hornin a vody v sedimentární pánvi (klinoptilolit, heulandit, analcim, chabazit, mordenit, phillipsit). Mohou též vzniknout při reakci amorfních vulkanických hornin s prosakující meteorickou vodou (klinoptilolit a mordenit). Zeolit bývá většinou čirý až perleťový. Tato hornina má nízkou až střední tvrdost (3,5 až 5) a lze získat i syntetickým procesem. Uměle vytvořený zeolit je vyroben pomalou krystalizací gelu z oxidu křemičitého a hlinitého za přítomnosti alkálií a dalších látek. Proto ho lze zařadit jak do přírodních tak do technogenních pucolánů [40].

Z chemického hlediska se jedná o anorganický krystalický mikroporózní materiál, který je na bázi hydratovaných hlinitokřemičitanů. Struktura je složena z tetraedrů  $\text{SiO}_4$  a  $\text{AlO}_4$ , které jsou spojeny kyslíkem do prostorového uspořádání skeletu. Negativní náboj, který vzniká na mřížce, vyrovnávají kationty alkalických kovů nebo kovů alkalických zemin (Na, K, Li, Ca, Ba atd.), které se vyskytují v dutinkách mřížky. Struktura je tvořena kanálky a dutinkami, které jsou vzájemně propojené [40, 45].



Obrázek 3. Grafické znázornění zeolitu

Při vystavení vyšším teplotám (do 700 °C) se zeolit dehydratuje a opakovaně rehydratuje. Při dehydrataci dokáží zeolity na sebe vázat různé látky díky absorpčním a iontově-výměnným dějům. Již od roku 1978 byla snaha vyjádřit vzorec zeolitů (Gottardi G.). V roce 1992 Rudy W. Tschernich napsal knihu „Zeolites of the World“, kde zobecnil vzorec pro zeolit:



Prvky, které jsou v hranaté závorce, prezentují aluminosilikátovou kostru zeolitu. Ostatní prvky, které jsou mimo tuto hranatou závorku, jsou považovány za vyměnitelné kationty, a právě ty jsou nositeli kanálků a dutinek, jež jsou typické pro tento materiál [46].

Zeolit je považován za pucolán, ale musí být jemně namletý a až tehdy dokáže reagovat s hydroxidem vápenatým za přítomnosti vody. U tohoto materiálu díky pucolánové reakci vznikají sloučeniny hydratovaných vápenatých silikátů a vápenatých ch aluminátů. Zeolit se používá proto, že dokáže ovlivnit pórovou strukturu, snižuje hydratační teplo, zvyšuje pevnostní charakteristiky v časové závislosti. Jeho nevýhodou je opět horší zpracovatelnost čerstvé směsi a větší spotřeba záměsové vody [40].

#### 4.1.2 Sedimentární horniny

Mezi sedimentární pucolány patří křemité (např. diatomit) a úlomkové neboli klastické sedimenty (např. jíly - montmorillonitové). Křemité horniny lze nazvat i tzv. rozsivkové zeminy, vznikly totiž ze schránek rozsivek, což jsou jednobuněčné řasy. Nejvíce lze diatomit nalézt na území v Kalifornii, Kanadě, Německu a Alžírsku. Mezi úlomkovité pucolány patří především jíly, které obsahují montmorillonit, který dokáže reagovat s hydroxidem vápenatým a vodou (pucolánová reakce) [43, 44].



Obrázek 4. Rozsivkový lom ve Venezuele (Alisha Vargas)

## 4.2 Technogenní pucolány

Tento druh pucolánu obsahuje stejně tak reaktivní formy oxidu křemičitého a hlinitého jako přírodní látky. Jeho původ je však na umělé bázi. V historii byly tyto pucolány také využívány. Nejznámějším příkladem jsou různé druhy popela z rostlinných materiálů nebo jemně namleté cihly či jiná keramika [1].

Metakaolín je příkladem technogenního pucolánu, který lze připravit pálením jílových surovin montmorillonitického nebo kaolinitického typu – nejčastější používanou surovinou je kaolín. Výpal se provádí při relativně nízkých teplotách (600 °C) a následně je surovina mletá na jemné částice. Kaolín je bělavá hornina reziduálního původu. Tato jílová surovina obsahuje minimálně 80 % kaolinitu. Při výpalu jde vlastně o dehydrataci kaolinitu, což je hlavní složka kaolínu. Výsledná surovina (metakaolín) je vysoce porézní a amorfní a je hlavním nositelem reaktivnosti [1, 47].

Zbytky po spalování organických látek (silikátové odpady), obsahující oxidy křemičité a hlinité, dokáží reagovat s hydroxidem vápenatým a vykazují pucolánovou aktivitu. V minulosti se velmi často využíval popel z kostí, popel ze slámy apod. V současné době je velice zajímavý výzkum popela z rýžových slupek, olejové či kokosové palmy, a to především v oblastech, ve kterých se tyto rostliny pěstují [1, 40].

Dalšími, velmi často používanými umělými pucolány, jsou skupiny materiálů, které vznikají pomocí různých výrobních procesů. Patří sem elektrárenské popílký a mikrosilika (křemičitý úlet). Elektrárenské popílký však přináší velké riziko. Jedná se především o nestálost složení a obsah nevhodných látek (síraný, radioaktivní látký, barva) [1].

Další možností je využití latentně hydraulické příměsí – vysokopecní strusky. Struska má tzv. skrytou hydraulicitu – hydraulicitu se musí vyvolat pomocí hydroxidu vápenatého nebo alkalických hydroxidů (hydroxid sodný nebo draselný) [1, 40].

#### 4.2.1 Metakaolín

Metakaolín je technogenní pucolán, jehož počáteční surovinou je kaolinitický jíl. Jílové minerály vznikly zvětváním vulkanických hornin a samy o sobě se vyznačují relativně nízkou pucolánovou aktivitou. Pokud se ovšem tato látka zahřeje, tak dojde ke změně struktury. Ta je doprovázená uvolněním chemicky vázané vody, které zapříčiní zborcení krystalické mřížky materiálu. Díky této reakci se zlepší pucolánové vlastnosti, jelikož dojde k přeměnění oxidu křemičitého a hlinitého do jejich reaktivních forem. Kvalita výsledného materiálu závisí na kvalitě vstupní suroviny a na technologii samotného zpracování. Metakaolín se nejčastěji vyrábí z kaolínu.

Kaolín je největším zdrojem kaolinitu (z hlediska pucolánové aktivity nejdůležitější minerál) a dále může obsahovat malá množství křemene, muskovitu, rutilu, illitu, granátu, turmalínu, limonitu, staurolitu. Kaolín je bělavá hornina, může být i mírně nažloutlá nebo načervenalá. Kaolinit je jílový minerál patřící do skupiny fylosilikátů. Z chemického hlediska se jedná o hydratované hlinitokřemičitany, označit jej lze vzorcem  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{AS}_2\text{H}_2$ ). Kromě toho může obsahovat menší množství oxidu železitého, titaničitého, vápenatého a manganatého.

Studium metakaolínu v oblasti rozsahu užitých teplot při výpalu lze shrnout do tří hlavních fází:

- pod 300 °C dochází k dehydrataci
- mezi 450 a 800 °C dochází k dehydroxylaci (vypaření chemicky vázané vody) jílových minerálů; rovnice 8 (450-700 °C)



- nad 1000 °C dochází k rekrystalizaci a ke vzniku nových fází – mullitu a cristobalitu

Pokud by překročila teplota 1000 °C a vyčkalo se na této teplotě delší dobu, došlo by k významnému poklesu pucolánové aktivity výsledného metakaolínu. Metakaolín se používá jako příměs do omítkových i betonových směsí. Výsledný produkt má lepší odolnost vůči chemickým látkám, působení vody, má větší pevnost či zlepšuje u betonu jeho reologické



vlastnosti. Velice důležité však u použití metakaolínu je jeho vstupní forma neboli reaktivnost, ta závisí na mnoha faktorech (velikosti částec, chemickém složení i struktuře). Velkou nevýhodou především u maltových směsí je potřeba většího množství záměsové vody, která nepříznivě ovlivňuje zpracovatelnost čerstvé směsi [40, 43].

#### 4.2.2 Jemně mletý cihelný střep

Keramické výrobky vznikají stejným způsobem jako metakaolín, a to výpalem jílových minerálů. Tyto jílové zeminy by měly obsahovat více než 80 % hydraulických oxidů ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). A z hlediska mineralogie by pak měly jílové zeminy obsahovat:

- Kaolinit -  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
- Montmorillonit –  $(\text{Na},\text{Ca})_{0,33}(\text{Al},\text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})\cdot n\text{H}_2\text{O}$
- Illit –  $(\text{KH}_2\text{O})\text{Al}_2(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
- Dickit –  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
- Halloysit -  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Teplota kalcinace jednotlivých jílových minerálů je rozdílná, a to i samotná přeměna na amorfní fáze či jejich složení. U kaolinitu je teplota rozkladu od 450 do 600 °C, u illitu od 500 do 600 °C a u montmorillonitu od 600 do 750 °C. Dalším důležitým parametrem, a to téměř u všech pucolánových látek, je velikost částic a s tím související hodnota měrného povrchu. Jemně mletý cihelný střep lze získat recyklací starých keramických výrobků a jejich cíleným rozemletím. Ekonomičtější a ekologičtější možností je využití cihelného obrusu (keramického prachu). Konkrétně o použití prachu, který lze získat z obrusů tepelně izolačních cihelných bloků, pojednává tato disertační práce (více viz dále).

Výhodou použití tohoto pucolánu do omítkových směsí je zjemnění struktury, nárůst mikropórů, uvolňování menšího množství hydratačního tepla či zvýšení pevností i v časové závislosti. Nevýhodou je stejně jako u metakaolínu větší spotřeba záměsové vody a tím zhoršující se zpracovatelnost [40].

#### 4.2.3 Popílky

##### Elektrárenské popílky

Elektrárenský popílek vzniká jako odpadní látka při spalování uhlí. Tento práškový produkt, který je velice jemně zrnitý, se zachycuje pomocí tzv. odlučovačů, které mohou pracovat na principu mechanického nebo elektrostatického filtru. Při spalování práškového uhlí nastává vysoká teplota, která dokáže většinu minerálních složek, které jsou součástí

spalovaného produktu, roztavit a přeměnit do malých kapiček. Při následném rychlém ochlazení se z nich stanou malé sklovité částičky [43].

Elektrárenský popílek je velice rozmanitá látka, co se týče složení a dalších specifikací. Zásadní odlišnosti se týkají granulometrie, chemického a mineralogického složení. Důvodem proč tomu tak je, je různorodost typu uhlí, lokality výskytu i technického vybavení elektráren (kotlů, odlučovačů). Klasifikace popílků byla vytvořena právě z velké odlišnosti jednotlivých popílků a pro zjednodušení specifikací. Elektrárenské popílků lze rozdělit dle technologie spalování na vysokoteplotní nebo fluidní popílků [48].



Obrázek 5. Elektrárenský popílek

#### Vysokoteplotní popílků

Vysokoteplotní popílek se získává pálením uhlí při teplotách od 1200 do 1700 °C a odsiřováním spalin pomocí vápence či vápna za vzniku sádrovce ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), prováděném ve zvláštním aparátu (pračce spalin). Proces vzniku vysokoteplotního popílků lze zjednodušeně rozdělit do tří fází. Nejdříve nastává natahování minerálních složek, které jsou rozptýlené v uhlí. V druhé fázi dochází k seskupení roztavených popelovin a ve třetí, poslední fázi, vzniká samotný popílek.

- Popílek typu F: Vzniká při spalování černého a kvalitnějšího hnědého uhlí. Obsahuje zejména  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .
- Popílek typu C: Vzniká spalováním hnědého uhlí s vysokým množstvím  $\text{CaO}$  (lignitu). Obsahují více krystalických fází.

#### Fluidní popílek

Fluidní popílek obsahuje vyšší množství oxidu vápenatého ( $\text{CaO}$ ) a  $\text{SO}_3$ , to je dáno tím, že při spalování, které probíhá při teplotě 850 °C, se odsiřuje mletým vápencem (sorberent) přímo ve spalovacím prostoru. Tento proces výroby je účinnější a ekologičtější, jelikož produkuje

méně emisí. Avšak velké negativum je vysoký obsah oxidu sírového ( $\text{SO}_3$ ) v popílku. Při výrobě vznikají dva druhy popílků. Prvním typem je ložový popílek, ten je hrubý, má vyšší hmotnost a má dobré hydraulické vlastnosti. Druhým typem je úletový neboli filtrový popílek, ten má jemnější zrnitost a je lehčí.

### **Popílky z rýžových slupek**

Rýže je rostlina, která se pěstuje v Africe, Asii a Latinské Americe. Samotné rýžové slupky kromě jiných sloučenin obsahují až 20 % oxidu křemičitého. Pokud se tento materiál spálí, tak vznikne popel, který se skládá převážně z amorfního oxidu křemičitého. Pro velkou spotřebu samotné rýže vzniká mnoho odpadu (slupek), se kterým je spojeno mnoho potíží. V současnosti je však snaha využívat tento odpadní materiál i jako palivo při výrobě elektřiny. Pro vznik látky s dobrými pucolánovými vlastnostmi je zapotřebí udržovat teplotu pálení pod  $700\text{ }^\circ\text{C}$  [49].

### **Popílky z cukrové třtiny (z bagasy)**

Podobně jako v předchozí podkapitole se i u spotřeby cukrové třtiny využívá odpadu, který vzniká při zpracování. Odpadním materiálem jsou rozmělněná stébla neboli bagasa. Také se využívá pro výrobu elektrické energie a ideální teplota spalování pro popel s dobrými pucolánovými vlastnostmi se pohybuje od  $800$  do  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ . Ovšem rafinérie, které využívají tento odpad pro výrobu energie, nedokáží vždy dodržet správný technologický postup, a proto není většina popela dostatečně pucolánově aktivní. Existuje studie i dalších popílků, např. ze slámy, palem nebo z kalů vznikajících při čištění odpadních vod. Každý takto vyrobený popílek má rozdílné zpracování, spalování i smísení se směsí [50].

## **4.2.4 Mikrosilika**

Mikrosilika se též nazývá křemičitý úlet a obsahuje vysoké množství (90 až 98 %) amorfního  $\text{SiO}_2$ . Tento materiál vzniká jako druhotný produkt při výrobě křemičitých slitin a elementárního křemíku. Redukce křemene vysoké čistoty probíhá v peci při  $2000\text{ }^\circ\text{C}$ . Část monooxidu křemíku ( $\text{SiO}$ ) se vyskytuje v plynném skupenství. Ten se následně ochlazuje, oxiduje a kondenzuje. Výsledkem těchto procesů jsou mikročástice amorfního  $\text{SiO}_2$ . Tento produkt lze vytvořit i hydrolyzou chloridu křemičitého nebo srážením roztoků vodního skla, ale tyto umělé látky nejsou ekonomicky výhodné a pro stavebnictví se nevyužívají. Mikrosilika je využívána spíše pro nahrazení za cementovou složku směsi.

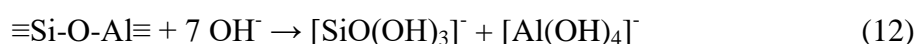
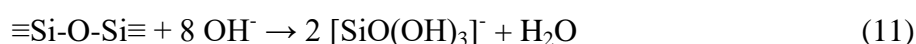
## 5 Pucolánová aktivita

Pucolánová aktivita je reakcí mezi vápnem neboli hydroxidem vápenatým a vodou (aktivními složkami pucolánu). Při této reakci lze vyčíst dvě hodnoty. První je maximální množství vápna, se kterým je pucolán schopen zreagovat, a druhou je rychlost této reakce.

Hydroxid vápenatý je sám o sobě velmi silná zásada (pH = 12,45 při 25 °C), a je zcela disociován na ionty ve dvou fázích (rozpuštění – rovnice 9, disociace silné zásady – rovnice 10):



Při takto vysoké koncentraci  $\text{OH}^-$  iontů se snadno převedou do roztoku vápenaté, sodné a draselné ionty. Následně dochází i k rozštěpení vazeb v oxidu křemičitém ( $\text{SiO}_2$ ), křemičitanech a hlinitanech za vzniku jednoduchých iontů:



Vzniklé křemičitanové a hlinitanové ionty reagují s  $\text{Ca}^{2+}$  a dochází k tvorbě hydratovaných křemičitanů, resp. C-S-H gelů, a hlinitanů vápenatých. Křemičitany se rozpouštějí rychleji, zatím co hlinitan vápenatý potřebuje pro vznik vyšší koncentraci  $\text{Ca}^{2+}$ . První se na pucolán přichytávají C-S-H gely a až na jejich povrch hlinitany vápenaté, které mívají tvar hexagonálních lístků. Dalšími produkty této reakce mohou být také sloučeniny ( $\text{C}_3\text{AH}_6$ ,  $\text{C}_3\text{A}\cdot\text{CaCO}_3\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{C}_2\text{ASH}_8$ ), které jsou podobné sloučeninám, které vznikají při reakci se zeolitickými sloučeninami a hydroxidem vápenatým.

### 5.1 Metodika stanovení pucolánové aktivity

Pro zjištění pucolánové aktivity existuje celá řada experimentů. Důvodem je, že přesné určení této charakteristiky není jednoduchá záležitost z mnoha aspektů. Pucolánové materiály jsou velice nestejnorodé, jejich původ je odlišný a vlastně samy o sobě nevykazují žádné pojivové schopnosti. Zkoumat lze mnoho charakteristik a stanovit tak pucolánovou aktivitu, např. fyzikální nebo chemické vlastnosti. Proto rozdělujeme tuto metodiku na přímou na nepřímou:

- Přímé metody – zjišťují spotřebu hydroxidu vápenatého při pucolánové reakci pomocí analytických principů
- Nepřímé metody – zjišťují změny fyzikálních charakteristik vlivem pucolánu

### 5.1.1 Přímé metody pro stanovení pucolánové aktivity

Mezi jednu z nejnámějších přímých metod pro stanovení pucolanity patří Frattiniho test. Tento test využívá titrační metodu pro určení koncentrace rozpustných iontů  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{OH}^-$  v roztoku, který obsahuje hydroxid vápenatý a pucolánovou složku. Tento test je normalizovaný dle ČSN EN 196-5. Speciálně namíchaná směs destilované vody a pucolánového cementu se nechá reagovat při 40 °C po dobu 15 dnů, následně se obsah přefiltruje a stanoví se koncentrace iontů  $\text{OH}^-$ . K finálnímu výsledku se využije diagram rozpustnosti  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Pucolánová aktivita je prokázána, pokud je koncentrace  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  v suspenzi nižší než koncentrace nasyceného roztoku. Existují i další testy, které vychází z Frattiniho základu, ale mají například jiný průběh či různá složení směsí [21, 51].

Chapelleho test je také normalizovaný, ale pouze ve Francii (NF P 18-513). Při tomto experimentu se smíchá potřebný poměr vody, pucolánu a hydroxidu vápenatého při teplotě 90 °C a po dobu 16 hodin je směs stále promíchávána. Následně se pomocí titrace stanoví obsah  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Pro přesný výsledek se porovnává výsledek s referenčním vzorkem, ten neobsahuje žádnou pucolánově aktivní látku. Existují také různé modifikace tohoto testu, např. využití autoklávu.

V neposlední řadě lze pro stanovení pucolánové aktivity použít sacharátovou metodu. V tomto případě se zkoumají ztvrdlé vzorky a snížení obsahu  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Část vzorků se louhuje a následně se opět pomocí titrace stanoví obsah zbylého hydroxidu vápenatého.

### 5.1.2 Nepřímé metody pro stanovení pucolánové aktivity

Další možností je z chemického hlediska stanovit rozpustnost oxidu křemičitého ( $\text{SiO}_2$ ). Tuto metodu navrhl v roce 1933 Feret. V první fázi se stanoví obsah  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , které se rozpustí v chlorovodíku (HCl). V druhé fázi je vytvořena pasta (50 % vápno, 50 % pucolán), která je vysušena a rozemleta na úplně stejnou zrnitost, kterou měl v první fázi použitý pucolán. A následně se stanoví obsah  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Podobný princip, při kterém se určuje amorfnní množství  $\text{SiO}_2$ , navrhl Kreshkov [52]. Tentokrát reaguje amorfnní  $\text{SiO}_2$  s glycerolem a výsledek je určován pomocí titrace. Titrace probíhá s roztokem hydroxidu barnatého a fenolftaleinu.

Pucolánovou aktivitu lze stanovit i pomocí tzv. entalpoigrafu. Jedná se o metodiku, která je založena na roztokové kalorimetrii, měří se tepelný efekt při reakci mezi zkoumanou složkou a činidlem. Pro tento experiment je dána přímo úměrná závislost mezi tepelným efektem a zkoumanou složkou. Ale tato metoda se již v současnosti nevyužívá.

Do nepřímých metod pro stanovení pucolanity lze zařadit i stanovení reaktivního  $\text{SiO}_2$  podle normy ČSN EN 196-2, která je sice určena pro chemický rozbor cementu, ale lze ji využít právě i pro pucolány, anebo zkoušku elektrické vodivosti [53].

Asi nejpoužívanější nepřímou metodou je zkoumání reálně vytvořených vzorků z vápenné omítky a pucolánu. Při výzkumu pevnostních vlastností se předpokládá, že vzorky obsahující pucolánovou složku budou vykazovat vyšších hodnot než samotná vápenná omítka. Dále je možnost zkoumat doby tuhnutí (počátek tuhnutí), které se po přidání pucolánu do vápenné malty zrychlují. Ideálně se pro výzkum využívá jak přímá metoda, tak i ta nepřímá. Tuto možnost navrhli ve svém článku Donatello a kolektiv [21], kteří poukazují a vhodnost využití Frattiniho testu a zkoušky pro určení mechanických charakteristik.

## 6 Popis experimentálních metod

### 6.1 Reologické vlastnosti

Reologické vlastnosti čerstvých omítkových směsí se určují dle příslušné normy ČSN EN 1015-3 - Stanovení konzistence malty rozlitím [61]. Podstatou této zkoušky je získání informací o konzistenci čerstvě namíchané omítkové směsi. K této zkoušce je zapotřebí třesací stolek (Obrázek 6), který je před samotnou zkouškou lehce zvlhčen vodou a natřen tenkou vrstvou oleje. Kovový kužel je umístěn do středu stolku a postupně se naplní směsí ve dvou vrstvách. Každá tato vrstva se zhutní deseti údery. Malta se na povrchu kužele zarovná a po 15 s se kovový kužel nadzvedne. Malta se rozleje po stolku díky 15 nárazům v celkovém čase 15 s. Na konci se průměr koláče změří pomocí připraveného měřidla.



Obrázek 6. Zkouška stanovení konzistence čerstvé omítkové směsi

### 6.2 Základní fyzikální vlastnosti

Mezi základní fyzikální vlastnosti patří objemová hmotnost  $\rho$  [ $\text{kg m}^{-3}$ ], která je studována dle příslušné normy [62], hustota pevné matrice  $\rho_{mat}$  [ $\text{kg m}^{-3}$ ] a otevřená pórovitost  $\psi_0$  [-]. Tyto veličiny lze získat různými experimentálními metodami.

Jednou z nich je vakuová nasákavost [63]. Vzorky o rozměrech 50 x 50 x 50 mm se umístí do sušárny, ve které je nastavená teplota na konstantních 100 °C, a nechají se zde, dokud

nedosáhnou suchého stavu  $m_d$  [kg]. Takto vysušené a převážené vzorky se umístí do exsikátoru s destilovanou vodou. Pomocí vakuové pumpy se z exsikátoru odsává vzduch a to minimálně po dobu 24 hodin. Po tomto procesu se zkoumaný vzorek opět váží a je zaznamenána hmotnost vzorku v nasyceném stavu  $m_w$  [kg]. Následně je zapotřebí také zjistit tzv. Archimédovu hmotnost  $m_a$  [kg], kdy je vzorek vážen pod vodou. Hustota vody je značena  $\rho_l$  [kg m<sup>-3</sup>]. Díky těmto naměřeným veličinám se objem  $V$  [m<sup>3</sup>] příslušného vzorku vypočítá dle následujícího vztahu:

$$V = \frac{m_w - m_a}{\rho_l} \quad (13)$$

Vakuová nasákavost je metoda, u které lze dopočítat z naměřených údajů i ostatní již jmenované základní fyzikální veličiny:

$$w_{sat} = \rho_l \psi_0 = \frac{m_w - m_d}{V} \quad (14)$$

$$\rho_{mat} = \frac{m_d}{V(1 - \psi_0)} \quad (15)$$

$$\rho = \frac{m_d}{V} \quad (16)$$

Hustota pevné matrice je pro kontrolu určována i pomocí héliového pyknometru, který má schopnost stanovit objem pevné matrice bez obsahu malých pórů. Předpokládá se, že atom hélia je tak malý, že pod tlakem dokáže zaplnit i velmi malé póry, které se ve zkoumaném vzorku vyskytují. Héliový pyknometr s tímto předpokladem pracuje. Správně vysušený vzorek je vložen do komory o známém objemu. Následně se vpouští hélium do referenční komory a zkoumané komory, ve které je zaznamenáván probíhající tlak. Z těchto tlaků, objemů a jejich vzájemných rozdílů lze dopočítat potřebnou hustotu matrice.

### 6.3 Charakteristika pórového systému

Pro stavební materiál je důležité rozložení jednotlivých pórů v materiálu. Póry mají odlišné velikosti a tvary, což významně ovlivňuje i další parametry, např.: transport kapalné vlhkosti (vzlínavost) apod. Distribuce pórů je zjišťována pomocí tzv. rtuťové porozimetrie na přístroji Pascal 140 + 440 (Obrázek 7).





Obrázek 7. Rtuťová porozimetrie - Pascal 140 + 440

Tato metoda má podobný princip jako obyčejná pyknometrická metoda nebo héliová pyknometrie (viz kapitola 7.2). Principem je vtláčování rtuti do studovaného pórového materiálu. Rtuťová porozimetrie využívá velmi vysokého povrchového napětí samotné rtuti  $\gamma$  ( $480 \times 10^{-3} \text{ N m}^{-1}$ ), a proto většinu organických a anorganických látek nesmáčí. Kvůli této vlastnosti je důležité na ni působit tlakem, aby zaplnila póry v materiálu. Washburnova rovnice popisuje vztah mezi tlakem  $p$  [Pa] a průměrem pórů  $d_p$  [m], kde  $\theta$  je kontaktní úhel [°]:

$$d_p = -\frac{4\gamma \cdot \cos\theta}{p} \quad (17)$$

Při nižších tlacích lze zaznamenat póry o velikosti poloměru  $4 \mu\text{m}$  až  $100 \mu\text{m}$  a u vyšších tlaků (400 MPa) se jedná o poloměry  $3 \text{ nm}$  až  $4 \mu\text{m}$ . Horní hranice, co se týče velikosti póru, je dána nejnižším tlakem. Tato hodnota je rovna hydrostatickému tlaku sloupce rtuti nad vzorkem na počátku měření (Obrázek 8). Vzorek se umístí do nádoby a ta je následně naplněna rtutí. Tlak se postupem času navyšuje, což také vede k postupnému zaplňování jednotlivých pórů ve zkoumaném materiálu. Díky známému tlaku a množství rtuti, která je do pórového systému materiálu vtačená, lze dotvořit distribuční křivku pórů. Pro malty či omítky je rozsah (velikost pórů) rtuťové porozimetrie dostatečný.



Obrázek 8. Dilatometr se vzorkem při měření na přístroji Pascal 140

#### **6.4 Termická analýza – Termogravimetrie/Diferenční skenovací kalorimetrie (TG/DSC)**

Diferenční skenovací analýza je jednou z nejpoužívanějších metod termických analýz. Využívá srovnávání referenčního a studovaného vzorku při snaze udržet jejich stejné teploty. Toto teplotní zatěžování je vždy řízeno určitým programem [64].

Lze rozlišovat dva základní typy DSC analyzátorů. Prvním typem je tzv. diferenční skenovací kalorimetr s kompenzací příkonu. Tento kalorimetr obsahuje dvě identické cely (pro studovaný a pro referenční vzorek) a při měření je zatěžován vzorek podle toho jaký typ děje uvnitř probíhá (endotermický, exotermický nebo žádný). Druhým typem je diferenční skenovací kalorimetr s tepelným tokem, ten obsahuje pouze jednu celu pro oba dva druhy vzorků, ale každý má své teplotní čidlo a ta jsou propojena tepelným mostem. Teplotní rozdíly mezi referenčním a studovaným vzorkem jsou zaznamenávány právě jako teplené toky, které jsou dále převáděny na energetický ekvivalent. Výstupem tohoto druhu kalorimetru je množství energie, které musí být jednomu ze vzorku dodáno. Tento záznam je nazýván DSC-křivka a popisuje závislost dodávané energie a času [64].

DSC-křivky jsou měřeny pomocí simultánního termického analyzátoru LABSYS EVO od francouzské společnosti SETARAM Instrumentation (Obrázek 9 [65]). Tento přístroj využívá druhý typ analyzátoru (viz. výše), který pracuje s tepelným tokem. Samotný přístroj se skládá ze senzorů, řídicího softwaru, termovah a z pece. Nedílnou součástí je inertní plyn, který chrání samotnou pec, a cirkulující voda, která zase pec ochlazuje [66].



Obrázek 9. Simultánní termický analyzátor LABSYS EVO

Zvážený vzorek, který se umísťuje do přístroje, bývá velmi malý (desítky mg) a může být jak ve stavu pevném (následně rozdrčen), tak i ve stavu kapalném. Prostor pro referenční vzorek, tzv. kelímek, je prázdný. Následně se uzavře pec a je vysán vzduch, který je nahrazen inertním plynem (argonem), jenž zabraňuje oxidaci a ochraňuje senzory.

Teplotní zatěžování je nastaveno programem, který lze měnit dle potřeby. Pro většinu zkoumaných stavebních materiálů (i pro studovanou pastu), je využíváno ověřené nastavení: V první fázi se po dobu několika minut ustálí teplota na 25 °C. V druhé fázi se teplota zvyšuje o 5 °C za jednu minutu, a to až do doby než dosáhne teploty 1000 °C. Ve třetí, a poslední fázi, nastává postupné ochlazování na 25 °C. Naměření jednoho vzorku trvá přibližně 9,5 hodiny. Výsledná naměřená data se pomocí počítačového programu vyhodnotí a sestrojí se DSC-křivka (viz. Kapitola 10.3) [65, 66, 67].

#### 6.4.1 Vyhodnocení termogravimetrického měření

Toto vyhodnocování měří a popisuje kinetiku pucolánových reakcí. V tomto konkrétním případě se jedná o široký rozsah poměrů vápna a pucolánu (cihelného obrusu), který je vyhodnocen pomocí modelu „Kondo“. Tento model využívá základní kinetickou rovnici v této podobě [68, 69]:

$$(1 - \sqrt[3]{1 - \alpha})^N = k \cdot t, \quad (18)$$

kde  $\alpha$  [-] je stupeň přeměny látky a vyjadřuje změnu složení regulujícího systému,  $N$  [-] je řád reakce,  $k$  [-] je rychlostní konstanta reakce a  $t$  [s] je čas reakce. Dále je definován stupeň přeměny látky dle vzorce:

$$\alpha = \frac{n_i^0 - n_i}{n_i^0} = 1 - \frac{n_i}{n_i^0}, \quad (19)$$

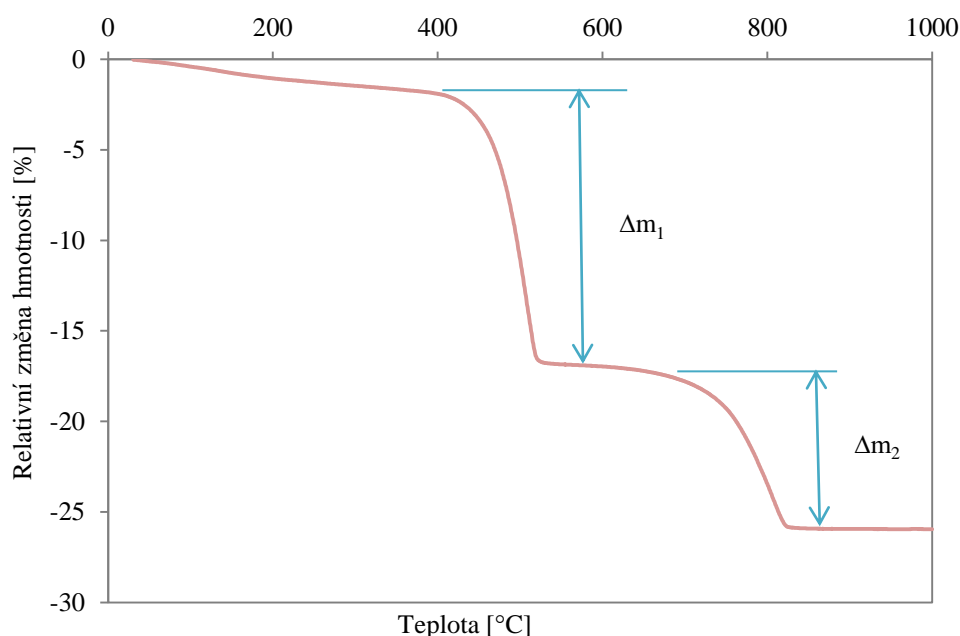
kde  $i$  je látka a v tomto případě se jedná o hydroxid vápenatý,  $n_i^0$  [mol] je počáteční látkové množství ve směsi v nulovém čase a  $n_i$  [mol] je látkové množství ve směsi v čase  $t$ . Při tomto experimentu probíhají dvě reakce zároveň a každá má svůj vlastní stupeň přeměny.

- $\alpha_{CaCO_3}$  je spotřeba portlanditu pro vznik kalcitu
- $\alpha_{CSH}$  je přeměna na CSH a CAH gely v pucolánové reakci

Všechny stupně přeměny jsou aditivní. To znamená, že celkový součet portlanditu ve studovaném systému odpovídá stupni přeměny:

$$\alpha_{celek} = \alpha_{CaCO_3} + \alpha_{CSH} \quad (20)$$

Jak již bylo zmíněno v kapitole 5, tak v systému vápno – pucolán dochází ke spotřebě portlanditu dvěma konkurenčními reakcemi. Jedná se o karbonataci a pucolánovou reakci. Stanovení obsahu neboli hmotnostního zlomku portlanditu a kalcitu ve směsi je založeno na tepelném rozkladu těchto dvou látek. Tyto reakce jsou dány rovnicemi:



Obrázek 10. Relativní změna hmotnosti studovaných past pomocí metody DSC

Z obrázku 10 lze reakce názorně popsat. Při úbytku hmotnosti  $\Delta m_1$  [%] v oblasti 400 – 550 °C docházelo k dehydrataci hydroxidu vápenatého neboli portlanditu (rovnice 21) a  $\Delta m_2$  [%] v oblasti 600 – 900 °C se rozkládalo vápno/kalcit (rovnice 1). Z hodnot úbytků hmotností lze vypočítat hmotnostní zlomek portlanditu ve směsi a analogicky i hmotnostní zlomek kalcitu:

$$w_{Ca(OH)_2} = \Delta m_1 \cdot \frac{M_{Ca(OH)_2}}{M_{H_2O}} \quad (22)$$

$$w_{CaCO_3} = \Delta m_2 \cdot \frac{M_{CaCO_3}}{M_{CO_2}} \quad (23)$$

Následně jsou tato data analyzována za účelem zjištění rychlostní konstanty a řádu reakce (rovnice 18), a to jak pro karbonataci, tak i pro pucolánovou reakci. Celkový stupeň přeměny je vypočítán z difrakčního vztahu:

$$\alpha_{celek} = 1 - \frac{n_{Ca(OH)_2}}{n_{Ca(OH)_2}^0} \quad (24)$$

Důležitější je však zjištění stupně přeměny portlanditu na kalcit ( $\alpha_{CaCO_3}$ ). Čítecitel ve vzorku odpovídá spotřebě portlanditu a kalcitu. Molárně se jedná o množství spotřebovaného portlanditu a vzniku kalcitu, které jsou identické.

$$\alpha_{CaCO_3} = 1 - \frac{n_{Ca(OH)_2}^0 - (n_{CaCO_3} - n_{CaCO_3}^0)}{n_{Ca(OH)_2}^0} \quad (25)$$

Stupeň přeměny portlanditu na CSH a CAH gely ( $\alpha_{CSH}$ ) je také důležitý. Čítecitel odpovídá spotřebě portlanditu na CSH a CAH hydratační produkty.

$$\alpha_{CSH} = 1 - \frac{n_{Ca(OH)_2}^0 + n_{CaCO_3} - n_{CaCO_3}^0}{n_{Ca(OH)_2}^0} \quad (26)$$

Vhodnější je ovšem kinetickou rovnici 18 zlinearizovat, kdy se po vynesení levé strany rovnice [ $\log(1 - \sqrt[3]{1 - \alpha})$ ] vůči logaritmu času ( $\log t$ ) získá lineární závislost. Z této závislosti je možné určit rychlostní konstantu a řád reakce pro jednotlivé řešené situace.

$$\log(1 - \sqrt[3]{1 - \alpha}) = \frac{\log k}{N} + \frac{\log t}{N} \quad (27)$$

## 6.5 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti popisují, jak je zkoumaný materiál schopen přenášet zatížení, které na něj působí. Metody jsou různé a může docházet i k porušení zkoumaného tělesa. Takto se rozlišují destruktivní a nedestruktivní mechanické zkoušky. Mechanické destruktivní vlastnosti jsou měřeny na vzorcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Konkrétně jsou zaznamenány výsledky z pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku. Zkoušky mechanických parametrů byly stanoveny na základě normového postupu dle normy ČSN EN 1015-11: Stanovení pevnosti zatvrdělých malt v tahu za ohybu a v tlaku [70].

### 6.5.1 Pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu se stanovují na přístroji MTS 100, který umožňuje zaznamenat deformaci. Zkoumaný vzorek se nesmí pohybovat, posouvá se pouze samotný příčník zatěžovacího stroje. Zkouška pevnosti v tahu za ohybu se provádí na celých trámečcích (40 x 40 x 160 mm) klasickým tříbodovým zatěžováním až do porušení vzorku, při kterém se zapisuje působící síla, z níž se následně dopočítá maximální moment  $M$  [Nm]. Podpory jsou od sebe vzdáleny 100 mm a břemeno se nachází uprostřed. Podle příslušné normy [70] má zkouška trvat od 30 do 90 sekund, v našem případě se čas pohyboval průměrně okolo 1 minuty. Zatěžování by mělo být rovnoměrné a při rychlosti v rozsahu 10 – 50  $\text{Ns}^{-1}$ . Průřezový modul  $W$  [ $\text{m}^3$ ] lze jednoduše dopočítat z rozměrů zkoumaného tělesa. Nakonec se výsledné napětí  $f_f$  [MPa] dopočítá:

$$f_f = \frac{\max M}{W} \quad (28)$$

### 6.5.2 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku se zkoušela na zlomcích trámečků, které vznikají po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu, a jsou stanoveny na přístroji EU 40. Použité vzorky se po předcházející zkoušce prohlédnou a nepoužijí se žádné, které vykazují jakékoliv poškození, které by mohlo ovlivnit výsledné hodnoty této zkoušky. Jedná se o zkoušku, při které síla působí pouze jednoosově a rovnoměrně. Zátěž se plynule zvyšuje v rozsahu 50 – 500  $\text{Ns}^{-1}$ , a to tak, aby k porušení tělesa došlo v časovém intervalu 30 – 90 sekund. Zkoumaný vzorek je položen na ocelovou destičku, která má rozměr 40 x 40 mm a následně je přikrytý příložkou o stejných rozměrech, to vše je umístěno přesně na středu lisu. Při výpočtu pevnosti v tlaku  $f_c$

[MPa] je zapotřebí znát průřezovou plochu  $A$  [m<sup>2</sup>] a maximální sílu, při které došlo k destrukci samotného vzorku:

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (29)$$

Zkoumané těleso se postupně zatěžuje silou až do porušení. V tomto okamžiku porušení se zaznamená potřebná maximální síla. Celý průběh zkoušky se kontroluje i vizuálně. Pokud tato podmínka při zkoušce není splněna a zkoušené těleso vykazuje neočekávané jevy, je příslušný vzorek vyškrtnut z hodnocení [70].

## 6.6 Vlhkostní vlastnosti

### 6.6.1 Transport vodní páry

Součinitel difúze vodní páry je měřen metodou bez teplotního spádu, která je založena na principu jednoosého šíření vodní páry vzorkem. Spočívá v měření difúzního toku vodní páry prošlé vzorkem, při znalosti parciálních tlaků vodní páry ve vzduchu, pod a nad měrným povrchem vzorku, tzv. „cup metody“. Zkoumaný vzorek je kruhového tvaru s průměrem cca 120 mm a tloušťkou mezi 10 mm a 30 mm [71].

Takto vyrobený vzorek se opatří epoxidem, aby byla zajištěna pouze jednorozměrná propustnost vodní páry. Zkoumaný kruhový vzorek se umístí do misky, ve které se na dně nachází voda a simuluje 95% relativní vlhkost (potom mluvíme o tzv. wet cup metodě) nebo silikagel a simuluje 0 – 5% relativní vlhkost, (tato metoda se označuje jako tzv. dry cup). Následně se obvod vzorku a misky utěsní technickou plastelínou. Před umístěním do klimatizační komory, kde je zajištěna stálá relativní vlhkost vzduchu a teplota, jsou takto připravené vzorky s miskami váženy. Po umístění do klimakomory se vzorky pravidelně váží a zapisují se úbytky hmotnosti (wet cup) nebo její přírůstky (dry cup) a časové údaje vážení. Termostatická komora byla při měření nastavena na 25 °C a 50 % relativní vlhkost. Každý stavební materiál má rozdílnou pórovitost, proto se může potřeba vážení při „cup“ metodě velmi lišit. Naměřené hodnoty se znázorňují pomocí grafu, z něhož lze dopočítat součinitel propustnosti pro vodní páru  $\delta$  [72].

Součinitel difúzní propustnosti vodní páry  $\delta$  [s] se vyhodnocuje dle vzorce [70]:

$$\delta = \frac{\Delta m \cdot d}{S \cdot \Delta p_p \cdot \tau}, \quad (30)$$

kde  $\Delta m$  je množství páry procházející materiálem [kg],  $d$  je tloušťka vzorku [mm],  $S$  je plocha vzorku, kterou může prostupovat vodní pára [mm<sup>2</sup>],  $\Delta p_p$  je rozdíl parciálních tlaků nad a pod vzorkem [Pa] a  $\tau$  je časové období [s].

Další důležitou veličinou je součinitel difúze vodní páry  $D$  [m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>], který lze vypočítat dle vztahu [39]:

$$D = \frac{\delta \cdot R \cdot T}{M}, \quad (31)$$

kde  $\delta$  je součinitel propustnosti pro vodní páru [s],  $R$  je univerzální plynová konstanta [J mol<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>],  $T$  je teplota [K] a  $M$  je molární hmotnost vody [kg mol<sup>-1</sup>].

Jeden z nejčastěji používaných parametrů ve stavební praxi je faktor difúzního odporu  $\mu$  [-], který je popsán jednoduchým vztahem [39]:

$$\mu = \frac{D_{vzduch}}{D}, \quad (32)$$

kde  $D_{vzduch}$  je součinitel difúze vodní páry ve vzduchu [m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>]. Faktor difúzního odporu (dle definice) v podstatě stanovuje, kolikrát je transport vodní páry materiálem pomalejší než transport vodní páry ve vzduchu [73].



Obrázek 11. Ukázka měření transportu vodní páry pomocí cup metody v klimatické komoře



## 6.6.2 Transport kapalné vody

Součinitel vlhkostní vodivosti  $\kappa$  [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ] lze zjistit jednoduchou zkouškou, kterou je absorpční metoda (absorpce vody). Pomocí digitální váhy, na které je připevněna kovová konstrukce s přichyceným zkoumaným vzorkem, akvářka, ve kterém je voda, a počítačového programu se zaznamenají přírůstky hmotnosti v závislosti na čase. Tento počítačový program umožňuje libovolné zaznamenávání časových intervalů, které jsou pro každý typ stavebního materiálu odlišné. Zkoumaný vzorek je ponořen do vody tak, aby voda dosahovala cca 2 mm výšky vzorku. Z naměřených údajů lze stanovit vlhkostní absorpční koeficient  $A$  [ $\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1/2}$ ]. Sestrojí se závislost kumulativního obsahu vlhkosti (na jednotku plochy)  $I$  [ $\text{kg m}^{-2}$ ] na odmocnině času  $t$  [ $\text{s}^{-1/2}$ ], ze které se použitím lineární regrese určí vlhkostní absorpční koeficient  $A$  podle vztahu [72, 74]:

$$I = A \cdot t^{1/2} \quad (33)$$

Průměrnou hodnotu součinitele vlhkostní vodivosti  $\kappa$  [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ] lze vypočítat pomocí rovnice:

$$\kappa \cong \left( \frac{A}{w_{sat}} \right)^2, \quad (34)$$

kde  $w_{sat}$  je obsah nasycené vlhkosti [ $\text{kg m}^{-3}$ ] [72, 74].

Pro tento typ zkoušky byly použity vzorky o rozměrech 50 x 50 x 50 mm, které jsou před použitím ještě po stranách opatřeny epoxidovým lepidlem, aby bylo docíleno pouze jednosměrnému transportu kapalné vody, a následně vysušeny v sušárně, která byla nastavena na 100 °C.

## 6.7 Tepelné vlastnosti

Pro měření tepelných vlastností se používají přístroje s označením ISOMET 2104 a ISOMET 2114 - Applied Precision (Obrázek 12 a 13), který dokáže naměřit součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$  [ $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ], součinitele teplotní vodivosti  $a$  [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ] a objemové tepelné kapacity  $c_p$  [ $\text{J m}^{-3}\text{K}^{-1}$ ]. Isomet je přenosný přístroj, který je řízen mikroprocesorem. Tento přístroj dokáže měřit termo-fyzikální vlastnosti stavebních materiálů a analyzuje průběh časové závislosti teplotní odezvy na impulsy tepelného toku do zkoumaného stavebního

materiálu. Tepelný tok je vytvářen v rezistoru samotné sondy, která se tepelně spojuje se zkoumaným vzorkem. Současně je při měření zaznamenávána teplota a vyhodnocena pomocí polynomiální regrese.

Toto měření velice ovlivňuje přítomnost vlhkosti v materiálu. Proto se dbá na to, aby bylo získáno potřebné zastoupení jednotlivých vlhkostních stavů mezi nasyceným a vysušeným stavem. Měření se zkoumá na vzorcích o rozměrech 70x70x70 mm, a je prováděno při laboratorních podmínkách.



Obrázek 12. Měření na přístroji ISOMET 2104



Obrázek 13. Měřicí přístroj ISOMET 2114

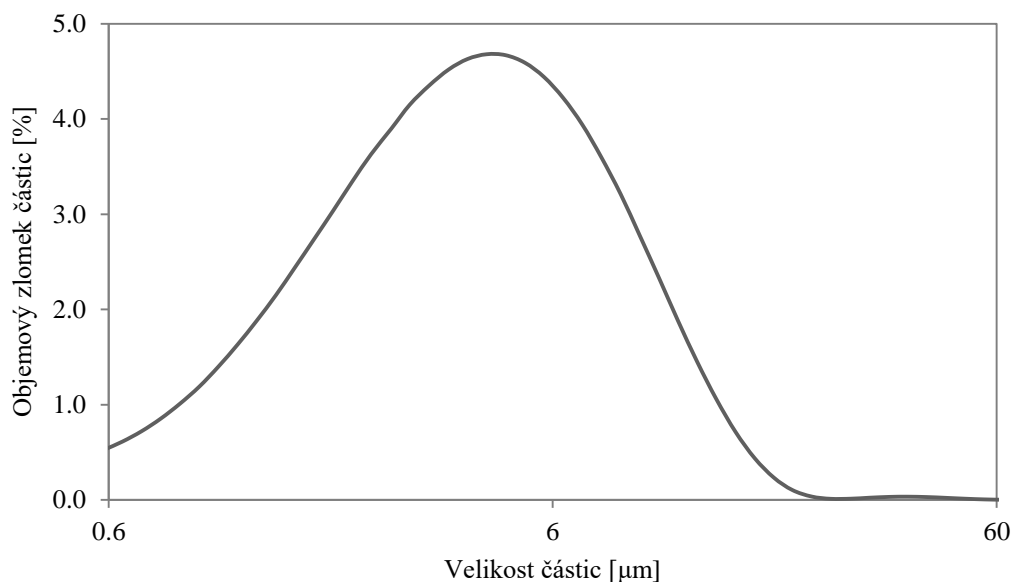
## 7 Charakteristika vstupních surovin

### 7.1 Vápenný hydrát

Vápenný hydrát, který je obsažen ve zkoumaných omítkách, je nazýván Čerták a označován jako CL 90 S a pochází z vápenky Čertovy schody a.s. Podrobné chemické složení, které bylo zjištěno pomocí XRF metody (rentgenová fluorescence) lze vidět v tabulce 1. Z tabulky je patrné, že použitý vápenný hydrát obsahoval více než 99 % oxidu vápenatého. Pro podrobnější charakterizaci tohoto materiálu byla zjišťována i granulometrie neboli distribuce velikosti částic (Obrázek 14). Z grafu lze vidět, že největší objem ve vápnu měly částice o velikosti v okolí od 1 do 15  $\mu\text{m}$ . Vápenný hydrát CL 90 S je zmiňován velmi často v odborných studiích o omítkách a maltách, např. v práci Matias a kol. [19], Pavía a kol. [54] a Walkera a kol. [20], dále pak stejné vápno použil Nežerka a kol. ve svém článku [30], který také nahrazoval vápenný hydrát cihelným prachem.

Tabulka 1. Chemické složení vápenného hydrátu CL 90 S

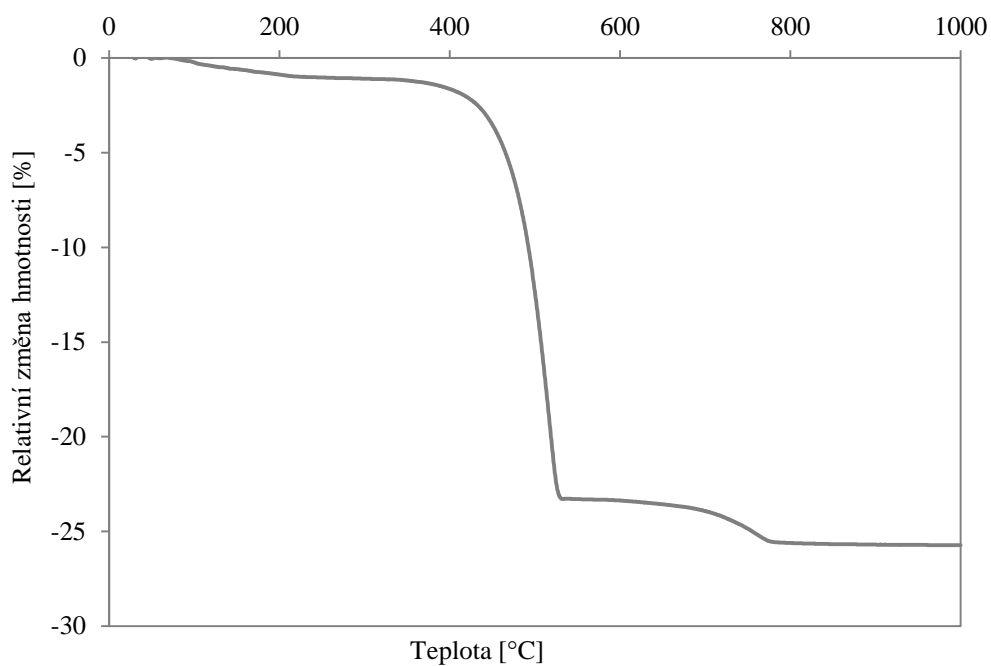
Chemické označení	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
Množství [%]	99,3	0,5	0,1



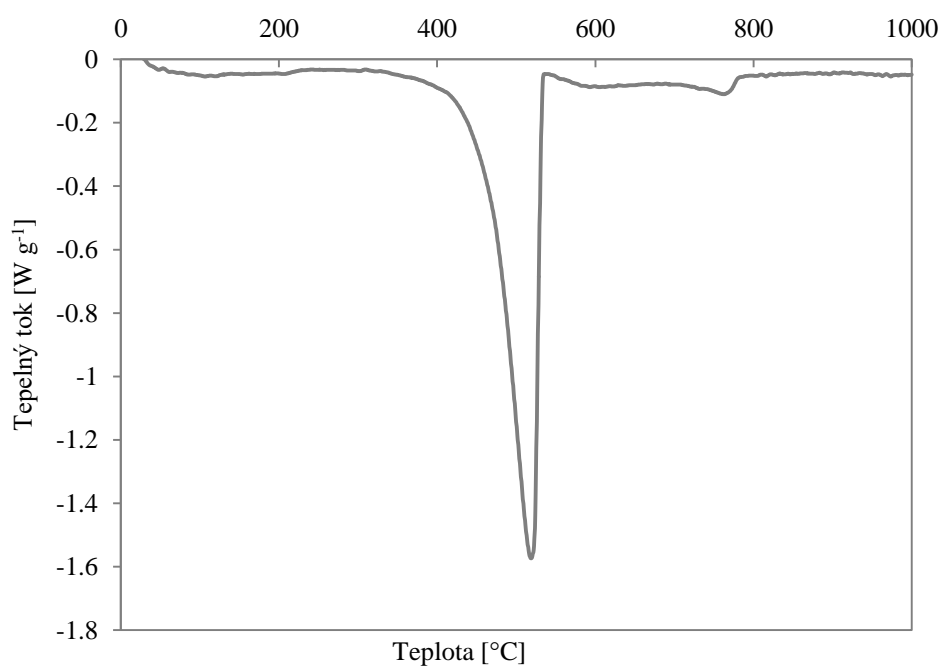
Obrázek 14. Distribuce velikosti částic vápenného hydrátu CL 90 S

Na obrázku 15 je graf použitého vápenného hydrátu CL 90 S, který znázorňuje relativní změnu hmotnosti při teplotním zatížení. Obrázek 16 zaznamenává vývoj tepelného toku

studovaného vápna. Tyto oba grafy (Obrázek 15 a 16) byly naměřeny na samotném práškovém vápenném hydrátu a to pomocí metody TG/DSC.



Obrázek 15. Relativní změna hmotnosti vápenného hydrátu pomocí metody DSC



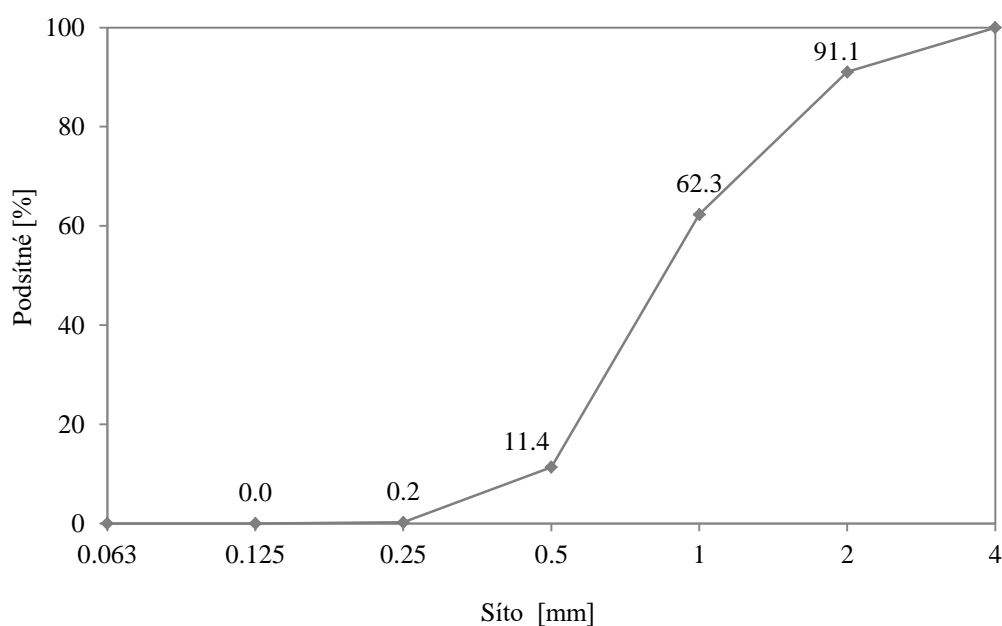
Obrázek 16. Teplný tok studovaného vápenného hydrátu pomocí metody DSC

## 7.2 Křemičité kamenivo

Použité technické křemičité kamenivo pochází od firmy Sklopísky Střeleč, a. s. Jedná se o písky, které obsahují vysoký obsah  $\text{SiO}_2$  (přes 99 %) [55]. Chemické složení (XRF metoda) použitého kameniva lze vidět v tabulce 2. Křivku zrnitosti použitého písku lze vidět na obrázku 17. Tato křivka byla stanovena pomocí normové prosévací metody [56]. Jedná se o standardní písek, který používá většina výzkumných pracovníků při experimentu omítek s pucolánovou příměsí, jako např. Ferraz a kol. [28], Donatello a kol. [21] atd.

Tabulka 2. Chemické složení křemičitého písku

Chemické označení	Frakce [mm]		
	0,3 – 0,8	0,6 – 1,2	1,0 – 4,0
Množství $\text{SiO}_2$ [%]	99,4	99,2	99,2

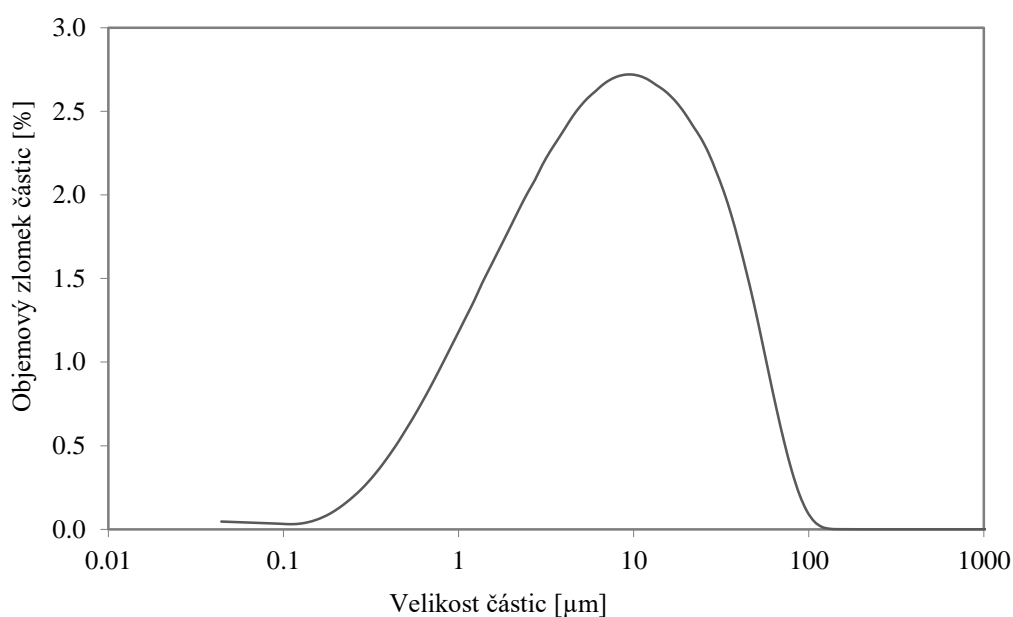


Obrázek 17. Křivka zrnitosti použitého křemičitého písku

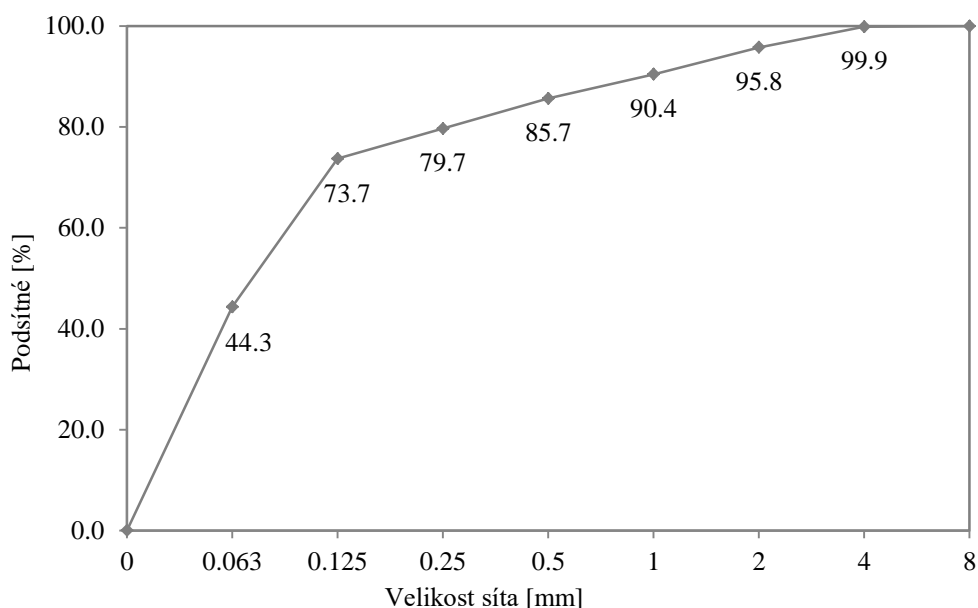
## 7.3 Cihelný prach

Použitý cihelný obrus vznikl jako druhotná surovina, která pocházela od firmy Heluz cihlářský průmysl v. o. s. Tento odpadní materiál vzniká při kalibraci (obrušování) tamních tepelně izolačních cihelných bloků. Tento jemně mletý cihelný prach byl zkoumán podrobněji, protože vykazoval dobré pucolánové vlastnosti a aktivně se podílí na vzniku vazeb ve struktuře vyvíjených materiálů při předchozích výzkumech [35, 36, 57].

Použitý cihelný obrus byl zkoumán dvěma metodami. Distribuce velikosti částic použitého cihelného prachu je zobrazena na obrázku 18, ta byla stanovena pomocí laserové difrakce [58]. Distribuce částic byla zkoumána na vzorku, který byl prosátý jemným sítem. U takto jemných částic již není vhodné použití prosévací metodu (viz. dále). Lze vidět (Obrázek 18), že zkoumaný prach obsahoval částice o průměru v rozmezí 0,1 až 100  $\mu\text{m}$ . Výhodou tohoto pucolánu byla jeho přirozená jemnost, která byla dána vlastním technologickým procesem, a tak odpadal krok domletí materiálu. Hodnota  $d_{50}$  byla 7,5  $\mu\text{m}$ . Měrný povrch byl zjištěn pomocí Blainova přístroje a dosahoval hodnotu 665  $\text{m}^2\text{kg}^{-1}$  [59]. Granulometrie cihelného obrusu byla měřena stejně jako kamenivo pomocí prosévací metody [56], je zobrazena na obrázku 19. Z grafu lze pozorovat, že jemný cihelný obrus obsahoval i větší částice (2 mm), jelikož se měřilo na neprosátém obrusu (z výroby). Tyto větší částice mohou mít negativní vliv na vlastnosti výsledného materiálu.



Obrázek 18. Distribuce velikosti částic cihelného prachu



Obrázek 19. Křivka zrnitosti cihelného prachu

Chemické složení cihelného prachu je shrnuto v tabulce 3. Cihelný prach obsahoval vyšší množství kovů alkalických zemin (Ca, Mg) a nižší obsah SiO<sub>2</sub>, než je obvyklé v metakaolínu, popílcích a dalších „běžných“ pucolánech. Celkové chemické složení zde není dostatečnou charakteristikou, důležitý je zejména obsah amorfnní fáze, která je reaktivní a dokáže se zapojit do hydratačního procesu (Tabulka 4 a 5).

Tabulka 3. Celkové chemické složení cihelného prachu

Chemické označení	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>
Množství [%]	51,3	20,0	6,0	11,5	4,5	3,2	1,3	0,8	1,0

Chemické složení amorfnního podílu bylo odhadnuto pomocí výpočtu ze známého celkového chemického složení (Tabulka 3.) a obsahu nejdůležitějších krystalických fází (Tabulka 4.).

Výsledky fázové analýzy jsou uvedeny v tabulce 4. Nejdůležitější je vysoké množství amorfnní složky (46,7 %). Je to více, než bylo zjištěno při dřívějších fázových analýzách jiných cihelných střepů. Nejvíce zastoupená krystalická fáze byl křemen (23,6 %) a následuje celá řada dalších křemičitanů (živec a slídy). Při použití tohoto cihelného prachu se krystalická fáze, která se dodává jako pojivo, uplatní jako plnivo, zatím co amorfnní fáze má potenciál působit jako aktivní složka pojiva [60].

Tabulka 4. Fázové složení cihelného prachu

Fázové složky		Množství [%]
Amorfni podíl		46,7
Křemen		23,6
Živec	Albit	6,5
	Mikroclin	7,2
	Ortoklas	2,8
Slídy	Biotit	0,9
	Muskovit	2,6
Ostatní křemičitany	Akermanit	4,4
	Hedenbergit	3,8
Hematit		1,4
Ettringit		0,4

Lze předpokládat, že složení amorfniho podílu (Tabulka 5.) se velmi blíží rozdílu mezi celkovým obsahem jednotlivých oxidů v materiálu a jejich obsahem v jednotlivých krystalických fázích. Je zřejmé, že se jedná pouze o odhad, nicméně poskytující jistou a jedinou dostupnou představu o povaze amorfni fáze (Tabulka 5.). Nejvýznamnější složkou byl  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (33,7 %). Při uvážení složení amorfniho podílu ještě více vynikne rozdíl mezi cihelným prachem a ostatními pucolány [60].

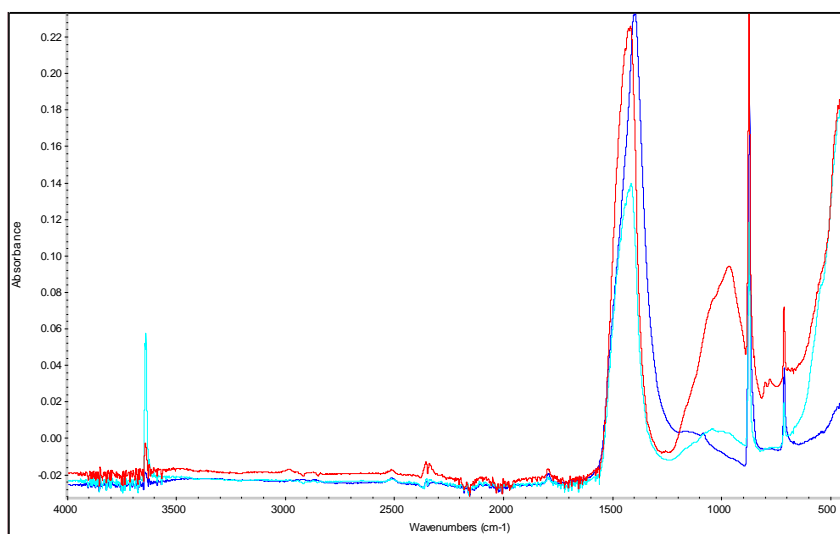
Tabulka 5. Přibližné chemické složení amorfniho podílu v cihelném obrusu

Chemické označení	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	$\text{SO}_3$
Množství [%]	24,4	33,7	7,1	19,0	7,9	2,3	1,1	1,5	1,2

Pucolánová aktivita byla zjišťována pomocí modifikace testu, který zjišťuje jaké množství  $\text{Ca(OH)}_2$  zreaguje s příslušným pucolánem. Byla použita standardní metoda dle příslušné normy [51] s pozitivním výsledkem. Tato metoda je pouze orientační a dokáže říci, zda pucolánové reakce probíhají nebo neprobíhají. Pro podrobnější studium je nedostačující. Z tohoto důvodu byl cihelný prach podroben infra-červené spektroskopii. Tato metoda detekuje chemické vazby [60].



Pomocí FTIR spektra bylo zjištěno, jak probíhala pucolánová reakce mezi cihelným obrusem a vápenným hydrátem. Byly připraveny jednoduché vzorky, které obsahovaly hydrát, cihelný prach a vodu. Tato směs byla zajištěna na konstantní konzistenci (rozliv 160/160 mm) [61]. Čistý vápenný hydrát byl označen jako LH0, vzorek s 10 % cihelného prachu a 90 % hydrátu byl popsán jako LH10 a jako LH50 byl označen materiál s 50 % cihelného obrusu a 50 % vápna. FTIR spektra, resp. zvyšující se absorbance vibračního pásu kolem  $1000\text{ cm}^{-1}$  (odpovídá asymetrické vibraci Si-O-Si ve vznikajícím CSH gelu) ukázala, že pucolánová reakce probíhala (Obrázek 20) [60].



Obrázek 20. FTIR spektra směsí cihelný obrus + vápenný hydrát

## 8 Optimalizace vápenno-pucolánové směsi

### 8.1 Náhrada pojiva

Podrobné složení studovaných omítek lze vidět v tabulce 6. Zkoumanými omítkami byly vápenné omítky, do kterých bylo přidáno postupně narůstající množství cihelného obrusu na úkor vápenného hydrátu (pojiva). Referenční omítka byla označena jako CCR a jednalo se o klasickou vápennou omítku bez jakýchkoliv příměsí. Omítky obsahující určité procentuální zastoupení cihelného obrusu (10 – 50 %) byly označeny CC1 až CC6. Čerstvé omítkové směsi byly navrženy na konstantní rozliv (160/160 mm) určený dle normy [61]. Na výrobu omítek CC klesala spotřeba vody spolu s narůstajícím množstvím cihelného obrusu ve směsi, jak lze vidět v tabulce 6 v posledním sloupci.

Tabulka 6. Materiálové složení omítek CC na 15 kg suché směsi

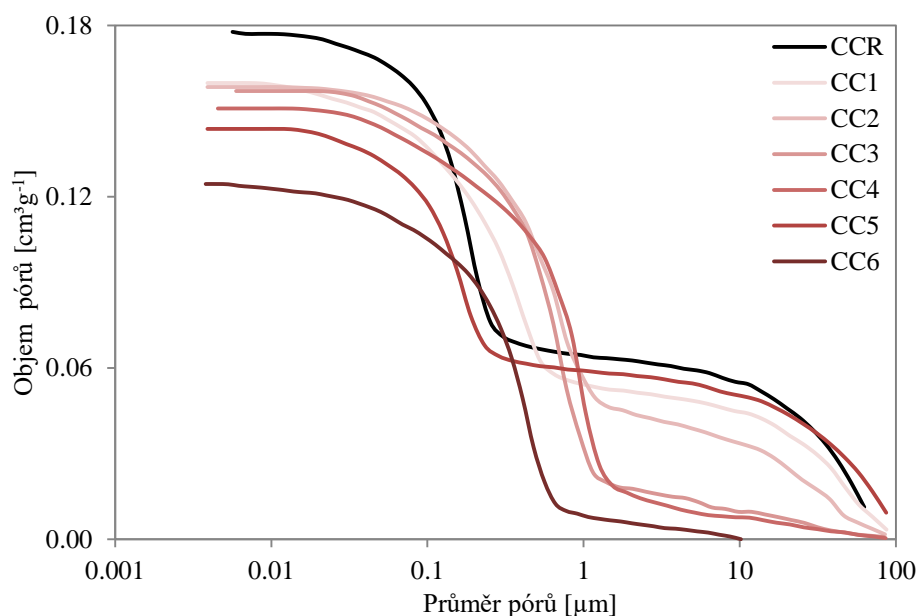
Materiál	Vápenný hydrát [kg]	Cihelný obrus [kg]	Kamenivo [kg]			Voda/suché složky
			0,3 – 0,8	0,6 – 1,2	1,0 – 4,0	
CCR	3,75	0,00	3,75	3,75	3,75	3,6
CC1	3,56	0,19	3,75	3,75	3,75	3,5
CC2	3,38	0,38	3,75	3,75	3,75	2,8
CC3	3,00	0,75	3,75	3,75	3,75	2,4
CC4	2,63	1,13	3,75	3,75	3,75	2,3
CC5	2,25	1,50	3,75	3,75	3,75	2,2
CC6	1,88	1,88	3,75	3,75	3,75	2,2

Základní fyzikální vlastnosti studovaných omítek CC lze vidět v tabulce 7. Všechny hodnoty (objemové hmotnosti, hustoty matrice i otevřené pórovitosti) narůstaly spolu s narůstajícím obsahem pucolánu ve vápenné omítce. Hodnoty objemové hmotnosti omítky CC6 oproti omítce CCR vzrostly o 14 %, hodnoty hustoty matrice vzrostly o 6 % a hodnoty otevřené pórovitosti vzrostly o 4 % při měření pomocí vakuové nasákavosti.

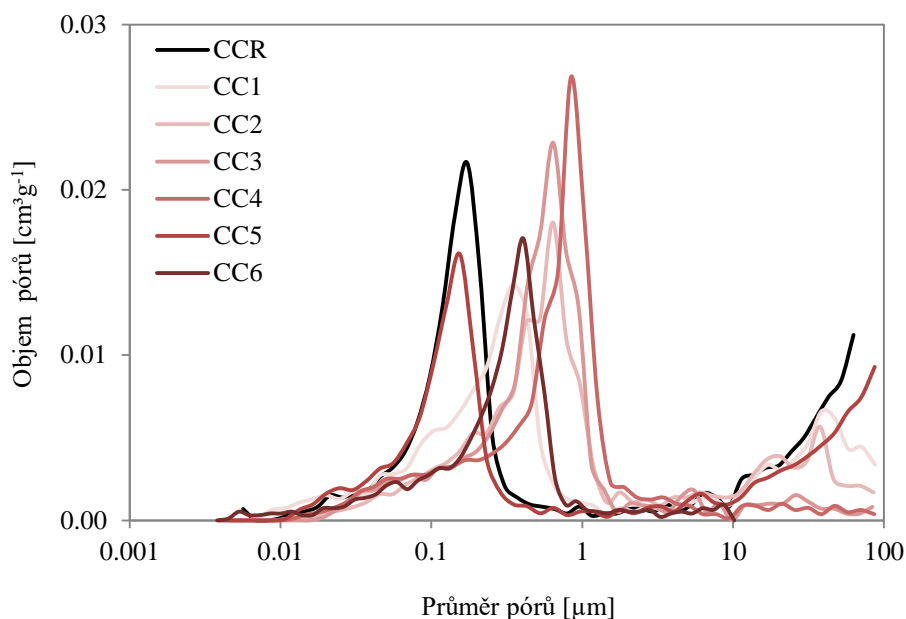
Tabulka 7. Základní fyzikální vlastnosti omítek CC

Materiál	Vakuová nasákavost			Héliová pyknometrie		
	$\rho$ [kg m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{\text{mat}}$ [kg m <sup>-3</sup> ]	$\psi_0$ [-]	$\rho$ [kg m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{\text{mat}}$ [kg m <sup>-3</sup> ]	$\psi_0$ [-]
CCR	1554	2401	30,1	1602	2610	32,6
CC1	1570	2414	30,0	1513	2527	32,4
CC2	1624	2431	30,3	1647	2587	32,3
CC3	1751	2481	30,4	1743	2611	33,3
CC4	1794	2493	30,7	1714	2645	35,0
CC5	1798	2501	31,0	1648	2654	36,9
CC6	1805	2560	31,3	1662	2660	37,0

Na obrázcích 21 a 22 lze vidět charakterizaci pórového systému omítek CC. Referenční – vápenná - omítka CCR se vyznačuje bimodální porozimetrickou křivkou; přítomny jsou jednak kapilární póry o typické velikosti v desítkách  $\mu\text{m}$  a jednak póry obsažené ve vlastním pojivu (analogie gelových pórů známých z cementových systémů) o velikosti řádově desetín  $\mu\text{m}$ . CCR vykazuje střední velikost těchto menších pórů 0,17  $\mu\text{m}$ . S narůstajícím obsahem cihelného obrusu v omítkách docházelo k významnému snižování objemu kapilárních pórů; střední velikost pórů se poněkud zvětšila do hodnot kolem 0,4 – 0,8  $\mu\text{m}$ .



Obrázek 21. Kumulativní křivka pórů omítek CC



Obrázek 22. Distribuční křivka pórů omítek CC

Mechanické vlastnosti omítek CC lze vidět v tabulce 8. Nejnižší hodnoty mechanických vlastností vykazovala omítka CCR. Je zde patrný trend, že s narůstajícím obsahem cihelného prachu v omítkových směsích narůstají i mechanické parametry. Hodnoty pevnosti v tahu za ohybu speciální omítky CC6 vzrostly proti referenčnímu materiálu CCR o 23% a hodnoty pevnosti v tlaku materiálu CC6 vzrostly 2krát oproti omítce referenční CCR.

Tabulka 8. Mechanické vlastnosti omítek CC

Materiál	$f_f$ [MPa]	$f_c$ [MPa]
CCR	0,27	0,94
CC1	0,14	0,70
CC2	0,25	1,16
CC3	0,26	1,28
CC4	0,26	1,33
CC5	0,34	1,93
CC6	0,35	1,97

Výsledné parametry transportu vodní páry omítek CC lze vidět v tabulce 9. I zde je vidět jistý trend: s narůstajícím obsahem cihelného obrusu v omítkových směsích narůstají i hodnoty faktoru difúzního odporu, a to jak v uspořádání dry cup, tak i v uspořádání wet cup.

Omítka CC6 vykazovala o zhruba 21 % vyšší hodnoty faktoru difúzního odporu u dry cupu a o 29 % vyšší u wet cupu.

Tabulka 9. Výsledné hodnoty transportu vodní páry omítek CC

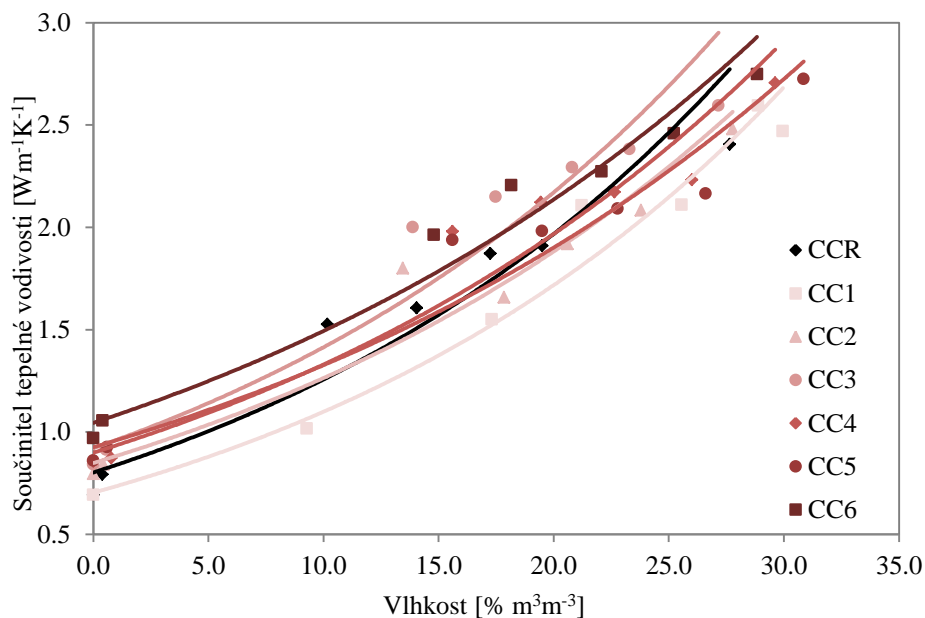
Materiál	Dry cup			Wet cup		
	$\delta$ [s]	$D$ [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ]	$\mu$ [-]	$\delta$ [s]	$D$ [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ]	$\mu$ [-]
CCR	1,07E-11	1,47E-6	15,90	3,30E-11	4,54E-6	5,14
CC1	1,14E-11	1,56E-6	14,77	3,58E-11	4,92E-6	4,68
CC2	8,89E-12	1,23E-6	18,72	2,76E-11	3,79E-6	6,14
CC3	8,61E-12	1,19E-6	19,01	2,67E-11	3,61E-6	6,33
CC4	8,52E-12	1,17E-6	19,65	2,60E-11	3,58E-6	6,50
CC5	8,51E-12	1,17E-6	19,68	2,51E-11	3,44E-6	6,69
CC6	8,44E-12	1,16E-6	20,00	2,33E-11	2,33E-6	7,27

Výsledné hodnoty transportu kapalné vody omítek CC jsou zobrazeny v tabulce 10. Nejvyšší hodnotu vlhkostního absorpčního koeficientu  $0,529 \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1/2}$  vykazuje referenční omítka CCR. Naopak nejnižší hodnoty tohoto parametru  $0,179 \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1/2}$  vykazuje omítka s nejvyšším zastoupením cihelného obrusu CC6. Hodnota vlhkostního absorpčního koeficientu omítky CC6 klesla oproti materiálu CCR skoro 3krát. Je zřejmá přímá souvislost mezi snižujícím se objemem kapilárních pórů a snižováním rychlosti transportu kapalné vody i, méně významně, vodní páry.

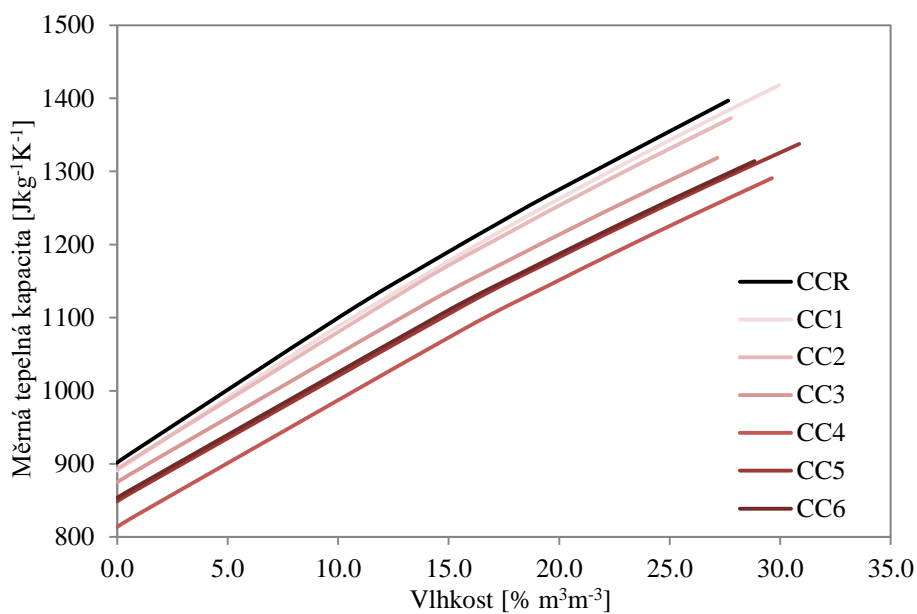
Tabulka 10. Výsledné hodnoty transportu kapalné vody omítek CC

Materiál	$A$ [ $\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1/2}$ ]	$\kappa$ [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ]
CCR	0,529	3,24E-6
CC1	0,486	2,31E-6
CC2	0,218	5,38E-7
CC3	0,194	4,47E-7
CC4	0,194	4,49E-7
CC5	0,181	3,82E-7
CC6	0,179	3,74E-7

Tepelné vlastnosti nevykazují takových rozdílných hodnot. Graf součinitele tepelné vodivosti omítek CC v závislosti na vlhkosti lze vidět na obrázku 23. Měrná tepelná kapacita v závislosti na vlhkosti je zobrazena na obrázku 24.



Obrázek 23. Součinitel tepelné vodivosti omítek CC



Obrázek 24. Měrná tepelná kapacita omítek CC

## 8.2 Náhrada plniva

Podrobné složení studovaných omítek CK lze vidět v tabulce 11. Zkoumaná omítka se skládala z vápenné omítky, do které bylo přidáno na úkor kameniva (plniva) procentuálně rozdílné množství cihelného obrusu. Referenční omítka byla označena jako CKR. Omítky obsahující určité procentuální zastoupení cihelného obrusu (10 – 50 %) byly označeny CK1 až CK6. Čerstvé omítkové směsi byly navrženy na konstantní rozliv (160/160 mm) a ten byl určován dle normy [61]. U omítek CK vzrůstala spotřeba vody spolu s narůstajícím množstvím pucolánu ve směsi.

Tabulka 11. Materiálové složení omítek CK na 15 kg suché směsi

Materiál	Vápenný hydrát [kg]	Cihelný obrus [kg]	Kamenivo [kg]			Voda/suché složky
			0,3 – 0,8	0,6 – 1,2	1,0 – 4,0	
CKR	3,75	0,00	3,75	3,75	3,75	3,8
CK1	3,75	0,56	3,56	3,56	3,56	4,0
CK2	3,75	1,13	3,38	3,38	3,38	4,1
CK3	3,75	2,25	3,00	3,00	3,00	4,2
CK4	3,75	3,38	2,63	2,63	2,63	4,5
CK5	3,75	4,50	2,25	2,25	2,25	5,0
CK6	3,75	5,63	1,88	1,88	1,88	5,5

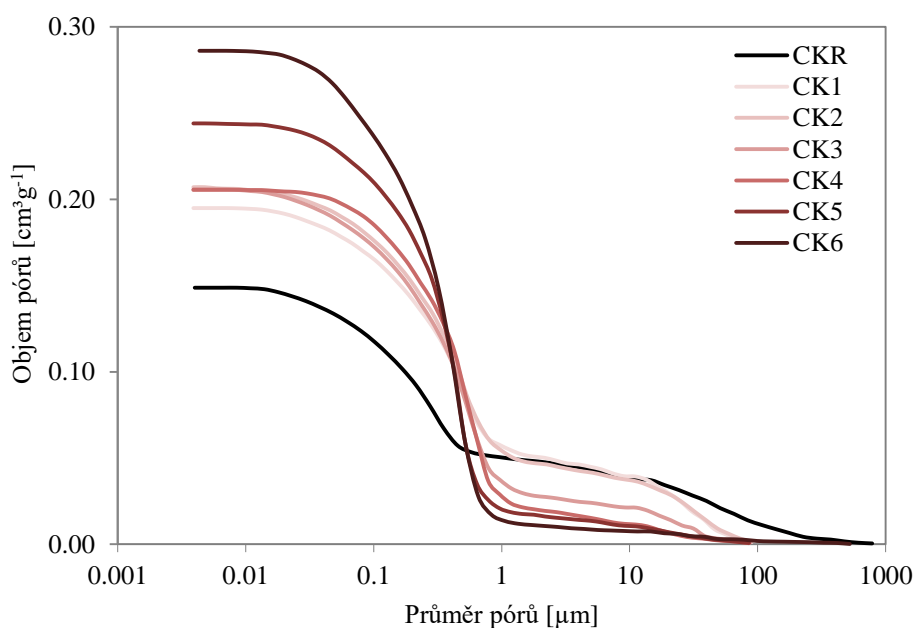
Základní fyzikální vlastnosti omítek CK lze vidět v tabulce 12, jsou zde zobrazeny jak výsledné hodnoty pomocí vakuové nasákavosti, tak i pomocí héliové pyknometrie. Hodnoty objemové hmotnosti mírně klesají s narůstajícím obsahem cihelného prachu v maltě. Naopak hodnoty hustoty matrice a otevřené pórovitosti narůstají s narůstajícím obsahem cihelného obrusu v omítkové směsi. Hodnoty otevřené pórovitosti omítky CK6 narostly oproti referenčnímu materiálu CKR o 34 % při použití vakuové nasákavosti a o 21 % při použití héliové pyknometrie.

Tabulka 12. Základní fyzikální vlastnosti CK omítek

Materiál	Vakuová nasákavost			Héliová pyknometrie		
	$\rho$ [kg m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{\text{mat}}$ [kg m <sup>-3</sup> ]	$\psi_0$ [-]	$\rho$ [kg m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{\text{mat}}$ [kg m <sup>-3</sup> ]	$\psi_0$ [-]
CKR	1699	2328	27,0	1652	2576	35,9

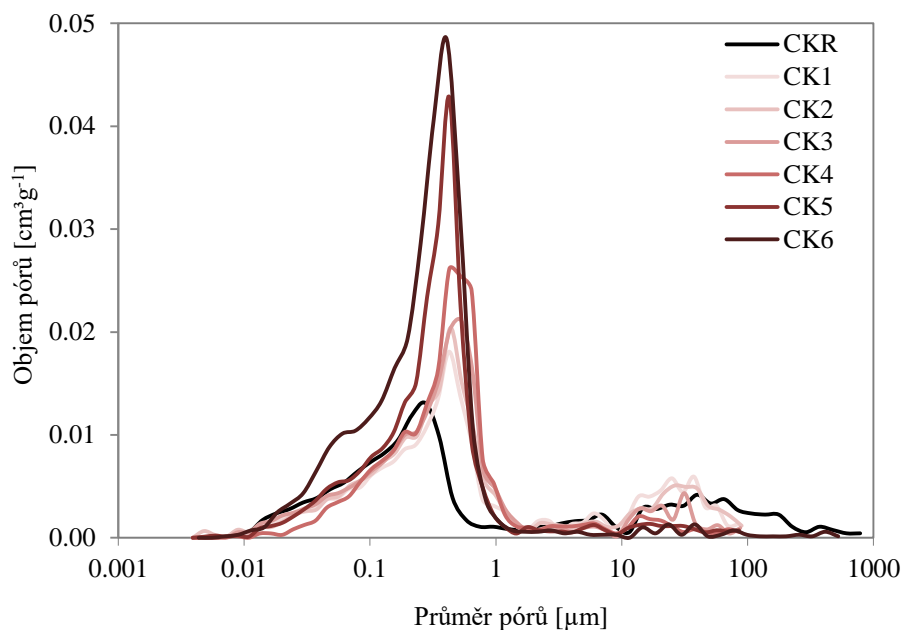
CK1	1699	2384	30,0	1634	2589	36,9
CK2	1628	2392	32,0	1596	2591	38,4
CK3	1603	2427	34,0	1560	2606	40,1
CK4	1572	2469	36,3	1561	2640	40,9
CK5	1515	2488	38,9	1479	2602	43,1
CK6	1479	2487	40,8	1454	2660	45,4

Kumulativní křivku a distribuční křivku pórů omítek CK lze vidět na obrázku 25 a 26. Je zde patrné, že nejvyšších hodnot otevřené pórovitosti i největší množství menších pórů vykazuje materiál s nejvyšším zastoupením cihelného obrusu CK6. Referenční omítkou CKR je na obrázcích 25 a 26 vyznačena černou barvou a je zde patrné, že je vždy tou křivkou nejnižší položenou, což znamená, že obsahuje i nejmenší množství pórů.



Obrázek 25. Kumulativní křivka pórů omítek CK





Obrázek 26. Distribuční křivka pórů omítek CK

Mechanické vlastnosti omítek CK jsou znázorněny v tabulce 13. Mechanické charakteristiky omítek se s narůstajícím množstvím cihelného obrusu zlepšovaly. Hodnoty pevností v tahu za ohybu vzrostly u omítky CK6 oproti materiálu CKR skoro 5krát a hodnoty pevností v tlaku vzrostly 7,5krát.

Tabulka 13. Mechanické vlastnosti omítek CK

Materiál	$f_f$ [MPa]	$f_c$ [MPa]
CKR	0,25	0,62
CK1	0,28	0,75
CK2	0,30	0,84
CK3	0,51	1,85
CK4	1,41	4,18
CK5	1,16	4,26
CK6	1,21	4,80

Výsledné hodnoty transportu vodní páry omítek CK lze vidět v tabulce 14. Hodnoty faktoru difúzního odporu spolu s narůstajícím procentuálním zastoupením pucolánu ve vápenné omítkce klesají, a to jak ve dry cupu tak i wet cupu. Hodnoty faktoru difúzního odporu omítky CK6 klesly o 16 % (dry cup) a o 23 % (wet cup) oproti referenční omítkce

CKR. Rozdíl hodnot faktoru difúzního odporu mezi dry a wet cupem je nepatrný oproti ostatním omítkám CP a CC.

Tabulka 14. Výsledné hodnoty transportu vodní páry omítek CK

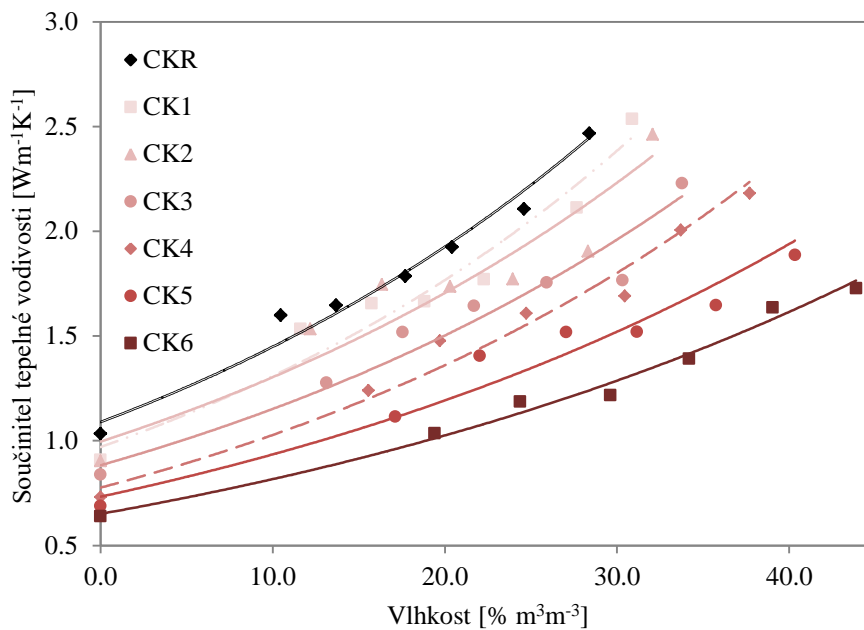
Materiál	Dry cup			Wet cup		
	$\delta$ [s]	$D$ [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ]	$\mu$ [-]	$\delta$ [s]	$D$ [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ]	$\mu$ [-]
CKR	1,55E-11	2,13E-6	10,84	1,68E-11	2,31E-6	9,88
CK1	1,54E-11	2,11E-6	10,91	1,77E-11	2,43E-6	9,49
CK2	1,62E-11	2,22E-6	10,36	2,17E-11	2,98E-6	8,89
CK3	1,69E-11	2,33E-6	9,89	2,00E-11	2,74E-6	8,43
CK4	1,73E-11	2,38E-6	9,69	2,04E-11	2,80E-6	8,23
CK5	1,80E-11	2,47E-6	9,32	2,06E-11	2,84E-6	8,13
CK6	1,83E-11	2,52E-6	9,13	2,19E-11	3,02E-6	7,63

Výsledné hodnoty transportu kapalné vlhkosti omítek CK lze vidět v tabulce 15. Je zde patrný trend, že s narůstajícím procentuálním zastoupením pucolánu v omítce klesaly hodnoty vlhkostního absorpčního koeficientu. Omítka CK6 vykazuje o 31 % menší hodnotu absorpčního koeficientu než referenční materiál CKR.

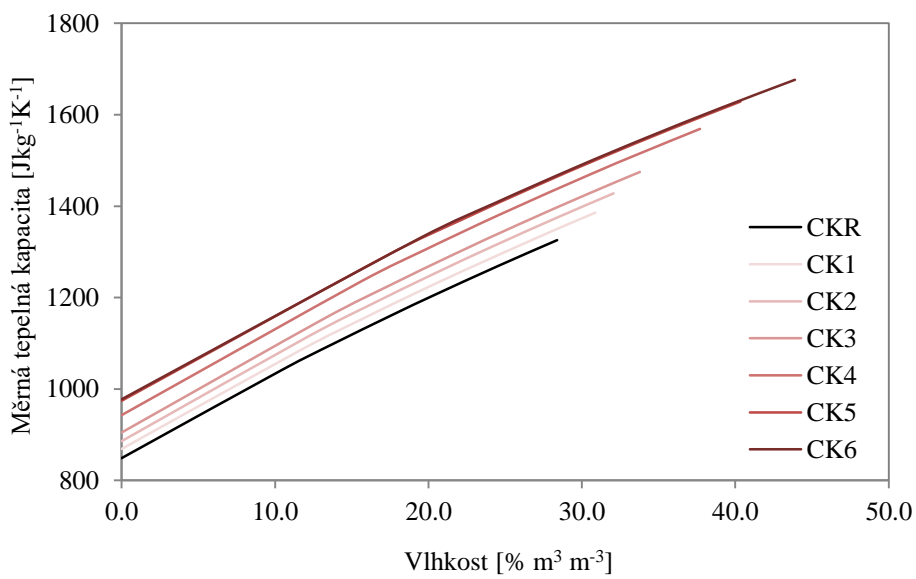
Tabulka 15. Výsledné hodnoty transportu kapalné vody omítek CK

Materiál	$A$ [ $\text{kg m}^2\text{s}^{1/2}$ ]	$\kappa$ [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ]
CKR	0,253	9,53E-7
CK1	0,185	3,98E-7
CK2	0,184	3,65E-7
CK3	0,184	3,10E-7
CK4	0,180	2,43E-7
CK5	0,178	2,10E-7
CK6	0,175	1,86E-07

Tepelné vlastnosti (součinitele tepelné vodivosti a měrnou tepelnou kapacitu) omítek CK lze vidět na obrázku 27 a 28. Referenční omítka CKR vykazovala největších hodnot součinitele tepelné vodivosti, nejmenších hodnot naopak vykazovala omítka CK6.



Obrázek 27. Součinitel tepelné vodivosti CK omítek



Obrázek 28. Měrná tepelná kapacita omítek CK

### 8.3 Náhrada pojiva i plniva

V tabulce 16 je zobrazeno materiálové složení studovaných omítek CP. Zkoumaná omítka se skládá z klasické vápenné omítky, do které se přidá rozdílné procentuální zastoupení cihelného obrusu. Snahou bylo částečně nahradit vápenný hydrát i křemičité kamenivo tímto pucolánem. Vápenný hydrát, který je obsažen ve zkoumaných omítkách, je označován jako Čerták (CL 90 S). Jako referenční omítka CPR byla použita čistě vápenná omítka. Speciální omítky, ve kterých je již určité procentuální zastoupení cihelného prachu, byly označeny CP1 (5 %) až CP6 (50 %).

Tabulka 16. Materiálové složení omítek CP na 15 kg suché směsi

Materiál	Vápenný hydrát [kg]	Cihelný obrus [kg]	Kamenivo [kg]			Voda/suché složky
			0,3 – 0,8	0,6 – 1,2	1,0 – 4,0	
CPR	3,75	0,00	3,75	3,75	3,75	3,7
CP1	3,66	0,38	3,66	3,66	3,66	3,8
CP2	3,56	0,75	3,56	3,56	3,56	3,9
CP3	3,38	1,50	3,38	3,38	3,38	4,3
CP4	3,19	2,25	3,19	3,19	3,19	4,4
CP5	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	4,4
CP6	2,81	3,75	2,81	2,81	2,81	4,4

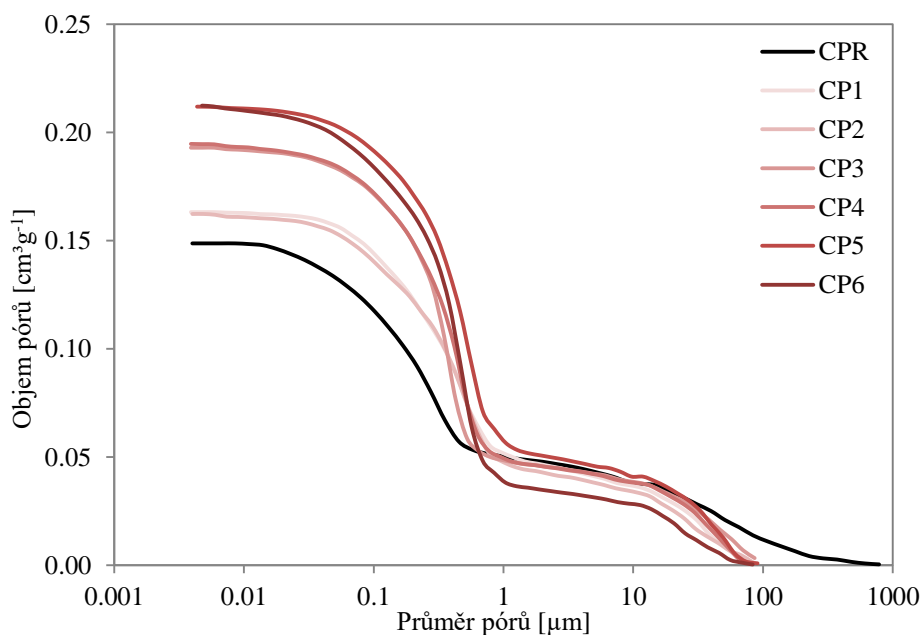
V tabulce 17 jsou uvedeny základní fyzikální parametry (objemová hmotnost, hustota matrice a otevřená pórovitost) stanovené pomocí metody vážení vysušeného vzorku, vážení vzorku plně nasyceného vodou a vzorku plně nasyceného vodou váženého pod vodou. Pro srovnání byly tyto vlastnosti určeny i pomocí héliového pyknometru (Tabulka 17). Z dosažených hodnot lze vyčíst, že objemová hmotnost se pro všechny naměřené vzorky liší jen nepatrně, a to jak u výsledků určených pomocí vakuové nasákavosti, tak i héliovým pyknometrem. Hodnoty hustoty pevné matrice a otevřené pórovitosti rostou spolu s vyšším procentuálním zastoupením jemně mletého keramického střepu. Hodnota speciální omítky CP6 objemové hmotnosti klesla oproti referenční omítce CPR o 6 % při vakuové nasákavosti a o 3 % u héliové pyknometrie. Hodnoty otevřené pórovitosti a hustoty matrice s narůstajícím procentuálním zastoupením pucolánu narůstají. Hodnota hustoty matrice omítky CP6 vzrostla oproti referenční omítce CPR o 11 % u vakuové nasákavosti a o 3 % u héliové pyknometrie.

A hodnota otevřené pórovitosti, která byla měřena pomocí vakuové nasákavosti, vzrostla u omítky CP6 oproti omítkce CPR o 29 %, a u metody héliové pyknometrie o 6,5 %.

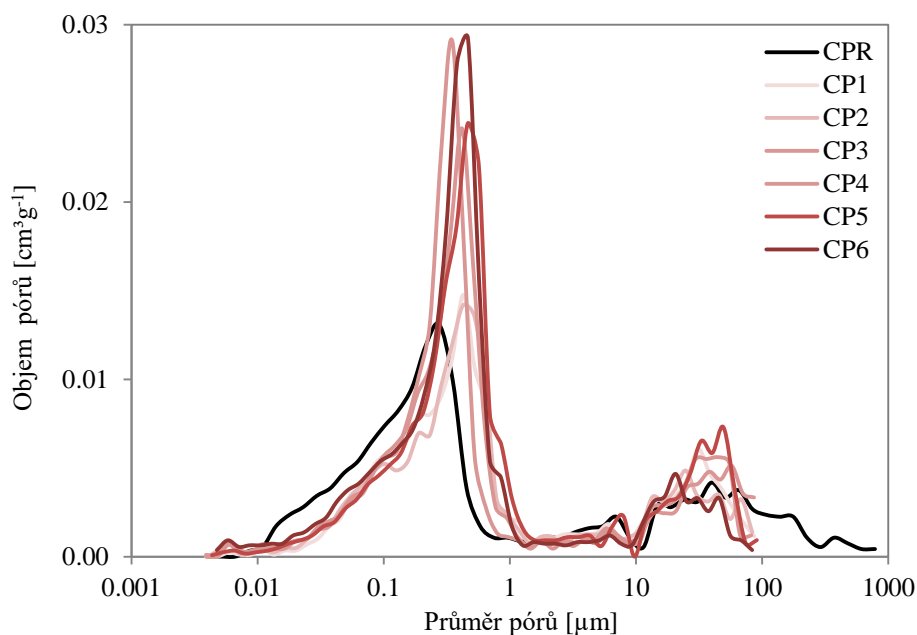
Tabulka 17. Základní vlastnosti omítek CP

Materiál	Vakuová nasákavost			Héliová pyknometrie		
	$\rho$ [kg m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{\text{mat}}$ [kg m <sup>-3</sup> ]	$\psi_0$ [-]	$\rho$ [kg m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{\text{mat}}$ [kg m <sup>-3</sup> ]	$\psi_0$ [-]
CPR	1699	2328	27,0	1652	2576	35,9
CP1	1695	2558	33,7	1652	2601	37,0
CP2	1675	2557	34,5	1647	2609	36,9
CP3	1590	2581	38,4	1631	2609	37,9
CP4	1618	2599	37,4	1614	2619	38,4
CP5	1613	2609	38,2	1603	2639	39,3
CP6	1598	2622	39,1	1603	2653	39,6

Na obrázcích 29 a 30 jsou znázorněny charakteristiky pórového systému studovaných materiálů. Z dosažených výsledků je patrné, že cihelný prach mění pórový systém omítek a lze konstatovat, že cihelný obrus zvyšuje počet menších pórů v materiálu a opět do jisté míry klesá objem kapilárních pórů. Jak lze vidět z porozimetrických křivek, referenční vzorek CPR obsahuje více větších pórů oproti vzorku CP6, který obsahuje 60% množství jemného cihelného střeptu.



Obrázek 29. Kumulativní křivka pórů omítek CP



Obrázek 30. Distribuční křivka pórů omítek CP

Výsledné hodnoty mechanických zkoušek jsou uvedeny v tabulce 18. Z dosažených výsledků je patrné, že oproti referenční omítce CPR dochází přidáním cihelného obrusu k nárůstu hodnot jak pevnosti v tlaku, tak i v tahu za ohybu. Referenční materiál CPR dosáhl průměrně o 5,5krát nižší pevnosti v tlaku než vzorek s největší pevností CP6 a také průměrně o 50 % nižší pevnost v tahu za ohybu.

Tabulka 18. Mechanické vlastnosti omítek CP

Materiál	$f_f$ [MPa]	$f_c$ [MPa]
CPR	0,25	0,62
CP1	0,34	1,23
CP2	0,36	1,33
CP3	0,41	1,82
CP4	0,42	1,90
CP5	0,43	2,04

Výsledné hodnoty transportu vodní páry omítek CP lze vidět v tabulce 19. Nejnižších hodnot součinitele difúze vodní páry dosáhl referenční materiál CPR bez obsahu pucolánové příměsi, a to jak v uspořádání dry cup, tak i wet cup. Hodnota faktoru difúzního odporu materiálu s největším obsahem cihelného obrusu CP6 se oproti referenčnímu materiálu CPR snížila o 32 % v případě metody dry cup a o 6 % v případě metody wet cup.

Tabulka 19. Výsledné hodnoty transportu vodní páry omítek CP

Materiál	Dry cup			Wet cup		
	$\delta$ [s]	$D$ [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ]	$\mu$ [-]	$\delta$ [s]	$D$ [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ]	$\mu$ [-]
CPR	4,55E-12	6,25E-7	37,2	2,41E-11	3,31E-6	7,01
CP1	4,60E-12	6,32E-7	36,56	2,49E-11	3,42E-6	6,81
CP2	4,82E-12	6,63E-7	34,76	2,49E-11	3,42E-6	6,74
CP3	4,93E-12	6,77E-7	34,47	2,69E-11	3,69E-6	6,64
CP4	4,97E-12	6,83E-7	33,80	2,53E-11	3,48E-6	6,61
CP5	5,30E-12	7,28E-7	31,60	2,54E-11	3,48E-6	6,50
CP6	6,64E-12	9,12E-7	25,31	2,64E-11	3,63E-6	6,57

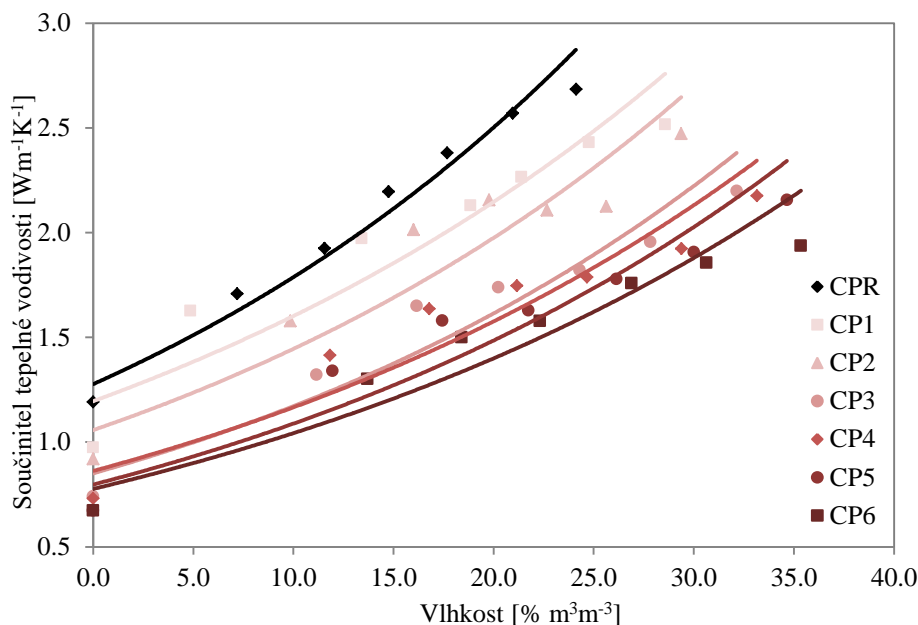
Výsledné hodnoty transportu kapalné vlhkosti lze vidět v tabulce 20. Z dosažených výsledků lze pozorovat, že s narůstajícím množstvím pucolánové příměsi obsažené v omítkové směsi nepatrně klesá i schopnost materiálu transportovat kapalnou vlhkost. Nejnižších hodnot součinitele vlhkostní vodivosti dosáhla omítka s nejvyšším obsahem pucolánové příměsi CP6. Hodnota součinitele vlhkostní vodivosti omítky CP6 se snížila 2,5krát oproti referenční omítce CPR. Hodnota absorpčního koeficientu se u speciální omítky CP6 snížila v průměru o 6 % oproti referenčnímu vzorku.

Tabulka 20. Výslední hodnoty transportu kapalné vody omítek CP

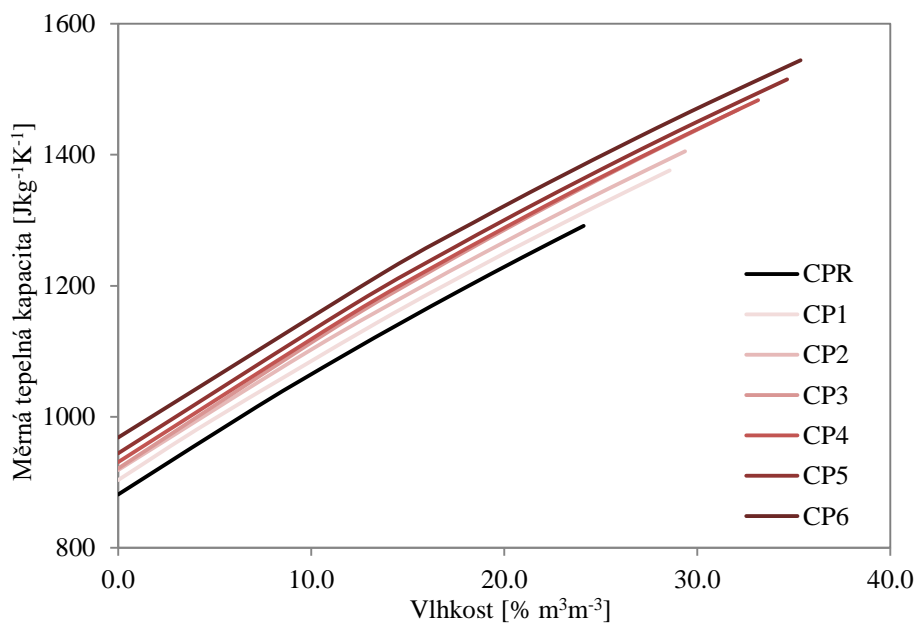
Materiál	$A$ [ $\text{kg m}^2\text{s}^{1/2}$ ]	$\kappa$ [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ]
CPR	0,235	7,65E-7
CP1	0,235	4,94E-7
CP2	0,234	4,93E-7
CP3	0,233	4,11E-7
CP4	0,232	3,91E-7
CP5	0,229	3,63E-7
CP6	0,221	3,10E-7

Závislost tepelných vlastností studovaných materiálů na obsahu vlhkosti je znázorněna na obrázku 31 a 32. Z dosažených výsledků je patrné, že nejvyšší hodnoty součinitele tepelné vodivosti dosáhl referenční materiál CPR bez obsahu pucolánové příměsi. Nejlepší tepelně izolační vlastnosti vykazoval materiál s nejvyšším obsahem cihelného obrusu CP6.

V porovnání s referenčním materiálem CPR byla hodnota součinitele tepelné vodivosti materiálu CP6 téměř 2krát nižší (ve vysušeném stavu). Z dosažených výsledků je patrný trend poklesu hodnoty součinitele tepelné vodivosti ve studovaných omítkových směsích s obsahem pucolánové příměsi. Stejný trend lze pozorovat při nárůstu obsahu vlhkosti. Hodnota součinitele tepelné vodivosti plně nasyceného vzorku vodou u referenční omítky CPR se oproti materiálu vysušenému zvýšila průměrně 2krát a u speciálních omítek až 3krát.



Obrázek 31. Součinitel tepelné vodivosti omítek CP



Obrázek 32. Měrná tepelná kapacita omítek CP



## 9 Výsledná zkoumaná směs

### 9.1 Složení vápenatých past

Experimenty s pastami obsahujícími pouze vápenný hydrát a cihelný obrus byly do experimentálního programu zařazeny za účelem sledování vlivu složení pojiva (poměru hmotnosti cihelného obrusu a vápenného hydrátu) na jeho chování – zejména vývoj pórového systému a průběh karbonatace a hydratace.

Zkoumané pasty se skládaly z vápenného hydrátu CL 90 S (Čerták), cihelného obrusu a vody (Obrázek 33). Dále byla vyrobena sada vzorků určená pro pevnostní charakteristiky. Vápenný hydrát byl nahrazován cihelným obrusem od 10 % až do 90 % (Tabulka 21). Pasty byly označeny MP10, MP20 až MP90. Číslo v názvu označuje procentuální zastoupení cihelného prachu, zbytek pasty tvoří vápenný hydrát. Referenční materiál byl označen jako MPR a jednalo se o čistý vápenný hydrát. V tabulce 21 je zaznamenáno, kolik bylo zapotřebí vody (poměr vody k suchým složkám). Je patrné, že čím bylo vyšší procentuální zastoupení cihelného obrusu ve zkoumaných pastách, tím bylo zapotřebí menší množství vody k umíchání daného rozlivu. Rozliv byl pro všechny studované čerstvé pasty konstantní (140/140 mm) a byl zjišťován na setřásacím stolku dle normy [61]. Tento rozliv byl odlišně navržený od předchozího výzkumu optimalizace směsi (kapitola 8), jelikož bylo zapotřebí, aby pasty rychleji zatvrdly, a to i při vyšším obsahu cihelného obrusu. Na základě dosažených pevností byly vybrány pasty, které byly zkoumány podrobněji (MPR, MP10, MP50 a MP70).



Obrázek 33. Studované pasty při výrobě

Tabulka. 21. Materiálové složení studovaných past

Označení pasty	Vápenný hydrát [%]	Cihelný obrus [%]	Voda/suché látky
<b>MPR</b>	100	0	1,23
<b>MP10</b>	90	10	0,95
MP20	80	20	0,73
MP30	70	30	0,67
MP40	60	40	0,66
<b>MP50</b>	50	50	0,63
MP60	40	60	0,53
<b>MP70</b>	30	70	0,50
MP80	20	80	0,44
MP90	10	90	0,42

## 9.2 Navržení omítkových směsí

Podrobné složení studovaných omítek lze vidět v tabulce 22. Zkoumaná omítka (Obrázek 34) se skládala z vápenného hydrátu, do kterého bylo přidáno rozdílné procentuální množství cihelného obrusu. Pucolán nahrazoval jak pojivovou složku (vápenný hydrát), tak i plnivovou (kamenivo). Složení směsi vyplývalo z předchozích výzkumů, které studovaly tuto problematiku (Kapitola 8) [35, 36, 57].

Referenční omítka byla označena jako OMR a jednalo se o klasickou vápennou omítku bez jakýchkoliv příměsí. Omítky obsahující určité procentuální zastoupení cihelného obrusu byly označeny OM2 až OM6. Směsi byly navrženy tak, aby obsahovaly 10 až 30 % cihelného obrusu (vztaženo k součtu všech suchých složek). Poměr hmotnosti vápna a kameniva pak byl konstantní. Poměr cihelného obrusu k vápnu pokrývá interval od 0 do 1,7. Čerstvé omítkové směsi byly navrženy na konstantní rozliv (140/140 mm) a ten byl určován dle normy [61]. Návrh rozlivu byl odlišný oproti návrhům v předešlém výzkumu (Kapitola 8). Vodní součinitel, vztažený jen k vápnu a cihelnému prachu, byl stejný jako u past MP. Jak lze vidět v tabulce 22, tak na výrobu všech zkoumaných omítkových směsí bylo potřeba skoro stejné množství vody. Takto vyrobené vzorky byly zkoumány a sledovány především v časové závislosti.

Tabulka 22. Materiálové složení zkoumaných omítek na 25 kg suché směsi

Materiál	Vápenný hydrát [kg]	Cihelný obrus [kg]	Kamenivo [kg]			Voda/suché složky
			0,3 – 0,8	0,6 – 1,2	1,0 – 4,0	
OMR	6,3	0,0	6,3	6,3	6,3	0,25
OM2	5,6	2,5	5,6	5,6	5,6	0,26
OM3	5,3	3,8	5,3	5,3	5,3	0,24
OM4	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	0,25
OM5	4,7	6,3	4,7	4,7	4,7	0,26
OM6	4,4	7,5	4,4	4,4	4,4	0,25



Obrázek 34. Studované omítkové směsi při výrobě

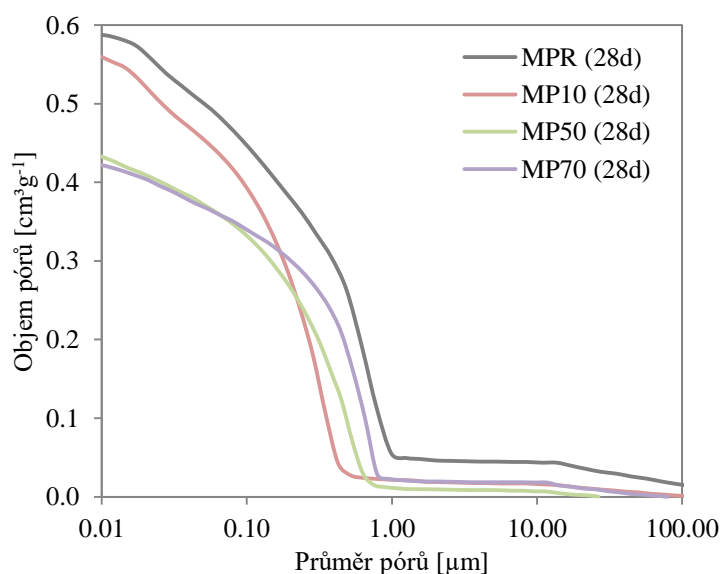
## 10 Výsledky a diskuze studovaných past

### 10.1 Charakteristika pórového systému

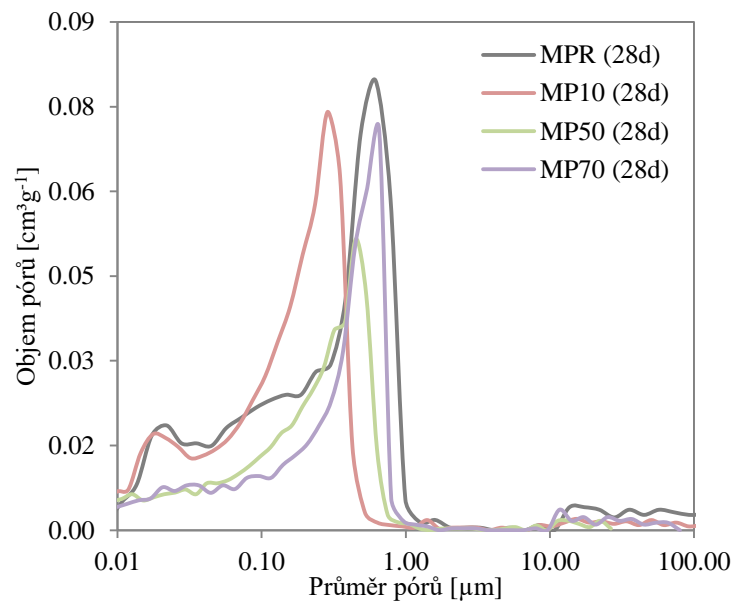
Charakteristiku pórového systému lze stanovit pomocí tzv. rtuťové porozimetrie. Tato metoda byla již podrobně popsána v kapitole výše (Kapitola 6.3). Vytvořené vzorky vápeno-pucolánových past byly pro tento typ experimentu uloženy do klimatické komory. Důvodem bylo zajištění konstantních podmínek všech vzorků po celý rok výzkumu. Klimatická komora byla nastavena na 50 % relativní vlhkosti a teplotu 25 °C.

Na obrázcích 35 a 36 jsou znázorněny charakteristiky pórového systému studovaných past ve stáří 28 dní. Tento konkrétní vzorek byl vybrán pro ukázkou trendu, jelikož 28 dní je standardní doba stáří, kdy se omítky klasicky prověřují. Z dosažených výsledků je patrné, že vzorek MP70, ve kterém je největší množství cihelného obrusu, obsahoval více menších pórů než materiály MP50 a MP10 i MR. Na distribuční křivce pórů (Obrázek 36) lze vidět, že pasta MP10 obsahovala největší množství pórů o velikosti okolo 0,3  $\mu\text{m}$ , vzorek MP50 okolo 0,45  $\mu\text{m}$  a materiál MP70 okolo 0,65  $\mu\text{m}$ . Je zde tedy patrný jistý trend, že se zvyšujícím se množstvím cihelného obrusu v pastách se zvyšoval i objem větších pórů.

Podobných výsledků dosáhl i Nežerka a kol., který zkoumal velice podobné pasty s cihelným prachem [30]. Tento fakt ovlivňuje veškeré další zkoumané charakteristiky, čehož si byl vědom i Maria [75]. Arandigoyen a Sharman dokázali, že záleží na množství vody [76], což bylo zohledněno i u navrhovaných směsí.



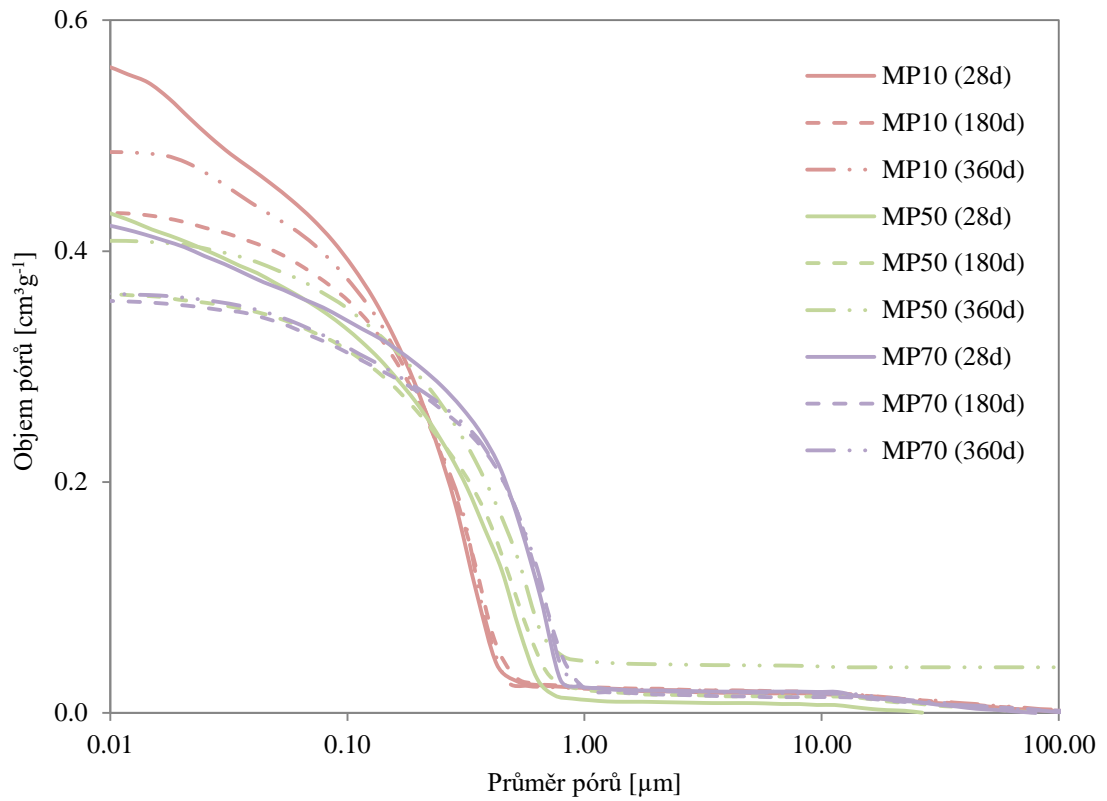
Obrázek 35. Kumulativní křivka pórů studovaných past ve 28 dnech



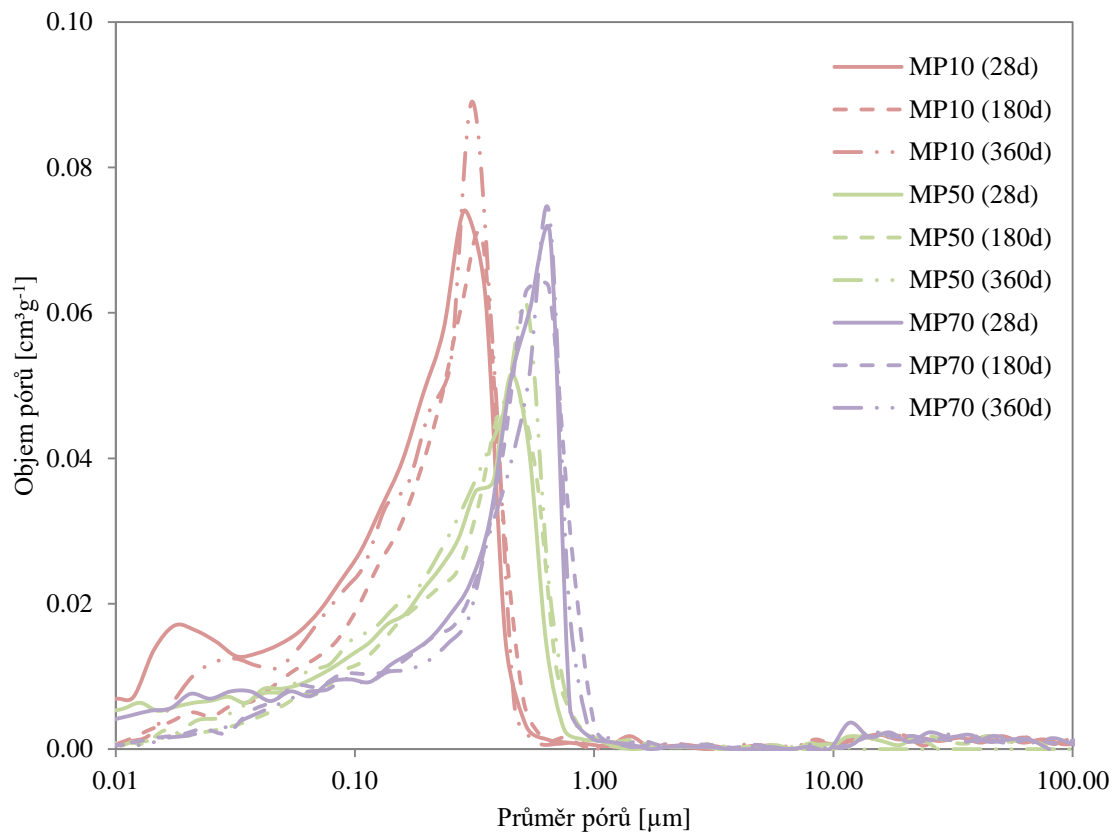
Obrázek 36. Distribuční křivka pórů studovaných past ve 28 dnech

Výběr past byl studován podrobněji z pohledu charakteristiky pórového systému. Pasty byly měřeny pomocí rtuťového porozimetru ve 2, 7, 28, 90, 180 a 360 dnech. Na obrázcích 37 a 38 jsou znázorněny zkoumané pasty ve třech základních časových intervalech, ve kterých jsou lépe patrné rozdíly (28, 180 a 360 dní). Na těchto grafech lze vidět jak rozdíly mezi jednotlivými pastami, tak i časový vývoj past s rozdílným procentuálním zastoupením cihelného obrusu. Na obrázcích 39 až 48 a 35 až 36 jsou podrobněji vidět křivky pórů v každém měřeném časovém intervalu.

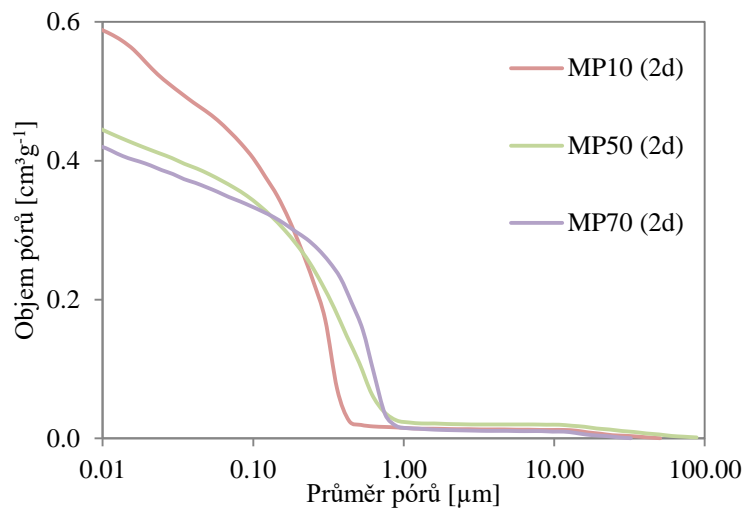
Zkoumaná pasta s 10% zastoupením cihelného obrusu MP10 obsahovala po celou zkoumanou dobu póry o velikosti 0,3 μm, rozdíl vykazoval akorát objem těchto pórů, který se mírně navýšil – pík zvýšil své maximum. Pasta, která obsahovala 50 % pucolánu MP50, obsahovala největší množství pórů o velikosti okolo 0,45 μm a ke konci posledního období (360 dní) se mírně zvýšila na hodnotu okolo 0,55 μm. Pasta s obsahem 70 % cihelného prachu MP70 po jednom roce prakticky svůj pík nezměnila, pouze lze pozorovat mírný pokles množství pórů (pórovitosti).



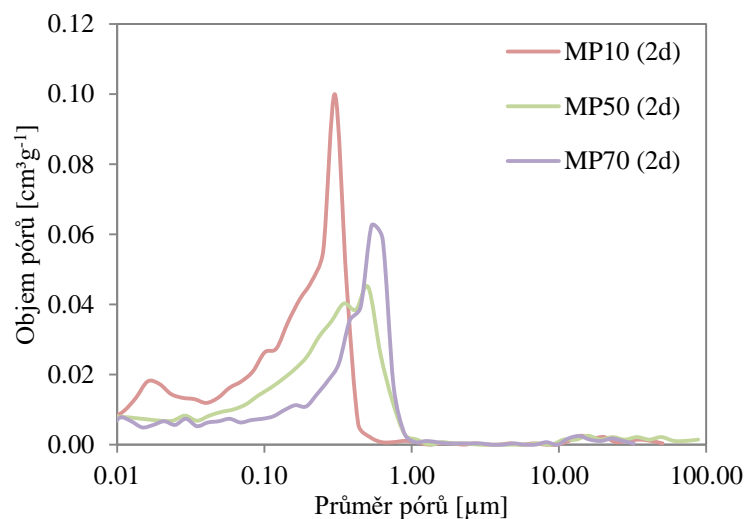
Obrázek 37. Kumulativní křivka pórů zkoumaných past ve stáří 28, 180 a 360 dní



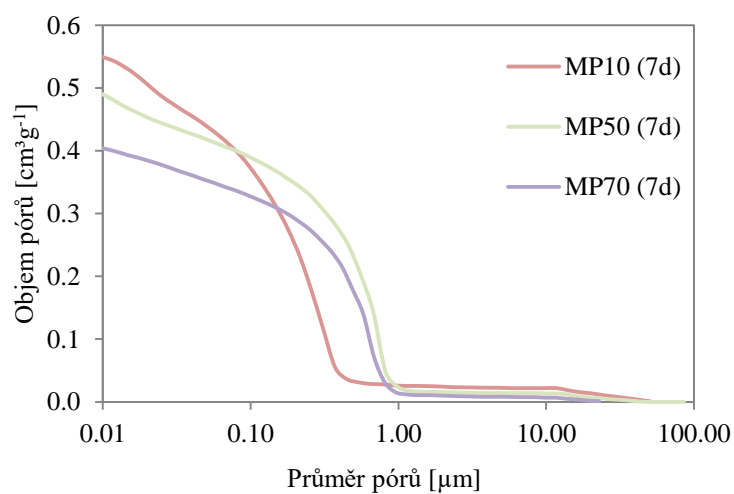
Obrázek 38. Distribuční křivka pórů zkoumaných past ve stáří 28, 180 a 360 dní



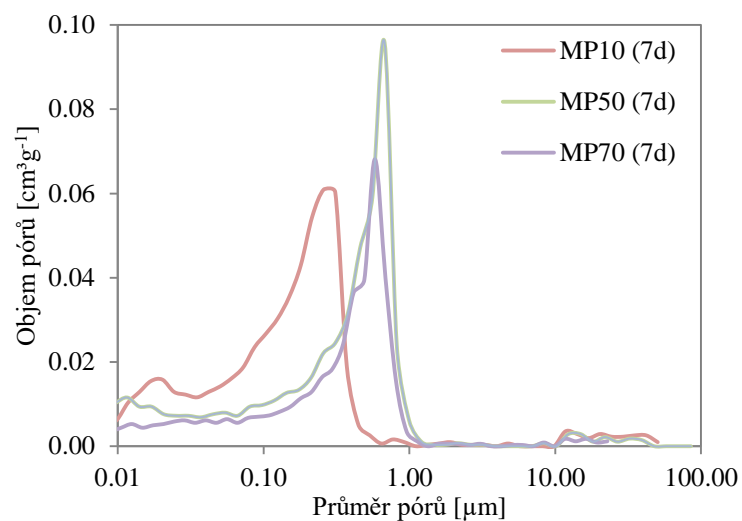
Obrázek 39. Kumulativní křivka pórů studovaných past ve 2 dnech



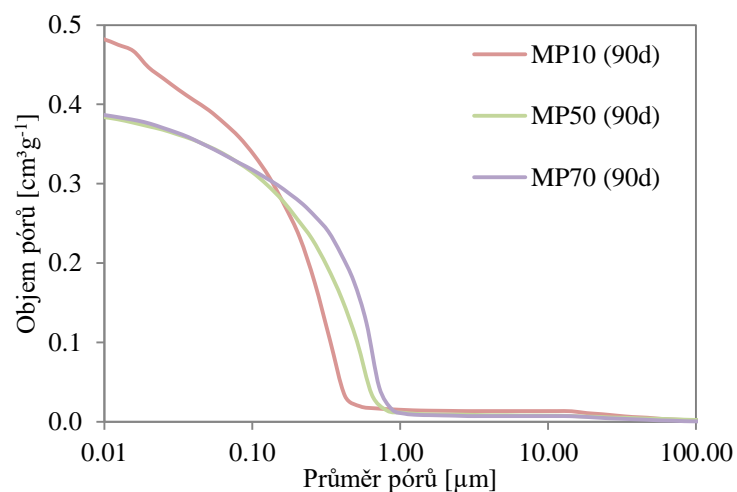
Obrázek 40. Distribuční křivka pórů studovaných past ve 2 dnech



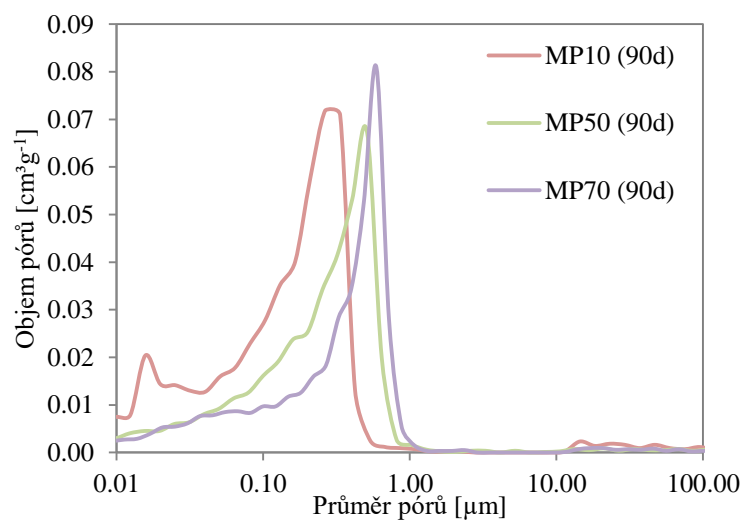
Obrázek 41. Kumulativní křivka pórů studovaných past v 7 dnech



Obrázek 42. Distribuční křivka pórů studovaných past v 7 dnech

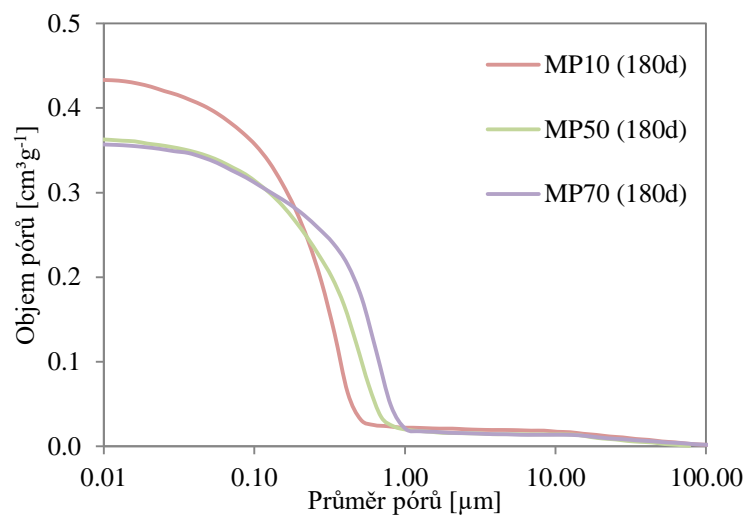


Obrázek 43. Kumulativní křivka pórů studovaných past v 90 dnech

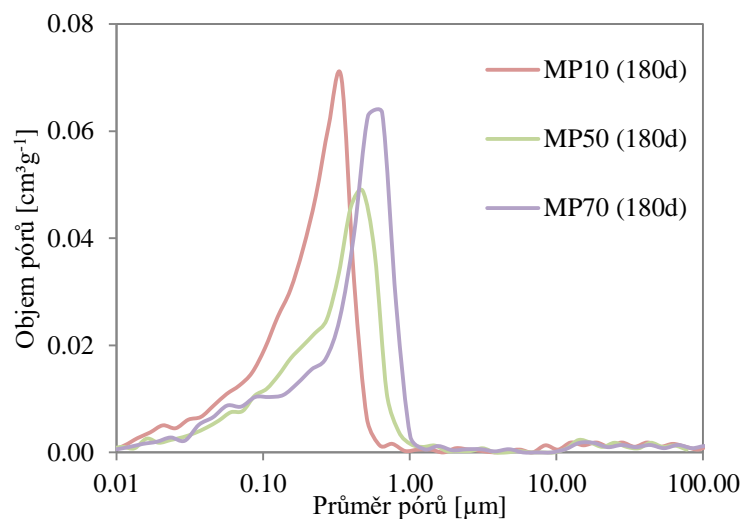


Obrázek 44. Distribuční křivka pórů studovaných past v 90 dnech

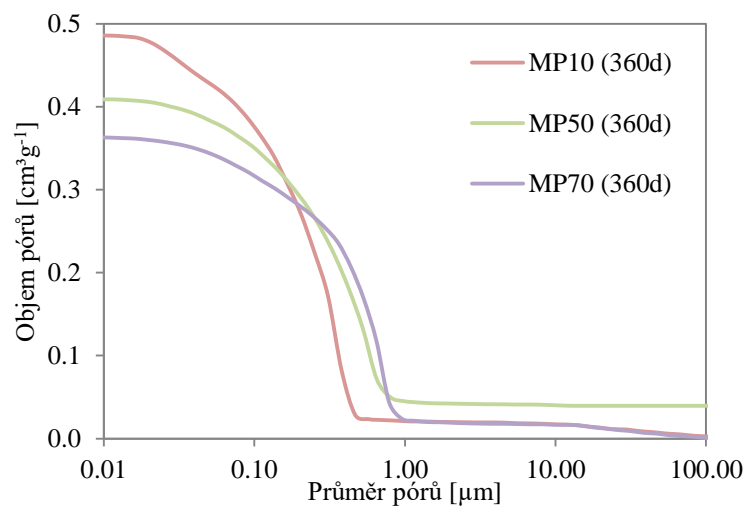




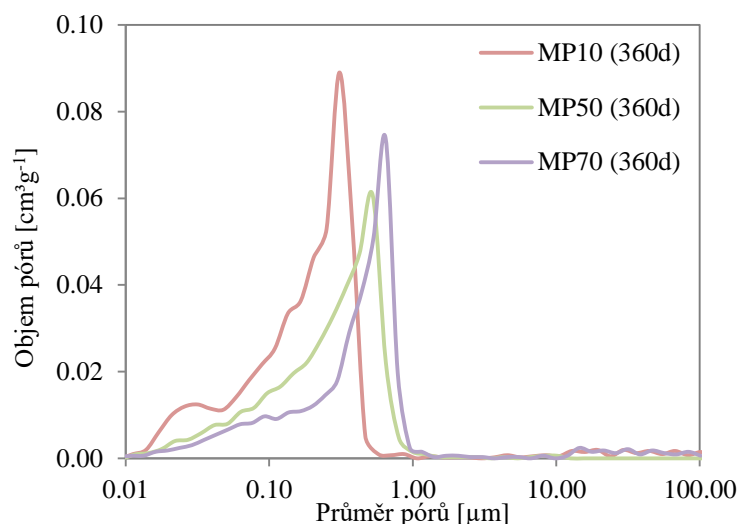
Obrázek 45. Kumulativní křivka pórů studovaných past ve 180 dnech



Obrázek 46. Distribuční křivka pórů studovaných past ve 180 dnech



Obrázek 47. Kumulativní křivka pórů studovaných past ve 360 dnech



Obrázek 48. Distribuční křivka pórů studovaných past ve 360 dnech

## 10.2 Mechanické vlastnosti

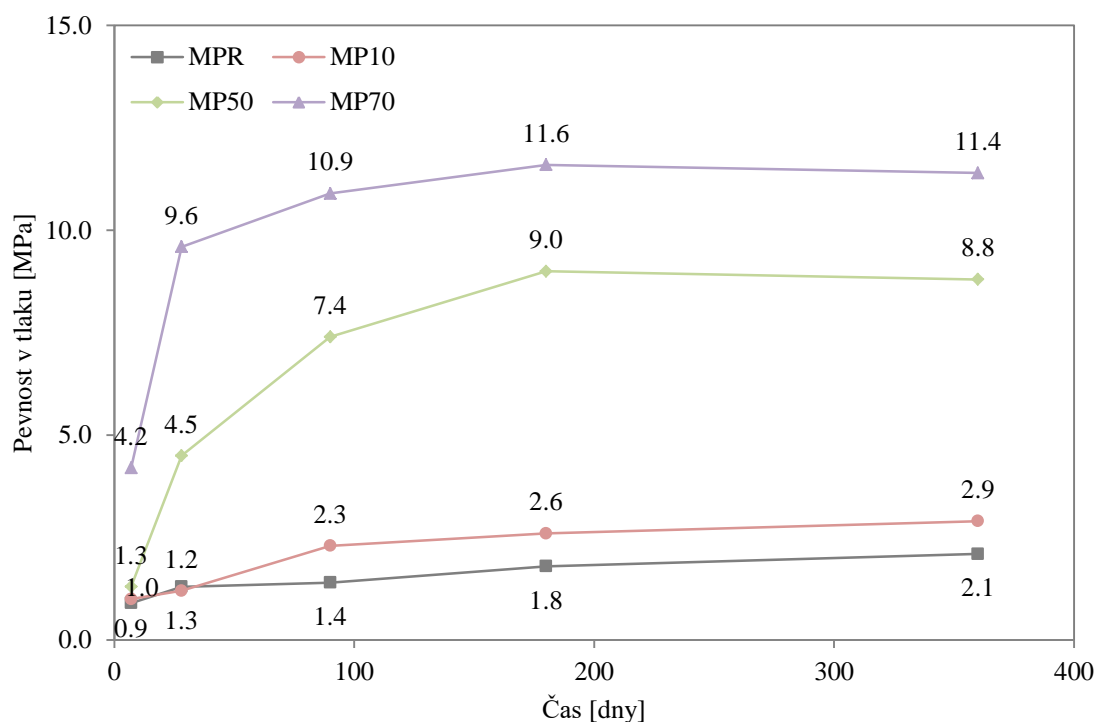
Výsledné hodnoty 28 denních mechanických zkoušek zkoumaných na pastách lze vidět v tabulce 23. Z dosažených výsledků je patrné, že nejnižší hodnotu pevnosti vykazovala pasta s nejnižším zastoupením cihelného prachu MP10. Mechanické vlastnosti vykazovaly změny, které jsou v souladu s naměřeným pórovým systémem studovaného materiálu. Pasty vykazovaly narůstající trend spolu s narůstajícím zastoupením cihelného obrusu, a to až do 70% náhrady (MP70), poté lze vidět pokles pevnostních charakteristik. Tento pokles nastal, jelikož se v materiálu vyskytovalo již nadbytečné množství pucolánu a málo vápenného hydrátu, a reakce již neprobíhala efektivně. Pasta obsahující 70 % pucolánu (MP70) dosáhla 8krát vyšší pevnosti v tlaku a 3krát vyšší pevnosti v tahu za ohybu než pasta s minimálním obsahem cihelného obrusu (MP10) a referenční materiál (MPR). Pevnost v tlaku materiálu MP10 klesla o 16 % a pevnost v tahu za ohybu o 36 % ve srovnání s pastou MP70, která vykazovala nejvyšších pevnostních charakteristik studovaných past. Pasty MP10, MP50 a MP70, jakož i referenční vápenná pasta MPR, byly studovány detailněji. Motivace byla následující: MP10 jako systém s minimálním obsahem keramiky, MP70 jako systém dosahující největších pevností a MP50 jako mezilehlá směs. Zde je na místě se vrátit k omítkám OM a jejich složení; pozitivní výsledky pasty MP70 naznačují, že by bylo vhodné připravit omítku s tímto poměrem cihelného obrusu k vápennému hydrátu (2,3), neboli s obsahem obrusu 35 %. To však nebylo možné kvůli velkému smrštění takové směsi, proto byla jako „nejvyšší“ omítky připravena OM6 (30 % obrusu), s poměrem obrusu ku vápnu 1.7.

Na obrázku 49 lze pozorovat změnu pevností v tlaku v časové závislosti vybraných past. Nejvyšších hodnot pevností v tlaku vykazuje pasta MP70 a naopak nejnižší hodnoty prezentuje referenční materiál (MPR). Na tomto grafu lze také pozorovat zastavení narůstajícího trendu (nárůstu pevnosti v čase) a v posledních zkoumaných časových intervalech lze spíše vidět konstantní hodnoty.

Podobný výzkum dělal i Nežerka a kolektiv a jeho mechanické vlastnosti nemají tento trend [30]. Jejich mechanické vlastnosti se tolik neměnily vlivem pucolánové příměsi. Avšak je to dáno tím, že neměli v základní směsi použito konstantní množství vody ani rozliv čerstvé směsi nebyl stálý. Stefanidou a kolektiv [77] prováděli také výzkum past i malt s pucolánem a i jejich výzkum potvrzuje narůstající pevnost po přidání pucolánové aktivních příměsí.

Tabulka 23. Mechanické vlastnosti zkoumaných past

Materiál	$f_f$ [MPa]	$f_c$ [MPa]
MPR	0,40	1,25
MP10	0,39	1,20
MP20	0,52	1,23
MP30	0,59	1,72
MP40	0,80	3,55
MP50	0,81	3,71
MP60	0,82	5,83
MP70	1,21	9,61
MP80	0,78	8,49
MP90	0,77	8,07



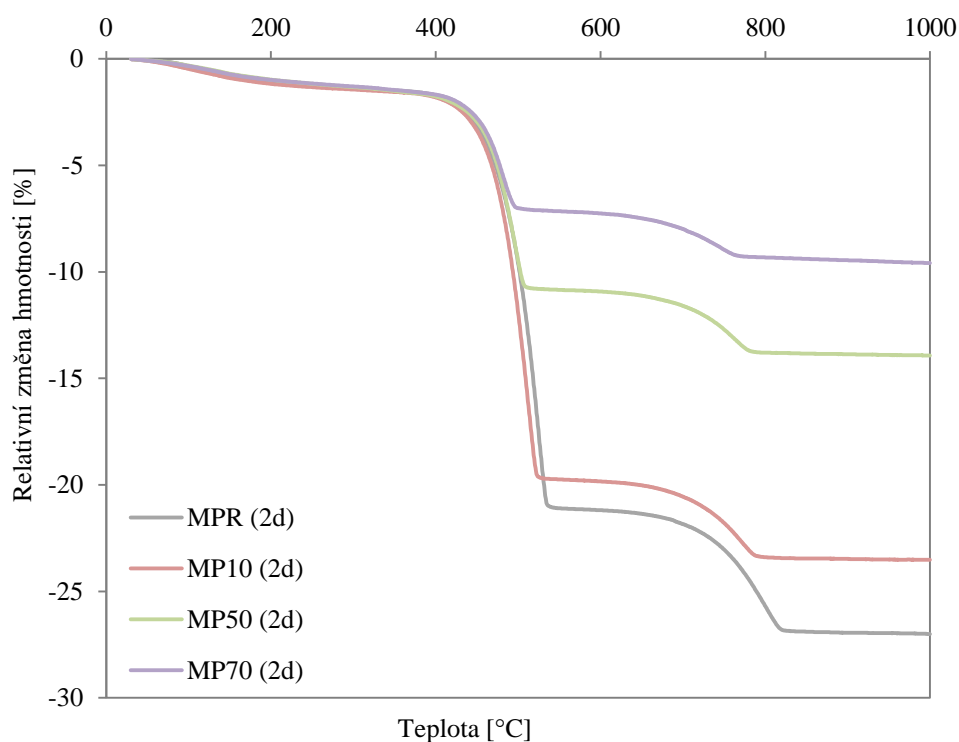
Obrázek 49. Mechanické vlastnosti vybraných past v závislosti na čase

### 10.3 Diferenční skenovací kalorimetrie – TG/DSC

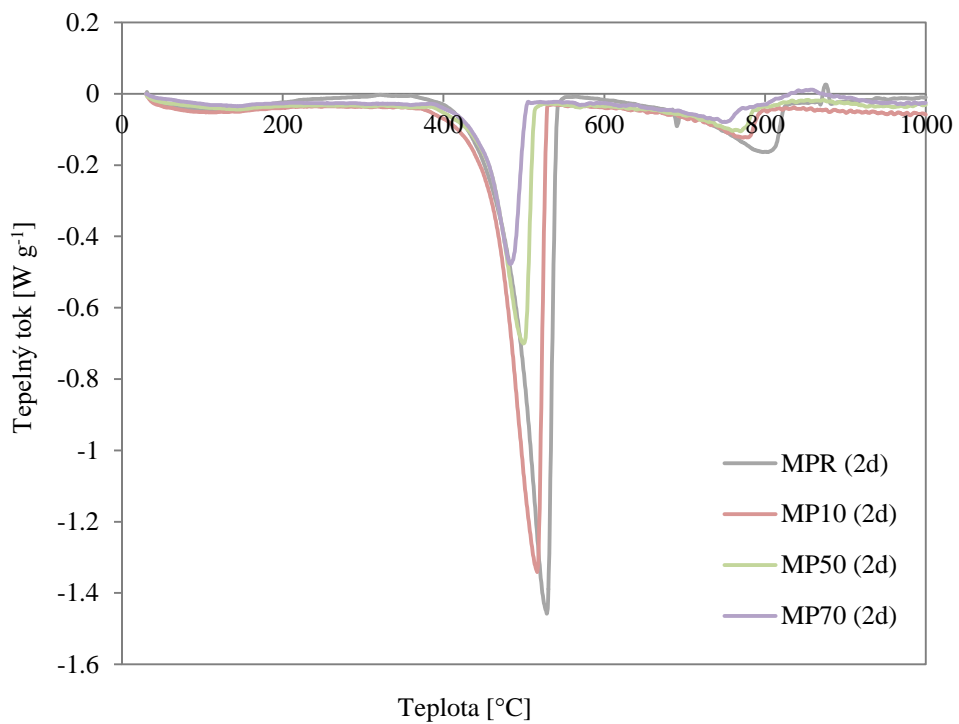
Tato metoda zkoumala vliv závislosti jak na čase, tak i na rozdílech při různém zastoupení cihelného obrusu v pastě. Jednotlivé pasty byly zkoušeny ve 2, 7, 28, 90, 180 a 360 dní. Tyto pasty byly stejně jako u výzkumu porozimetrických křivek uloženy po dobu jednoho roku v klimatické komoře s 50 % relativní vlhkostí a s 25 °C. Před samotným experimentem byly vzorky vloženy do sušárny (80 °C) po dobu 4 hodin. Na obrázcích 50 a 51 jsou znázorněny výsledné hodnoty difrakční skenovací kalorimetrie (DSC) na zkoumaných pastách ve stáří 2 dnů. Lze vidět hmotnostní úbytky na vzorcích (Obrázek 50) v závislosti na teplotě. Největších hmotnostních úbytků vykazoval referenční materiál (MPR), a naopak nejmenších úbytků hmotnosti zaznamenal vzorek s nejvyšším procentuálním zastoupením cihelného obrusu MP70. Stejný trend lze pozorovat ve všech studovaných časových intervalech.

Dále byl vytvořen graf tepelného toku v závislosti na teplotě (Obrázek 51), ze kterého lze také pozorovat reakční změny studovaných materiálů. Kolem 450 °C nastala endotermická reakce, konkrétně se jednalo o dehydrataci hydroxidu vápenatého (portlanditu). Tento děj doprovázel výrazný úbytek hmotnosti a vznik oxidu vápenatého a vody. Z výsledků byl patrný trend, výraznějších změn v tepelném toku (popř. hmotnosti) vykazoval vzorek MPR, a studovaná pasta MP70 s nejvyšším procentuálním zastoupením pucolánu vykazovala

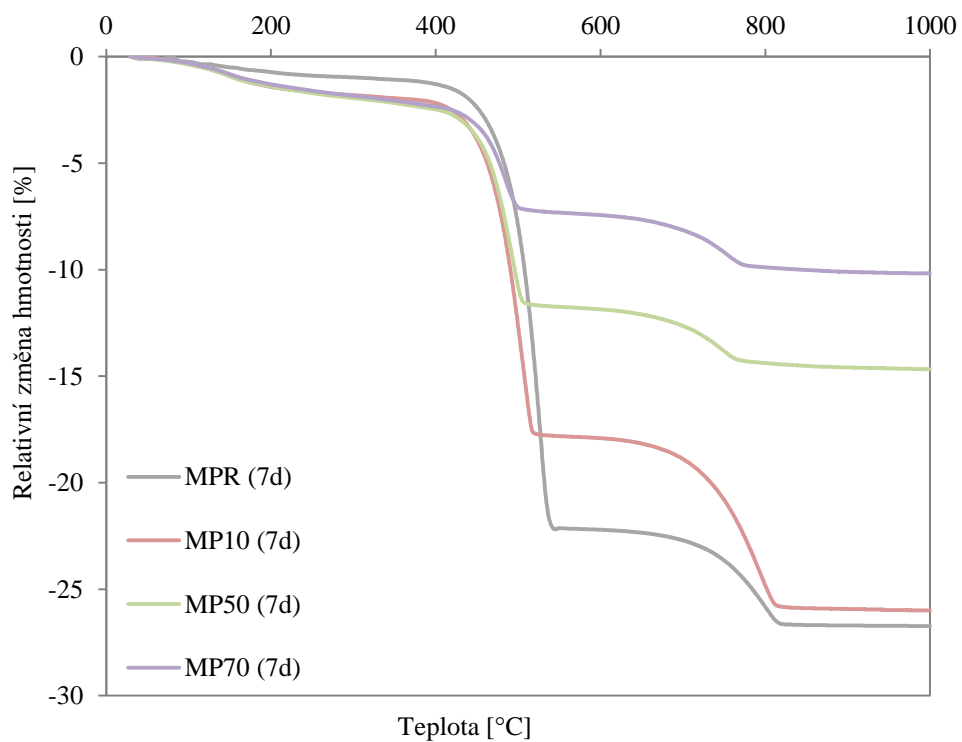
nejnižší rozdílly ve sledovaných charakteristikách. Kolem 750 °C nastal další endotermický děj, tentokrát se jednalo o rozklad kalcitu (uhličitanu vápenatého). Tento jev opět doprovázela změna hmotnostních i tepelných toků, tentokrát se však jednalo o menší rozdílly. Trend reakcí je obdobný jako u předchozí termické reakce. Od 820 °C docházelo u past MP50 a MP70 k exotermickému ději. Jednalo se o krystalizaci, která mohla chvilkově zpevnit dehydratovaný zbytek materiálu. Pasta s nejnižším zastoupením pucolánu MP10 a referenční pasta MPR tuto exotermickou reakci nevykazovaly. Všechny reakce probíhaly v každém studovaném časovém intervalu. Rozdílly hodnot toků mezi jednotlivými časovými závislostmi se zvětšují. Velmi podobným studiem se zabýval Moropoulou [9].



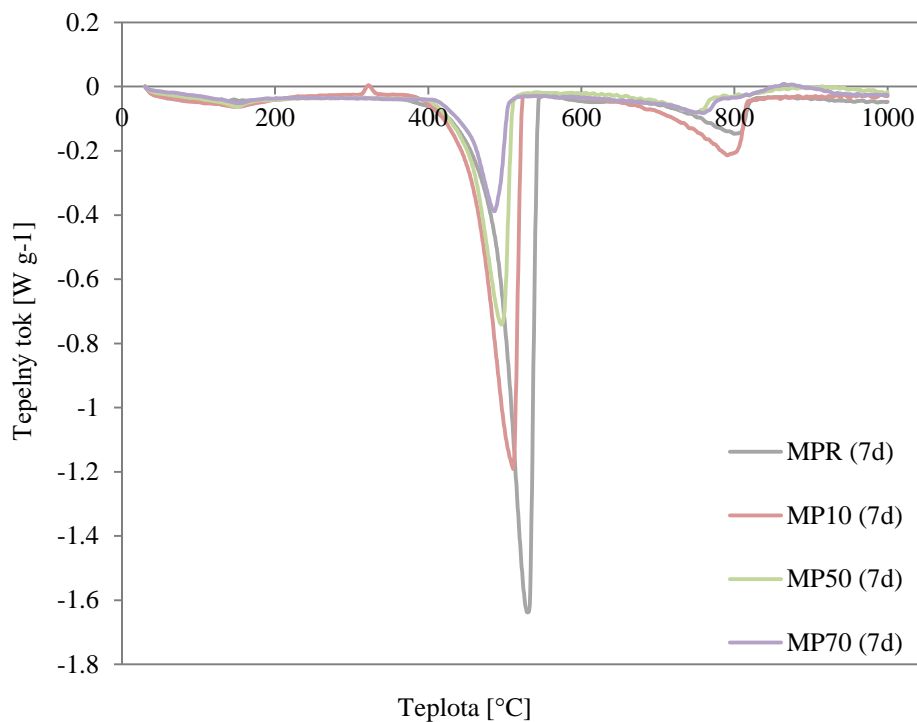
Obrázek 50. Relativní změna hmotnosti studovaných past pomocí metody DSC ve stáří 2 dnů



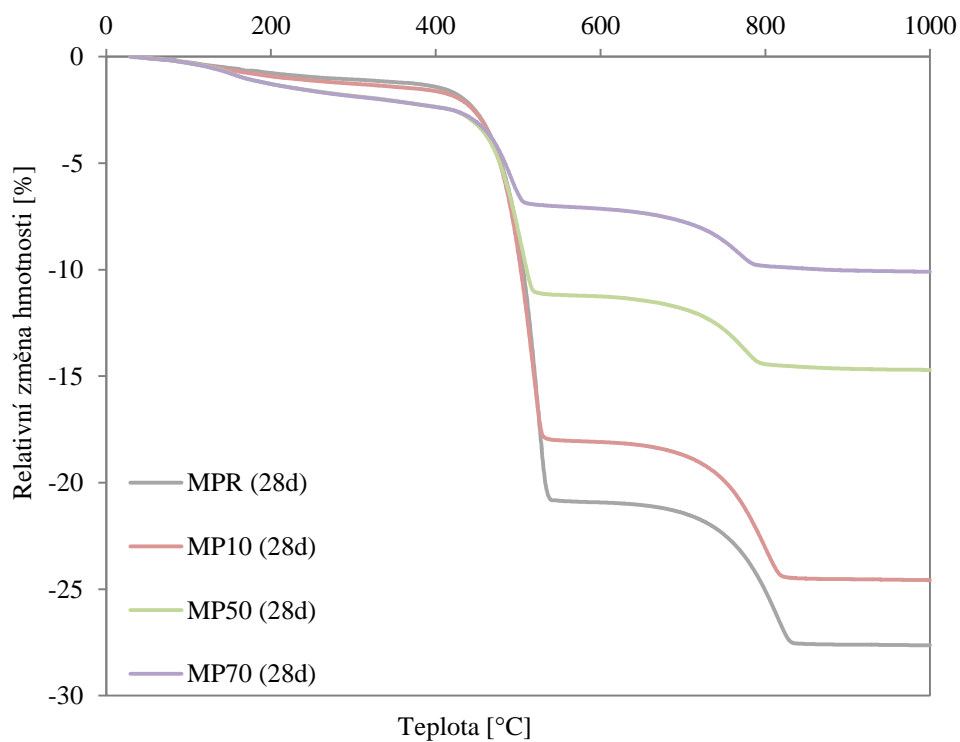
Obrázek 51. Tepelný tok zkoumaných past pomocí metody DSC ve stáří 2 dnů



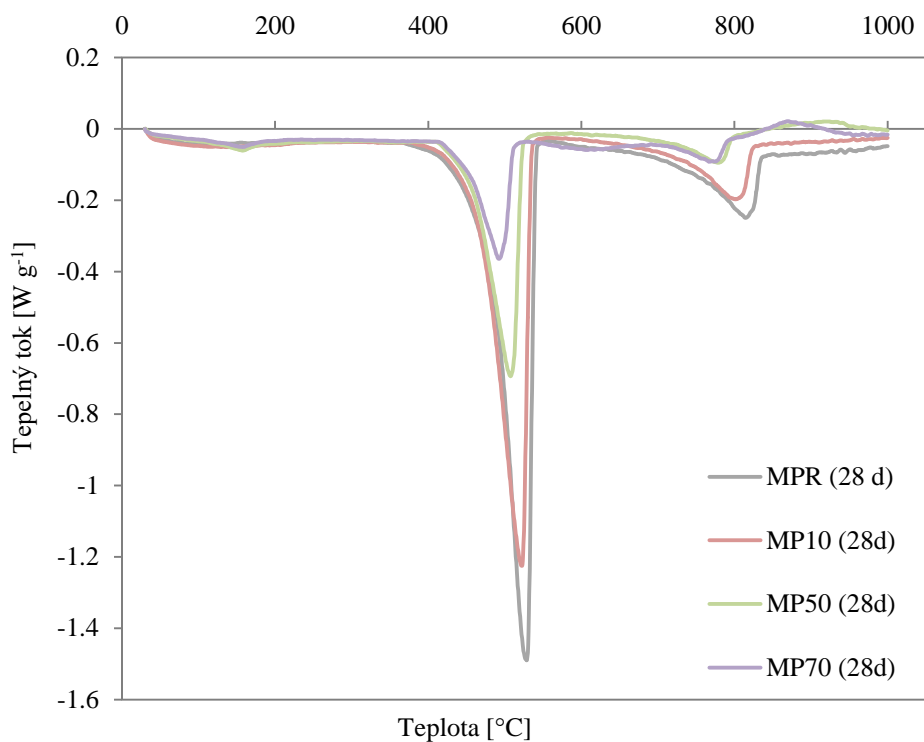
Obrázek 52. Relativní změna hmotnosti studovaných past pomocí metody DSC ve stáří 7 dnů



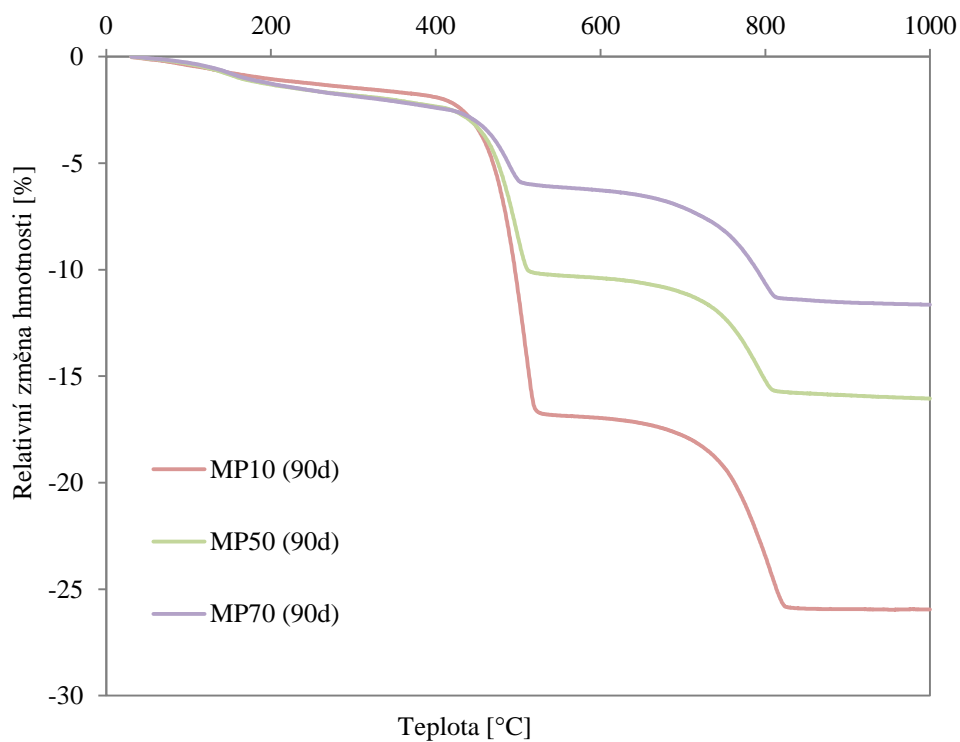
Obrázek 53. Tepelný tok zkoumaných past pomocí metody DSC ve stáří 7 dnů



Obrázek 54. Relativní změna hmotnosti studovaných past pomocí metody DSC ve stáří 28 dní

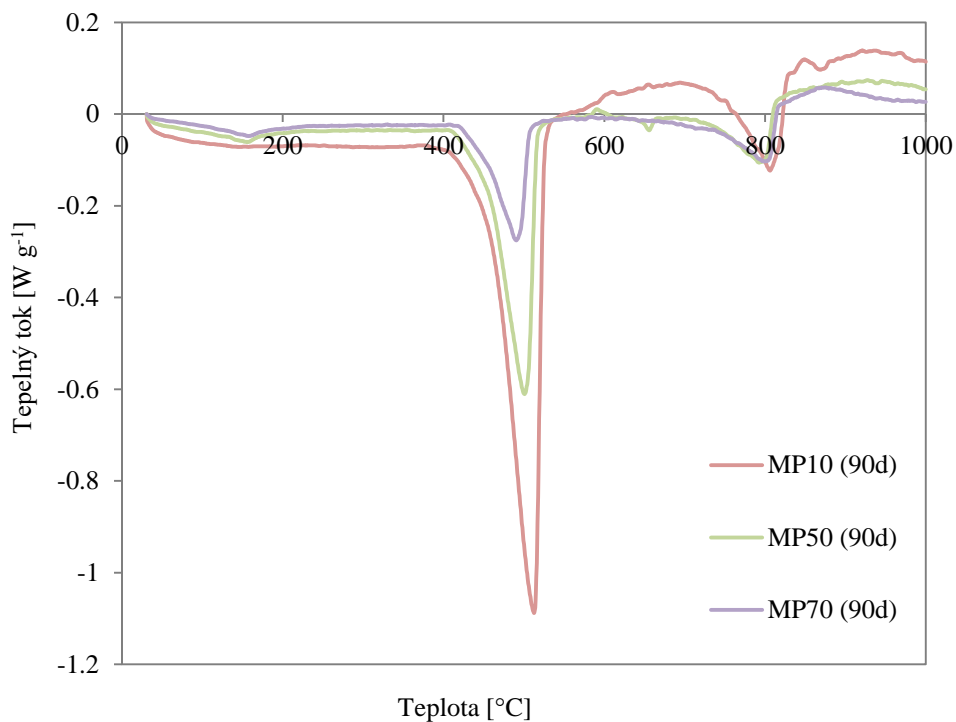


Obrázek 55. Tepelný tok zkoumaných past pomocí metody DSC ve stáří 28 dní

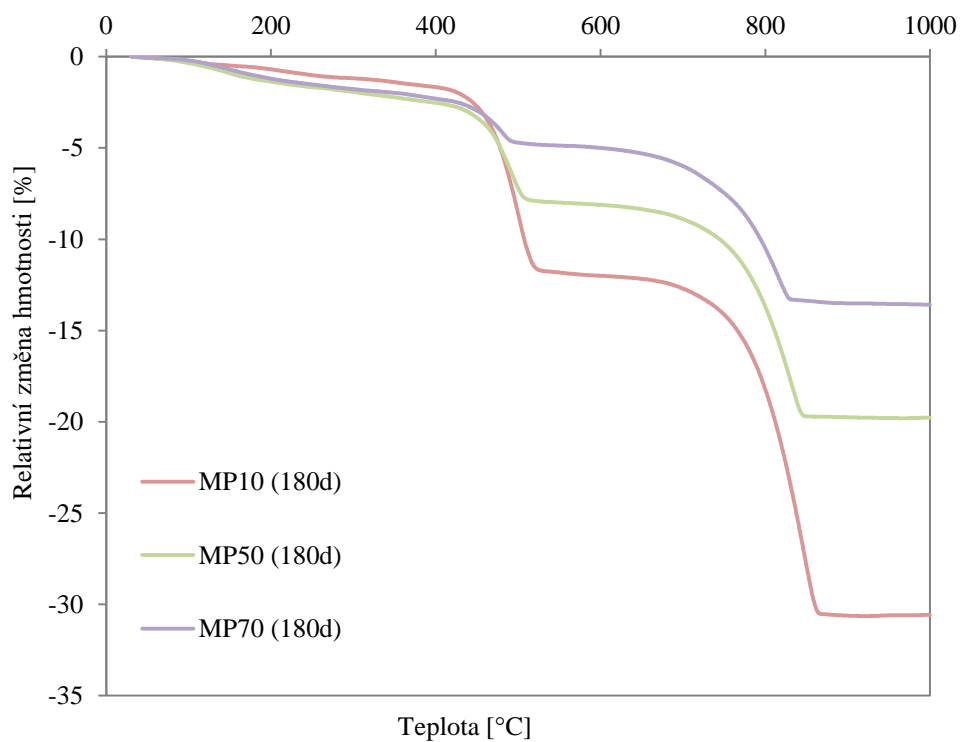


Obrázek 56. Relativní změna hmotnosti studovaných past pomocí metody DSC ve stáří 90 dní

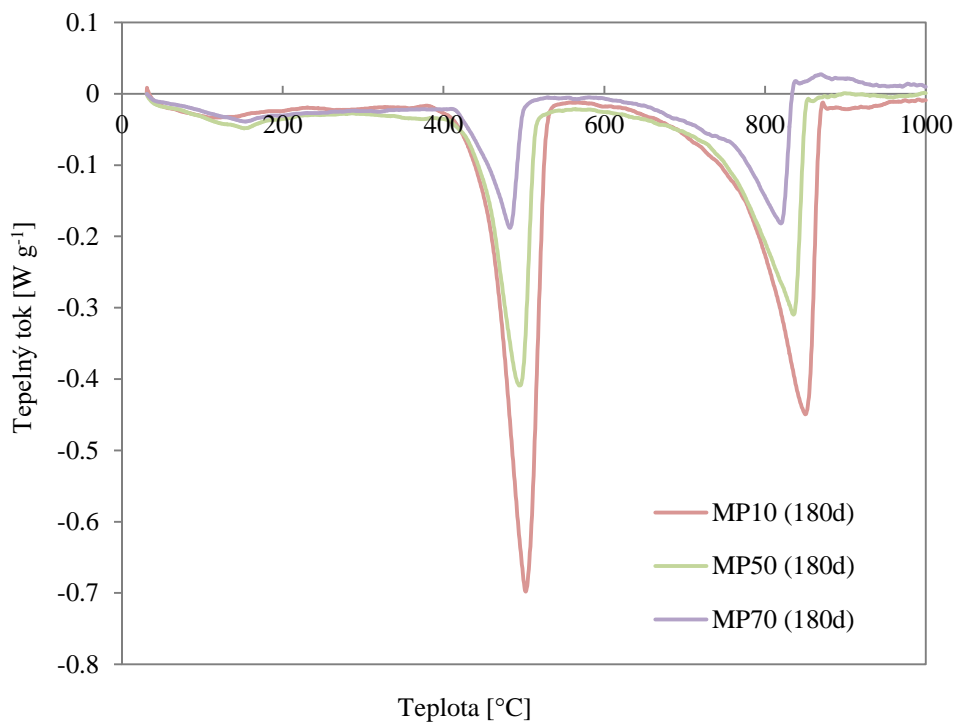




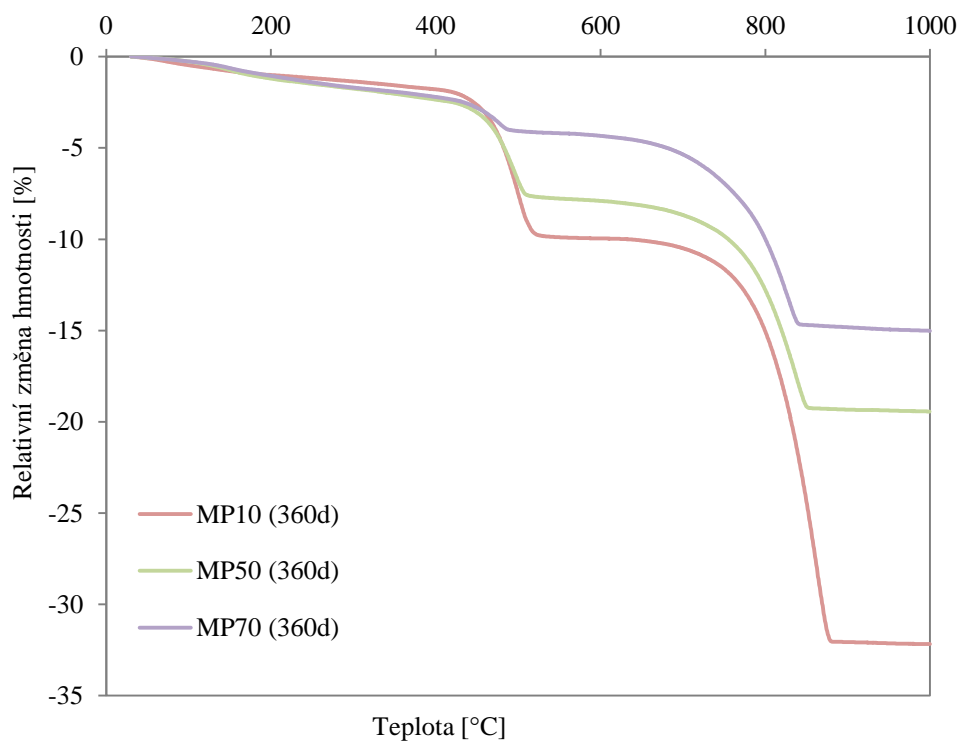
Obrázek 57. Tepelný tok zkoumaných past pomocí metody DSC ve stáří 90 dní



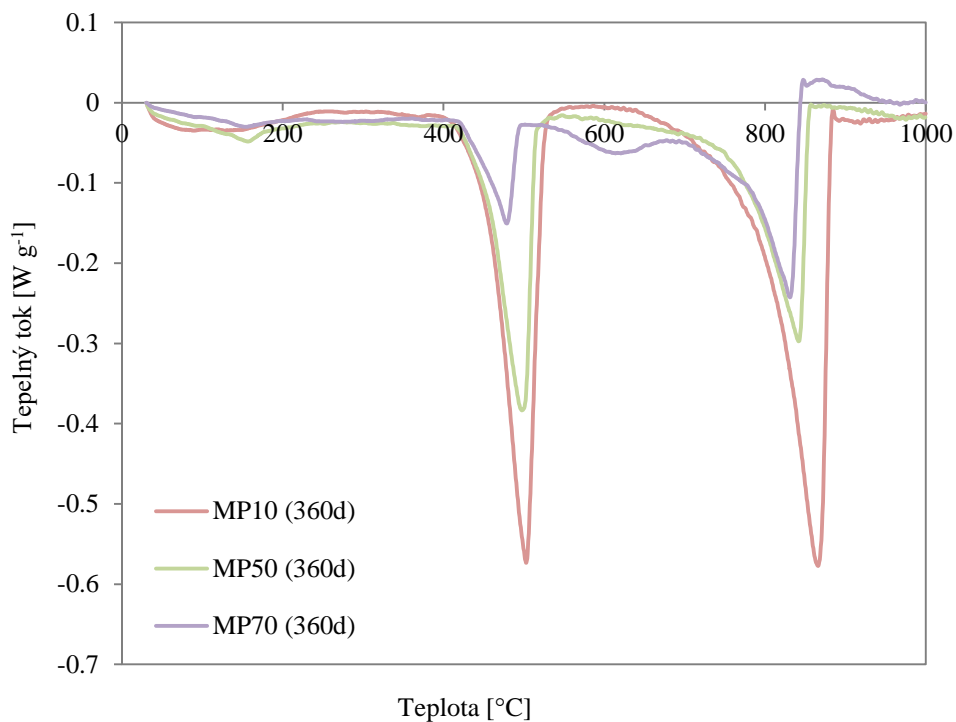
Obrázek 58. Relativní změna hmotnosti studovaných past pomocí metody DSC ve stáří 180 dní



Obrázek 59. Tepelný tok zkoumaných past pomocí metody DSC ve stáří 180 dní



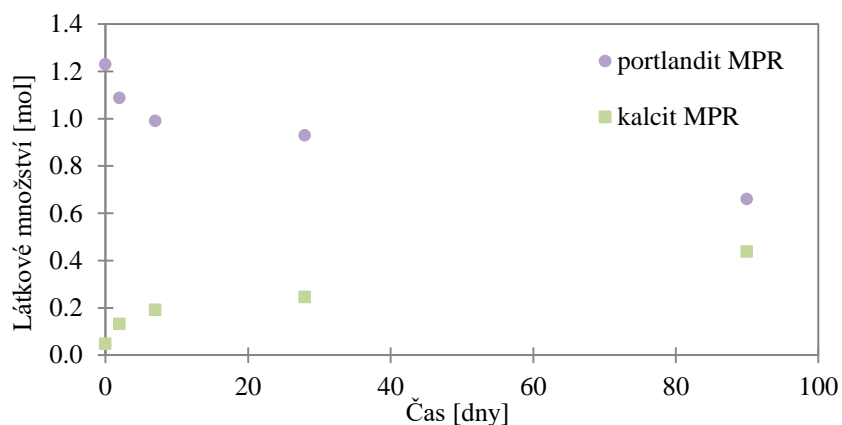
Obrázek 60. Relativní změna hmotnosti studovaných past pomocí metody DSC ve stáří 360 dní



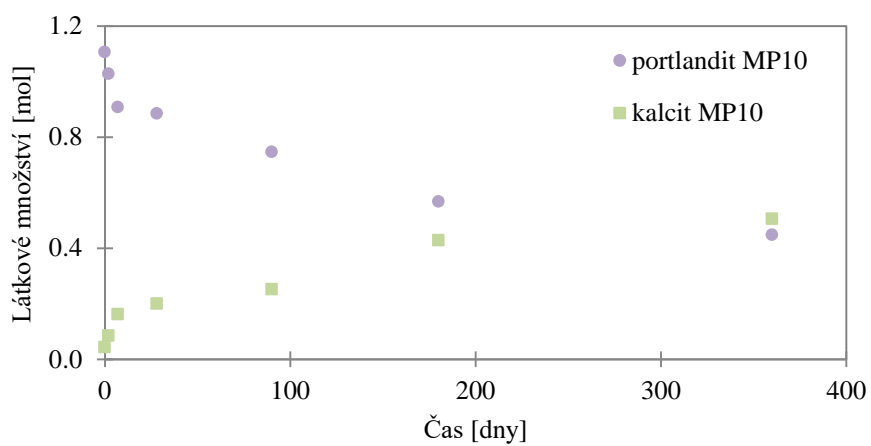
Obrázek 61. Tepelný tok zkoumaných past pomocí metody DSC ve stáří 360 dní

### 10.3.1 Vyhodnocení termogravimetrického měření

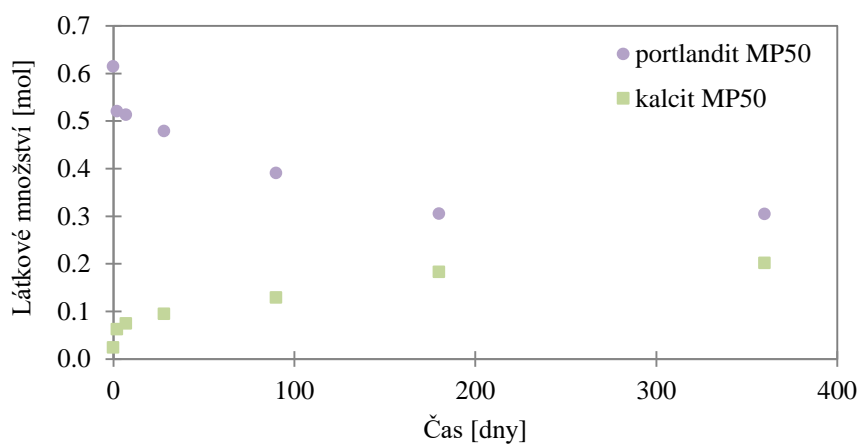
Vyhodnocování probíhalo na vybraných pastách obsahujících cihelný obrus (MP10, MP50 a MP70) i na referenčním materiálu (MPR). Použitý vápenný hydrát obsahoval 90,9 % portlanditu a 4,7 % kalcitu. Pro výpočet požadovaného stupně přeměny byla pro výchozí stav ( $t = 0$ ) použita „fiktivní“ směs systému vápno – pucolán v daném poměru. Hodnoty látkových množství byly počítány pro směsi o hmotnosti 100 g. Což znamená, že hmotnostní zlomek ( $v \%$ ) byl zjištěn podílem hmotností portlanditu a kalcitu v připraveném 100 g vzorku. V následujících obrázcích (Obrázek 62 – 65) jsou uvedeny vývoje látkového množství sledovaných směsí (MPR, MP10, MP50 a MP70). Obsah portlanditu klesá na úkor kalcitu ve všech zkoumaných materiálech.



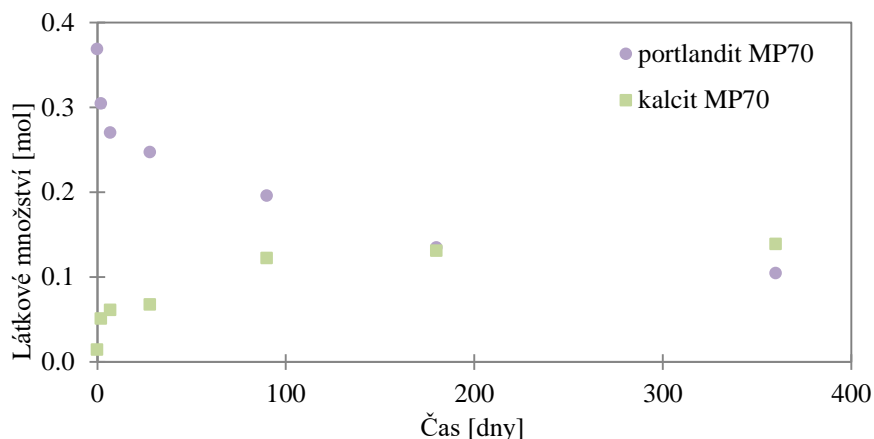
Obrázek 62. Vývoj látkového množství pasty MPR v časové závislosti



Obrázek 63. Vývoj látkového množství pasty MP10 v časové závislosti

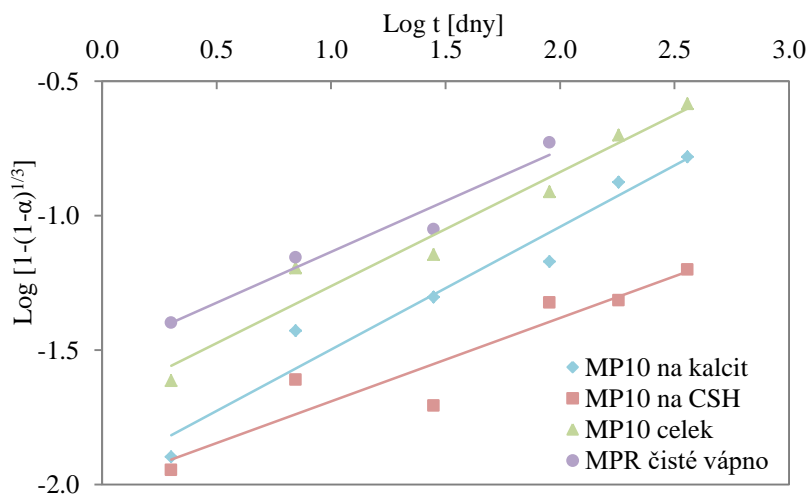


Obrázek 64. Vývoj látkového množství pasty MP50 v časové závislosti

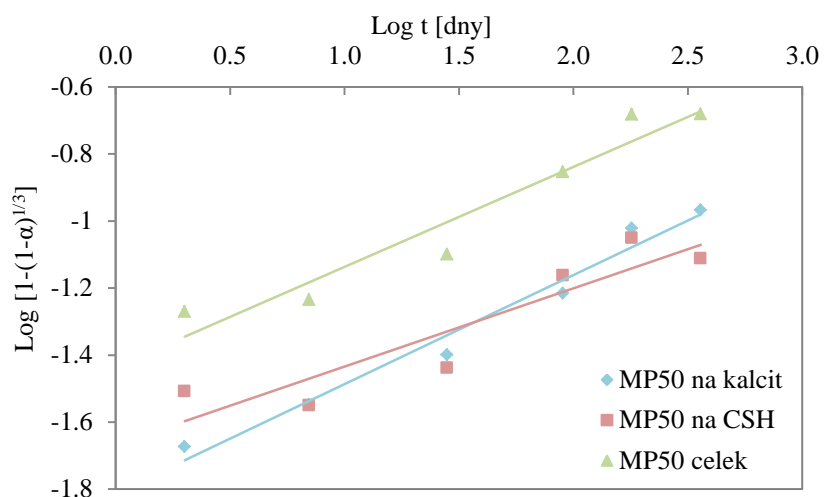


Obrázek 65. Vývoj látkového množství pasty MP70 v časové závislosti

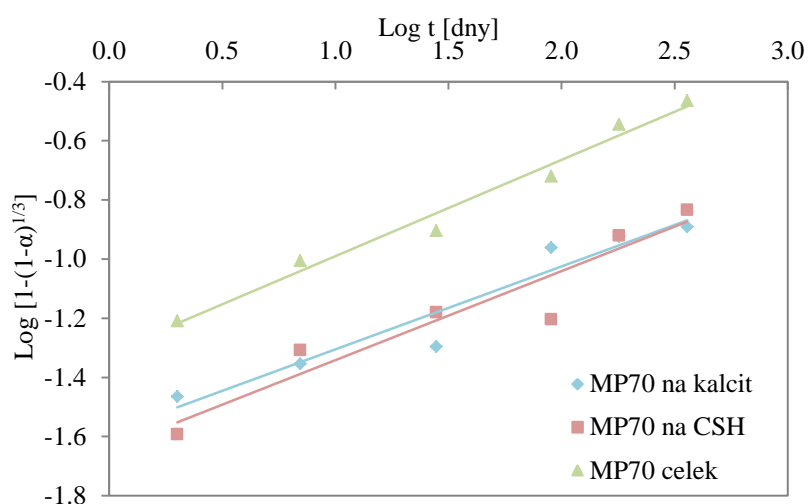
Na obrázcích 66 až 68 lze vidět grafy, které znázorňují „log-log“ analýzu dle rovnice 27 na všech zkoumaných pastách. V tabulce 24 lze vidět výsledné hodnoty této analýzy. Jelikož ve všech studovaných systémech vychází hodnoty řádu reakce vysoké ( $N > 2$ ), lze předpokládat, že procesy jsou řízeny difúzí reaktantů ( $\text{CO}_2$  a  $\text{Ca}^{2+}$ ) v materiálu k místu reakce. Pro lepší znázornění a pochopení průběhů rychlostí všech reakcí (karbonatace a pucolánová reakce) byly vytvořeny grafy (Obrázek 69 až 72). Tyto grafy popisují závislosti na čase s celkovým stupněm přeměny portlanditu, stupněm konverze na kalcit (karbonatace) a na CSH a CAH gely (pucolánová reakce).



Obrázek 66. Logaritmovaná kinetická rovnice materiálu MP10 a MPR



Obrázek 67. Logaritmovaná kinetická rovnice materiálu MP50

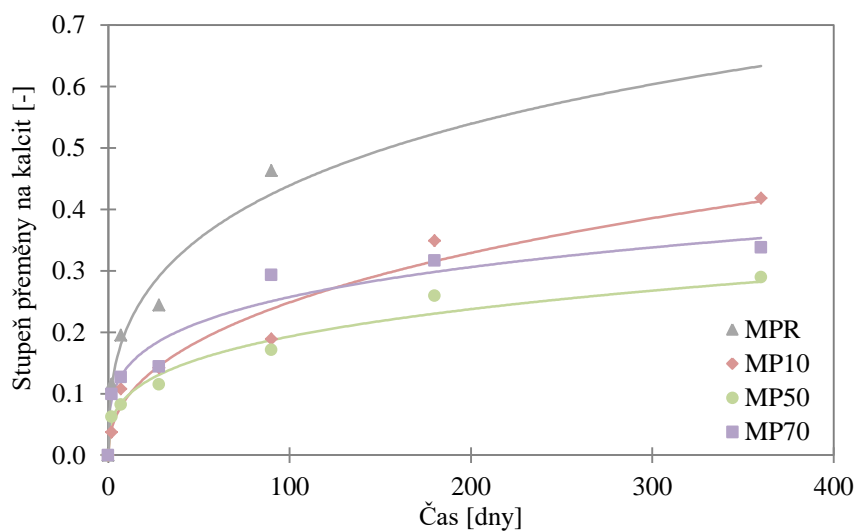


Obrázek 68. Logaritmovaná kinetická rovnice materiálu MP70

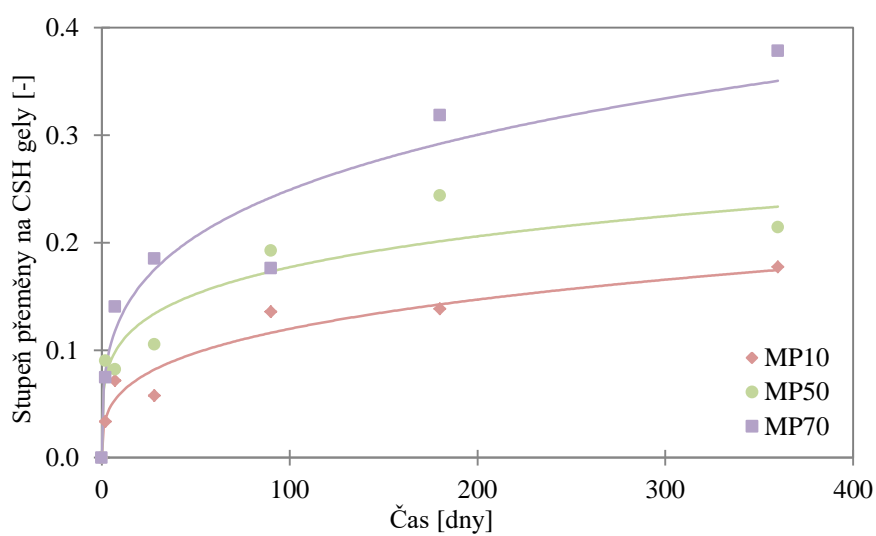
Tabulka 24. Výsledné hodnoty z termogravimetrického měření

Materiál		Směrnice přímky	N	úsek	log k	k
MPR	celek	0,3778	2,6	-1,512	-4,002	9,95E-5
MP10	na kalcit	0,4557	2,2	-1,953	-4,286	5,18E-5
	na CSH	0,3098	3,2	-2,000	-6,455	3,50E-7
	celek	0,4239	2,4	-1,686	-3,977	1,05E-4
MP50	na kalcit	0,3251	3,1	-1,811	-5,571	2,68E-6
	na CSH	0,2329	4,3	-1,667	-7,157	6,96E-8
	celek	0,2983	3,4	-1,435	-4,811	1,54E-5

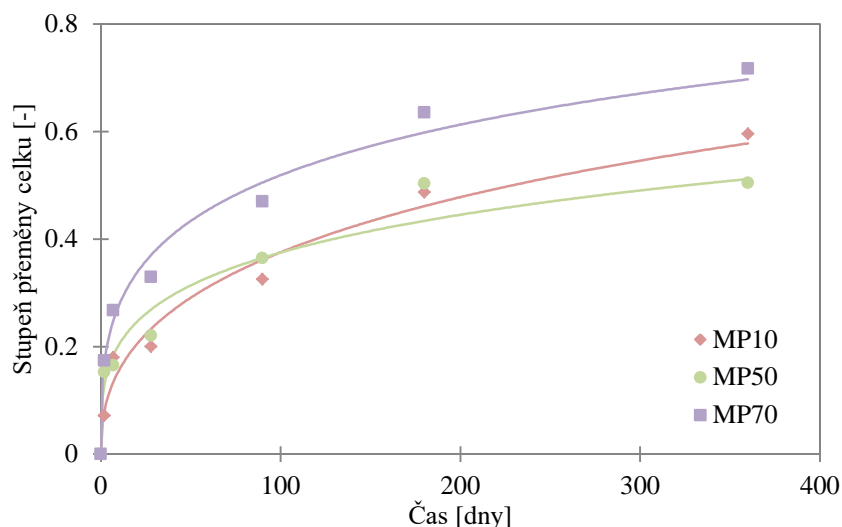
MP70	na kalcit	0,2805	3,3	-1,586	-5,654	2,22E-6
	na CSH	0,3012	3,1	-1,643	-5,455	3,51E-6
	celek	0,3257	2,6	-1,316	-4,041	9,10E-5



Obrázek 69. Průběh stupně přeměny portlanditu na kalcit



Obrázek 70. Rychlosti pucolánové reakce studovaných past



Obrázek 71. Celkové stupně přeměny portlanditu v pastách s obrusem

Karbonatace čistého vápna (Obrázek 69) byla poměrně rychlá. Pokud se do tohoto systému přidal pucolán, a to i v malém množství (MP10), dochází k výraznému zpomalení karbonatace. Také je patrné z obrázku 69, že nezáleží na množství pucolánu ve směsi – neovlivňuje zpomalení reakce. Z obrázku 71 lze vidět, že pasta MP70 vykazuje nejrychlejší celkový úbytek portlanditu. Hodnoty stupňů přeměny portlanditu na hydratační produkty (Obrázek 70) byly nejvyšší v systému MP70 – tomu odpovídají nejvyšší pevnosti zjištěné v tomto systému a tento poměr cihelného obrusu a vápenného hydrátu může být považován za optimální z hlediska pevnosti a rychlosti hydratace.



# 11 Výsledky a diskuze o výsledných omítkových směsích

## 11.1 Základní fyzikální vlastnosti

Základní fyzikální vlastnosti navržených omítkových směsí byly zkoumány v závislosti na čase. U všech použitých metod se konkrétně jednalo o 1, 6 a 12 měsíců. Výsledné naměřené hodnoty objemových hmotností a hustot matric stanovené pomocí vakuové nasákavosti lze vidět v tabulkách 25 a 26. Otevřené pórovitosti jsou zaznamenány v tabulce 27. Pokud se zaměříme na hodnoty v určitých časových intervalech lze konstatovat, že omítky se „stmelily“, tzv. všechny základní fyzikální parametry se nepatrně snížily.

Hodnoty objemové hmotnosti i hustoty matrice se liší nepatrně. Objemové hmotnosti se pohybovaly kolem  $1650 \text{ kg m}^{-3}$  a hustoty matrice okolo  $2550 \text{ kg m}^{-3}$ , a to jak ve stáří 1 měsíce, tak i v 6 a 12 měsících. U otevřené pórovitosti lze vidět (Tabulka 27), že s rostoucím procentuálním zastoupením cihelného obrusu nepatrně narůstala i otevřená pórovitost. Referenční omítka OMR vykazovala nejmenších hodnot otevřené pórovitosti. Při porovnání s omítkou OM6 hodnota otevřené pórovitosti klesla oproti OMR o 8 % u 1 měsíčního vzorku a o 6 % u 6 i 12 měsíčních omítek. Také lze konstatovat, že 12 měsíční omítky vykazovaly nižší hodnoty otevřené pórovitosti než omítky měsíční. Stejný trend pórovitosti vykazují vápenné omítky s obsahem jemně mletého cihelného prachu v článku od Čáchové a kol. [36] i Vejmelkové a kol. [15], která studovala podobné vlastnosti u omítek, ve kterých byl použit jako pucolánová náhrada metalupek.

Tabulka 25. Objemové hmotnosti zkoumaných omítek v časové závislosti pomocí vakuové nasákavosti

Materiál	$\rho \text{ [kg m}^{-3}\text{]}$		
	1 měsíc	6 měsíců	12 měsíců
OMR	1681	1675	1682
OM2	1622	1611	1676
OM3	1659	1683	1686
OM4	1649	1667	1697
OM5	1619	1632	1664
OM6	1630	1630	1645

Tabulka 26. Hustoty matrice zkoumaných omítek v časové závislosti pomocí vakuové nasákavosti

Materiál	$\rho_{\text{mat}} [\text{kg m}^{-3}]$		
	1 měsíc	6 měsíců	12 měsíců
OMR	2545	2517	2544
OM2	2503	2473	2601
OM3	2584	2589	2597
OM4	2584	2600	2626
OM5	2567	2478	2594
OM6	2586	2538	2574

Tabulka 27. Otevřená pórovitost zkoumaných omítek v časové závislosti pomocí vakuové nasákavosti

Materiál	$\psi_0 [\%]$		
	1 měsíc	6 měsíců	12 měsíců
OMR	34,0	33,8	33,6
OM2	35,2	34,6	34,5
OM3	35,8	35,0	34,9
OM4	36,2	35,9	35,4
OM5	36,9	35,8	35,8
OM6	37,0	36,1	35,8

Pro srovnání byla využita i metoda měření pomocí héliového pyknometru. Základní fyzikální parametry určené pomocí héliového pyknometru lze vidět v tabulkách 28 až 30, ve kterých jsou zaznamenány hodnoty ve všech zkoumaných časových závislostech (1 měsíc, 6 a 12 měsíců). Trend a hodnoty stanovené pomocí héliového pyknometru byly stejné jako při měření základních fyzikálních parametrů pomocí gravimetrické metody. Omítky vykazovaly pouze nepatrně vyšší hodnoty otevřené pórovitosti. Vzorek OM6 vykazoval o 6 – 7 % vyšší hodnoty otevřené pórovitosti než referenční omítka OMR, a to ve všech zkoumaných časech.

Výzkum této problematiky potvrzuje, že některé pucolány vykazují také nárůst pórovitosti, jak popisuje například Pandey a kol. ve svém článku [76].

Tabulka 28. Objemová hmotnost zkoumaných omítek v časové závislosti pomocí héliového pyknometru

Materiál	$\rho$ [kg m <sup>-3</sup> ]		
	1 měsíc	6 měsíců	12 měsíců
OMR	1657	1634	1635
OM2	1577	1577	1614
OM3	1629	1666	1677
OM4	1624	1608	1654
OM5	1616	1607	1623
OM6	1588	1604	1623

Tabulka 29. Hustota matrice zkoumaných omítek v časové závislosti pomocí héliového pyknometru

Materiál	$\rho_{\text{mat}}$ [kg m <sup>-3</sup> ]		
	1 měsíc	6 měsíců	12 měsíců
OMR	2623	2494	2378
OM2	2524	2426	2336
OM3	2607	2579	2378
OM4	2603	2508	2345
OM5	2636	2510	2293
OM6	2608	2528	2282

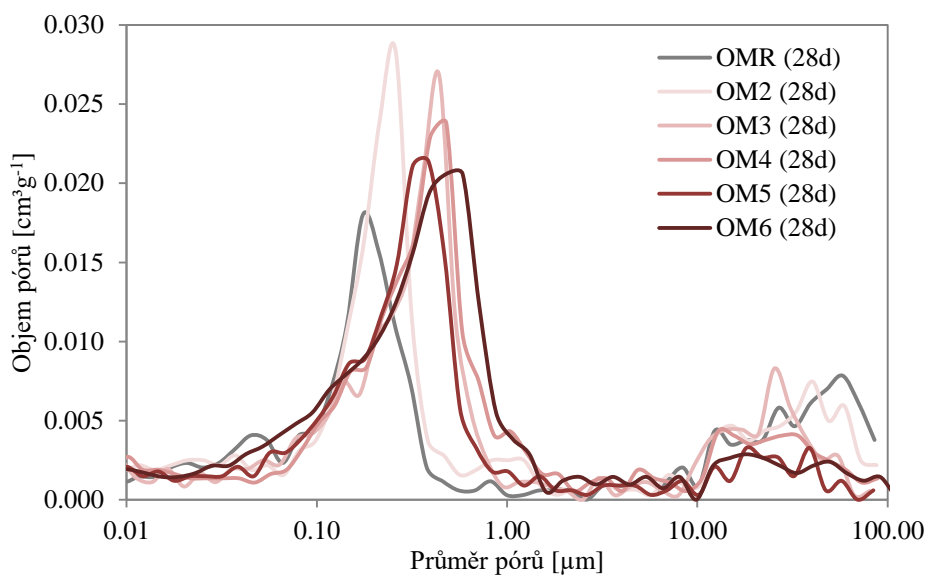
Tabulka 30. Otevřená pórovitost zkoumaných omítek v časové závislosti pomocí héliového pyknometru

Materiál	$\psi_0$ [%]		
	1 měsíc	6 měsíců	12 měsíců
OMR	36,8	34,5	31,2
OM2	37,5	35,0	30,9
OM3	37,5	35,4	29,5
OM4	37,6	35,9	29,5
OM5	38,7	36,0	29,2
OM6	39,1	36,6	28,9

## 11.2 Charakteristika pórového systému

Celkovou pórovitost neboli charakteristiku pórového systému lze stanovit pomocí tzv. rtuťové porozimetrie. Tato metoda byla již podrobně popsána v kapitole 7.3.

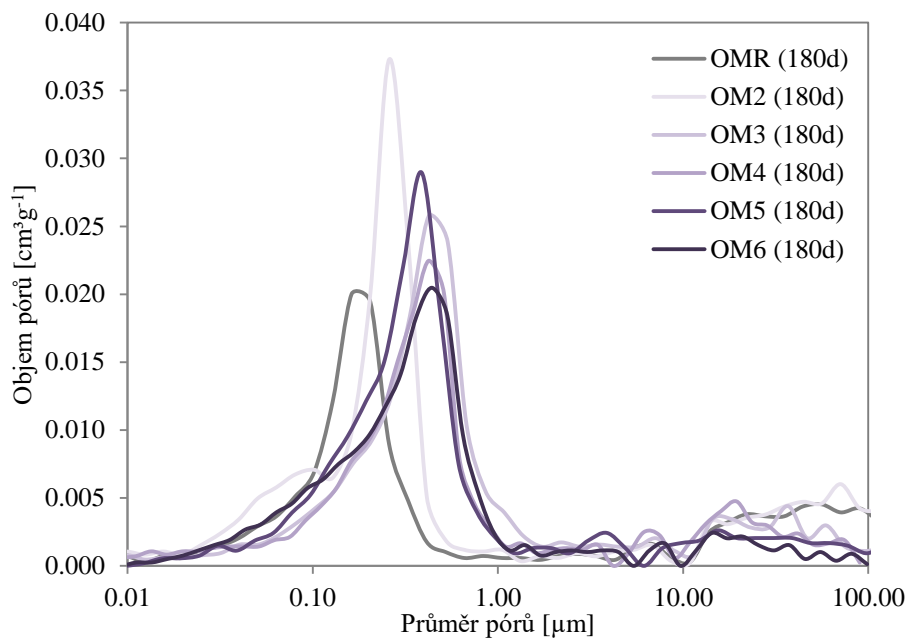
Na obrázku 72 jsou znázorněny charakteristiky pórového systému studovaných omítkových směsí ve stáří 28 dní. Z dosažených výsledků je patrný trend, který koresponduje s naměřenými výslednými hodnotami otevřené pórovitosti pomocí vakuové nasákovosti a héliového pyknometru, a to že se zvyšujícím se zastoupením cihelného ohrusu narůstá pórovitost. Také lze konstatovat, že zvyšující se obsah keramického prachu zvyšuje množství menších pórů. Stejně výsledky dosahovaly i zkoumané pasty (Kapitola 10.1). Jak lze vidět z distribučních křivek pórů (Obrázek 72), referenční vzorek OMR obsahuje více větších pórů (okolo 0,15  $\mu\text{m}$ ) oproti materiálu, který obsahuje největší množství pucolánu OM6 (okolo 0,6  $\mu\text{m}$ ). Tento zjištěný fakt, ovlivňuje všechny ostatní naměřené charakteristiky, což prověřil i Maria a kol. ve svém článku [75]. V oblasti velikosti pórů od 10  $\mu\text{m}$  do 100  $\mu\text{m}$  lze vidět nepatrný nárůst objemu pórů. Tato velikost částic ovlivňuje především transport vodní páry. Lze konstatovat, že omítky s vyšším obsahem cihelného ohrusu (OM5 a OM6) vykazovaly menší množství větších pórů oproti omítkám s nejmenším nebo žádným obsahem cihelného prachu (OMR, OM2, OM3).



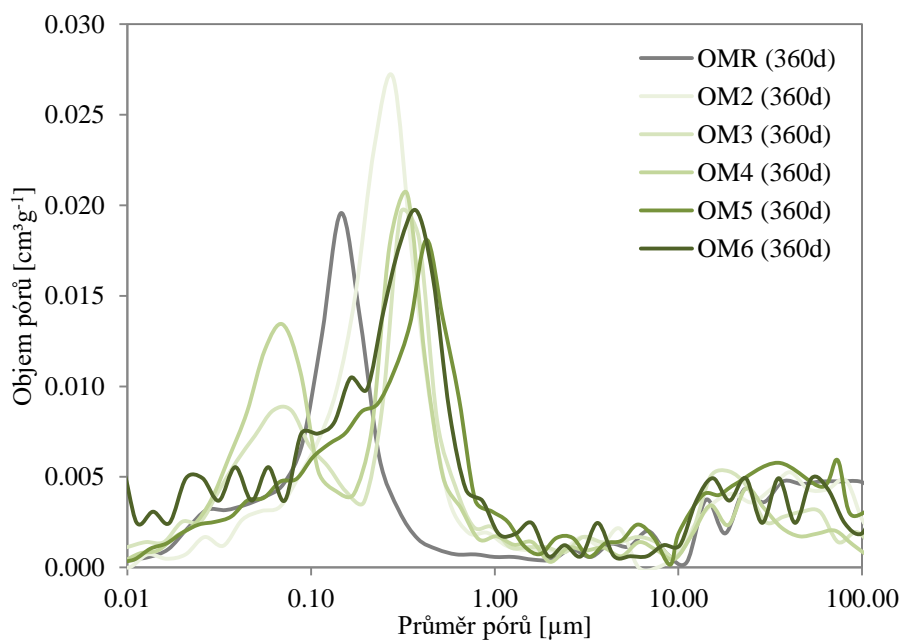
Obrázek 72. Distribuční křivka pórů ve stáří 28 dnech studovaných omítek

Na obrázku 73 jsou znázorněny charakteristiky pórového systému studovaných omítkových směsí ve stáří 180 dní. Z dosažených výsledků je patrný stejný trend, jako byl naměřen ve stáří 28 dní a to, že s vyšším obsahem cihelného prachu se zmenšuje množství kapilárních pórů (10-100  $\mu\text{m}$ ). Jak lze vidět z pórových křivek, referenční vzorek OMR obsahuje více menších pórů (okolo 0,15  $\mu\text{m}$ ) oproti materiálům, které obsahovaly větší množství cihelného obrusu (okolo 0,4  $\mu\text{m}$ ). I ve 180 dnech byl patrný nárůst větších pórů v oblasti velikosti pórů od 10  $\mu\text{m}$  do 100  $\mu\text{m}$ , ovšem byl zde zaznamenán menší objem pórů oproti 28 dnům. Ale i přes to je rozpoznat podobný trend.

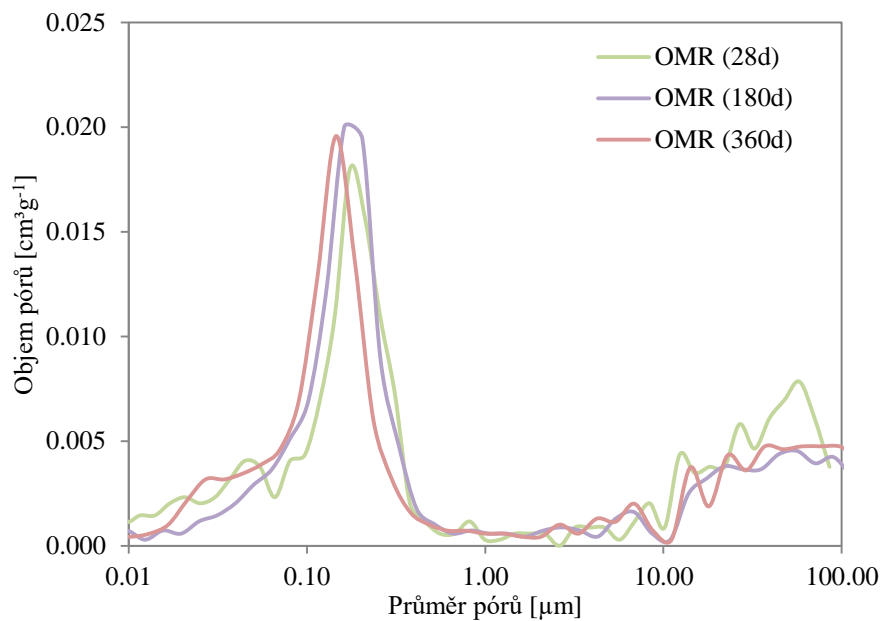
Při porovnání pórovitého systému v závislosti na čase jednotlivých omítkových směsí, lze vidět, že se také změnilo vnitřní uspořádání pórů. Póry speciálních omítek vykazovaly menší velikosti, například ve vzorku OM6 ve 28 dnech bylo zastoupeno největší množství pórů ve velikosti okolo 0,6  $\mu\text{m}$  a ve 180 dnech tato velikost pórů klesla na hodnotu okolo 0,4  $\mu\text{m}$ . Ve stáří 360 dní již není tak patrný rozdíl kumulativních křivek pórů v porovnání s omítkou po 180 dnech. V posledním zkoumaném časovém intervalu (360 dní) je ovšem patrný nárůst menších pórů a objevení nových a menších píků většiny speciálních omítek v oblasti od 0,01 do 0,10  $\mu\text{m}$ . Patrné rozdíly jsou lépe vidět na obrázcích 75 až 80, kde jsou znázorněny jednotlivé omítkové směsi ve všech třech zkoumaných časových intervalech. Stejný trend dokázala i Čáchová a kol. v předchozích studiích [36, 57, 78] a Fiala a kol. [79].



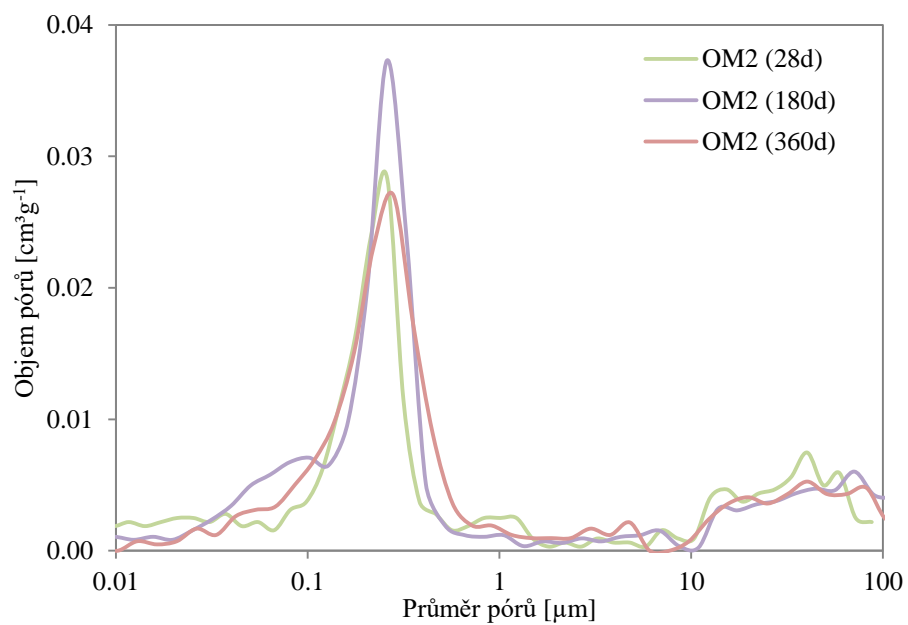
Obrázek 73. Distribuční křivka pórů ve stáří 180 dní studovaných omítkových směsí



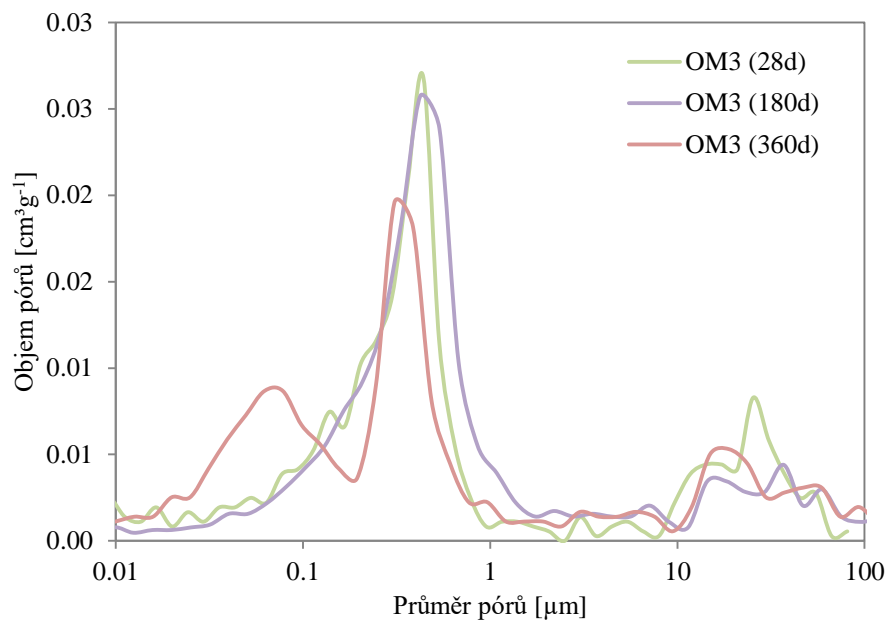
Obrázek 74. Distribuční křivka pórů ve stáří 360 dní studovaných omítkových směsí



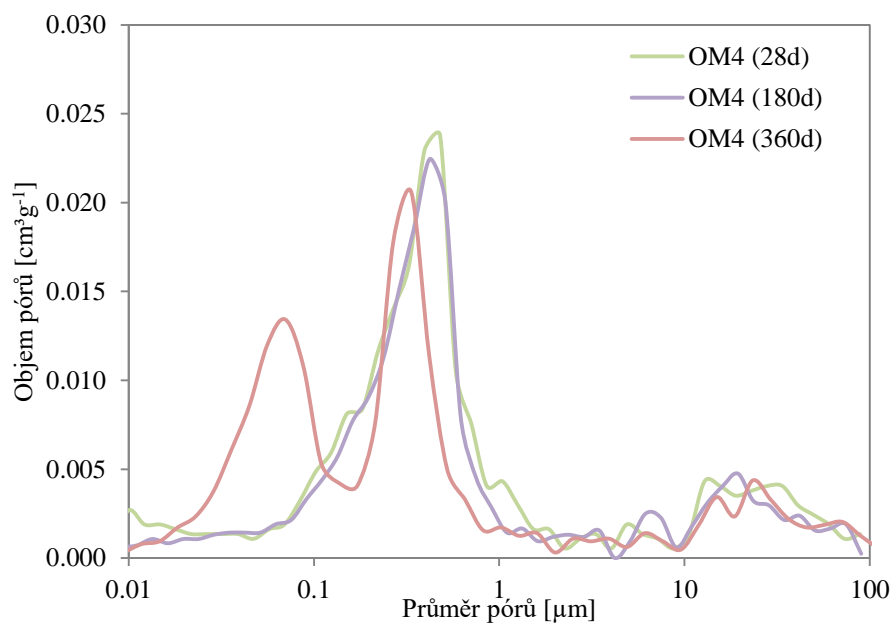
Obrázek 75. Distribuční křivka pórů omítky OMR ve zkoumaných časových intervalech



Obrázek 76. Distribuční křivka pórů omítky OM2 ve zkoumaných časových intervalech

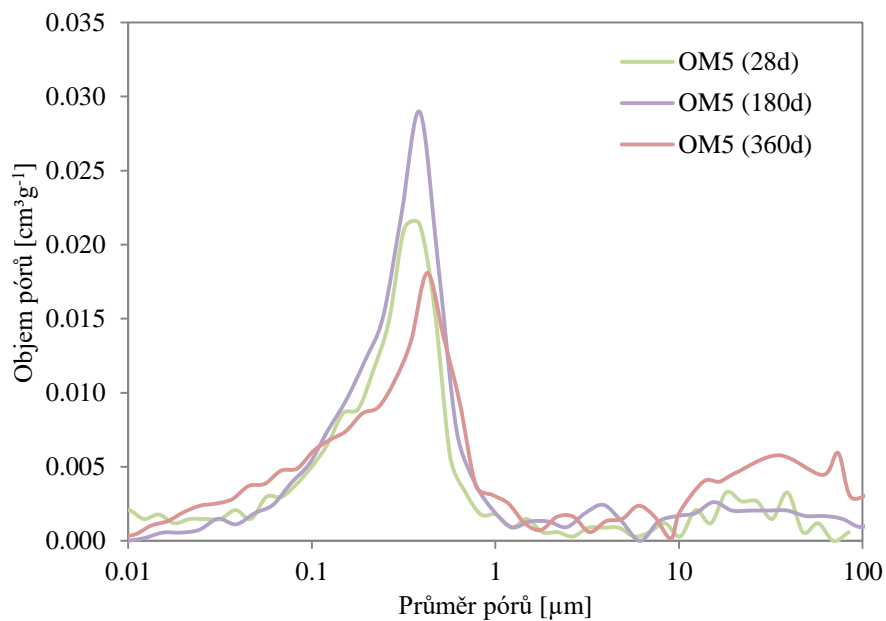


Obrázek 77. Distribuční křivka pórů omítky OM3 ve zkoumaných časových intervalech

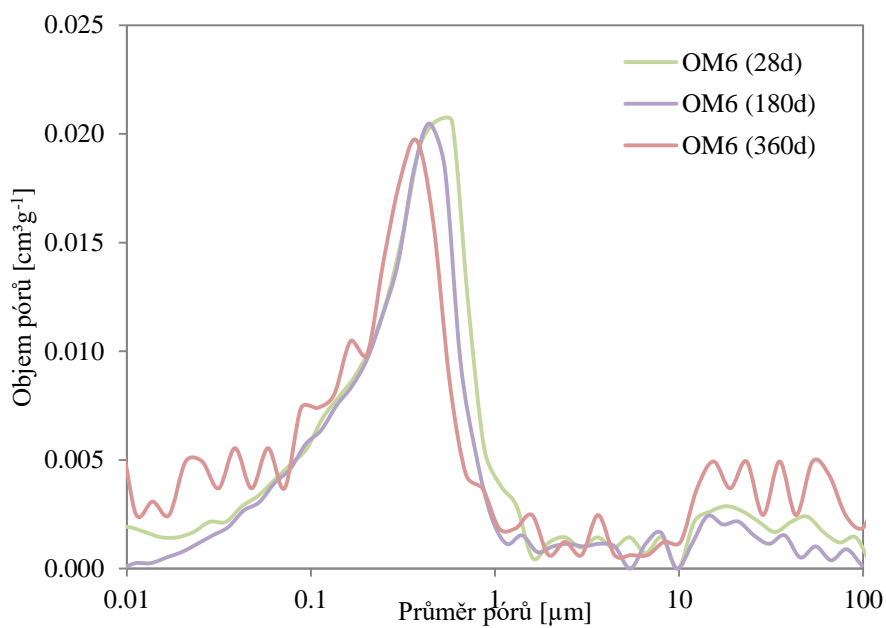


Obrázek 78. Distribuční křivka pórů omítky OM4 ve zkoumaných časových intervalech





Obrázek 79. Distribuční křivka pórů omítky OM5 ve zkoumaných časových intervalech

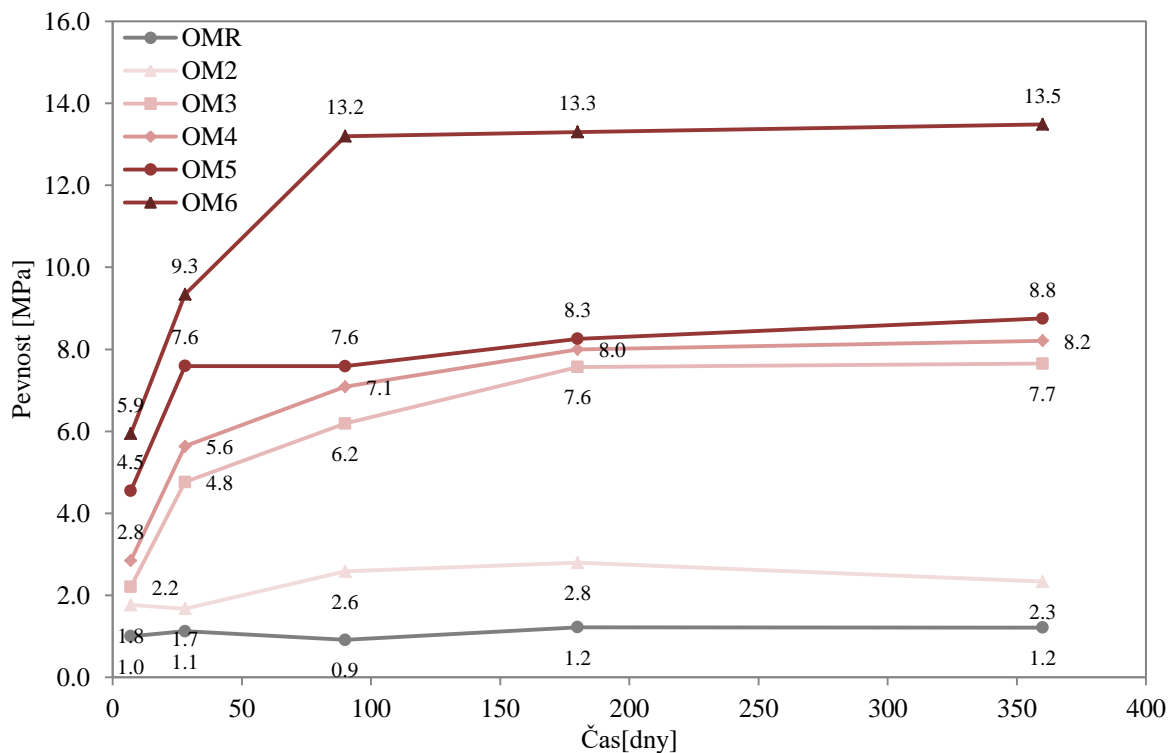


Obrázek 80. Distribuční křivka pórů omítky OM6 ve zkoumaných časových intervalech

### 11.3 Mechanické vlastnosti

Výsledné mechanické vlastnosti studovaných omítek v závislosti na čase lze vidět na obrázku 81 a v tabulce 31. Vliv času na mechanické vlastnosti studoval například i Tesárek a kol. [80]. Z dosažených výsledků je patrné, že referenční omítka OMR vykazovala nejnižších hodnot mechanických parametrů, naopak omítka s nejvyšším procentuálním zastoupením cihelného obrusu (OM6) dosahovala nejvyšších hodnot pevností. Je zde tedy patrný jistý trend, že se stoupajícím podílem pucolánu ve směsi narůstaly pevnosti v tlaku i pevnosti v tahu za ohybu omítek. Při zaměření se na vliv času byl pozorován narůstající trend hodnot mechanických parametrů na jednotlivých typech omítkových směsí.

Ve stáří 7 dnů omítka OM6 dosáhla více než 6krát vyšší pevnosti v tlaku (Obrázek 81) než referenční omítka OMR a ve stáří 90 dnů se tento rozdíl zvýšil skoro na 15krát vyšší hodnotu. Projevovala se zde vlastnost, která je typická pro pucolánové příměsi: vlivem času se pevnosti jednotlivých materiálů zvyšovaly, materiál byl pevnější a hutnější. Tato vlastnost se nejvíce projevila u omítky OM3, která zvýšila za půl roku svou pevnost v tlaku skoro 3,5krát. Nejvyšší hodnoty pevností v tlaku vykazovala speciální omítka OM6 obsahující nejvyšší procentuálního zastoupení cihelného obrusu, a to v každém studovaném časovém období. Již od 90 denních pevností dosahovala hodnot 13 MPa, tato hodnota se stále pozvolna zvyšovala, a to až do konce plánovaného experimentálního programu v časovém horizontu jednoho roku.



## Obrázek 81. Pevnosti v tlaku zkoumaných omítkových směsí v časové závislosti

Ve stáří 7 dnů omítka OM6 dosáhla více než 6,5krát vyšší pevnosti tahu za ohybu (Tabulka 31) než referenční omítka OMR a ve stáří 90 dnů se tento podíl zvýšil na 11krát vyšší hodnotu. U jednotlivých omítek se pevnosti v tahu za ohybu v závislosti na čase také zvyšovaly a nejvyšší nárůst zaznamenala omítka OM2, jejíž pevnost vzrostla skoro 3,5krát. Nejvyšších hodnot pevností v tahu za ohybu vykazovala omítka OM6 ve všech zkoumaných časových intervalech. Maximální hodnota této speciální omítky dosáhla po roce hodnoty 2,9 MPa.

Tabulka 31. Pevnost v tahu za ohybu zkoumaných omítkových směsí v časové závislosti

Materiál	$f_f$ [MPa]				
	7 dní	28 dní	90 dní	180 dní	360 dní
OMR	0,20	0,22	0,22	0,28	0,32
OM2	0,19	0,33	0,46	0,66	0,68
OM3	0,46	0,92	1,03	1,07	1,37
OM4	0,53	1,32	1,37	1,47	1,51
OM5	1,12	1,44	1,42	1,60	1,71
OM6	1,32	1,95	2,42	2,06	2,94

Různých závěrů při výzkumu past dosáhl Nežerka a kol. [30], důvody jsou již vysvětleny v kapitole 10.2. Pevnosti se po přidání popela z rýžových slupek zvýšily i Pavíovi a kol. [55], což je obvyklé při přidání pucolánové látky do omítkové směsi. To dokázal Ugurlu a kol. výzkumem historických omítek obsahujících cihelný prach [8], Isikdag a kol. při studiu strusky [12], Nacari a kol. s cihelným odpadem [81] a mnoho dalších [35, 22].

## 11.4 Vlhkostní vlastnosti

### 11.4.1 Transport vodní páry

Naměřené hodnoty pro transport vodní páry neboli difúze (součinitel difúze vodní páry a součinitel difúzní propustnosti pro vodní páru) ve stáří 1 měsíce lze vidět v tabulce 32 a ve stáří 12 měsíců v tabulce 33. Hodnoty faktoru difúzního odporu jsou znázorněny na obrázku 82 a 83. Nejvyšších hodnot faktoru difúzního odporu vykazoval referenční materiál OMR

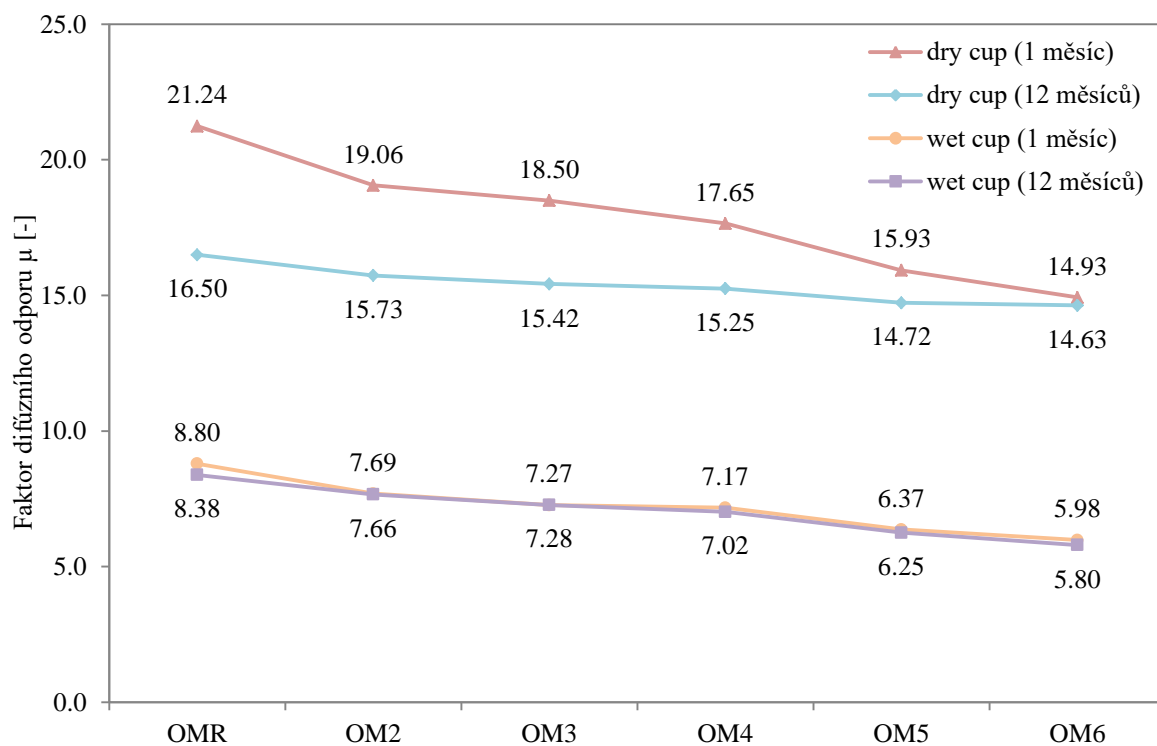
v obou zkoumaných časových intervalech (1 a 12 měsíců), a to jak v uspořádání dry cup, tak i wet cup. Dosažené výsledky opět korespondují s naměřenými pórovitostmi a samotným zjištěným charakterem pórového systému. Lze pozorovat klesající trend faktoru difúzního odporu s narůstajícím zastoupením cihelného prachu. Hodnota faktoru difúzního odporu materiálu v prvním měsíci u vzorku s nejvyšším procentuálním zastoupením cihelného obrusu OM6 se oproti referenční omítce OMR snížila o necelých 30 % v případě dry cupu a o 32 % v případě metody wet cup. Tento trend lze pozorovat u transportu vodní páry i po jednom roce. Po prvním roce se hodnota faktoru difúzního odporu omítky OM6 oproti referenční omítce OMR snížila o 11 % u dry cupu a o 31 % u wet cupu. Součinitel difúze vodní páry v uspořádání dry cup byl nižší než v uspořádání wet cup. Tento výsledek je v souladu se zkušenostmi u jiných typů materiálů a je pravděpodobně důkazem skutečnosti, že v uspořádání wet cup je částečně zachycen i přenos vody v kapalně formě [82]. Při porovnání časových závislostí je patrný pokles hodnot faktoru difúzního odporu. Nejvyšší rozdíl se projevil u referenční omítky OMR, jejíž faktor difúzního odporu klesl o 22 % po uplynutí jednoho roku v uspořádání dry cup. Čím vyšší je zastoupení cihelného obrusu ve vápenných omítkových směsích, tím tento rozdíl mezi časovými intervaly klesá, a např. u omítky OM6 již není skoro žádný znatelný rozdíl. Transport vodní páry studovala i Čáchová a kol. ve svých předchozích výzkumech, které podporují zjištěný trend i při náhradě plniva i pojiva cihelným odpadem (viz. Kapitola 8) [34, 35].

Tabulka 32. Vlhkostní vlastnosti zkoumaných omítek pomocí cup metody ve stáří jednoho měsíce

Materiál	Dry cup		Wet – cup	
	$\delta$ [s]	$D$ [ $m^2s^{-1}$ ]	$\delta$ [s]	$D$ [ $m^2s^{-1}$ ]
OMR	7,88E-12	1,08E-06	1,99E-11	2,74E-06
OM2	8,83E-12	1,21E-06	2,21E-11	3,03E-06
OM3	9,05E-12	1,24E-06	2,43E-11	3,34E-06
OM4	9,48E-12	1,30E-06	2,35E-11	3,23E-06
OM5	1,05E-11	1,45E-06	2,67E-11	3,67E-06
OM6	1,12E-11	1,54E-06	2,80E-11	3,85E-06

Tabulka 33. Vlhkostní vlastnosti zkoumaných omítek pomocí cup metody ve stáří dvanácti měsíců

Materiál	Dry cup		Wet cup	
	$\delta$ [s]	D [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ]	$\delta$ [s]	D [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ]
OMR	1,02E-11	1,40E-6	2,01E-11	2,76E-6
OM2	1,07E-11	1,46E-6	2,19E-11	3,00E-6
OM3	1,09E-11	1,49E-6	2,31E-11	3,17E-6
OM4	1,10E-11	1,51E-6	2,40E-11	3,29E-6
OM5	1,14E-11	1,56E-6	2,84E-11	3,90E-6
OM6	1,15E-11	1,58E-6	2,89E-11	3,97E-6



Obrázek 82. Faktor difúzního odporu naměřen metodou dry cup a wet cup v časové závislosti

## 11.4.2 Transport kapalné vody

Výsledné hodnoty transportu kapalné vody v závislosti na čase lze vidět v tabulce 34 (součinitel vlhkostní vodivosti) a na obrázku 83 (absorpční koeficient pro kapalnou vodu). Oba dva parametry vykazovaly klesající trend spolu s narůstajícím procentuálním zastoupením pucolánové příměsi. Nejnižších hodnot součinitele vlhkostní vodivosti dosahovala omítka OM6. V porovnání s referenčním materiálem OMR se její hodnota výrazně snížila, a to především ve stáří 6 měsíců.

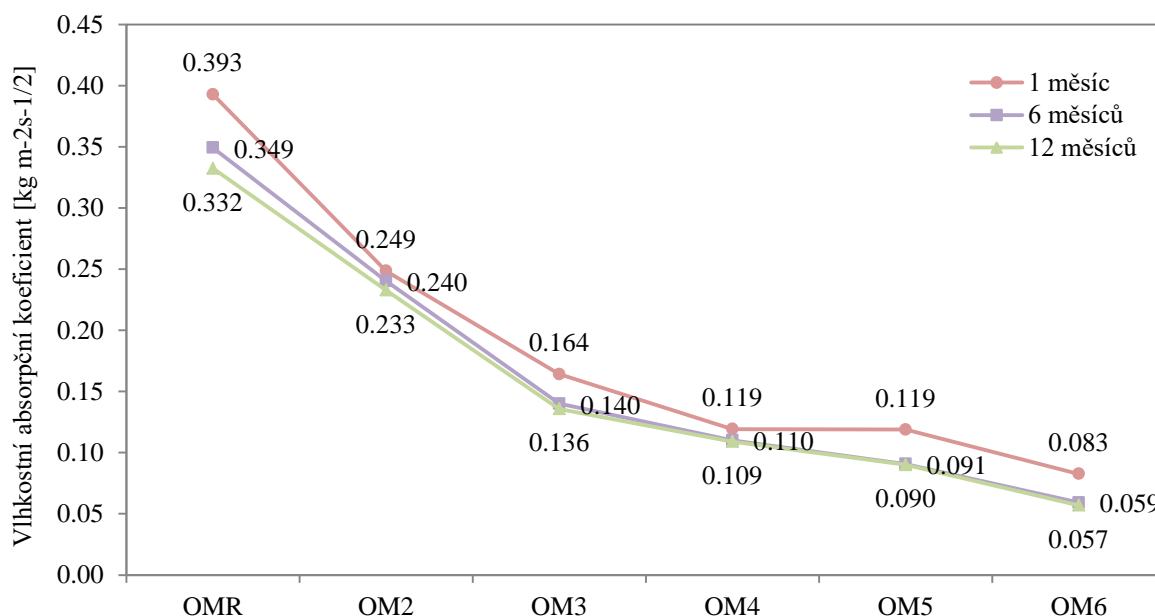
Tabulka 34. Součinitel vlhkostní vodivosti studovaných omítek v závislosti na čase.

Materiál	$\kappa$ [m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]		
	1 měsíc	6 měsíců	12 měsíců
OMR	1,40E-6	1,12E-6	1,08E-6
OM2	5,27E-7	4,39E-7	5,09E-7
OM3	2,10E-7	1,76E-7	1,58E-7
OM4	1,15E-7	9,46E-8	9,88E-8
OM5	1,08E-7	6,26E-8	6,81E-8
OM6	5,21E-8	2,75E-9	2,60E-8

Hodnota vlhkostního absorpčního koeficientu referenční omítky OMR ve stáří 1 měsíce byla vyšší skoro 5krát (Obrázek 83 a Tabulka 35) oproti speciální omítce OM6. Ve stáří 6 měsíců byl materiál OMR vyšší až 10krát vzhledem k 6 měsíční omítce OM6. A ve stáří 12 měsíců byl tento rozdíl vyšší skoro 6krát. Největší progres v časové závislosti prodělala omítka s nejvyšším zastoupením cihelného obrusu OM6, jejíž hodnota vlhkostního absorpčního koeficientu se snížila po roce o 31 %. Opačným příkladem je například speciální omítka OM2, jejíž vlhkostní absorpční koeficient klesl pouze o 6,4 %. Tyto výsledky jsou v souladu s naměřenou charakteristikou pórového systému. Je zde patrný trend zhoršující se schopnosti transportovat kapalnou vodu vlivem narůstajícího obsahu cihelného obrusu ve vápenné omítce.

Tabulka 35. Vlhkostní absorpční koeficient studovaných omítek v časové závislosti

Materiál	A [ $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1/2}$ ]		
	1 měsíc	6 měsíců	12 měsíců
OMR	0,393	0,349	0,332
OM2	0,249	0,240	0,233
OM3	0,164	0,140	0,136
OM4	0,119	0,091	0,109
OM5	0,119	0,090	0,090
OM6	0,083	0,059	0,057



Obrázek 83. Vlhkostní absorpční koeficient zkoumaných omítek

Již v minulosti se využívala omítka s cihelným odpadem, například v akvaduktech či v podobném vlhkém prostředí (hydraulické vlastnosti). Elif Ugurlu a Hasan Boke [8] studovali, jak se chová a jaké má charakteristiky právě cihelná omítka ve vlhkém a teplém prostředí (v lázních). Také vycházeli z historie cihelných omítek. Výsledky ukázaly, že omítka neztratila svou pevnost ani přilnavost k povrchu, a to díky svým hydraulickým vlastnostem.

Podobným výzkum lze vidět v článku od Vejmelkové a kol. [15], která studovala vlhkostní vlastnosti vápenné omítky s metalupkem. Naměřené výsledky ukázaly, že vlhkostní absorpční koeficient byl také snížen vlivem zvyšujícího se obsahu metalupku ve vápenné omítce.

## 11.5 Tepelné vlastnosti

Zkoumané hodnoty součinitele tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity studovaných omítek ve vysušeném stavu lze vidět v tabulce 36 a v nasyceném stavu v tabulce 37. Závislost tepelných vlastností studovaných materiálů na obsahu vlhkosti je znázorněna na obrázku 84 a 85. Tyto vzorky byly měřeny v závislosti na vlhkosti po jednom roce od výroby. Do té doby byly uloženy v klimatické komoře v konstantních podmínkách, stejně jako vyrobené pasty. Z dosažených výsledků je patrné, že nejvyšší hodnoty součinitele tepelné vodivosti dosáhl referenční materiál OMR. Naopak nejnižších hodnot součinitele tepelné vodivosti dosahoval materiál s nejvyšším obsahem cihelného obrusu OM6. V tomto případě je však nutné podotknout, že rozdíly mezi jednotlivými omítkami jsou nepatrné. V porovnání s referenčním materiálem OMR byla hodnota součinitele tepelné vodivosti materiálu OM6 pouze 17 % (ve vysušeném stavu).

Tabulka 36. Součinitel tepelné vodivosti a měrná tepelná kapacita studovaných omítek ve vysušeném stavu

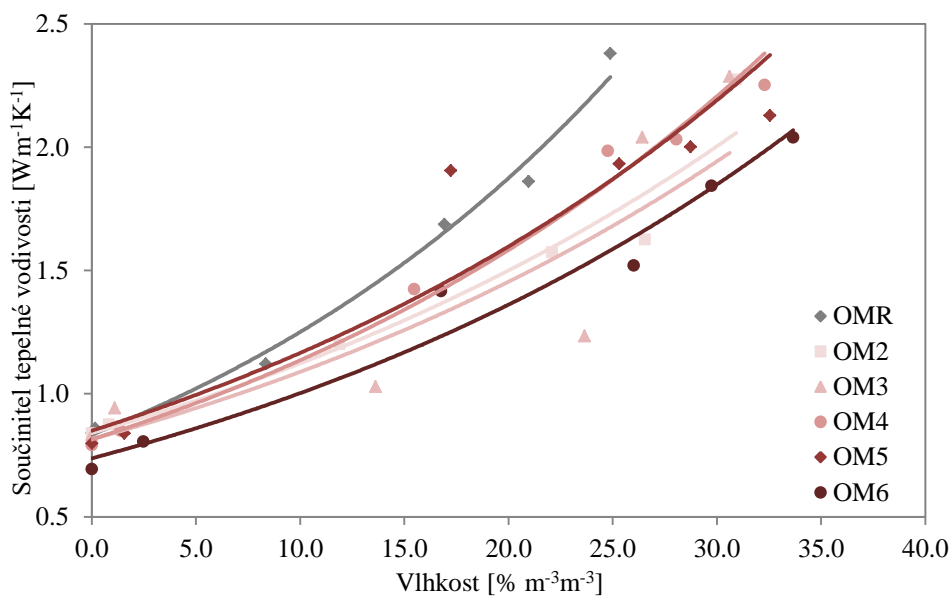
Materiál	Vysušený stav	
	$\lambda$ [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]	$c$ [ $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]
OMR	0,840	876
OM2	0,840	947
OM3	0,834	931
OM4	0,790	960
OM5	0,798	986
OM6	0,694	922

Tabulka 37. Součinitel tepelné vodivosti a měrná tepelná kapacita studovaných omítek v nasyceném stavu

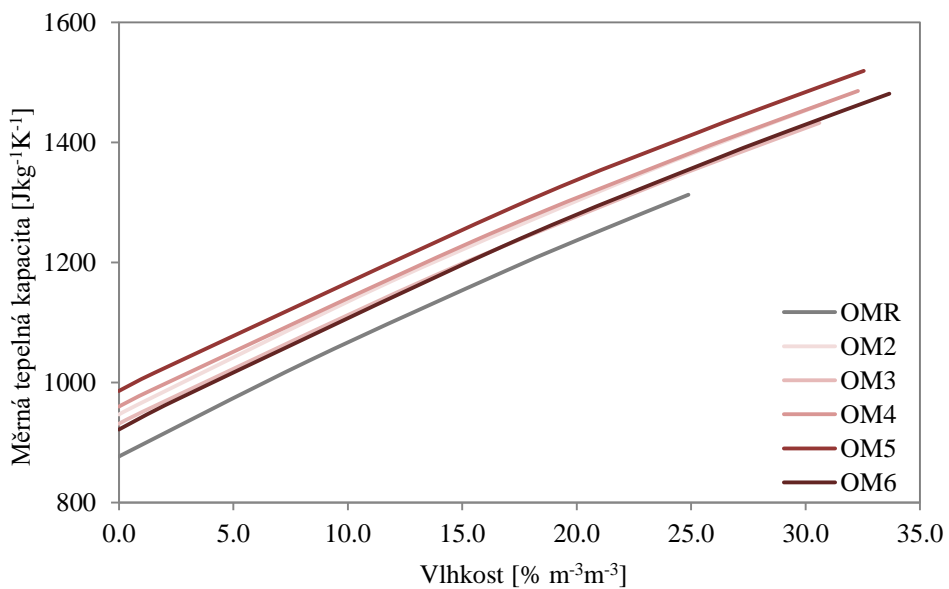
Materiál	Nasycený stav		
	$w$ [ $\%\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ]	$\lambda$ [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]	$c$ [ $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]
OMR	24,9	2,381	1313
OM2	30,9	2,275	1466
OM3	30,6	2,287	1433
OM4	32,3	2,252	1486



OM5	32,5	2,129	1519
OM6	33,7	2,038	1481



Obrázek 84. Součinitel tepelné vodivosti zkoumaných omítek OM



Obrázek 85. Měrná tepelná kapacita studovaných omítek OM

## 12 Závěr

V disertační práci byly podrobně studovány vápenné pasty a omítky s různým procentuálním zastoupením cihelného obrusu. Pasty byly zkoumány především pro lepší porozumění vnitřního vývoje vazeb a vznikajících reakcí. U omítek s obsahem cihelného obrusu byl monitorován především vývoj vlastností v porovnání s referenční vápennou omítkou. Podrobné shrnutí naměřených výsledků je v textu níže.

Studované pasty byly zkoumány především pro určení podrobnějších informací, které by objasnilo vzájemné spolupůsobení použitých surovin (vápenný hydrát – cihelný obrus) v časové závislosti. Pro základní výzkum vápenných past byl připraven rozsáhlý experimentální program, podrobněji byly studovány tři typy materiálů. Konkrétně se jednalo o složení materiálů, kde se vápenný hydrát nahrazoval 10, 50 a 70 % cihelného obrusu. V následujících bodech jsou uvedeny dosažené výsledky měřené na studovaných vápeno-pucolánových pastách v rámci tohoto experimentálního programu.

- Při studiu charakterizace pórového systému byl patrný rozdíl mezi 10% náhradou (MP10) a ostatními pastami obsahující cihelný obrus. Materiál MP10 vykazoval podstatně více menších pórů oproti zbylým studovaným pastám, které měly vyšší procentuální zastoupení cihelného prachu. Z distribučních a kumulativních křivek pórů byl patrný trend, že se zvyšujícím se množstvím pucolánové příměsi v pastách se zvyšoval i objem větších pórů. Tyto trendy byly patrné ve všech zkoumaných časových intervalech (2, 7, 28, 90, 180 a 360 dní). V tomto studovaném materiálu se nacházejí pouze tzv. gelové póry.
- Z výsledků 28denních mechanických zkoušek je patrné, že nejnižších hodnot pevnostních charakteristik dosahovala referenční pasta MPR. Pasty vykazovaly narůstající trend spolu se zvyšujícím se zastoupením cihelného obrusu, a to až do 70% náhrady (MP70), poté byl zaznamenán výrazný pokles hodnot pevnostních charakteristik. Tento propad nastal, jelikož se v materiálu vyskytovalo již nadbytečné množství pucolánu a málo vápenného hydrátu, reakce již neprobíhala efektivně a použitý pucolán zřejmě plnil spíše funkci plniva než pojiva. Při podrobnějším výzkumu hodnot pevností v tlaku v časové závislosti, bylo také prokázáno, že s narůstajícím obsahem cihelného obrusu v pastách narůstají i pevnosti. Následně bylo zjištěno, že v delším časovém horizontu se hodnoty pevností již příliš nevyvíjí jako v počátku experimentu.

- Největší hmotnostní úbytky pomocí termické analýzy (DSC) vykazoval referenční materiál MPR a materiál s nejmenším obsahem cihelného obrusu MP10. Tyto hmotnostní úbytky se stále postupně zvyšovaly a v posledním zkoumaném časovém intervalu (360 dní) vykazovaly nejvyšší hodnoty. Tento trend byl pozorován u všech zkoumaných past – vlivem času se zvyšoval hmotnostní úbytek. Z grafů tepelných toků byl patrný trend výraznějších změn tepelného toku materiálu MP10, další studovaná pasta MP70 s nejvyšším procentuálním zastoupením pucolánu vykazovala změny nejmenší. Od 820 °C docházelo u past MP50 a MP70 ve stáří 28 dní k exotermickému ději - krystalizaci. U pasty s nejnižším zastoupením pucolánu MP10 a referenčním materiálem MPR nebyla takováto reakce zaznamenána. Reakce okolo 800 °C se postupně začala měnit na endotermický děj a při 180 denní zkoušce začala velikost tohoto píku výrazně stoupat a přibližovat se k velikosti píku vyjadřující rozklad kalcitu. Po 360 dnech již měly tyto píky u materiálu MP10 stejnou velikost.
- Podrobné vyhodnocení termogravimetrické metody podporuje a rozšiřuje nashromážděné informace z měření pomocí TG/DSC. Karbonatace čistého vápna byla poměrně rychlá reakce. Pokud se do tohoto systému přidal cihelný obrus, a to i v malém množství, docházelo k výraznému zpomalení karbonatace (nezáleží na množství pucolánu ve směsi). Pasta MP70 s nejvyšším obsahem cihelného prachu vykazovala nejrychlejší celkový úbytek portlanditu, ale i jeho nejrychlejší konverzi na CSH produkty

Z naměřených a prezentovaných výsledných hodnot vápenno-pucolánových past lze pozorovat, jak velký vliv má zvyšující se zastoupení cihelného obrusu ve vápenném hydrátu. Také bylo pomocí mechanických zkoušek potvrzeno, do jaké míry lze nahrazovat vápenný hydrát efektivně, a že se počáteční progres v časovém období zmírní. Pomocí charakterizace pórovitého systému bylo zjištěno, že pasty obsahují pouze gelové póry, a že vlivem času se obsah a velikost pórů mění. Termická analýza ukázala, jak množství cihelného obrusu a vliv času ovlivňuje reakce vyskytující se v tomto systému.

Na základě předchozích studií byla navržena omítková směs, jejíž materiálové charakteristiky byly podrobněji zkoumány i v delším časovém horizontu. Tyto dosažené výsledky jsou shrnuty v následujících bodech.

- Hodnoty objemové hmotnosti i hustoty matrice se liší jen nepatrně. Objemové hmotnosti se pohybovaly kolem 1650 kg m<sup>-3</sup> a hustoty matrice okolo 2550 kg m<sup>-3</sup>,

a to ve všech časových intervalech. U otevřené pórovitosti je vidět trend pozvolného navyšování jejich hodnot s rostoucím procentuálním zastoupením cihelného obrusu. Referenční omítka OMR vykazovala nejmenší hodnoty otevřené pórovitosti. Vlivem času se otevřená pórovitost všech omítek snížila.

- Z dosažených výsledků charakterizace pórového systému je patrný trend, že s nárůstem keramického obrusu v omítkových směsích se zmenšuje i množství kapilárních pórů. Jak lze vidět z distribučních křivek pórů, referenční vzorek OMR obsahuje více menších pórů (pík okolo 0,15  $\mu\text{m}$ ) oproti materiálu, který obsahuje největší množství pucolánu OM6 (pík okolo 0,6  $\mu\text{m}$ ). Z dosažených výsledků po 180 dnech je patrný stejný trend, jako byl naměřen ve stáří 28 dnů. Při porovnání charakterizace pórového systému v závislosti na čase jednotlivých omítkových směsí, lze vidět, že se zároveň změnilo vnitřní uspořádání pórů. S přidavkem pucolánu se zjemňuje pórový systém. Z porovnání porozimetrických výsledků past a malt je zřejmé, že kapilární póry (10-100  $\mu\text{m}$ ) jsou přítomné prakticky pouze v maltách – to znamená, že jsou způsobeny přítomností kameniva v systému a nacházejí se zejména v tranzitní zóně. V čase, při průběhu pucolánové reakce, pak dochází k růstu hydratačních produktů v původně větších pórech a tyto zanikají, resp. jsou „zjemňovány“ novými částicemi na póry o menším průměru.
- Z naměřených mechanických charakteristik je patrné, že referenční omítka OMR vykazovala nejnižší pevnost, naopak omítka s nejvyšším procentuálním zastoupením cihelného obrusu dosahovala hodnot nejvyšších. Lze konstatovat, že s narůstajícím podílem pucolánu ve směsi narůstaly pevnosti omítek v tlaku i pevnosti v tahu za ohybu. Pokud se zaměříme na vliv času, tak zde byl pozorován narůstající trend hodnot mechanických parametrů u všech jednotlivých typů omítkových směsí. Po 90 denních pevnostech byl nárůst hodnot mechanických charakteristik pouze mírný. Mezi intervaly 180 a 360 dní byly pozorovány již spíše konstantní hodnoty.
- Nejvyšší hodnotu faktoru difúzního odporu vykazoval referenční vzorek OMR, a to u obou typů cup metod. Současně byl zaznamenán klesající trend faktoru difúzního odporu s narůstajícím zastoupením cihelného prachu. Tento trend byl pozorován u obou zkoumaných prostředí. Po jednom roce vykazovaly omítky nižší hodnoty faktoru difúzního odporu než ve stáří jednoho měsíce.

- Výsledné hodnoty součinitele vlhkostní vodivosti a absorpčního koeficientu pro kapalnou vodu vykazovaly klesající trend spolu s narůstajícím procentuálním zastoupením pucolánové příměsi. Nejnižší hodnotu součinitele vlhkostní vodivosti vykazovala omítka OM6, oproti referenčnímu materiálu OMR se její hodnota výrazně snížila. Je zde také patrné zhoršení schopnosti transportovat kapalnou vodu vlivem narůstajícího zastoupení cihelného obrusu ve vápenné omítce a i v delším časovém horizontu.
- Výsledné hodnoty tepelných charakteristik ukázaly, že narůstající obsah cihelného obrusu v omítkových směsích vykazuje mírné zlepšení tepelně – izolačních vlastností. Nižší hodnoty součinitel tepelné vodivosti vykazuje omítka s nejvyšším obsahem pucolánu, ovšem jedná se velice mírný pokles.

Z dosažených výsledků v rámci experimentálního programu týkajícího se nově vyvíjených omítkových směsí s pucolánovou příměsí, lze pozorovat, že náhradou vápenného hydrátu a křemičitého písku cihelným obrusem se prakticky všechny naměřené vlastnosti zlepšily. Jako nejlepší se jeví 50% náhrada za plnivo i pojivo (OM5). Jedná se o celkem vysoký podíl náhrady vápenného hydrátu, který by zajistil snížení celkových nákladů na výrobu samotných omítek i pokles vzniku emisí CO<sub>2</sub>. Ke zlepšení docházelo i ve zkoumaném časovém horizontu, což lze považovat také za pozitivní vlastnost studovaných omítek. Lze tedy říci, že recyklovaný cihelný obrus může být považován za perspektivní příměs do omítkových směsí jako náhrada pojiva i plniva.

Díky této disertační práci bylo získáno velké množství zajímavých dat a v závěru disertační práce byl i nastíněn pozitivní vliv cihelného obrusu na vlastnosti vápenných omítek. Vzhledem k výše uvedeným závěrům, lze konstatovat, že k získání optimalizované výsledné omítky dle vstupních požadavků, by byl zapotřebí dalšího rozsáhlejšího výzkumu. K tomuto účelu by bylo vhodné využít např. simplexovou metodu, která by byla schopna zdokonalit navrhované omítkové směsi efektivněji, než to dokážou provedené experimenty. Další krok, který se nabízí, v případě znalosti konkrétní náhrady, by byl výpočet jednak ekonomického dopadu (výpočet nákladů), ale i ekologického zatížení (ušetření energie potřebné na výrobu a snížení vzniku emisí CO<sub>2</sub>) při případném zavedení na trh.

## Literatura

- [1] ROVNANÍKOVÁ, P., *Omítky: chemické a technologické vlastnosti*. Vyd. 1. Praha: Společnost pro technologie ochrany památek - Stop, 2002. ISBN 80-86657-00-0.
- [2] HOŠEK, J. a LOSOS, L., *Historické omítky: průzkumy, sanace, typologie*. 1. vyd. Praha: Grada, 2007. Stavitel. ISBN 978-80-247-1395-3.
- [3] LÁTNÍK, J. a CIKRT M., *Dvě tisíciletí vápenictví a cementárenství v českých zemích*. Praha: Svaz výrobců cementu a vápna Čech, Moravy a Slezska, 2001.
- [4] VITRUVIUS POLLIO, M. *Deset knih o architektuře*. SNKLUH, Praha 1953.
- [5] VEJMEJKOVÁ, Eva. *Vápenné omítky s pucolánovými příměsmi: Lime based plasters with pozzolanic admixture*. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. Habilitační přednáška. ISBN 978-80-01-05910-4.
- [6] DAMTOF, J.S., LUKASIK, J., HERFORT, D., SORRENTINO D., GARTNER, E.M., Sustainable Development and Climate Change Initiatives, *Cement and Concrete Research*. Vol. 38, Issue 2, February 2008, pp. 115-127.
- [7] SCHNEIDER, M., ROMER, M., TSCHUDIN M., BOLIO H., Sustainable Cement Production Present and Future. *Cement and Concrete Research*. Vol. 41, Issue 7, July 2011, pp. 642-650.
- [8] UGURLU, E., BÖKE, H., The Use of Brick-Lime Plasters and Their Relevance to Climatic Conditions of Historic Bath Buildings, *Construction and Building Materials*. Vol. 23, Issue 6, June 2009, pp. 2442-2450.
- [9] MOROPOULOU, A., BAKOLAS., A., AGGELAKOPOULOU, E., Evaluation of Pozzolanic Activity of Natural and Artificial Pozzolans by Thermal Analysis, *Thermochimica Acta*. Vol. 420, Issue 1-2 SPEC. ISS., October 2004, pp. 135-140.
- [10] UGURLU, E., BOKE, H., The Use of Brick-Lime Plasters and Their Relevance to Climatic Conditions of Historic Bath Buildings, In: *Scopus* [online], *Construction and Building Materials*. Vol. 23, Issue 6, June 2009, pp. 2442-2450.
- [11] MARACELAKI-KALAITZAKI, P., BAKOLAS, A., MOROPOULOU, A., Physico-chemical Study of Cretan Ancient Mortars, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, Issue 5, May 2003, pp. 651-661.
- [12] ISIKDAG, B., TOPCU, I. B., The Effect of Ground Granulated Blast-furnace Slag on Properties of Horasan Mortar, In: *Scopus* [online], *Construction and Building Materials*. Vol. 40, 2013, pp. 448-454.
- [13] BUDAK, M., AKKURT, S., BÖKE, H., Evaluation of Heat Treated Clay for Potential Use in Intervention Mortars, *Applied Clay Science*, Vol. 49, 2010, pp. 414-419.
- [14] VEJMEJKOVÁ, E., PERNICOVÁ, R., SOVJAK, R., ČERNÝ R.. Properties of Innovative Renders on a Lime Basis for the Renovation of Historical Buildings, In: *Scopus* [online], *WIT Transactions on the Built Environment*, 11th International Conference on Structural Repairs and Maintenance of Heritage Architecture. Vol. 109, July 2009, pp. 221-229.
- [15] VEJMEJKOVÁ, E., KEPPERT, M., KERŠNER, Z., ROVNANÍKOVÁ, P., ČERNÝ, R., Mechanical, Fracture-mechanical, Hydric, Thermal, and Durability Properties of Lime-metakaolin Plasters for Renovation of Historical Buildings, In: *Scopus* [online], *Construction and building materials*. Vol. 31, June 2012, pp. 22-28.

- [16] ČERNÝ, R., KUNCA, A., TYDLITÁT, V., DRCHALOVÁ, J., ROVNANÍKOVÁ, P., Effect of Pozzolanic Admixtures on Mechanical, Thermal and Hydric Properties of Lime Plasters, *Construction and Building Materials*, Vol. 20, December 2006, pp. 849-857.
- [17] VEJMEKOVÁ, E., MÁCA, P., KEPPERT, M., ROVNANÍKOVÁ, P., ČERNÝ, R., Commercial Renovation Renders: Mechanical, Hygric, Thermal and Durability Properties, In: *Scopus* [online], *Cement Wapno Beton*. Issue 5, September-October 2011, pp. 288-298.
- [18] TONIOLO, L., PARADISI, A., GOIDANICH, S., PENNATI, G., Mechanical Behaviour of Lime Based Mortars after Surface Consolidation, In: *Scopus* [online], *Construction and building materials*. Vol. 25, Issue 4, April 2011, pp. 1553-1559.
- [19] MATIAS, G., FARIA, P., TORRES, I., Lime Mortars with Ceramic Wastes: Characterization of Components and Their Influence on the Mechanical Behaviour, *Construction and Building Materials*, Vol. 73, December 2014, pp. 523-534.
- [20] WALKER, R., PAVÍA, S., Physical Properties and Reactivity of Pozzolans, and Their Influence on the Properties of Lime-pozzolan Pastes, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. Vol. 44, Issue 6, July 2011, pp. 1139-1150.
- [21] DONATELLO, S., TYRER, M., CHEESEMAN, C.R., Comparison of Test Methods to Assess Pozzolanic Activity, *Cement and Concrete Composites*. Vol. 32, Issue 2, February 2010, pp. 121-127.
- [22] NAVRÁTILOVÁ, E., ROVNANÍKOVÁ, P., Reactivity of Brick Powder in Lime Mortars, *11th International Conference Binders and Materials 2013*, In: *Scopus* [online], Elsevier B. V., Advanced Materials Research, 2013.
- [23] TASHIMA, M. M., SORIANO, L., MONZÓ, J., BORRACHERO, M.V., AKASAKI, J. L., PAYÁ, J., New Method to Assess the Pozzolanic Reactivity of Mineral Admixture by Means of pH and Electrical Conductivity Measurements in Lime:Pozzolan Suspensions, Vol. 64, 2014, No 316, <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2014.00914>.
- [24] AUBERT, J. E., SEGUI, P., HUSSON, B., MEASSON, M., A Method Developed to Quantify Lime and Gypsum Consumed by Mineral Additions, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 34, 2012, pp. 874-880.
- [25] CIZER, Ö, VAN BALEN, K., VAN GEMERT, D., Competition Between Hydration and Carbonation in Hydraulic Lime and Lime-Pozzolana Mortars, *Advanced Materials Research*, Vols. 133-134, 2010, pp. 241-246, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.133-134.241.
- [26] MOROPOULOU, A., BAKOLAS, A., AGGELAKOPOULOU, E., Evaluation of Pozzolanic Activity of Natural and Artificial Pozzolans by Thermal Analysis, *Thermochimica Acta*. Vol. 420, Issue 1-2 SPEC. ISS., October 2004, pp. 135-140.
- [27] NÓBRAGA DE AZEREDO, A. F., STRUBLE, L. J., CARNEIRO, A. M. P., Microstructural Characteristics of Lime-pozzolan Pastes Made from Kaolin Production Wastes, *Material and Structures*, Vol 48, 2015, pp. 2123-2132.
- [28] FERRAZ, E., ANDEJKOVIČOVÁ, S., VELOSA, A. L., SILVA, A.S., ROCHA, F., Synthetic Zeolite Pellets Incorporated to Air Lime-metakaolin Mortars: Mechanical Properties, *Construction and Building Materials*. Vol. 69, October 2014, pp. 243-252.
- [29] GAMEIRO, A., SANTOS SILVA, A., FARIA, P., GRILO, J., BRANCO, T., VEIGA R., VELOSA, A., Physical and Chemical Assessment of Lime-metakaolin Mortars: Influence of Binder:Aggregate Ratio, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 45, 2014, pp. 264-271.

- [30] NEŽERKA, V., SLÍŽKOVÁ, Z., TESÁREK, P., PLACHÝ, T., FRANKEOVÁ, D., PETRÁŇOVÁ, V., Comprehensive Study on Mechanical Properties of Lime-based Pastes with Additions of Metakaolin and Brick Dust. *Cement and Concrete Research*. Vol. 64, October 2014, pp. 17-29.
- [31] UCHIMA, J.S., RESTREPO, O.J., TOBÓN, J.I., Pozzolanicity of the Material Obtained in the Simultaneous Calcination of Biomass and Kaolinitic Clay, *Construction and Building Materials*, Vol. 95, 2015, pp. 414-420.
- [32] MORAES, J.C.B., AKASAKI, J. L., MELGES, J.L.P., MONZÓ, J., BORRACHERO, M. V., SORIANO, L., PAYÁ, J., Assessment of Sugar Cane Straw Ash (SCSA) as Pozzolanic Material in Blended Portland Cement: Microstructural Charakterization of Pastet and Mechanical Strength of Mortars, *Construction and Building Materials*, Vol. 94, 2015, pp. 670-677.
- [33] VEJMEKOVÁ, E., KEPPERT, M., ROVNANÍKOVÁ, P., KERŠNER, Z., ČERNÝ, R., Application of Burnt Clay Shale as Pozzolan Addition to Lime Mortar, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 34, 2012, pp. 486-492.
- [34] ČÁCHOVÁ, M., VEJMEKOVÁ, E., KOŇÁKOVÁ, D., ŽUMÁR, J., KEPPERT, M., REITERMAN, P., ČERNÝ, R., Application of Ceramic Powder as Supplementary Cementitious Material in Lime Plasters, In: *23rd International Baltic Conference on Materials Engineering*, Medziagotyra, Vol. 22, Issue 3, 2016, pp. 440-444.
- [35] ČÁCHOVÁ, M., KOŇÁKOVÁ D., VEJMEKOVÁ, E., KEPPERT, M., ČERNÝ, R., Properties of Innovated Mortars Utilizing Secondary Raw Material, In: *International Conference on High Performance and Optimum Design of Structures and Materials - HPSM/OPTI 2014, Oostende, Belgium*, WIT Transactions on the Built Environment, June 2014 pp. 49-56. ISBN: 987-184564774-2.
- [36] ČÁCHOVÁ, M., KOŇÁKOVÁ D., VEJMEKOVÁ, E., POLOZHIY, K., ČERNÝ, R., Pore Distribution and Water Vapor Diffusion Parameters of Lime Plasters with Waste Brick Powder, Vol. 1054, 2014, pp. 205-208. ISBN: 978-3-03835-317-1.
- [37] KOLTÍK, P., BLÁHA, J., DOUBRAVOVÁ, K., HEIDINGSFELD, V., ROVNANÍKOVÁ, P., VANĚČEK, O., *Vápno*, Vyd. 1. Praha: Společnost pro technologie ochrany památek - Stop, 2001. SBN 80-902668-8-6.
- [38] ROVNANÍKOVÁ, P., ROVNANÍK, P., *Stavební chemie, Modul 2 – anorganická chemie a chemie anorganických stavebních materiálů*, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2004.
- [39] SVOBODA, L. a kolektiv, *Stavební hmoty*. Jaga group s.r.o., Bratislava 2007.
- [40] VEJMEKOVÁ, E., *Vápenné omítky s pucolánovými příměsmi, Habilitační přednáška*, České vysoké učení technické v Praze, 2016. ISBN 978-80-01-05910-4.
- [41] Ing. Rejnuš. SUEVITSKÝ TRAS TRASVÁPENNÉ ZDÍCÍ MALTY TRASVÁPENNÉ OMÍTKY. *PRISMA CONSULT*. [online]. 19.1.2017 [cit. 2017-01-19]. Dostupné z: [http://www.prismaconsult.cz/fotky1136/fotov/\\_ps\\_24Suevitsky-tras-trasvap-malty-a-omitky.pdf](http://www.prismaconsult.cz/fotky1136/fotov/_ps_24Suevitsky-tras-trasvap-malty-a-omitky.pdf).
- [42] Tuff. *Sandatlas*. [online]. 19.1.2017 [cit. 2017-01-19]. Dostupné z: <http://www.sandatlas.org/tuff/>
- [43] BAREK, J., *Pucolánová aktivita oxidu křemičitého*, Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie, 2014



- [44] 5 Incredible Benefits Of Diatomaceous Earth. *reset.me*. [online]. 19.1.2017 [cit. 2017-01-19]. Dostupné z: <http://reset.me/story/5-incredible-benefits-of-diatomaceous-earth/>
- [45] Zeolit – poklad z nitra Země. *ZEOLIT*. [online]. 19.1.2017 [cit. 2017-01-19]. Dostupné z: <http://mineralzeolit.cz/>
- [46] Úvod. *Zeolity*. [online]. 19.1.2017 [cit. 2017-01-19]. Dostupné z: <http://zeolity.brych.cz/>
- [47] kaolin. *Geologická encyklopedie*. [online]. 19.1.2017 [cit. 2017-01-19]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?kaolin>
- [48] TOLHURST L.. Commercial Recovery of Metals From Coal Fly Ash. *CORNERSTONE: The official journal of the world coal industry*. [online]. 19.1.2017 [cit. 2017-01-19]. Dostupné z: <http://cornerstonemag.net/commercial-recovery-of-metals-from-coal-fly-ash/>
- [49] NAGRALE, S. D., HAJARE, H., MODAK P. R. Utilization Of Rice Husk Ash. In: *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2012. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.416.1166&rep=rep1&type=pdf>.
- [50] SUA-IAM, G., MAKUL, N. Use of increasing amounts of bagasse ash waste to produce self-compacting concrete by adding limestone powder waste. *Journal of Cleaner Production*. 2013, vol. 57, 308-319.
- [51] ČSN EN 196-5 (722100), Metody zkoušení cementu – Část 5: Zkoušení pucolanitý pucolánových cementů, ČSNI, 2011.
- [52] PAYÁ, J., MONZÓ, J., BORRACHEROA, M. V., MELLADO, A., ORDOÑEZ, L. M. Determination of amorphous silica in rice husk ash by a rapid analytical method. *Cement and Concrete Composites*. 2001, vol. 31, s. 227-231.
- [53] ČSN EN 196-2 (722100), Metody zkoušení cementu – Část 2: Chemický rozbor cementu, ČSNI, 2013.
- [54] PAVÍA, S., WALKER, R., VEALE, P., WOOD. A., Impact of the Properties and Reaktivitý of Rice Husk Ash on Lime Mortar Properties, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 26, Issue 9, September 2014, Art. number 04014066.
- [55] Katalog produktů: Technické písky. *Sklopisek Střeleč a.s.* [online]. [cit. 2016-04-27]. Dostupné z: <http://www.glassand.eu/pisky/techpisky.pdf>
- [56] ČSN EN 933-2 (721184), Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 2: Stanovení zrnitosti – Zkušební síta, jmenovité velikosti otvorů, ČSNI, 1997.
- [57] ČÁCHOVÁ, M., VEJMELOVÁ, E., POLOZHIY, K., ČERNÝ, R., Pore System and Hydric Properties of Two Different Lime Plasters with Finely Crushed Brick, *Key Engineering Materials, 2nd International Conference on Applied Physics and Material Applications, Pattaya, Thailand*. Vol. 675-676, 2016, pp. 597-600.
- [58] CHEN, X., BAO, H., WU, W., ZHANG, L., Evaluation for Closeness of Agreement of Measure Status for Laser Diffraction Particle Size Analyzers with Different Types, *Diamond and Abrasives Engineering*. Vol. 35, Issue 6, December 2015, pp. 61-64.
- [59] ČSN EN 196-6 (722100), Metody zkoušení cementu – Část 6: Stanovení jemnosti mletí, ČSNI, 2010.
- [60] KEPPERT, M., ČÁCHOVÁ, M., PAVLÍKOVÁ, M., TRNÍK, A., ŽUMÁR, J., ČERNÝ, R., Waste Ceramics as Supplementary Cementitious Material: Characterization and

Utilization, *WIT Transactions on the Built Environment, 5th International Conference on Harmonisation Between Architecture and Nature*. Vol. 142, 2014, pp. 231-239.

- [61] ČSN EN 1015-3 (722400), Zkušební metody malt pro zdivo – Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím strásacího stolku), ČSN, 2000.
- [62] ČSN EN 1015-10 (722400), Zkušební metody malt pro zdivo – Část 10: Stanovení objemové hmotnosti suché ztvrdlé malty, ČSN, 2000.
- [63] ROELS, S., CARMELIET, J., HENS, H., ADAN, O., BROCKEN, H., CERNY, R., PAVLIK, Z., HALL, C., KUMARAN, K., PLAGGE, R., Interlaboratory Comparison of Hydric Properties of Porous Building Materials, *Journal of Thermal Envelope and Building Science*. Vol. 27, Issue 4, April 2004, pp. 307-325.
- [64] KLOUŽKOVÁ, A., ZEMANOVÁ, P., KLOUŽEK, J., PABST, W., Termická analýza. [online]. *VŠCHT* v Praze, 2012[vid. 2016\_23\_3] Dostupné z: <http://tresen.vscht.cz/sil/sites/default/files/Termick%C3%A1%20anal%C3%BDza.pdf>.
- [65] 10276-7828.jpg. In: *photos.labwrench.com* [online]. [vid. 2017-01-17]. Dostupné z: <http://photos.labwrench.com/equipmentPhotos/10000/10276-7828.jpg>
- [66] SETARAM. *LABSYS EVO STANDARD VERSION / GAS PANEL VERSION: PUTTING INTO SERVICE APPLICATIONS*. France, 2009.
- [67] ŠTARHA, P., TRÁVNÍČEK, Z., Termická analýza. [online]. *Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra anorganické chemie*, 2011 [vid. 2016\_23\_3] Dostupné z: [http://agch.upol.cz/userfiles/file/pdf/Termicka\\_analyza.pdf](http://agch.upol.cz/userfiles/file/pdf/Termicka_analyza.pdf).
- [68] R. Kondo, K. Lee, M. Diamon, Kinetics and mechanism of hydrothermal reaction in lime-quartz-water system, *J. Ceram. Soc. Japan* 84 (1976) 573-578.
- [69] C. Shi, R.L. Day, Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators. Part I. Reaction kinetics, *Cem. Conc. Res.* 30 (2000) 51–58.
- [70] ČSN EN 1015-11 (722400), Zkušební metody malt pro zdivo – část 11: Stanovení pevnosti zatvrdělých malt v tahu za ohybu a v tlaku, ČSN, 2000.
- [71] ČSN EN 1015-19 (722400), Zkušební metody malt pro zdivo – Část 19: Stanovení propustnosti vodních par zatvrdělými maltami pro vnitřní a vnější omítky. ČSN, 1999.
- [72] ČERNÝ R., *Complex System of Methods*, Czech Technical University in Prague, Prague 2010.
- [73] PAVLÍKOVÁ, M., PAVLÍK, Z., HOŠEK, J., *Materiálové inženýrství I*, České vysoké učení technické v Praze, 2011.
- [74] VEJMELOVÁ E., PAVLÍKOVÁ, M., JERMAN, M., ČERNÝ, R., Free Water Intake as Means of Material Charakterization, *Journal of Building Physics*. Vol. 33, Issue 1, Juny 2009, pp. 29-44.
- [75] MARIA, S., Methods for Porosity Measurement in Lime-based Mortars, *Construction and Building Materials*. Vol. 24, Issue 12, December 2010, pp. 2572-2578.
- [76] PANDAY, S.P., SHARMA, R.L., Influence of Mineral Additives on the Strength and Porosity of OPC Mortar, *Cement and Concrete Research*. Vol. 30, Issue 1, January 2000, pp. 19-23.
- [77] STEFANIDOU, M., PAPAYIANNI, I., The Role of Aggregates on the Structure and Properties of Lime Mortars, *Cement and Concrete Composites*. Vol. 27, Issue 9-10, October 2005, pp. 914-919.

- [78] ČÁCHOVÁ, M., VEJMELOVÁ, E., KEPPERT, M., FIALA, L., Basic and Thermal Characteristics of Render with Crushed Brick, *Material Science Forum, 7th International Conference on Building Materials, Zahrádky – Czech Republic*. Vol. 824, 2015, pp. 7-11.
- [79] FIALA, L., ČÁCHOVÁ, M., VEJMELOVÁ, E., ČERNÝ, R., Experimental and Theoretical Study of Heat Transport Parameters of Plasters Containing Pozzolanic Admixtures, *Key Engineering Materials, 2nd International Conference on Applied Physics and Material Applications, Pattaya – Thailand*. Vol. 675-676, 2016, pp. 569-572.
- [80] TESÁREK, P., PLACHÝ, T., WILCZYNSKA, A., PADEVĚT, P., POLÁK, M., Time Evolution of “Gray Gypsum” Mechanical Properties, *3rd WSEAS International Conference on Engineering Mechanics, Structures, Engineering Geology, Corfu Island, Greece*. 2010, pp. 413-417, ISBN: 978-960474203-5.
- [81] NACERI, A., HAMINA, M.C., Use of Waste Brick as a Partial Replacement of Cement in Mortar, *Waste Management*. Vol. 29, Issue 8, August 2009, pp. 2378-2384.
- [82] ČERNÝ, R., ROVNANÍKOVÁ, P., *Transport Processes in Concrete*. London, Spon Press 2002, ISBN 0-415-24264-9.

## Seznam obrázků

Obrázek 1. Karbonatace vápenné omítky.....	18
Obrázek 2. Pozůstatek z těžby tufů na Kanárských ostrovech.....	23
Obrázek 3. Grafické znázornění zeolitu .....	24
Obrázek 4. Rozsivkový lom ve Venezuele (Alisha Vargas) .....	25
Obrázek 5. Elektrárenský popílek .....	28
Obrázek 6. Zkouška stanovení konzistence čerstvé omítkové směsi .....	33
Obrázek 7. Rtuťová porozimetrie - Pascal 140 + 440 .....	35
Obrázek 8. Dilatometr se vzorkem při měření na přístroji Pascal 140.....	36
Obrázek 9. Simultánní termický analyzátor LABSYS EVO.....	37
Obrázek 10. Relativní změna hmotnosti studovaných past pomocí metody DSC .....	38
Obrázek 11. Ukázka měření transportu vodní páry pomocí cup metody v klimatické komoře.....	42
Obrázek 12. Měření na přístroji ISOMET 2104.....	44
Obrázek 13. Měřicí přístroj ISOMET 2114.....	44
Obrázek 14. Distribuce velikosti částic vápenného hydrátu CL 90 S .....	45
Obrázek 15. Relativní změna hmotnosti vápenného hydrátu pomocí metody DSC .....	46
Obrázek 16. Tepelný tok studovaného vápenného hydrátu pomocí metody DSC .....	46
Obrázek 17. Křivka zrnitosti použitého křemičitého písku.....	47
Obrázek 18. Distribuce velikosti částic cihelného prachu.....	48
Obrázek 19. Křivka zrnitosti cihelného prachu .....	49
Obrázek 20. FTIR spektra směsí cihelný obrus + vápenný hydrát.....	51
Obrázek 21. Kumulativní křivka pórů omítek CC .....	53
Obrázek 22. Distribuční křivka pórů omítek CC.....	54
Obrázek 23. Součinitel tepelné vodivosti omítek CC.....	56
Obrázek 24. Měrná tepelná kapacita omítek CC.....	56
Obrázek 25. Kumulativní křivka pórů omítek CK .....	58
Obrázek 26. Distribuční křivka pórů omítek CK .....	59
Obrázek 27. Součinitel tepelné vodivosti CK omítek .....	61
Obrázek 28. Měrná tepelná kapacita omítek CK.....	61
Obrázek 29. Kumulativní křivka pórů omítek CP .....	63
Obrázek 30. Distribuční křivka pórů omítek CP .....	64
Obrázek 31. Součinitel tepelné vodivosti omítek CP .....	66

Obrázek 32. Měrná tepelná kapacita omítek CP .....	66
Obrázek 33. Studované pasty při výrobě.....	67
Obrázek 35. Studované omítkové směsi při výrobě .....	69
Obrázek 36. Kumulativní křivka pórů studovaných past ve 28 dnech.....	70
Obrázek 37. Distribuční křivka pórů studovaných past ve 28 dnech .....	71
Obrázek 38. Kumulativní křivka pórů zkoumaných past ve stáří 28, 180 a 360 dní .....	72
Obrázek 39. Distribuční křivka pórů zkoumaných past ve stáří 28, 180 a 360 dní.....	72
Obrázek 40. Kumulativní křivka pórů studovaných past ve 2 dnech.....	73
Obrázek 41. Distribuční křivka pórů studovaných past ve 2 dnech .....	73
Obrázek 42. Kumulativní křivka pórů studovaných past v 7 dnech.....	73
Obrázek 43. Distribuční křivka pórů studovaných past v 7 dnech.....	74
Obrázek 44. Kumulativní křivka pórů studovaných past v 90 dnech.....	74
Obrázek 45. Distribuční křivka pórů studovaných past v 90 dnech.....	74
Obrázek 46. Kumulativní křivka pórů studovaných past ve 180 dnech.....	75
Obrázek 47. Distribuční křivka pórů studovaných past ve 180 dnech .....	75
Obrázek 48. Kumulativní křivka pórů studovaných past ve 360 dnech.....	75
Obrázek 49. Distribuční křivka pórů studovaných past ve 360 dnech .....	76
Obrázek 50. Mechanické vlastnosti vybraných past v závislosti na čase.....	78
Obrázek 51. Relativní změna hmotnosti studovaných past pomocí metody DSC ve stáří 2 dnů.....	79
Obrázek 52. Tepelný tok zkoumaných past pomocí metody DSC ve stáří 2 dnů.....	80
Obrázek 53. Relativní změna hmotnosti studovaných past pomocí metody DSC ve stáří 7 dnů.....	80
Obrázek 54. Tepelný tok zkoumaných past pomocí metody DSC ve stáří 7 dnů.....	81
Obrázek 55. Relativní změna hmotnosti studovaných past pomocí metody DSC ve stáří 28 dní.....	81
Obrázek 56. Tepelný tok zkoumaných past pomocí metody DSC ve stáří 28 dní.....	82
Obrázek 57. Relativní změna hmotnosti studovaných past pomocí metody DSC ve stáří 90 dní.....	82
Obrázek 58. Tepelný tok zkoumaných past pomocí metody DSC ve stáří 90 dní.....	83
Obrázek 59. Relativní změna hmotnosti studovaných past pomocí metody DSC ve stáří 180 dní.....	83
Obrázek 60. Tepelný tok zkoumaných past pomocí metody DSC ve stáří 180 dní.....	84

Obrázek 61. Relativní změna hmotnosti studovaných past pomocí metody DSC ve stáří 360 dní.....	84
Obrázek 62. Tepelný tok zkoumaných past pomocí metody DSC ve stáří 360 dní .....	85
Obrázek 63. Vývoj látkového množství pasty MPR v časové závislosti .....	86
Obrázek 64. Vývoj látkového množství pasty MP10 v časové závislosti.....	86
Obrázek 65. Vývoj látkového množství pasty MP50 v časové závislosti.....	86
Obrázek 66. Vývoj látkového množství pasty MP70 v časové závislosti.....	87
Obrázek 67. Logaritmovaná kinetická rovnice materiálu MP10 a MPR .....	87
Obrázek 68. Logaritmovaná kinetická rovnice materiálu MP50.....	88
Obrázek 69. Logaritmovaná kinetická rovnice materiálu MP70.....	88
Obrázek 70. Průběh stupně přeměny portlanditu na kalcit.....	89
Obrázek 71. Rychlosti pucolánové reakce studovaných past.....	89
Obrázek 72. Celkové stupně přeměny portlanditu v pastách s obrusem.....	90
Obrázek 73. Distribuční křivka pórů ve stáří 28 dnech studovaných omítek.....	95
Obrázek 74. Distribuční křivka pórů ve stáří 180 dní studovaných omítkových směsí.....	96
Obrázek 75. Distribuční křivka pórů ve stáří 360 dní studovaných omítkových směsí.....	96
Obrázek 76. Distribuční křivka pórů omítky OMR ve zkoumaných časových intervalech	97
Obrázek 77. Distribuční křivka pórů omítky OM2 ve zkoumaných časových intervalech	97
Obrázek 78. Distribuční křivka pórů omítky OM3 ve zkoumaných časových intervalech	98
Obrázek 79. Distribuční křivka pórů omítky OM4 ve zkoumaných časových intervalech	98
Obrázek 80. Distribuční křivka pórů omítky OM5 ve zkoumaných časových intervalech	99
Obrázek 81. Distribuční křivka pórů omítky OM6 ve zkoumaných časových intervalech	99
Obrázek 82. Pevnosti v tlaku zkoumaných omítkových směsí v časové závislosti .....	101
Obrázek 83. Faktor difúzního odporu naměřen metodou dry cup a wet cup v časové závislosti.....	103
Obrázek 84. Vlhkostní absorpční koeficient zkoumaných omítek.....	105
Obrázek 85. Součinitel tepelné vodivosti zkoumaných omítek OM.....	107
Obrázek 86. Měrná tepelná kapacita studovaných omítek OM.....	107

## Seznam tabulek

Tabulka 1. Chemické složení vápenného hydrátu CL 90 S.....	45
Tabulka 2. Chemické složení křemičitého písku.....	47
Tabulka 3. Celkové chemické složení cihelného prachu.....	49
Tabulka 4. Fázové složení cihelného prachu.....	50
Tabulka 5. Přibližné chemické složení amorfního podílu v cihelném obrusu.....	50
Tabulka 6. Materiálové složení omítek CC na 15 kg suché směsi.....	52
Tabulka 7. Základní fyzikální vlastnosti omítek CC.....	53
Tabulka 8. Mechanické vlastnosti omítek CC.....	54
Tabulka 9. Výsledné hodnoty transportu vodní páry omítek CC.....	55
Tabulka 10. Výsledné hodnoty transportu kapalné vody omítek CC.....	55
Tabulka 11. Materiálové složení omítek CK na 15 kg suché směsi.....	57
Tabulka 12. Základní fyzikální vlastnosti CK omítek.....	57
Tabulka 13. Mechanické vlastnosti omítek CK.....	59
Tabulka 14. Výsledné hodnoty transportu vodní páry omítek CK.....	60
Tabulka 15. Výsledné hodnoty transportu kapalné vody omítek CK.....	60
Tabulka 16. Materiálové složení omítek CP na 15 kg suché směsi.....	62
Tabulka 17. Základní vlastnosti omítek CP.....	63
Tabulka 18. Mechanické vlastnosti omítek CP.....	64
Tabulka 19. Výsledné hodnoty transportu vodní páry omítek CP.....	65
Tabulka 20. Výsledné hodnoty transportu kapalné vody omítek CP.....	65
Tabulka 21. Materiálové složení studovaných past.....	68
Tabulka 22. Materiálové složení zkoumaných omítek na 25 kg suché směsi.....	69
Tabulka 23. Mechanické vlastnosti zkoumaných past.....	77
Tabulka 24. Výsledné hodnoty z termogravimetrického měření.....	88
Tabulka 25. Objemové hmotnosti zkoumaných omítek v časové závislosti pomocí vakuové nasákavosti.....	91
Tabulka 26. Hustoty matrice zkoumaných omítek v časové závislosti pomocí vakuové nasákavosti.....	92
Tabulka 27. Otevřená pórovitost zkoumaných omítek v časové závislosti pomocí vakuové nasákavosti.....	92
Tabulka 28. Objemová hmotnost zkoumaných omítek v časové závislosti pomocí héliového pyknometru.....	93

Tabulka 29. Hustota matrice zkoumaných omítek v časové závislosti pomocí héliového pyknometru.....	93
Tabulka 30. Otevřená pórovitost zkoumaných omítek v časové závislosti pomocí héliového pyknometru.....	94
Tabulka 31. Pevnost v tahu za ohybu zkoumaných omítkových směsí v časové závislosti .....	101
Tabulka 32. Vlhkostní vlastnosti zkoumaných omítek pomocí cup metody ve stáří jednoho měsíce.....	102
Tabulka 33. Vlhkostní vlastnosti zkoumaných omítek pomocí cup metody ve stáří dvanácti měsíců.....	103
Tabulka 34. Součinitel vlhkostní vodivosti studovaných omítek v závislosti na čase.....	104
Tabulka 35. Vlhkostní absorpční koeficient studovaných omítek v časové závislosti .....	105
Tabulka 36. Součinitel tepelné vodivosti a měrná tepelná kapacita studovaných omítek ve vysušeném stavu .....	106
Tabulka 37. Součinitel tepelné vodivosti a měrná tepelná kapacita studovaných omítek v nasyceném stavu.....	106