



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta stavební  
Katedra mechaniky**

**Vliv provzdušňujících přísad na mrazuvzdornost  
vápeno-metakaolinových malt**

**The influence of air-entraining admixtures on frost resistance  
of lime-metakaolin mortars**

**DISERTAČNÍ PRÁCE**

**Mgr. Dana Janotová**

Doktorský studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Fyzikální a materiálové inženýrství

Školitel: doc. Ing. Pavel Padevět, Ph.D.

Školitel-specialista: doc. Ing. Zuzana Slížková, Ph.D.

**Praha, 2022**

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta stavební**

Thákurova 7, 166 29 Praha 6



## **PROHLÁŠENÍ**

Jméno doktoranda: Mgr. Dana Janotová

Název disertační práce: Vliv provzdušňujících přísad na mrazuvzdornost vápeno-metakaolinových malt

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracoval/a samostatně pod vedením školitele doc. Ing. Pavla Padevěta, Ph.D.

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla za podpory výzkumného projektu „Vysokohodnotné a kompatibilní vápenné malty pro extrémní aplikaci při restaurování, opravách a preventivní údržbě architektonického dědictví“ (DF11P01OVV008), NAKI I MK ČR

V Praze dne 20.9.2022

.....  
podpis

*Dědovi Vládovi, který  
uměl připravit tu nejlepší  
maltu na světě.*

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu disertační práce panu doc. Ing. Pavlu Padevětovi, Ph.D. za podnětné rady, metodickou a odbornou pomoc po celou dobu studia. Školitelce specialiste doc. Ing. Zuzaně Slížkové, Ph.D. děkuji za odborný náhled a přínosné rady a připomínky k obsahu i formě práce.

Dále bych ráda poděkovat kolegům a přátelům z ÚTAM AV ČR, v. v. i. za pomoc, podporu a dobré rady, kterými mě podporovali po celou dobu studia, jmenovitě:

Msc. Cristianě Laře Paulos Nunes, Ph.D.

Mgr. Ditě Frankeové, Ph.D.

Bc. Petře Vurmové

Ing. Jiřímu Kuneckému, Ph.D

Ing. Janu Válkovi, Ph.D.

Mgr. Krzysztofu Niedobovi

Ing. Janu Krejčímu

Vladimíru Novákovi

Ing. Riccardovi Cacciottimu, Ph.D.

Ing. Michalu Přinosilovi, Ph.D.

Mgr. Ditě Machové, Ph.D.

Poděkování patří také mé rodině Lukášovi a Ladičce a Hubánkovi.

## ABSTRAKT

Hlavním cílem práce je výzkum a vývoj nových receptur vápenných malt pro použití při restaurování, opravách a preventivní údržbě architektonického dědictví a ověření jejich aplikace na vybraných modelových historických objektech. Základním principem současné péče o památky je zachování jejich autenticity, což vyžaduje použití tradičních materiálů – v případě malt vápna. Jedním ze způsobů, jak zlepšit nedostatky vlastností vápenné malty připravené z dnešního komerčního vzdušného vápna, je přídavek pucolánového materiálu k vápennému pojivu. Výzkum v posledních desetiletích potvrdil příznivý efekt metakaolinu – tepelně upraveného jílu. Z toho důvodu je disertační práce zaměřena na studium vápeno-pucolánových malt připravených ze směsi vápenného hydrátu a metakaolinu, s využitím dalších přísad (lněného oleje, provzdušňovacích přísad) s cílem zlepšit odolnost vápenných malt vůči mrazu a solím.

V první části práce byly zjištěny mechanické charakteristiky a nasákavost vápenné malty modifikované různými příměsemi. Ve druhé části práce byla optimalizována porézní struktura malty a byly sledovány materiálové vlastnosti spojené s transportem vlhkosti. Pro modifikaci porézní struktury malt byly použity dva typy přísad s provzdušňovacím účinkem: na bázi oleátu sodného a na bázi dodecyl sulfátu sodného. Obě přísady se v praxi používají za účelem zvýšení mrazuvzdornosti betonu a cementových malt, nicméně jejich vliv na vlastnosti vápenných malt nebyl dosud zkoumán. Ve třetí části výzkumu byla na základě dílčích výsledků práce navržena optimalizovaná receptura vápenné malty s metakaolinem a provzdušňovací přísadou. Životnost navržené omítky byla monitorována po jejím nanesení na konstrukci zatíženou kumulací degradačních činitelů: vzliňající vlhkostí ve spodní části zdi, průnikem srážkové vody do horní části zdi a přítomností vodorozpuštěných solí v cihelném zdivu.

V závěru práce je definováno složení suché maltové směsi pro výrobu vápenopucolánové omítky se zvýšenou mrazuvzdorností, kde podstatou technického řešení vyšší mrazuvzdornosti je optimalizace její porézní struktury a smáčivosti provzdušňovací přísadou v množství 0,05 hmotnostních dílů k celkové hmotnosti suchých složek maltové směsi. Zjištěné hodnoty rychlosti průniku vody i celkové množství nasáknuté vody do provzdušněné malty jsou velmi nízké. Omezením množství proniklé vody do malty je výrazně sníženo riziko jejího poškození mrazem. Dílčí výsledky disertační práce přispěly k vytvoření certifikované metodiky „Příprava omítky se zvýšenou mrazuvzdorností pro opravy historických staveb“, která uvádí základní informace pro použití vápenometakaolinových omítek, vyznačujících se zvýšenou odolností vůči mrazovým cyklům. Metodika předkládá informace o specifických vlastnostech vápenometakaolinových omítek, které jsou modifikovány hydrofobní přísadou.

Výsledkem práce jsou navržené směsi vápeno-pucolánových malt, které vykazují oproti běžným vápenným maltám výrazně zlepšenou odolnost vůči fyzikálně-chemickým účinkům.

**Klíčová slova:** vápno, metakaolin, malta, degradace, zmrazování/rozmrazování, provzdušňovací přísady, lněný olej

## ABSTRACT

The main goal of this thesis is to research and develop new recipes of lime mortars for use in restoration, repair and preventive maintenance of the architectural heritage and to validate their effectiveness on selected historical objects. The basic principle of contemporary monument care is to preserve their authenticity, which requires using traditional materials - in the case of lime mortars. One way to improve the properties of lime mortar prepared from today's commercial air lime is to add pozzolanic materials to the lime binder. Research in recent decades has confirmed the beneficial effect of metakaolin, a calcined clay. Therefore, this dissertation aims to study lime-pozzolan mortars prepared from a mixture of lime hydrate and metakaolin, using other admixtures (linseed oil, air-entraining additives) to improve the resistance of the mortars to deterioration by frost and salt crystallisation.

In the first part of the work, the mechanical properties and the water absorption of the mortars with the addition of different admixtures were determined. In the second part of the work, the porous structure of the mortar was optimised, and the material properties related to moisture transport were investigated. Two types of air-entraining admixtures were used to modify the porous structure of the mortars: sodium oleate-based and sodium dodecyl sulfate. Both additives are commonly used in practice to increase the frost resistance of concrete and cement mortars. However, their effect on the properties of lime mortars has not been investigated yet. In the third part of the research, an optimised formulation of lime mortar with metakaolin and an air-entraining admixture is proposed. The durability of the proposed mortar was monitored after its application on a brick masonry wall subjected to several common deteriorating agents: rising damp from the lower part of the wall, penetration of rainwater into the upper part of the wall and the presence of water-soluble salts in the porous bricks.

The thesis concludes with the formulation of the composition of the dry mortar mix for the preparation of lime-pozzolan mortar with increased frost resistance, which is related to the optimisation of its porous structure and wettability by the addition of an air-entraining agent in the amount of 0.05 parts by weight to the total weight of the dry mortar components. The observed values of water penetration rate and the total amount of water absorbed into the mortar are very low. By limiting the amount of water penetration, the risk of frost damage is significantly reduced. Another output to which the partial results of the dissertation have made a contribution is the certified methodology "Preparation of plaster with increased frost resistance for the repair of historic buildings", which provides basic information for the use of lime-metakaolin plasters characterised by increased resistance to frost cycles. The methodology provides information on the properties of lime-metakaolin plasters modified with the addition of an hydrophobic additive.

As a result of the thesis, mixtures of lime-pozzolan mortars are proposed, which show significantly improved resistance to physicochemical effects compared to conventional lime mortars.

**Keywords:** lime, metakaolin, mortar, degradation, freeze/thaw, air-entraining additives, linseed oil

# OBSAH

<b>1.</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>8</b>
<b>2.</b>	<b>TEORETICKÁ ČÁST</b>	<b>10</b>
2.1.	OPRAVNÉ MALTY	10
2.2.	VÁPENNÉ MALTY	10
2.3.	PUCOLÁNY	11
2.3.1.	<i>Metakaolin</i>	12
2.4.	VYTVORENÍ PEVNÉ STRUKTURY MALT	16
2.4.1.	<i>Karbonatace</i>	16
2.4.2.	<i>Pucolánová reakce</i>	17
2.5.	VLIV METAKAOLINU NA VLASTNOSTI MALT	19
2.6.	TRANSPORT VLHKOSTI	20
2.7.	PORÉZNÍ STRUKTURA MALT	21
2.8.	ÚČINEK PŮSOBENÍ SOLÍ	21
2.9.	LNĚNÝ OLEJ	22
2.9.1.	<i>Vliv lněného oleje na vlastnosti malt</i>	23
2.10.	ÚČINEK MRAZU	26
2.11.	PROVZDUŠŇOVACÍ PŘÍŠADY	27
2.11.1.	<i>Vliv provzdušňovacích přísad na vlastnosti malt</i>	28
<b>3.</b>	<b>CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE</b>	<b>29</b>
<b>4.</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b>	<b>30</b>
2.12.	VÁPENNÉ MALT S METAKAOLINEM A LNĚNÝM OLEJEM	30
2.12.1.	<i>Materiál a příprava malt</i>	30
2.12.2.	<i>Metodika zkoušek</i>	33
2.12.3.	<i>Vlastnosti studovaných malt</i>	37
2.12.4.	<i>Shrnutí výsledků studia vápenných malt s metakaolinem a lněným olejem</i>	54
2.13.	OPTIMALIZOVANÉ VÁPENNÉ MALT S METAKAOLINEM A PROVZDUŠŇOVACÍMI PŘÍŠADAMI	56
2.13.1.	<i>Materiál a příprava malt</i>	56
2.13.2.	<i>Metodika zkoušek</i>	58
2.13.3.	<i>Vlastnosti studovaných malt</i>	61
2.13.4.	<i>Shrnutí výsledků studia vápenných malt s metakaolinem a provzdušňovacími přísadami</i>	78
2.14.	MONITOROVÁNÍ PROJEVŮ STÁRNUTÍ MALT NA OHRADNÍ ZDI HŘBITOVA	80
2.14.1.	<i>Aplikace vápenných malt s metakaolinem a lněným olejem</i>	80
2.14.2.	<i>Aplikace optimalizovaných vápenných malt s metakaolinem a provzdušňovacími přísadami</i>	94
<b>3.</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>101</b>
<b>4.</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>106</b>
<b>5.</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b>	<b>109</b>
<b>6.</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b>	<b>112</b>
<b>7.</b>	<b>PŘÍLOHA</b>	<b>118</b>

# 1. Úvod

---

Restaurování, opravy a preventivní údržba památek jsou předpokladem pro uchování hodnot architektonického dědictví pro budoucí generace. Jedním ze základních principů současné péče o památky je zachování jejich autenticity, což vyžaduje aplikaci památkových postupů založených na minimální intervenci a použití tradičních materiálů – v případě malt vápna. Zároveň je však požadována vysoká trvanlivost oprav, neboť každá opakovaná oprava je dalším zásahem ohrožujícím autenticitu historického objektu. Vápno je pravděpodobně nejuniverzálnější dostupné stavební pojivo, které lze volbou vstupní suroviny a volbou různých příměsí a přísad upravit tak, aby vyhovovalo různým použitím a expozicím. Vápenné omítky nebo zdicí malty jsou vzhledem ke své porézности kompatibilní s tradičními historickými zdicími materiály. Kvalita vápenného pojiva zásadně ovlivňuje chování a životnost vápenných malt z nich vyrobených, zejména v případě, kdy je stavební konstrukce zatížena vlhkostí, mrazem a vodorozpustnými solemi. Vápna vyráběná v dnešní době se liší od historických vápen; paradoxně díky své čistotě neobsahují hydraulické příměsi dodávající maltám pevnost. Tento nedostatek se v restaurátorské praxi nahrazuje přísadou malého množství cementu, který však není kompatibilní s historickými materiály a jeho použití s sebou nese riziko zavádění nebezpečných solí do konstrukce.

Jedním ze způsobů, jak zlepšit nedostatky vlastností vápenné malty připravené z dnešního komerčního vzdušného vápna, je přidavek pucolánového materiálu k vápennému pojivu. V historii se využívaly především horniny vulkanického původu (včetně italského pucolánu těžného u Neapole); v posledních desetiletích se výzkum zaměřil také na alternativy v podobě průmyslově pálených jílu, drcené cihly nebo křemičitého úletu. Řada výzkumných prací potvrdila příznivý efekt příměsí metakaolinu na urychlení doby tvrdnutí a na zvýšení pevnosti vápenné malty. Z toho důvodu se disertační práce zaměřila zejména na studium vlastností vápenných malt připravených ze směsi vápenného hydrátu a metakaolinu, s využitím dalších příměsí (lněný olej, provzdušňovací přísady) s potenciálem zlepšit odolnost vápenných malt vůči mrazu a solím.

Významná část disertační práce byla realizována v návaznosti na výzkumný projekt „Vysokohodnotné a kompatibilní vápenné malty pro extrémní aplikaci při restaurování, opravách a preventivní údržbě architektonického dědictví“ podporovaný grantem Ministerstva kultury v programu NAKI I (DF11P01OVV008) v letech 2011-2015. Výzkum respektoval tematické priority programu NAKI MK ČR v oblasti „Materiály a technologie pro záchranu a zachování kulturního dědictví“: a) vývoj nových materiálů a technologií pro restaurování, konzervaci a údržbu památek, b) zhodnocení tradičních materiálů a technologií pro znovu zavedení do praxe, d) vývoj a aplikace nových materiálů a technologií pro preventivní památkovou péči.



Hlavním cílem práce byl výzkum a vývoj nových receptur vápenných malt pro použití při restaurování, opravách a preventivní údržbě architektonického dědictví a ověření jejich aplikace na vybraných modelových historických objektech.

## 2. TEORETICKÁ ČÁST

---

### 2.1. Opravné malty

Omítka dotváří celkový vzhled historické stavby, zároveň významně chrání nosnou konstrukci před mnoha degradačními vlivy, kterým je tento stavební prvek vystaven napříč celou dobou své životnosti (Arizzi a kol., 2012).

Každý materiál stárne a degradační vlivy nelze zcela zastavit. Poměrné složení historických omítek se z těchto důvodů během staletí mění, a proto původní recepturu historické omítky nelze přesně stanovit pouhým rozborem za použití analytických metod. Složení nově navrhované opravné omítky a její vlastnosti, je třeba předem vyzkoušet a ověřit jak v laboratorních podmínkách, tak i na konkrétním objektu vystaveném reálným vlivům povětrnosti. Důležitým předpokladem opravných malt je kompatibilita se starým zdivem a úměrná trvanlivost, aby se zabránilo předčasnému poškození a nutnosti dalších oprav. Opravné malty by měly vykazovat dobrou mechanickou, fyzikální a chemickou kompatibilitu se zdivem, neměly by být pevnější než malta stávající (van Hees a kol., 2004), výrazně slabší než zdicí prvky a před porušením by se měly výrazně deformovat. Pokud jde o chování v přítomnosti vody, měly by mít podobnou nebo větší propustnost pro vodu a vodní páru než stávající zdicí materiály, aby se voda mohla rychle odpařovat (Mosquera a kol., 2002). Měly by mít také dobrou zpracovatelnost a snadno se nanášet. Nicméně není vždy snadné těchto vlastností dosáhnout a sladit je.

### 2.2. Vápenné malty

Vápno je nejdostupnějším pojivem a na jeho bázi jsou založeny starověké, středověké a částečně i novověké stavby. Vápenné pojivo bylo identifikováno ve stavbách minimálně 5000 let př.n.l. (Rovnaníková, 2002). Z bohaté tradice používání vápna jako pojiva plyne jasný předpoklad pro použití vápenných technologií také při rekonstrukcích historických objektů, na což památková péče klade vysoký důraz. Zachování estetického vzhledu a zároveň funkčnosti čistě vápenné omítky značně komplikuje fakt, že v současnosti se na českém trhu vyrábí pouze vápno vzdušné, z vysoce čistého vápence, které v maltě bez přísad hydraulických nebo pucolánových složek reaguje zcela odlišně než vápna historická. Omítky připravené pouze na bázi v současnosti vyráběného vzdušného vápna nemají dlouhodobě dobré užitné vlastnosti, jimi provedené rekonstrukce je třeba častěji opakovat i opravovat, což není vzhledem k nedostatku peněz v oblasti péče o kulturní dědictví ekonomické.

Jak zjišťujeme prostřednictvím analýz, historické omítky obsahují kromě produktů karbonátů (uhličitanu vápenatého) také produkty pucolánové reakce (hydratované křemičitany a hlinitokřemičitany vápenaté) (Cizer, 2009). Je to dáno hydraulickým charakterem historického vápna, které bylo páleno z místně dostupných vápenců různé čistoty, a které bylo díky jednoduché technologii výroby znečištěno hydraulicky

reagujícími látkami, např. popelem z paliva (dřeva, uhlí, slámy), tvořeného zejména  $\text{SiO}_2$  a  $\text{K}_2\text{CO}_3$  (Koutník a kol., 2011).

Pucolánově reagující látky byly také ke vzdušnému vápnu záměrně přidávány ve formě anorganických příměsí za účelem zlepšení vlastností malt v čerstvém a zatvrdlém stavu. Dnes na tuto tradici navazuje přidávání pálených kaolinových jíílů, jakožto latentně hydraulických složek (Moropoulou a kol., 2005a), (Baronio a kol., 1997). Směs metakaolinu se vzdušným vápnem představuje variantu hydraulického pojiva připraveného z tuzemských zdrojů (Slížková, 2004).

### 2.3. Pucolány

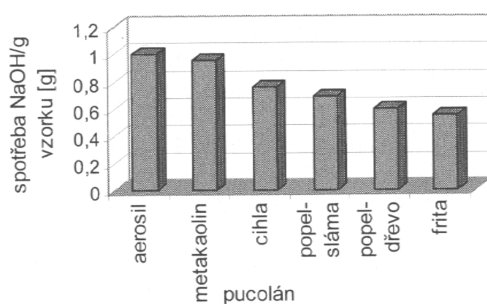
Pucolány jsou definovány jako jemně mleté práškové materiály, které obsahují amorfní oxid křemičitý nebo jeho kombinaci s hlinitany. Tyto hydraulicky aktivní materiály neobsahují vápník nebo je jeho množství velmi malé. Samy o sobě nemají žádnou nebo jen velmi malou vazebnou schopnost, avšak v přítomnosti vody za běžných teplot reagují s  $\text{CaO}$  nebo s  $\text{Ca(OH)}_2$  za vzniku nerozpustných sloučenin podobných produktům hydratace cementu (hydratované gely křemičitanů a hlinitanů vápenatých) (Rovnaníková, 2001).

Podle původu se pucolány dělí na přírodní a uměle připravené. Přírodní pucolány tvoří převážně amorfní  $\text{SiO}_2$ , další jsou ve formě malých sklovitých částic obsahujících  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  s malým množstvím  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  a  $\text{K}_2\text{O}$ . Tyto horniny a zeminy jsou po usušení při  $150^\circ\text{C}$  a jemném rozemletí velmi reaktivní (Benešová a kol., 2010). Materiály jsou buď původu vulkanického (tufy) nebo sedimentárního (tufity, rozsivkové zeminy - křemelina). Nejznámější ložiska vulkanických pucolánů se nachází v Itálii (ložiska vulkanického popela Lazio, Kampanie), v Řecku (zeminy na ostrově Santorius), v Německu (trasy v Bavorsku a Porýní), v USA (ryolitická pemza). Naleziště křemeliny se vyskytuje také v Čechách (okolí Trhových Svin a Borovan). Střední pucolánové vlastnosti lze po rozemletí využít u dalších materiálů, např. čediče, živců, slídy (Rovnaníková, 2001), (Rovnaníková, 2002).

Slabou pucolánovou reakci lze tedy předpokládat i u jílovitých písků, které břidlici, čedič, živce a slídu obsahují ve veliké míře. Je pravděpodobné, že při tradičních způsobech přípravy historických malt z místně dostupných surovin, které často zahrnovaly hašení vápna společně s pískem, mohlo reakční teplo podpořit tuto minimální pucolánovou aktivitu písku a do jisté míry ovlivnit vlastnosti vápenné malty (Gibson, 2011).

Technogenní pucolány jsou materiály záměrně připravované, jako např. keramické hlíny s obsahem jílových minerálů (montmorillonit, illit, alofan a kaolinit), které se zpracovávají pálením, kalcinací za nízkých teplot, a následným mletím na požadovanou zrnitost, jako např. metakaolin, keramický střep, drcený cihelný střep, cihelný prach. V posledních letech je velmi často využívána také pucolánová aktivita odpadových materiálů např. vysokopecní granulované strusky, vysokoteplotního elektrárenského popílku, obsahujícího především amorfní  $\text{SiO}_2$

(Rovnaníková, 2003), (Křístek a Hibbert, 2005), (Buchwald a Schulz, 2005). Mezi pucolány vzniklé lidskou činností patří také v historii využívané anorganické zbytky po spalování organických materiálů, např. dřeva, pšeničné slámy, výhonků vinné révy, rýžových slupek (Křístek a Rovnaníková, 2005), (Frías a kol., 2007). Pro posouzení, zda je pucolánová přísada pro modifikaci dané malty významná, je třeba předem stanovit její pucolánovou aktivitu. Pucolánová aktivita vyjadřuje potenciál reakce amorfního oxidu křemičitého, hlinitého nebo reaktivních hlinitokřemičitanů s hydroxidem vápenatým probíhající za běžných teplot (20 °C) v přítomnosti dostatečného množství vody. Voda se váže do ve vodě nerozpustných hydratovaných sloučenin – křemičitanů, hlinitanů a hlinitokřemičitanů vápenatých (Rovnaníková, 2001). Míru pucolánové aktivity ovlivňuje chemické složení dané látky, obsah amorfního SiO<sub>2</sub> a hlinitokřemičitanů, velikost částic a jejich reakční povrch. U technogenních pucolánů je důležitým faktorem také teplota výpalu, při které látky získávají reaktivní strukturu (Sabir a kol. 2001). Porovnání pucolánové aktivity různých materiálů (metakaolinu Mefisto K05, cihly, popela z pšeničné slámy a smrkového dřeva a frity) s reaktivitou čistého aerosilu (z 99,99 % amorfni SiO<sub>2</sub>) uvádí graf na **Obr. 1** (Křístek a Rovnaníková, 2005).



**Obr. 1** Pucolánová aktivita různých materiálů (aerosil, metakaolin Mefisto K05, cihla, popel z pšeničné slámy a smrkového dřeva, frita) (Křístek a Rovnaníková, 2005).

V historických maltách se na našem území nejčastěji objevují mleté keramické stěpy, cihelné drti, drcené sklo a pálené jíly. Přidáním upraveného kaolinitického jílu - metakaolinu, který se jeví jako perspektivní pucolánová složka vápenného pojiva, na tuto tradici chce praktická studie navázat.

### 2.3.1. Metakaolin

Metakaolin se v posledních letech, stává velmi zajímavým stavebním materiálem. Uplatnění nachází zejména v betonářské praxi, kde se jím částečně nahrazuje cement. Důvodem je Metakaolin reaguje s nežádoucím Ca(OH)<sub>2</sub>, vznikajícím během hydratace cementu a snižujícím pevnost betonu. Ve zcela hydratovaném betonu může hydroxid vápenatý tvořit až 28 % hmotnosti. Jeho eliminací se výrazně zvyšuje mechanická odolnost betonu, odolnost síranům a alkalicko-křemičité reakci. Reakcí s metakaolinem navíc vznikají další cementické fáze, které zvyšují pevnost (Sabir a

kol. 2001), (Gruber, 2001). Metakaolin se často přidává do vysokopevnostního betonu, protože v závislosti na zlepšené porositě výrazně zvyšuje odolnost vůči chloridům. Dalším kladem metakaolinu je jeho ekologičtější výroba. Rozkladem kaolinitu se neuvolňuje žádný CO<sub>2</sub>, emise vznikají pouze při spalování paliv za účelem získání energie pro kalcinaci (Sabir a kol. 2001). Kaolínový písek, který není vhodný pro sklářský a keramický průmysl může totiž v plném rozsahu nahradit zeolit, čehož se využívá při výrobě portlandských směsných cementů (Špaček a Janotka, 2011). Významné chemické, fyzikální a fyzikálně chemické vlastnosti metakaolinu objevují také technologové památkové péče. Přídavkem metakaolinu získává vápenná omítka na pevnosti, vede k vhodnému objemu pórů v zatvrdlé omítce, což je důležité zejména pro difúzi vodních par (Rovnaníková a kol., 2008b).

Pro účely konzervování a restaurování historických omítek jsou na českém trhu v současné době dostupné dva typy komerčně vyráběných produktů na bázi metakaolinu. Je to směsné hydraulické pojivo VAPO (AQUA obnova staveb s. r.o.), která s vývojem započala již v roce 2002. Reference k praktickým aplikacím VAPO uvádí např. (Slížková a kol., 2007). Vlastnosti vápenného pojiva VAPO shrnuje **Tab. 1**, **Tab. 2**, **Tab. 3**. Dalším komerčním produktem je suchá vápenno-pucolánová směs Nestor P0/4 a Nestor W 0/4 (České lupkové závody, a.s.) a svým složením s touto maltou korespondující vápenno-pucolánové pojivo Nestor B20 a Nestor B40 (České lupkové závody, a.s.). Směsi obsahují vápenný hydrát, pucolán na bázi metakaolinitu a křemenný písek o zrnitosti 0 až 4 mm a vzájemně se liší obsahem pucolánu. Systémy jsou aplikovány na několika objektech, kolektiv autorů jejich stav pravidelně kontroluje a o nových výsledcích z vývoje a praktických aplikací od roku 2007 pravidelně informuje ve sborníku Metakaolin. Přehled vlastností systému pro omítání kamenných a cihelných zdí Nestor P 0/4 a systému pro zdění Nestor W 0/4 uvádí **Tab. 4** a **Tab. 5**.

**Tab. 1** Pevnostní charakteristiky a pórovitost vápenné a vápenno-pucolánové malty (Slížková a kol., 2007).

Název zkoušky	Čistě vápenná malta	Vápenná malta s pucolánem (směsné hydraulické pojivo VAPO)	Vápenná malta s pucolánem (směsné hydraul. pojivo VAPO) a bílým cementem	Minimální hodnoty (MPa) nárokované ČSN 72 2430-4
Pevnost v tahu za ohybu	0,09 MPa	0,93 MPa	1,08 MPa	0,18 <sup>a)</sup> 1,20 <sup>b)</sup>
Pevnost v tlaku	0,6 MPa	3,8 MPa	4,9 MPa	
Pórovitost otevřená <sup>c)</sup>	21,8 %	22,8 %	17,1 %	
Přidrženost na cihelném podkladu	neměřena	0,26 MPa	neměřena	0,15 <sup>b)</sup>

Vysvětlivky: <sup>a)</sup> požadavky na vápennou maltu <sup>b)</sup> požadavky na maltu ze směsného hydraulického pojiva <sup>c)</sup> pórovitost odvozená z nasákavosti vzorků isopropanolem za sníženého tlaku pomocí vodní vývěvy).

**Tab. 2** Zkouška mrazuvzdornosti (Slížková a kol., 2007).

	Čistě vápenná malta	Vápenná malta s pucolánem (směsné hydraulické pojivo VAPO)	Vápenná malta s pucolánem (směsné hydraul. pojivo VAPO) a bílým cementem
Pevnost v tahu za ohybu na mokrých vzorcích (plně nasáklých vodou)	0,02 MPa	0,68 MPa	0,88 MPa
Pevnost v tahu za ohybu na mokrých zmrazovaných vzorcích po x cyklech	<u>po 1 cyklu</u> 0,00 MPa	<u>po 5 cyklech</u> 0,55 MPa	<u>po 5 cyklech</u> 0,69 MPa
Pevnost v tlaku na mokrých vzorcích	0,20 MPa	3,0 MPa	4,8 MPa
Pevnost v tlaku na mokrých zmrazovaných vzorcích po x cyklech	<u>po 1 cyklu</u> 0,10 MPa	<u>po 5 cyklech</u> 2,2 MPa	<u>po 5 cyklech</u> 3,4 MPa
Vizuální rozpad vzorků	po 1 cyklu	po 11 cyklech	po 15 cyklech

**Tab. 3** Odolnost proti krystalizaci solí (Slížková a kol., 2007).

	Čistě vápenná malta	Vápenná malta s pucolánem (směsné hydraulické pojivo VAPO)	Vápenná malta s pucolánem (směsné hydraul. pojivo VAPO) a bílým cementem
Pevnost v tahu za ohybu na sušených vzorcích po x cyklech v solném roztoku	<u>po 15 cyklech</u> 0,30 MPa	<u>po 15 cyklech</u> 0,52 MPa	<u>po 15 cyklech</u> 0,41 MPa
Pevnost v tlaku na sušených vzorcích po x cyklech v solném roztoku	0,50 MPa	2,3 MPa	3,2 MPa

**Tab. 4** Základní vlastnosti malty Nestor P 0/4.

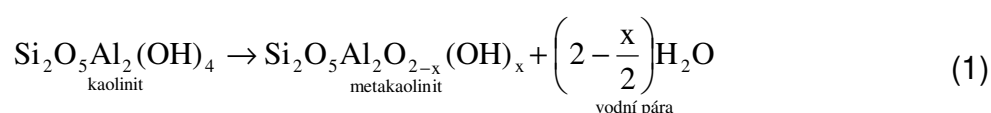
parametr	hodnota	jednotka	metoda
pevnost v tlaku po 28 dnech	5,2	MPa	ČSN EN 1015-11
pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech	1,35	MPa	ČSN EN 1015-11
přídržnost k podkladu (cihla)	0,34	MPa	ČSN EN 1015-12
objemová hmotnost	1920	kg.m <sup>-3</sup>	ČSN EN 1015-10
koeficient kapilární absorpce vody	1,74	kg.m <sup>-2</sup> .min <sup>-0,5</sup>	ČSN EN 1015-18
difúzní odpor pro vodní páru μ 5/25 % (suchá miska)	29,03	-	ČSN 72 7031
difúzní odpor pro vodní páru μ 97/25 % (mokrý miska)	11,57	-	ČSN 72 7031
součinitel tepelné vodivosti δ (v suchém stavu)	0,89	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	přímé měření ISOMET 2104
součinitel tepelné vodivosti δ (v suchém stavu)	0,56	10 <sup>-6</sup> .m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>	přímé měření ISOMET 2104

**Tab. 5** Základní vlastnosti malty Nestor W 0/4.

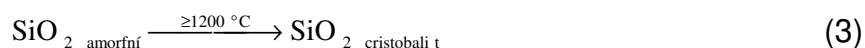
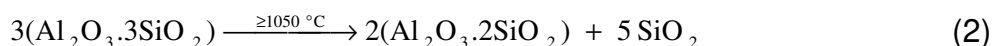
parametr	hodnota	jednotka	metoda
pevnost v tlaku po 28 dnech	9,13	MPa	ČSN EN 1015-11
pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech	2,09	MPa	ČSN EN 1015-11
přídržnost k podkladu (cihla)	0,42	MPa	ČSN EN 1015-12
objemová hmotnost	1950	kg.m <sup>-3</sup>	ČSN EN 1015-10
koeficient kapilární absorpce vody	1,83	kg.m <sup>-2</sup> .min <sup>-0,5</sup>	ČSN EN 1015-18
difúzní odpor pro vodní páru μ 5/25 % (suchá miska)	31,48	-	ČSN 72 7031
difúzní odpor pro vodní páru μ 97/25 % (mokrý miska)	14,12	-	ČSN 72 7031
součinitel tepelné vodivosti μ (v suchém stavu)	0,84	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	přímé měření ISOMET 2104
součinitel tepelné vodivosti μ (v suchém stavu)	0,57	10 <sup>-6</sup> .m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>	přímé měření ISOMET 2104

### 2.3.1.1. Výroba metakaolinu

Metakaolin se vyrábí kalcinací (při teplotách 650-800 °C) z keramického jílu zvaného kaolín, který má vysoký obsah jílového minerálu kaolinitu (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O) (Rovnaníková a kol., 2008b). Termický rozklad kaolínu probíhá v několika krocích, za určitých teplot. Při teplotě do 100 °C dochází k dehydrataci, kdy se uvolňuje voda absorbovaná v pórech na povrchu materiálu. Teplota 100 až 400 °C odpovídá předdehydroxylačním procesům, při nichž se reorganizují oktaedrické vrstvy OH- na povrchu materiálu. Od 400 do 800 °C probíhá dehydroxylace, kterou popisuje rovnice (1). Maximální teplota dehydroxylace kaolinitu souvisí se stupněm uspořádání jeho struktury. Reakcí dojde k hmotnostní ztrátě až 14 % (Kakali a kol., 2001), (Balek a kol., 1996), (Böke a kol., 2006), (Heide a kol., 2006). Uvolňující se pára způsobí vznik silně porézní struktury metakaolinitu, ten si i nadále uchovává okolo 10 % zbytkových hydroxylových skupin, které ovlivňují další průběh kalcinace.



Dalším krokem kalcinace kaolínu je krystalizace Al-Si spinelu (2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.3SiO<sub>2</sub>), ze kterého nad teplotu 1100 °C vzniká orthorombický mullit (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub>), viz rovnice (2) a oxid křemičitý, který nad 1200 °C přechází na cristobalit (c-SiO<sub>2</sub>), viz rovnice (3) (Šoukal a kol., 2009). Obecně lze říci, že překročením teploty 900 °C dochází k další reorganizaci SiO<sub>2</sub> a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, čímž vznikají nové termodynamicky stabilní sloučeniny (mullit, tridimit, atd.), které již s Ca(OH)<sub>2</sub> nereagují (Binda a Baronio, 1997).



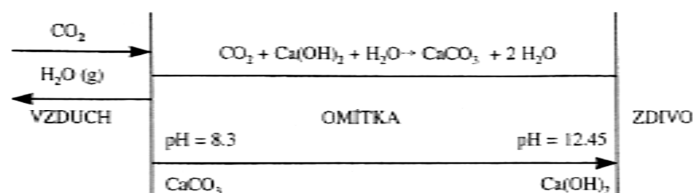
Přetvořením krystalické mřížky metakaolin získává nevýrazně krystalickou pucolánově reaktivní strukturu. Potenciál pucolánové reaktivity v tomto ohledu nejvíce závisí na původu jílového minerálu a podmínkách kalcinace: teplotě výpalu a velikosti částic finálního produktu (Rovnaníková, 2003). Tepelným ošetřením dochází ke zvýšení porosity produktu, a proto je následně ve směsi s vápnem potřeba větší množství záměsové vody (Binda a Baronio, 1997).

## 2.4. Vytvoření pevné struktury malt

Čistě vápenná omítka zpevňuje svoji strukturu karbonatací. V omítce z hydraulického vápna a ve vápenno-pucolánových omítkách dochází jednak k hydratačním reakcím za vzniku C-S-H a AFm ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-mono}$ ) fází, následné zpevňování zajišťuje karbonatace (Cizer, 2009).

### 2.4.1. Karbonatace

Podstatu vytvrzování čistě vápenné malty popsal (Van Balen a Van Gemert, 1994). Karbonatace probíhá v několika fázích. Na počátku  $\text{CO}_2$  difunduje dovnitř alkalických pórů omítky, naplněných vodou (vodní parou), ve které se oxid uhličitý rozpouští a v roztoku reaguje s disociovaným hydroxidem vápenatý ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) za vzniku uhličitanu vápenatého ( $\text{CaCO}_3$ ). Rychlost karbonatace je řízena difúzí  $\text{CO}_2$  do struktury omítky. Ve vodě difúze probíhá výrazně pomaleji než na vzduchu (difúzní koeficient  $\text{CO}_2$  ve vzduchu  $1390 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  a pro vodné prostředí je hodnota  $10^4$  až  $10^5$  krát menší). Významný vliv na rychlost reakce má také velikost pórů, parciální tlak  $\text{CO}_2$  (jeho koncentrace v okolní atmosféře bývá v rozmezí 0,03 až 0,04 obj. %), vlhkost materiálu a okolního prostředí. Obsah kapalné vody a vodní páry v pórech hraje velmi důležitou roli v jejich vytvrzování. Nasycení omítky vodou však průběh karbonatace zpomaluje. Optimálnímu množství vody, odpovídá stav nasycení povrchu absorpcí vody před kapilární kondenzací. Stejně jako průběh všech chemických reakcí, je i karbonatace ovlivňována teplotou. Stoupající teplota karbonataci urychluje, s klesající teplotou rychlost klesá (Rovnaníková, 2002). Schematicky je vytvrzování vápenné omítky znázorněno na **Obr. 2**.



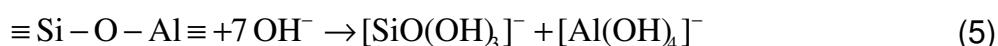
**Obr. 2** Karbonatace vápenné omítky (Rovnaníková, 2002).

Krystalizací kalcitu se mění mikrostruktura vápenné omítky, zlepšují se její mechanické vlastnosti a také je ovlivňována struktura pórů a s tím související transport vody (Lawrence a kol., 2007).



## 2.4.2. Pucolánová reakce

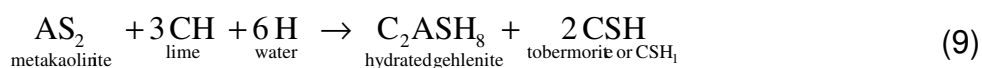
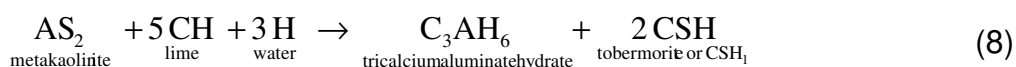
Ve vápenopucolánovém pojivu probíhají současně dva konkurenční děje. Průběh reakcí ovlivňuje mnoho faktorů (druh pucolánu nebo hydraulického materiálu, pucolánová reaktivita, velikost zrna a kvalita použitého vápna) a samozřejmě okolní podmínky (teplota, relativní vlhkost vzduchu a parciální tlak  $\text{CO}_2$ ) (Rovnaníková, 2002). Silný hydroxid vápenatý ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) reaguje s amorfním metakaolinem. Převádí do roztoku ionty  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  a štěpí vazby v  $\text{SiO}_2$ , křemičitanech a hlinitanech za vzniku jednoduchých křemičitanových a hlinitanových iontů, podle rovnic (4) a (5):



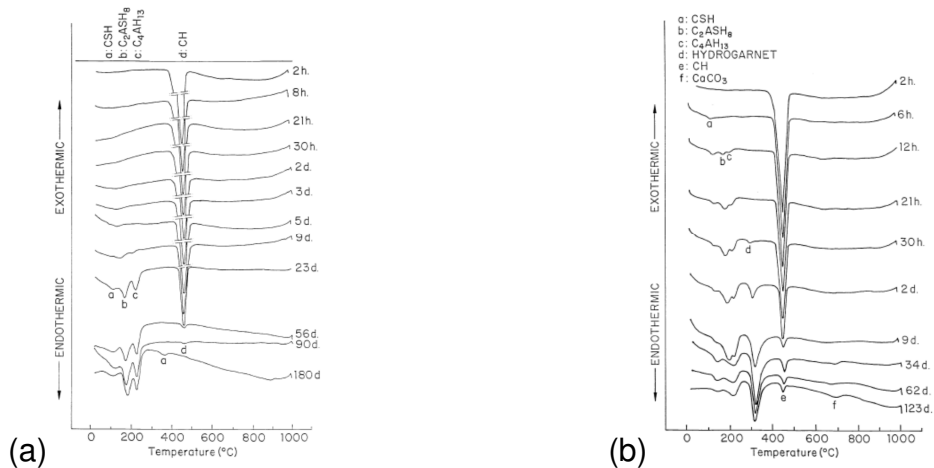
Mezi metakaolinem (křemičitany a hlinitany) a hydroxidem vápenatým ( $\text{Ca}^{2+}$  ionty), probíhá pucolánová reakce za vzniku hydratovaných fází CSH,  $\text{C}_2\text{ASH}_8$  (stratlingite),  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$  a  $\text{C}_3\text{ASH}_6$  (hydrogarnet) (Frías a kol., 2003). vznik CSH gelů popisuje obecná rovnice (6) (Rovnaníková a kol., 2004):



Křemičitanové ionty reagují rychleji, k vytvoření hlinitanů vápníku je třeba vyšší koncentrace  $\text{Ca}^{2+}$  iontů, proto se na částech pucolánu nejprve sráží C-S-H gely na jejich povrchu teprve hlinitany vápenaté ve formě hexagonálních lístků (Rovnaníková, 2001). V jílech kaolinitického typu připadají hypoteticky v úvahu tři chemické reakce mezi hydroxidem a amorfním oxidem křemičitým a hlinitým, viz rovnice (7), (8) a (9) (Binda a Baronio, 1997).



Všechny 4 hydratované fáze byly nalezeny pomocí DTA v metakaolin-vápenné pastě, s hmotnostním poměrem 1:1, vytvrzované při 20 a 60°C, jak je patrné z **Obr. 3**. CSH se objevilo už v 6 hodině hydratace, následovalo vytvoření  $\text{C}_2\text{ASH}_8$  a  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$  fáze po 12 hodinách a  $\text{C}_3\text{ASH}_6$  po 30 hodině hydratace, pasta uložená při 20°C hydratovala pomaleji (Frías a kol., 2003).

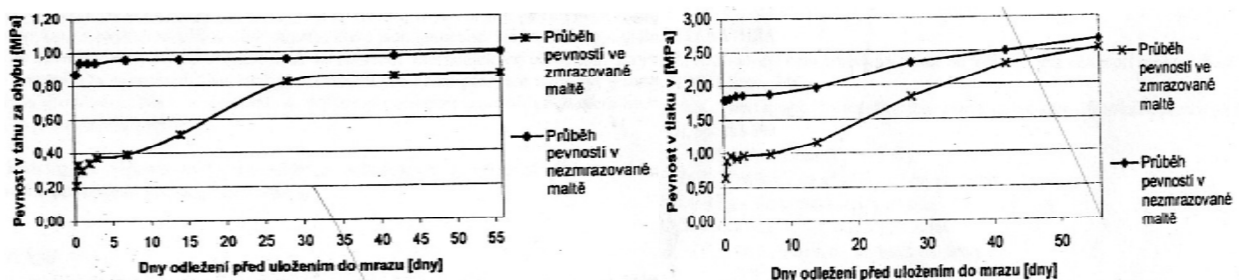


**Obr. 3** DTA termogram - vývoj hydratovaných fází v MK/vápenné pastě s časem hydratace při 20°C (a) a při 60°C (b) (Frías a kol., 2003).

### 2.4.3.1. Podmínky zrání

Teplota a kombinace zmrazování a tání vody v pórovém systému významně ovlivňuje kvalitu omítek, a to jak v počátečních fázích vytvrzování, kdy se utváří pevná porézní struktura, tak ve vytvrdlém stavu. Změnou skupenství vody v led dochází k nárůstu objemu o 9 %. Objemovými změnami roste napětí, ve struktuře vznikají mikrotrhlinky a praskliny, v závažnějších případech dochází k celkové ztrátě soudržnosti omítky.

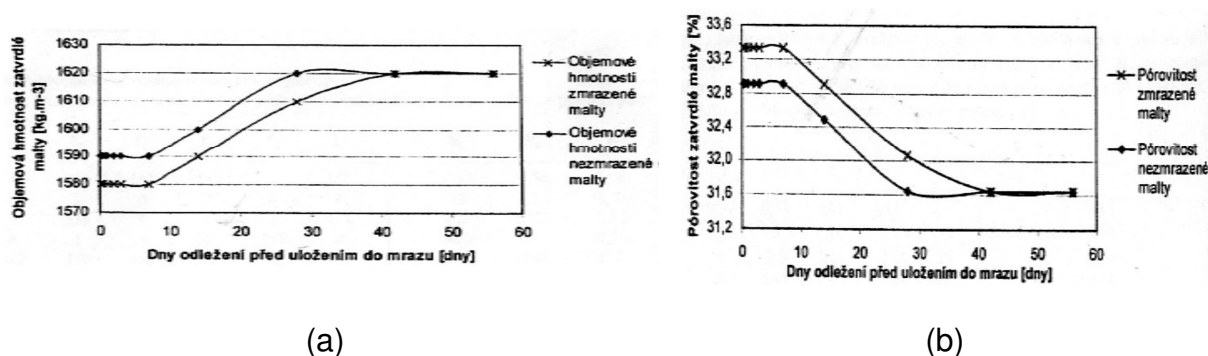
Vliv mrazu na vápenné malty v plastickém a zatvrdlém stavu a na vývoj jejich pevné struktury popisuje experiment (Rovnaníková a Horká, 2002). Dospěli k závěru, že malta vyrobená ze vzdušného vápna, písku a vody, nesmí zmrznout minimálně 42 dnů po aplikaci (předpokladem je neklesnutí denní teploty pod 15°C). Zkušební tělesa byla zmrazována po odležení 6 až 1344 hodin po dobu 24 hodin při -18°C, po rozmrznutí a následném 7 a 28denním uložení při teplotě 22 °C a vlhkosti vzduchu 45 %, následovalo stanovení mechanických vlastností, objemových změn a pórovitosti. Průběh jednotlivých charakteristik čistě vápenných malt uvádí **Obr. 4** a **Obr. 5**



(a)

(b)

**Obr. 4** (a) Vývoj pevností v tahu za ohybu, (b) vývoj pevností v tlaku.



**Obr. 5** (a) Objemová hmotnost zatvrdlé malty, (b) pórovitost zatvrdlé malty.

Nižší pevnosti v tahu za ohybu i tlaku byly u zmrazované malty stanovovány do 56. dne od přípravy směsi, stejně jako zvýšená pórovitost. Na zvýšení pevností má tedy vliv množství záměsové vody, které se s rostoucí dobou odležení malty před zmrazením snižuje. Zvýšená porosita v omítkách je významná z hlediska propustnosti pro vodní páru, ale musí být v souladu s pevnostními požadavky. Zvýšené porosity omítky je lepší dosáhnout přidávkem hydraulických nebo pucolánových přísad (Rovnaníková a Horká, 2002).

Pevnosti a další konečné vlastnosti vápenometakaolinových malt ovlivňuje teplota zrání. Okolní teplota 30°C výrazně urychlila pucolánovou i karbonatační reakci malty CL 90 a metakaolinu Sedlec a písku v hmotnostním poměru 1:0,25:3. Konečných pevností malta dosáhla již za 7 dnů (Rovnaníková, 2008). Rychlost hydratace a vytvoření pevné struktury vápenometakaolinové pasty (1:1 hm.) z Ca(OH)<sub>2</sub> a metakaolinu anglické produkce stanovená na vzorcích uložených v plastových nádobkách ve vodní lázni o teplotě 60 °C a ve druhém případě v místnosti při 20°C a 100% RH, potvrdil pozitivní vliv a výrazné zrychlení reakce při 60 °C (zreagování 82 % hydroxidu ve vzorcích uložených při 60°C oproti 18 % při 20 °C (Cabera a kol., 2001). Výrazné zpomalení karbonatační a pucolánové reakce při teplotě 5 °C potvrdil (Křístek a kol., 2003) stanovením 94 % nezreagovaného hydroxidu vápenatého ve 28 dnů starých vzorcích vápenometakaolinových malt. Z těchto závěrů plyne pro praxi důležité doporučení, a sice provádět omítkářské práce při teplotách mezi 20 až 30 °C, aby byla rychleji snížena alkalita a na omítku mohl být v co nejkratší době aplikován fasádní nátěr (Křístek a kol., 2003).

## 2.5. Vliv metakaolinu na vlastnosti malt

Vliv přidávku metakaolinu bývá nejčastěji posuzován změnou mechanických vlastností malt: pevností v tahu za ohybu, pevností v tlaku, modulem pružnosti. Běžně aplikovaná čistě vápenná omítky dosahuje pevností v tlaku okolo 1,5 MPa (Rovnaníková a kol, 2004), tuto hodnotu je třeba brát v potaz při výběru opravné

malty, která má být kompatibilní s původní historickou omítkou. Velosa a kol. porovnáním mechanických vlastností vápenometakaolinových malt (vápno:pucolán:písek 1:0,5:2,5) po 28 a 90 dnech s cementovou maltou zjistila vliv mineralogického a chemického složení portugalského metakaolinu na výsledné lepší mechanické vlastnosti. Ty měla malta z metakaolinu bohatšího na  $Al_2O_3$  a více uspořádaný kaolinit. Dále bylo zaznamenáno obvyklé snížení pevností v tlaku mezi 28. a 90. dnem zrání. Jev je vysvětlován vytvořením mikrotrhlinek vlivem smršťování malt, na které je velmi citlivá ohybová pevnost (Velosa a kol., 2009).

Výsledky odolnosti malt proti mrazu jsou vyjadřovány porovnáváním pevností vzhledem k referenčním tělesům, jindy počtem zmrazovacích cyklů nebo stanovením stupně mrazuvzdornosti. Téměř vždy se vizuální změny během zkoušky dokumentují fotograficky a strukturní změny pomocí SEM. Otázkou zůstává, zda podmínky zkoušení mrazuvzdornosti skutečně odpovídají reálným podmínkám prostředí, kterým je stavební konstrukce vystavena. Platná česká norma (ČSN 72 2452) pro zkoušku mrazuvzdornosti malt, z roku 1968 předepisuje zkoušení vzorků malty v rozsahu teplot +20 až -20 °C, přičemž se těleso zkouší ve vodou zcela nasyceném stavu. -20°C je extrémní teplota, kterou se řídí stavařská praxe, pokud je zděná konstrukce technicky zabezpečená, je vysoce nepravděpodobné, že se omítka na ní zcela nasytí vodou.

Vliv nasycení vzorku vodou před zmrazením, byl prověřován na zkušebních 28 denních tělesech z metakaolinu Sedlec a vápenného hydrátu CL 90 Mokrá s pískem 0-4 mm (1:1:3 hm.). Cyklus zkoušení sestával z 6 hodinové etapy v mrazicím boxu při -18 °C a 2 hodin tání na vzduchu při teplotě  $20 \pm 2$  °C. Po zvážení těles byla polovina těles vložena do vodní lázně a polovina ponechána na vzduchu. Po 40. cyklu byla stanovena pevnost v tahu za ohybu a v tlaku. Projevil se významný vliv metakaolinu na odolnost zmrazovacím cyklům, a to především u těles plně nasycených vodou (po 40. cyklu 12 MPa oproti 10,6 MPa stanovených u vzduchosuchých vzorků). Čistě vápenná omítka se rozpadla již při prvním cyklu zmrazení. Vyšší pevnosti metakaolinové malty nasycené vodou, souvisí s doreagováním metakaolinu a potřebou vody pro vytvoření hydratovaných sloučenin pucolánové reakce (Rovnaníková a kol., 2007). Porovnáváním dvou malt z metakaolinu Mefisto K05 a Mefisto L05, připravených v různých poměrech s dvěma různými typy vápenných hydrátů Čertovy schody a Kotouč Štramberk, autorky našly závislost odolnosti mrazu na druhu použitého vápna a druhu pucolánu. Nejvyšší pevnosti po 30. cyklu oproti referenčním vzorkům (19,6 MPa), vykazala malta v poměru 1:2,125 z vápna z Čertových schodů s Mefistem L05 (16,6 MPa). Taková pevnost je pro modifikovanou vápennou omítku nepotřebně vysoká a vzhledem k vysokému poměru metakaolinu by takováto směs byla pro komerční použití příliš drahá (Rovnaníková a kol., 2008a).

## 2.6. Transport vlhkosti

Klasické vápenné omítky se vlhkostními a teplotními vlastnostmi velmi podobají omítkám historickým. Vylepšení mechanických vlastností pucolánovou přísadou by

nemělo zhoršovat. (Tydlitát a kol., 2004) sleduje tepelné a vlhkostní vlastnosti třech pucolánových omítek (se Sedlecký metakaolinem, mletou cihelnou keramikou a fritou – borosilikátovým sklem), hydrofobizovaných stearanem zinečnatým. U všech pucolánových omítek byla zároveň pozorována zvýšená odolnost proti pronikání kapalné vody a snížení součinitele difúzního odporu. Sorpce vodní páry byla v porovnání s čistě vápennou omítkou vyšší. Metakaolinová omítka vykazovala ve srovnání s ostatními i lepší tepelné vlastnosti (nižší hodnoty tepelné vodivosti) (Tydlitát a kol., 2004).

## 2.7. Porézní struktura malty

Póry se v omítce vytváří odpařováním vody během procesu tvrdnutí. Rozhodujícím činitelem v tomto procesu je proto obsah vody, mineralogické složení a podmínky tuhnutí malty. Obsah vody přímo ovlivňuje vlastnosti omítky a její zpracovatelnost. Struktura pórů má přímý vliv na fyzikální vlastnosti, zejména na propustnost vlhkosti a solí. Vztah mezi druhem pojiva, jeho tvrdnutím a propustností pórů se snažil ukázat Banfill, zjistil, že čím více je cementu v maltě, tím méně je prostupná pro páry (Banfill, 2000). Velikost pórů ovlivňuje pohyb vodních par a solí materiálem. (Biscontin a kol., 2002) např. rozbořem historické omítky z benátského kostela sv. Marty zjistil rozpětí velikostí pórů od 0,01 do 0,5  $\mu\text{m}$ . Existuje celá řada metod, jak velikosti pórů a celkovou porositu stanovovat, přičemž každá má své limity. (Meng, 1996) předkládá ve své práci stručný výčet použitelných metod pro tu kterou velikost pórů. Všechny velikosti pórů může obsáhnout zkouška nasákavosti vodou. Nejhrubší metodou je optická mikroskopie, dále elektronová mikroskopie, menší póry – až do  $10^{-8}$  m je možné zjišťovat rtuťovou porosimetrií. Porézní struktura omítky je schopna do sebe sorbovat vlhkost a další látky jako např. soli nebo plyny. Každé velikosti pórů proto můžeme přiřadit fyzikální proces, např. kapilární jevy dominují při velikostech pórů 10 nm až 10  $\mu\text{m}$  (Ferreira a kol., 2013). Teorie si zjednodušuje tvary pórů do podoby válcovitých útvarů, s proměnným poloměrem podstavy, které na sebe různě navazují. Propojenost systému pórů uvnitř materiálu omezuje zjistitelnost skutečné distribuce pórů, dokonce i rtuťová porosimetrie zde naráží na své limity (Meng, 1996). Khatib a Wild sledovali vývoj porosity a distribuce velikosti pórů v metakaolinem nastavovaných cementových pastách. Gel vzniklý reakcí metakaolinu s hydroxidem vápenatým gelu zaplňuje póry a současně zpevňuje strukturu malty. Bylo pozorováno, že s rostoucím přídatkem metakaolinu a s rostoucí délkou zrání vzorků se snižuje poměr pórů s poloměrem větším než 0,02 mm. Mezi 14. a 28. dnem stáří vzorků došlo ke zvýšení objemu pórů, což autoři vysvětlují vytvořením inhibující vrstvy reakčního produktu kolem zrn metakaolinu, která reakci s hydroxidem zastaví, tím dojde k nárůstu objemu pevné matrice a zvýšení porosity (Khatib a kol., 1996).

## 2.8. Účinek působení solí

Vážnou příčinu porušení omítek představuje krystalizace a rekrystalizace solí. Téměř vždy je omítka kontaminována a porušována hned několika solemi najednou.

Nejběžnějšími jsou chloridy, sírany nebo dusičnany sodné, vápenaté, draselné, hořečnaté někdy amonné. Soli jsou do omítky transportovány kapilárním vztlínáním vody z podzákladí, z okolního terénu nebo vlastního materiálu zděné konstrukce. Zdrojem chloridů bývají nejčastěji rozmrazovací posypové směsi, dusičnany bývají organického původu, sírany do stavby obvykle vstupují se spodní vodou, ale mohou být také produktem reakce uhličitanu vápenatého s oxidy síry. Dusičnany a sírany mohou být bakteriálního původu. Nebezpečnost solí spočívá v jejich rozpustnosti. Anhydritické soli NaCl, KCl, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> se ve vodném roztoku dobře disociují, jejich ionty mohou snadněji a hlouběji pronikat do omítky. Řada solí krystalizuje v podobě prostorově objemných hydrátů (např. CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O). Krystalicky vázaná voda působí značné objemové změny. Pokud je roztok solí transportován až na povrch omítky, k mechanickému poškození obvykle nedochází (Rovnaníková a kol., 2004). Vznikají-li krystalky, krystalizačním tlakem materiál mechanicky poškozují. Hygroskopické soli jsou příčinou stálého zavlhčení. Především u starých staveb, kde chybí horizontální izolace, je třeba zajistit, aby se voda mohla ze zdiva odpařovat (Čechová, 2009). Odolnost vápenné malty modifikované Sedleckým metakaolinem vůči roztokům solí, testovala (Rovnaníková a kol., 2004) zkouška sestávala ze 7 hodinového vkládání zkušebních těles do solných roztoků 10% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 3% NaCl a 3% KNO<sub>3</sub> a 16,5 hodinového sušení při teplotě 60 °C. Struktura pucolánové malty byla soudržná i po 32 cyklech v NaCl a KNO<sub>3</sub>, a to i v případě, že uvnitř struktury solí vykristalizovaly. Působením síranu sodného nastalo porušení po 6. cyklu, vznikem sádrovce a ettringitu s velkým molárním objemem (Rovnaníková a kol., 2004).

Vliv přídavku metakaolinu bývá nejčastěji posuzován změnou mechanických vlastností malt: pevností v tahu za ohybu, pevností v tlaku, modulem pružnosti. Běžně aplikovaná čistě vápenná omítka dosahuje pevností v tlaku okolo 1,5 MPa (Rovnaníková a kol., 2004), tuto hodnotu je třeba brát v potaz při výběru opravné malty, která má být kompatibilní s původní historickou omítkou. Velosa a kol. porovnáním mechanických vlastností vápenometakaolinových malt (vápno:pucolán:písek 1:0,5:2,5) po 28 a 90 dnech s cementovou maltou zjistila vliv mineralogického a chemického složení portugalského metakaolinu na výsledné lepší mechanické vlastnosti. Ty měla malta z metakaolinu bohatšího na Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a více uspořádaný kaolinit. Dále bylo zaznamenáno obvyklé snížení pevností v tlaku mezi 28. a 90. dnem zrání. Jev je vysvětlován vytvořením mikrotrhlinek vlivem smršťování malt, na které je velmi citlivá ohybová pevnost (Velosa a kol., 2009).

## 2.9. Lněný olej

Při návrhu opravné malty je důležitým kritériem kompatibilita a dlouhá životnost, kterou ve většině případů stavebních materiálů zásadním způsobem ovlivňuje míra nasycení vodou a transport vlhkosti porézní strukturou (Roels, 2000). Jednu z možností, jak nasákavost malt snížit, představuje tradiční hydrofobní přísada - lněný olej, který zpomaluje pronikání vody a zlepšuje tak odolnost. Lněný olej byl ve

starověku jedním z nejpoužívanějších maltových aditiv, přesto dnes nemáme o odolnosti a kompatibilitě těchto malt dostatek informací.

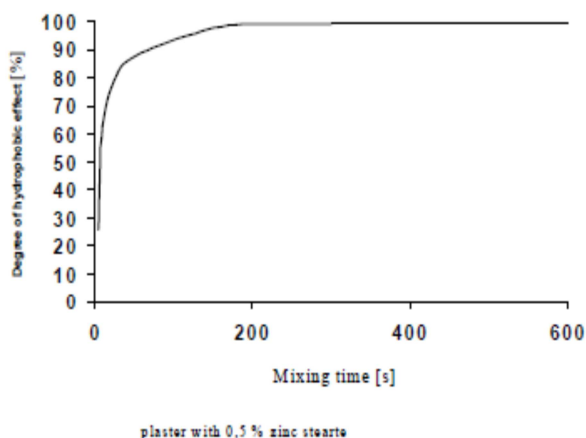
Lněný olej se získává ze semen lnu (*Linum usitatissimum*) a je, oproti jiným rostlinným olejům, bohatší na kyselinu linolenovou a také má vysoký obsah kyseliny linolové, která mu dává oxidační vlastnosti (Rudnik a kol., 2001). Olej je klasifikován jako vysychavý, a proto je vhodný pro povrchové úpravy. Vysoká rychlost schnutí je dána vysokou koncentrací kyseliny linolové. Tato nenasycená mastná kyselina má dvě dvojně C=C vazby, zvláště náchylné k oxidaci a tudíž žluknutí kyseliny linolové. Zvýšenou polymerizaci, na které je založeno vysychání barev, inkoustů a dalších nátěrových materiálů, způsobují oxidací vzniklé volné radikály (Masschelein-Kleiner, 1995), (Cahoon a kol., 2008). Zásadní vliv na výsledné vlastnosti oleje má proces extrakce. Především je třeba vyvarovat se vysokým teplotám, protože může dojít k ztmavnutí a změně složení triglyceridů. Lepší vlastnosti má surový lněný olej, který je průsvitnější a obsahuje nižší podíl pevných látek. Lněná semena však zřídka bývají lisovaná za studena, protože se tak získá menší množství oleje (Masschelein-Kleiner, 1995).

### 2.9.1. Vliv lněného oleje na vlastnosti malt

Od poloviny 90. let prodává portugalský výrobce vápennou maltu ze vzdušného vápna s přísadou kalu z olivového oleje pod názvem „D. Fradique“. Portugalský architekt Quirino da Fonseca použil tento materiál při konzervaci historické omítky na zdech hradu S. Jorge v Lisabonu. Tato malta se vyrábí přimícháváním kalu olivového oleje během hašení vápna, které bylo připraveno vypálením vápence a jeho namletím. Quirino da Fonseca doporučuje u „D. Fradique“ následující poměr: 25 kg vápna, 1,5 kg kalu z olivového oleje a 10 litrů vody. Výrobce však používá jiný poměr, který je obchodním tajemstvím (Torgal a kol., 2011). (Sá, 2005) studovala vlastnosti D. Fradique malty a zjistila, že tato malta měla ve srovnání s referenční vápennou maltou lepší konzistenci, větší paropropustnost, nižší kapilární nasákavost a vyšší odolnost proti vodě. Výsledky dále ukázaly, že ačkoliv vápenné malty s olejem vykazovaly vyšší odolnost vůči vodě, mají nižší povrchovou odolnost a horší přilnavost k podkladu než ostatní malty založené na hydraulickém a vzdušném vápně a cementu. Vápenná malta D. Fradique má díky oleji hustší konzistenci, ale proces karbonatace této malty může být pomalejší, což ovlivní i vývoj její odolnosti (Sá, 2005). (Blachnik, 2001), která sledovala proces zrání cementové malty s látkami odpuzujícími vodu založenými na oleátech a stearátech pomocí DTA, zaznamenala zvýšený vznik ettringitu a snížené množství kalcitu. Odolnost malt založených na hydraulických pojivech a rostlinných olejích vůči vodě byla studována (Vikan a Justnes, 2006). Autoři uvádějí, že malý přírůstek oleje, jako je 0,5 % na hmotnost pojiva, může tuto vlastnost malty zlepšit.

(Ventola a kol. 2011) zkoumal vliv různých přísad vybraných podle vlastností a užívání v historii. Byly mezi nimi polysacharidy („opuncie“ známá jako nopál, používaná v podobě prášku nebo šťávy), bílkoviny (živočišný kliš a kasein) a mastné kyseliny (olivový olej). Poměr vápna k plnivu byl 1:3 objemově, hmotnostní podíl

jednotlivých přísad byl 5 %. Přidáním těchto aditiv nebyly pozorovány změny v postupu karbonatace. Mechanická odolnost vzrostla, u malty s olivovým olejem byl nárůst o  $0,92 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$  (na  $2,67 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ ). U všech vzorků se snížila pórovitost a velikost pórů. Významné změny byly zaznamenány při použití olivového oleje: objem pórů byl snížen na polovinu, snížila se i velikost pórů (výsledky ukázaly, že objem pórů odpovídá  $0,014 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  a průměrná velikost póru je 30 nm). To naznačuje významné zlepšení voděodolnosti malty. Bohužel článek nezmiňuje techniku míchání, která je velmi důležitým faktorem pro pórovitost zatvrdlé malty. Teoretické poznatky o vodoodpudivosti sloučenin na bázi oleje naznačují, že intenzivní míchání suché směsi s olejem by mohlo vést ke zvýšení hydrofobního charakteru směsi (Stolz, 2008). (Riethmayer, 1960) ověřil tento předpoklad, viz **Obr. 6**.



**Obr. 6** Vliv intenzity míchání suché směsi na vodoodpudivost (Riethmayer, 1960).

(Rovnaníková, 2002) zkoumala vliv různých přírodních polymerů na vápenné malty. Fermež byla přidávána v 1%, 5% a 10% přídatku z hmotnosti maltové směsi (tedy v 0,3%, 1,7% a 3,3% přídatku z hmotnosti vápna). Hašené vápno:písek:voda byly v poměru 1:3:1. Autorka pozorovala snížení pórovitosti a zpracovatelnosti čerstvé malty a přisuzuje to hydrofobnímu charakteru oleje. Zatvrdlé malty s fermeží měly nižší pórovitost a nasákavost ve srovnání s referenčními maltami. Pevnost v tlaku s přídatkem fermeže výrazně vzrostla, ale snížila se pevnost v ohybu, pravděpodobně fyzikálním působením oleje. Paropropustnost nebyla přídatkem ovlivněna.

(Chandra, 2003) zkoumal vliv oleje z lněného semínka, kukuřice a hořčice na vlastnosti malty z portlandského cementu. Olej byl přidán v 0,5% a 0,8% koncentraci z váhy cementu (poměr cement:písek byl 1:3). Po 28 dnech se u malty s 0,5% přídatkem oleje neprojevil žádný vliv na pevnost v tlaku, zatímco 0,8% přidání oleje vyvolalo její pokles. Absorpce vody byla snížena a následně odolnost vůči soli a mrazu byla zvýšena. Účinek byl zřetelnější s vyšším procentem přidaného oleje.

(Justnes a kol., 2003) zkoumali vliv rostlinných olejů na cementovou maltu. Byl testován olej z lněného semínka, slunečnice, oliv, sóji, arašídů, kukuřice a řepky



v 0,5% a 1,5% koncentraci z hmotnosti cementu (poměr cement:písek byl 1:3). Oleje byly dispergovány ve vodě pomocí sulfonátů ligninu. Jasná závislost pevnosti malty na dávkování oleje se neprojevila. Ve srovnání s referenčními došlo ke značnému snížení kapilární absorpce vody, zatímco paropropustnost se snížila jen nepatrně. Podobně jako v (Chandra, 2003) bylo s rostoucí koncentrací oleje zaznamenáno snížení vzlínivosti. Olej neměl vliv na míru hydratace cementu. Odolnost chloridům se snížila oproti referenčním vzorkům z 66 % na 35 %, ale nebyly nalezeny žádné závislosti. Efekt vodoodpudivosti vzorky ve vlhkých podmínkách zachovaly déle než 3 roky.

Studie (Čechová, 2009), která se zabývá přísadou lněného oleje do vápenných malt, dává nový pohled na potenciál této staré a rozšířené přísady zlepšující vlastností malty - zejména jejího hydrofobního chování zvyšujícího odolnost vůči vodě. Přísada 1 % lněného oleje z hmotnosti pojiva ukázala kladný vliv na různé vlastnosti vápenných malt, došlo k omezení nasákavosti bez významnějšího ovlivnění celkové otevřené pórovitosti nebo zpomalení karbonatace. Přidáním 3 % lněného oleje se také zvýšila hydrofobicita, ale na druhou stranu výrazně snížila pevnost malty. U všech typů vápenných malt se přidáním oleje významně snížila nasákavost a tím absorpce vodorozpuštěných solí, což zlepšilo odolnost malty vůči krystalizaci a zmrazovacím cyklům.

Na základě těchto výsledků se zdá být 1,5% přídavek lněného oleje do správkových malt optimálním množstvím. Pro snadnější srovnání dosud uvedených výsledků, shrnuje **Tab. 6** výsledné vlastnosti čerstvých malt připravených Čechovou.

**Tab. 6** Vlastnosti čerstvé vápenné malty poměru 1:3 (Čechová, 2009).

Malta	Poměr voda/ pojivo	Rozliv (cm)	Objemová hmotnost (kg·m <sup>-3</sup> )
Vápenná malta	0,76	14,5	1876
Vápenná malta s 1% lněného oleje	0,72	15,5	1917
Vápenná malta s 3% lněného oleje	0,75	15	1967

\*Pozn.: Nezbytné množství záměsové vody, kterým se zachová stejná konzistence (±5%).  
Konzistence čerstvé malty je ovlivněna mnoha faktory (teplota, vlhkost, rychlost přidávání vody do suché směsi, atd.)

(Rykwert a kol., 1988) zmiňuje využití oleje pro ochranu chodníkové mazaniny. (Vidovszky, 2011) popisuje použití lněného oleje na teraco (kompozitní materiál vyrobený z drceného kamene, hašeného vápna a vody), jehož závěrečná ochranná vrstva se prováděla leštěním a následnou aplikací lněného oleje. Lněný olej je také používal k ochraně omítek vystavených působení dešťové vody (Ashurst a kol., 1988). (Morris, 1961) informuje o použití lněného oleje v neprovzdušněném betonu s hlavním cílem ochránit jej proti mrazu. Popisuje lněný olej jako levný, neškodný a snadno aplikovatelný prostředek, který se nanáší v tenkých vrstvách, aby se póry

v betonu utěsnily a tím se bránilo prostupu vody a následné korozi výztuže. Kvůli rychlejšímu vysychání a vytváření filmu se často před surovým olejem dává přednost fermeži. Pro dosažení snížené viskozity a lepšího nanášení, je zvykem rozmíchat fermež se stejným objemovým množstvím alkoholu. Směs může být aplikována přímo nebo emulgovaná ve vodě. Vodní emulze musí být připravena předem a průběžně míchána, aby se zabránilo rozdělení olejové a vodné fáze během používání. (Gaster a kol., 1971) uvádí, že sloučeniny lněného oleje zabraňující odpařování povrchových vrstev jsou obvykle nanášeny na vrstvu betonu asi po jednom měsíci stáří betonu.

Vzhledem k nedostatku odborné literatury, která by se systematicky zabývala použitím lněného oleje pro zlepšení vlastností malt využívaných pro opravu památek, bylo třeba jeho účinek na vápenných maltách, vyzkoušet. Přičemž hlavním důvodem navržení vápenné malty s lněným olejem je především její zvýšená hydrofobicitá, a tedy vyšší odolnost proti poškození solemi a mrazem. Informace z literatury ukazují, že přidání lněného oleje do vápenných malt má vliv na snížení jejich mechanické pevnosti, nicméně se předpokládá, že mechanickou pevnost může vylepšit příměs hydraulické příměsi vápenného pojiva - umělý pucolán – metakaolin.

## 2.10. Účinek mrazu

Střídání cyklů zmrazování a tání představuje jednu z nejčastějších příčin poškození malt, zejména v zemích, kde jsou časté teploty blízko nuly. Mrazovým poškozením jsou nejvíce ohroženy zejména stavební konstrukce, které nejsou izolovány od okolní zeminy, jsou vystaveny neustálému působení vzlínající, odstříkující a dešťové vody. Poškození je mnohem častější na severních a západních stranách budov, které jsou během podzimu více vystaveny dešťovým srážkám (Balksten, 2007).

Mechanismus, jakým led způsobuje pnutí v porézních materiálech, jako je malta, vysvětlují různé teorie. Teorie hydraulického tlaku definovaná Powersem, říká, že pokud je materiál blízko stavu nasycení a v jeho kapilárních pórech se začne tvořit led, je přebytečná voda vytlačena ven, aby se přizpůsobila objemové expanzi vody, která je kolem 9 %. Pokud v blízkosti těchto pórů není dostatek místa, generovaný hydraulický tlak způsobuje expanzi a případné praskání materiálu (Powers, 1945). Teorie osmotického tlaku vychází z faktu, že voda přítomná v kapilárách materiálů není čistá, ale obsahuje rozpuštěné ionty, poškození mrazem se vysvětluje v důsledku vývoje osmotických tlaků, které vznikají v důsledku různých koncentrací solí v pórech (Powers a Helmuth, 1953). Nejnovější teorie se příkladně k vysvětlení, že hlavním mechanismem odpovědným za poškození mrazem je krystalizační tlak. Během zmrazování má voda tendenci se vzdalovat od menších pórů směrem k větším (kapilárním) pórům, ve kterých se tvoří led, protože teplota, při které se led může tvořit, klesá s velikostí pórů (Pytlík, 2000). Krystalizace tak nejprve probíhá v kapilárních pórech, zatímco v menších pórech zůstává voda kapalná, ve stavu přechlazení. To má za následek termodynamickou nerovnováhu, která působí jako hnací síla pro pohyb vody z menších pórů do kapilárních pórů, kde se tvoří ledové krystaly. Když se tato voda dostane do kapilárních pórů, zmrazne a ledové krystalky

se zvětší. Pokud však není dostatek místa pro další tvorbu ledu, tlak ve stěnách pórů se začne zvyšovat, což způsobí expanzi a nakonec praskání (Cultrone a kol., 2005). Mechanismus krystalizačního tlaku je důležitější pro delší zmrazovací období, protože transport vody je relativně pomalý.

Všechny tyto teorie naznačují, že odolnost vůči zmrazování a rozmrazování souvisí s porézní strukturou materiálu (pórovitostí, velikostí a propojeností pórů), stupněm nasycení a mechanickou pevností, z toho vyplývá, že vysoká pórovitost a propustnost vápenných malt a jejich nízká mechanická pevnost je činí zvláště citlivými na poškození v důsledku mrazu a tání.

Odolnost porézních materiálů vůči mrazu a tání a míra poškození je přímo úměrná množství vody přítomnému v porézní struktuře před zmrazením. Fagerlund množství nazývá „kritické množství vlhkosti“. Jedná se o stav nasycení porézní struktury vodou, který je pro každý materiál specifický. Vlhkost přítomná v podkritickém množství stav porézního materiálu příliš neovlivňuje. S narůstajícím množstvím vody narůstá v porézní struktuře množství ledu, které může zvýšit destrukční účinek mrazu. Poškození materiálu vyvolané dosažením kritického množství vlhkosti není ovlivněno počtem cyklů zmrazení a tání (Fagerlund, 2002).

## **2.11. Provzdušňovací přísady**

Provzdušňovací přísady jsou látky, schopné v průběhu míchání čerstvé směsi zachytit a stabilizovat velké množství uzavřených vzduchových pórů převážně o průměru 25 až 300  $\mu\text{m}$ . Tyto póry zůstávají v maltové směsi i po zatvrdnutí (Pytlík, 2000). Provzdušňovací přísady vzduchové bubliny pouze stabilizují, ale negenerují je. Pozitivní účinek provzdušňovacích přísad byl objeven náhodně ve 30. letech 20. století. Praktickým pozorováním bylo zjištěno, že betony vyrobené z cementového slínku, při jehož mletí byly použity prostředky obsahující hovězí tuk, stearát vápenatý a rybí olej, výrazně lépe odolávají účinku zmrazování a rozmrazování (Dolch, 1996). V současné stavební praxi se provzdušňování porézní struktury považuje za nejúčinnější způsob, jakým lze snížit riziko poškození a prodloužit životnost betonů a cementových malt vystavených střídavému zmrazování a tání (Wong a kol., 2011). Množství, velikost a distribucí vzduchových pórů ovlivňuje několik parametrů: druh a množství provzdušňovací přísady (obvykle 0,05 až 0,5 % 0,5 % hmotnosti cementu a v čerstvém betonu se musí docílit provzdušnění  $5,5 \pm 0,5\%$ ), druh jemnost mletí a množství pojiva; vodní součinitel, zrnitost kameniva a maximální velikost zrna kameniva; způsob hutnění čerstvé směsi (Pytlík, 2000). Vliv provzdušnění na trvanlivost zmrazování a rozmrazování spočívá ve velikosti provzdušněných pórů, které jsou větší než kapilární póry, nesnadno se zaplňují vodou a mohou sloužit jako expanzní komory, kde může voda proudit během zmrazování, čímž se minimalizuje pnutí.

### 2.11.1. Vliv provzdušňovacích přísad na vlastnosti malt

Provzdušňovací přísady ovlivňují celou řadu vlastností: zlepšují zpracovatelnost čerstvé malty a snižují smrštění, vzduchové póry omezují transport vody i plynu uvnitř malty (Cultrone a kol., 2005). Provzdušněné póry, v zatvrdlé maltě přerušují síť kapilár a snižují tak absorpci vody porézním materiálem, což příznivě ovlivňuje namáhání v důsledku zmrazování a rozmrazování. Vzduchové póry zároveň mají vliv na snížení mechanické pevnosti malt (Silva a kol., 2021).

V disertační práci byly použity a testovány dvě provzdušňovací přísady prodávané pod obchodními značkami Ligaphob N90 (Peter Greven GmbH & Co. KG) a Berolan LP50 (Berolan® Vertriebs-Ges.m.b.H). Účinnou složkou přísady Berolan LP je lauryl sulfát sodný (nebo dodecyl sulfát sodný, CAS 9004-82-4). Jedná se o povrchově aktivní látku (syntetický tenzid), jehož molekula je tvořena alifatickým uhlovodíkem a na jeho konci připojenou a ve vodě rozpustnou skupinou  $\text{SO}_4^{2-}$ . Tato skupina reaguje s hydroxidem vápenatým za vzniku ve vodě rozpustné vápenaté soli. Rozpustnost tenzidů ve vodě je neobvyklá. Dodecyl sulfát sodný, ostatně jako všechny tenzidy, snižuje povrchové napětí tím, že se přednostně shlukuje na rozhraní vzduchu a vody. Snížení povrchového napětí je hlavní příčinou jak provzdušnění tak stability bublin. Dle informací výrobce se jedná o silně povrchově aktivní provzdušňovací přísadu s plastifikačním (změkčovacím) účinkem. Přísada zlepšuje zpracovatelnost, smáčení malty, snižuje opotřebení míchacích jednotek, snižuje sklon malty k hrudkovatění a ke smršťování a byla vyvinuta speciálně pro použití v maltách na bázi sádry, vápna nebo cementu. Přísadu Ligaphob N90 tvoří oleát sodný. Oleát sodný reaguje s roztokem hydroxidu vápenatého za vzniku nerozpustných hydrofobních vápenatých solí. Účinkem oleátu sodného nedochází ke snížení povrchového napětí vody. Pokud jde o použití oleátu sodného v betonech) míra provzdušnění a stabilita vzduchových bublin závisí na shluknutí hydrofobních solí na rozhraní vody, vzduchu a cementového zrna, sraženiny vápenatých solí zůstávají v zatvrdlém betonu na povrchu vzduchových bublin (Chatterji, 2003).

Účinku provzdušňovacích přísad a se dlouhá léta využívalo především při přípravě betonů a malt na bázi cementu. Odborná literatura uvádí velmi málo studií, které se zabývají účinkem provzdušňovacích přísad na vlastnosti vápenných past (Sebrara a kol., 2009) nebo vápenných malt (Paiva a kol., 2009), (Izaguirre a kol., 2009), (Izaguirre a kol., 20010), (Silva a kol., 2020), (Silva a kol., 2021). Dosud, žádná z odborných studií se nevěnuje vlivu provzdušňovacích přísad na vlastnosti vápeno-pucolánových malt.

### 3. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

---

Výzkum předkládané práce je inspirován častými případy poruch nově provedených vápenných omítek na památkově chráněných budovách, ke kterým v tuzemsku dochází vlivem působení mrazu. Řada oprav provedená vápennou maltou končí závažnými poškozeními hned po prvním zimním období po aplikaci.

Hlavním cílem práce je vývoj vysokohodnotných a kompatibilních vápenných malt pro extrémní použití při restaurování, opravách a preventivní údržbě architektonického dědictví a ověření jejich aplikace na vybraných modelových historických objektech.

#### **Dílčí cíle zahrnují:**

- 1) Vývoj modifikované vápenné malty se zvýšenou odolností vůči klimatickým vlivům, zejména na základě zvýšení pevností malty.
- 2) Vývoj vápenné malty s provzdušňovacími přísadami se zvýšenou odolností proti poškození vlivem vlhkosti a mrazu.
- 3) Ověření účinnosti vyvinutých produktů na modelovém historickém objektu.

#### **Pracovní etapy experimentální činnosti potřebné k naplnění cílů disertační práce jsou následující:**

První část rozsáhlého laboratorního výzkumu je zaměřená na ověření možnosti posílení mechanické odolnosti čistě vápenné malty přidáním pucolánové příměsi tuzemského typu metakaolinu; a dále na možnosti snížení nasákavosti porézního systému malt pomocí tradiční hydrofobní přísady lněného oleje.

Druhá část výzkumu je zaměřená na optimalizaci porézní struktury vápenných malt a na studium vlastností spojených s transportem vlhkosti. Mikrostruktura malt byla modifikována dvěma typy přísad s provzdušňovacím účinkem. První přísada byla na bázi oleátu sodného a druhá přísada na bázi dodecyl sulfátu sodného.

Ve třetí části praktického výzkumu byly vybrané receptury malt aplikovány na historický objekt (ohradní zeď hřbitova) a v průběhu dvou let byly monitorovány projevy stárnutí omítek na konstrukci zatížené kumulací degradačních činitelů: vzliňající vlhkostí, srážkovou vodou, přítomností vodorozpustných solí ve zdivu.

## 4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 2.12. Vápenné malty s metakaolinem a lněným olejem

#### 2.12.1. Materiál a příprava malt

Byly studovány čtyři maltové směsi: referenční vápenná malta a tři malty modifikované metakaolinem a/nebo přísadou lněného oleje. Informace o složení připravených malt a použitých materiálech jsou uvedeny v následujících tabulkách **Tab. 7** a **Tab. 8**. Malty byly připraveny v laboratorních podmínkách v hmotnostním poměru pojiva a kameniva 1:3 s použitím praného křemičitého písku připraveného smícháním 4 zrnitostních frakcí (poměr frakcí: 27% frakce 0,1/0,5 mm, 26,2% frakce 0,5/1,0 mm, 17,6 % frakce 1,0/2,0 mm a 29,2% frakce 1,6/4,0 mm).

**Tab. 7** Složení maltových směsí.

Označení malty	Složení	Hmotnostní poměr složek
L	vápenný hydrát:písek	1:3
LO	vápenný hydrát:písek + 1,5 % lněného oleje	1:3 + 1,5 % z hmotnosti pojiva
LM	vápenný hydrát:metakaolin:písek	0,75:0,25:3
LMO	vápenný hydrát:metakaolin:písek + 1,5 % lněného oleje	0,75:0,25:3 + 1,5 % z hmotnosti pojiva

**Tab. 8** Materiály použité pro přípravu malt (obchodní značky a výrobci).

Materiál	Název	Výrobce
vápenný hydrát	Čerták	Vápenka Čertovy schody, a.s.
písek	Provodínský písek*	Provodínské písky, a.s.
lněný olej	lněný olej	Grac, spol. s r.o.
metakaolin	Mefisto L05	České lupkové závody, s.r.o.

\* slévárenský písek PR33 0,1-0,5; filtrační písky PR 0,5-1; PR 1-2; PR 1,6-4

Na základě experimentů byl pro každou variantu malty ověřen vhodný postup míchání čerstvé směsi (pořadí složek a doba míchání) a vždy stejným způsobem byly připraveny jednotlivé dávky čerstvé malty určitého typu. Pro přípravu všech malt byl použit laboratorní mixer MATEST-E093. Postup míchání vápenné a vápenometakaolinové malty byl následující: do míchací nádoby byly nejprve

vloženy 4 navážené frakce suchého písku, poté přidáno pojivo v suchém stavu (vápenný hydrát, event. metakaolin). Směs suchých složek byla v míchací nádobě mixerem homogenizována při nízkých otáčkách 2,5 minuty. Při vypnuté míchače byla pak do nádoby najednou přidána voda v předem odváženém množství a směs s vodou byla mixerem míchána 2,5 minuty. Během následující krátké přestávky v míchání byla ze stěn nádoby a metly stržena usazená malta a závěrečná fáze strojního míchání trvala opět 2,5 min (míchání s vodou celkem 5 min). Malty s přísadou lněného oleje byly připravovány odlišně. Nejprve se olej 3 minuty ručně pomocí lžice rozmíchal s trochou suché směsi (cca 50 g) v plastovém kelímku, vzniklá kaše se přidala ke zbytku suché směsi a byla míchána 3 minuty. Po přidání vody následovalo dalších 6 minut míchání s pauzou na strhnutí suché směsi z metly a nádoby. Zvolený postup se příliš neliší od postupu (Čechová, 2009), která maltu s olejem připravila stejným způsobem, ale ručním mícháním po kratší dobu (3 minuty). Byly zohledněny publikované závěry (Riethmayer, 1960), podle kterého fáze míchání oleje se suchou směsí ovlivňuje výsledné vodoodpudivé vlastnosti zatvrdlé malty. Ve srovnání s (Čechová, 2009) byla doba míchání záměrně volena dvojnásobně dlouhá, aby byl porovnán vliv doby míchání na vlastnosti malty s využitím těchto výsledků publikovaných Čechovou. Praktickými zkouškami bylo ověřeno, že vodu je lépe do směsi přidávat najednou a nikoliv postupně v malých dávkách. Přidáváním vody po malých dávkách nebyl pozorován očekávaný nárůst konzistence čerstvé malty, pravděpodobně v důsledku relativně velkých ztrát vody zůstávající na povrchu dávkovací nádoby a většího odparu během prodlev při míchání. Jednotící charakteristikou pro všechny připravené malty byla hodnota konzistence malty stanovená podle (ČSN EN 1015-3). Na základě předpokladu, že malta bude v praxi aplikována především jako omítka, byly laboratorní malty připravovány v relativně vyšší konzistenci (tekutější). Posouzením konzistence namíchaných malt byla zvolena jako optimální hodnota  $175 \pm 10$  mm vyhovující pro všechny studované varianty malt a tato konzistence byla dodržována v celém experimentálním programu. Zvolená hodnota rozlivu je v souladu s (ČSN EN 1015-2) (**Tab. 9**). Konzistence malty byla stanovena ihned po namíchání čerstvé směsi na základě změření průměru rozlivu malty ve dvou na sebe kolmých směrech.

**Tab. 9** Předepsaná hodnota rozlití pro různé druhy mat vztahující se na objemovou hmotnost čerstvé malty dle ČSN EN 1015-2.

Objemová hmotnost čerstvé malty ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	Hodnota rozlití (mm)
> 1200	$175 \pm 10$
600 - 1200	$160 \pm 10$
300 - 600	$140 \pm 10$
$\leq 300$	$120 \pm 10$

Výzkum vlastností čerstvých maltových směsí se podle naplánované metodiky soustředil zejména na zjištění vodního koeficientu odpovídajícího vybrané hodnotě

konzistence směsi a na rozdíly v objemové hmotnosti, obsahu vody a vzduchu vyplývající z různých modifikací vápenné malty metakaolinem a/nebo lněným olejem.

Konzistence čerstvých malt byla stanovena rozlivem čerstvé malty na střešacím stolku dle (ČSN EN 1015-2). Manuálním tlakovým zařízením TESTING s ruční pumpičkou (objem nádoby 1 litr) byl dle (ČSN EN 1015-7) stanoven obsah vzduchu v čerstvé maltě. Objemová hmotnost čerstvé malty byla stanovována jako poměr hmotnosti a objemu, který čerstvá malta zaujímala po naplnění zkušební kovové formy velikosti 40x40x160 mm a zhutnění způsobem stejným pro všechny malty (30x sklepnutí na střešacím stolku, 30x zhutnění plastovým tloučkem). Zjištěné vlastnosti čerstvé malty jsou prezentovány v **Tab. 10**.

**Tab. 10** Vlastnosti čerstvých malt.

Označení malty	Množství záměsové vody (% hm.)	Vodní součinitel		Konzistence		Obsah vzduchu (%)	Objemová hmotnost (g.cm <sup>-3</sup> )
		(w/b)	(w/ds)	Rozliv (cm)	(%)		
L	21,6	1,04	0,26	16,8 (±0,1)	68 (±1)	2,6 (±0,1)	1,91 (±0,02)
LO	21,3	1,08	0,27	16,6 (±0,1)	66,0 (±1)	5,4 (±0,2)	1,78 (± 0,20)
LM	19,3	0,96	0,24	17,1 (±0,3)	70,7 (±2,5)	2,17 (±0,08)	1,97 (±0,01)
LMO	20,3	1,02	0,26	16,5 (±0,1)	65,0 (±1)	4,0 (±0,06)	1,91 (± 0,02)

Výsledkem experimentálního studia je poznatek, že ani náhrada části vápenného pojiva metakaolinem ani přísada lněného oleje do vápenné nebo vápenometakaolinové malty ve zvolených množstvích neovlivnily nijak výrazně vodní součinitel čerstvé malty. Ve srovnání s přípravou referenční malty L ze vzdušného bylo k přípravě malty LM obsahující metakaolin spotřebováno mírně méně vody. Tento poznatek odpovídá pozorování Koutníka a kol., který porovnával vlastnosti čerstvých vápenných malt s rostoucím množstvím Mefista L03 (Koutník a kol., 2009). Přídavkem lněného oleje (malta LO a LMO) došlo k mírnému nárůstu vodního součinitele malty, což je v souladu s výsledky (Rovnaníková, 2002) a v rozporu s výsledky, které získala (Čechová, 2009). Nicméně zjištěné rozdíly ve vodním součiniteli malt jsou velmi malé a jsou v rozsahu chyby měření konzistence malty.

Provzdušnění čerstvé malty je přítomností metakaolinu a lněného oleje v maltě ovlivněno mnohem výrazněji. Přísada lněného oleje zvýšila obsah vzduchu jak ve vápenné variantě malty, tak ve vápenometakaolinové. Provzdušnění vzrostlo díky lněnému oleji ve vápenné maltě o 107% a ve vápenometakaolinové maltě o 84%.



Distribuce vzduchových bublin v čerstvé maltě byla studována mikroskopicky. Bylo zjištěno, že bublinky vzduchu jsou ve struktuře malty rozmístěny rovnoměrně, což svědčí o kvalitním promíchání směsi. Texturní vlastnosti malty byly dále studovány v zatvrdlé maltě v další etapě výzkumu. Obsah vzduchu hraje velmi důležitou roli ve zvýšení odolnosti vápenné malty. Prostor, který vzduch vytvoří ve struktuře omítky, je prostorem, kde voda může zmrznout bez poškození materiálu (Chatterji, 1999b). Vzduchové bubliny ve vápenné maltě navíc usnadňují karbonatační proces, což má pozitivní vliv na vývoj mechanických vlastností tohoto materiálu.

Čerstvá malta byla hutněna za pomoci střešovacího stolku do forem tří velikostí (podle požadavků konkrétních zkušebních postupů). Dno forem bylo z důvodů snazšího odformování zkušebních těles vyloženo igelitovou folií. Po 24 hodinách byla tělesa z forem vyjmuta a po dobu dalších 6 dní byla uložena v prostředí o relativní vlhkosti  $90 \pm 5 \%$  a teplotě vzduchu  $22 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Do času zkoušení byla následně tělesa uložena v řízených mikroklimatických podmínkách: relativní vlhkosti vzduchu  $65 \pm 5 \%$  a teplotě vzduchu  $22 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ , v regálech s děrovanými policemi, aby se zajistila rovnoměrná cirkulace vzduchu. Měřicím  $\text{CO}_2$  čidlem byla v místnosti monitorována také koncentrace vzdušného oxidu uhličitého  $495 \pm 37 \text{ ppm}$ .

### **2.12.2. Metodika zkoušek**

Vlastnosti navržených vápenných malt s přídavkem metakaolinu a s přídavkem lněného oleje byly zkoumány v různých stupních vyzrálosti malt. Informace o typu zkoušky, tvaru a stáří těles shrnuje **Tab. 11**. Pro jednodušší orientaci ve výsledcích byly maltám přiřazeny následující zkratky: L (referenční čistě vápenná), LO (vápenná malta s olejem), LM (vápenometakaolinová), LMO (vápenometakaolinová s olejem).

**Tab. 11** Přehled laboratorních zkoušek studia vápenných malt s metakaolinem a lněným olejem.

Zjišťovaná vlastnost	Rozměr vzorku (mm)	Stáří vzorků (dny)	Počet vzorků pro 1 zkoušku
pevnost v tlaku a v tahu za ohybu, modul pružnosti	20×20×100 mm	14, 28, 60, 90, 180, 360	5
	40×40×160 mm	90, 180, 360	5
pórovitost přístupná vodě, saturační koeficient, vzlínavost	poloviny vzorků 40×40×160 mm	90, 180, 360	3 až 5
paropropustnost (součinitel difúze vodní páry, difúzní odpor materiálu pro vodní páru)	kruhové těleso, r = 70, v = 12	90	5
distribuce velikosti pórů měřená rtuťovou porozimetrií	reprezentativní zbytky vzorků 40×40×160 mm	90	2 až 3
gravimetrická analýza TG/DTG	reprezentativní zbytky vzorků 40×40×160 mm	14, 28, 60, 90, 180, 360	2 až 3
mrazuvzdornost	40×40×160 mm	90	3 zmrazované 3 uložené pod vodou
odolnost krystalizaci chloridu sodného	40×40×160 mm	90	3 v roztoku NaCl 3 referenční ve vodě
optický mikroskop (polarizované, procházející a odražené světlo); SEM (BSE)	reprezentativní zbytky vzorků 40×40×160 mm	90	1

### 2.12.2.1. Mechanické vlastnosti a rychlost zrání pojiva

Mechanické pevnosti na zatvrdlých maltách byly zkoušeny na 5 až 6 tělesech o velikosti 20×20×100 mm a 40×40×160 mm. Zkoušky byly provedeny podle (ČSN EN 1015-11), na zatěžovacím stroji Testatron 226 (Wolpert) s použitím 50N až 100kN siloměrů. Pevnost v tahu za ohybu byla stanovena třibodovým zatěžováním do porušení zkušebního vzorku. Na jedné polovině vzorku byla následně změřena pevnost malty v tlaku.

Stupeň karbonatace a hydratace 10 různých pojiv byl zjišťován na polovinách tělísek 20×20×100 mm, zbylých po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu. Stupeň karbonatace a hydratace byl stanovován TGA/DTG analýzou na základě charakteristických rozkladných teplot a s tím spojeným hmotnostním úbytkem. Kvantitativně byly určeny hydratované fáze a uhličitán vápenatý v pojivu. Analyzovány byly vždy cca 20 až 30mg navážky přesátého a vysušeného pojiva ze dvou různých trámečků. Analýza

vzorku byla provedena na přístroji SDT Q600 firmy TA v rozmezí teplot 25 až 1000 °C. Spalování probíhalo v N<sub>2</sub> atmosféře rychlostí ohřevu 20 °C za min.

Z hmotnostních úbytků v určitých teplotních intervalech zahřívání vzorku bylo spočítáno množství CaCO<sub>3</sub> a Ca(OH)<sub>2</sub> v pojivu. Rychlost karbonatace v čase byla vyjádřena jako množství spotřebovaného hydroxidu vápenatého k jeho počátečnímu množství.

#### **2.12.2.2. Pórovitost přístupná vodě a distribuce velikostí pórů**

Poloviny vzorků 40×40×160 mm, zbylé po mechanických zkouškách, byly vysušeny do konstantní hmotnosti a poté na nich byla podle (ČSN EN 1936) stanovena pórovitost přístupná vodě a objemová hmotnost. Zkouška spočívá v hydrostatickém vážení vzorků po 24hodinovém vakuování při podtlaku 0,2 kPa a 24hodinovém zaplavení vzorků vodou.

Pórovitost a distribuce velikosti pórů malt byla stanovena rtuťovou intruzní porozimetrií (MIP) bylo provedeno pomocí rtuťového porozimetru na přístroji Poremaster® PM-60-13, Quantachrome, za těchto podmínek: úhel smáčení 140°, povrchové napětí rtuti 480 erg.cm<sup>-2</sup> a hustota rtuti 13,5487g.cm<sup>-3</sup>, s rozsahem tlaku mezi 0,0055 až 200 MPa, který odpovídá velikosti penetrovaných pórů o průměru 258 μm až 6 nm.

#### **2.12.2.3. Koeficient kapilární absorpce**

Znovu vysušené poloviny trámečků 40×40×160 mm, byly v dalším kroku použity pro zjištění koeficientu kapilární absorpce. Metodika zkoušky vychází z norem (ČSN EN 1925) a (ČSN EN 1015-18). Lomová plocha vzorků byla nejprve zarovnána a boční stěny izolovány neprodyšným nátěrem proti odparu vody (mikrokrystalický vosk s parafínem). Vzorky byly v zakryté misce postaveny na savou textilií, a asi do 0,3 cm ponořeny do vody tak, že voda do vzorku vzlínala pouze plochou podstavy tělesa. Na základě zjištěných hodnot hmotnosti v závislosti na čase byl vypočten koeficient kapilární absorpce (směrnice lineární části závislosti).

#### **2.12.2.4. Propustnost pro vodní páry**

Zkouška propustnosti malt pro vodní páru byla provedena tzv. metodou suché misky podle doporučení (RILEM II. 1). Vysušená kruhová zkušební tělesa o tloušťce 12 mm byla pomocí paronepropustného plastického tmelu (Mastersil) uchycena o hliníkových zkušebních misek s vysoušedlem (granulovaný CaCl<sub>2</sub>) tak, že mezi vzorkem a vysoušedlem byla 1 cm mezera. Misky se vzorky byly umístěny do zkušebních boxů v kontrolovaném prostředí s teplotou 23 ±3 °C a relativní vlhkostí 33 ±5 % udržovanou roztokem chloridu vápenatého. Nárůsty hmotností byly v závislosti na čase vyneseny do grafu a byl vypočten faktor difúzního odporu  $\mu$  (-) a koeficient difúze pro vodní páru  $D$  (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>).

### **2.12.2.5. Mikrostruktura**

V každém sledovaném stáří byl od každé malty, z tělíška 40×40×160 mm, připraven jeden leštěný petrografický výbrus. Měnící se struktura malt byla vyšetřována pod polarizačním mikroskopem Zeiss NU 2 spojeným s fotoaparátem Olympus 5060. Obraz byl zpracován systémem pro QuickPHOTO Industrial 2.3 (Promicra).

Vyšetření malt skenovacím elektronovým mikroskopem bylo provedeno na přístroji MIRA II LMU (Tescan, Brno). Nábrusy byly před skenováním pokryty tenkou vodivou vrstvou uhlíku a následně byly snímkovány s použitím detektoru sekundárních elektronů (SE), při urychlovacím napětí 3 kV a detektoru zpětně odražených elektronů (BSE) při urychlovacím napětí 15 kV a pracovní vzdálenosti 28 až 13 cm. Absorbovaný proud vzorkem dosahoval hodnot 230-720 pA.

### **2.12.2.6. Odolnost malt proti krystalizaci chloridu sodného**

Odolnost malt vůči působení 3% roztoku chloridu sodného byla testována na 6 standardních tělesech 40×40×160 mm. Tři zkušební tělesa byla cyklicky máčena 8 hodin v 3% roztoku NaCl a následně 16 hodin vysušena při teplotě 60 (±5) °C. Tři referenční tělesa byla místo v roztoku soli máčena v destilované vodě. Hmotnost byla zaznamenávána v každém cyklu vždy před ponořením těles do roztoku soli (zkoušená tělíška) a destilované vody (sada referenčních těles) a následně po osmi hodinách absorpce. Stav vzorků byl během zkoušky pravidelně kontrolován. Po každém 5. cyklu byl solný roztok vyměněn, byly zaznamenány změny rozměrů těles a vzorky byly vyfotografovány. Test byl ukončen po 20. cyklu. Pro čistě vápennou maltu 90 dnů starou, byla zkouška vzhledem k výraznému poškození vzorků ukončena již po 15. cyklu. Po ukončení posledního cyklu byly zkušební i referenční vzorky vysušeny do konstantní hmotnosti a podrobeny mechanickým testům.

### **2.12.2.7. Odolnost vodou nasycených malt proti poškození mrazem**

Ve 90 a 360 dnech zrání byla sada 6 vzorků 40×40×160 mm podrobena zkoušce odolnosti cyklickému působení mrazu a tání. Metodika zkoušení mrazuvzdornosti malt vychází z normy (ČSN 72 2452). Na začátku byly vzorky vysušeny do konstantní hmotnosti a ponořeny na 24 hod do destilované vody, a poté ihned mrazeny v předem temperovaném mrazicím boxu. Malty s olejem byly kvůli pomalému nasakování ponechány ve vodě až do konstantního nasycení. Jeden zkušební cyklus zahrnoval čtyřhodinové mražení zkoušených těles při -20 (±5) °C a minimálně dvě hodiny volného tání ve vodě o teplotě 20 (±5) °C. Mimo zmrazování byly zkoušené vzorky uchovány pod vodou, referenční sada vzorků byla pod vodou po celou dobu zkoušky. Stupeň poškození zkoušených i referenčních vzorků byl monitorován ultrazvukem (měření v podélném směru trámečku), a to po každém 5. cyklu. Byly zaznamenány změny rozměrů těles a objemové hmotnosti (hydrostatické vážení pod vodou a na vzduchu). Součástí monitoringu byla i fotodokumentace stavu těles v průběhu zkoušky. Po ukončení posledního cyklu byly vzorky vysušeny do

konstantní hmotnosti a podrobeny mechanickým zkouškám (pevnost v tlaku a v tahu za ohybu).

### 2.12.3. Vlastnosti studovaných malt

#### 2.12.3.1. Mechanické pevnosti a rychlost zrání pojiva

**Tab. 12** uvádí pevnosti naměřené na tělesech 20×20×100 mm do 180 příp. 360 dne zrání. Na tělesech standardní velikosti 40×40×160 mm byly stanoveny pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu po 90, 180 a 360 dnech zrání **Tab. 13**. Pevnosti zjištěné na tělích různé velikosti ve stejné době zrání nejsou srovnatelné vzhledem k různému stupni karbonatace malt.

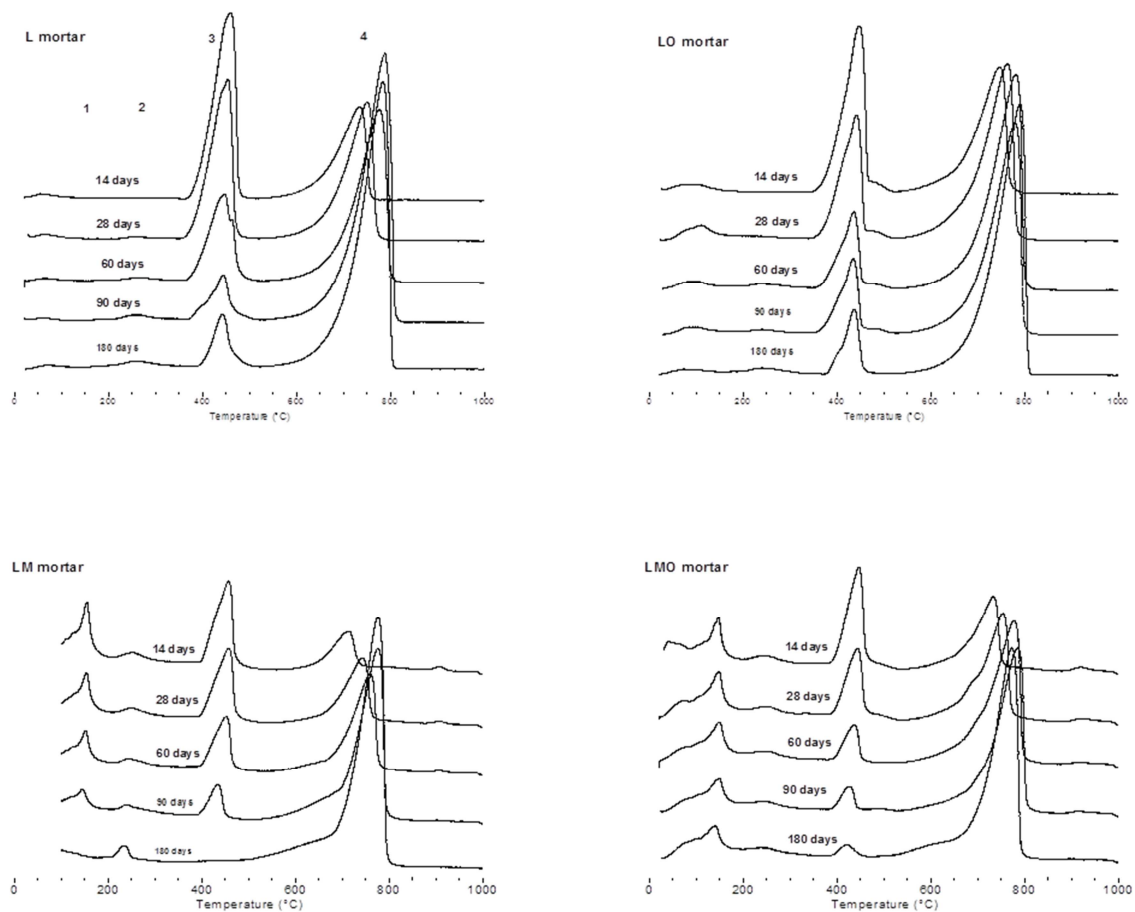
**Tab. 12** Pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku stanovené na vzorcích 20×20×100 mm ve 14, 28, 60, 90 a 180 dnech zrání malty.

Označení malt	Pevnost v tahu za ohybu (MPa)						Pevnost v tlaku (MPa)					
	14d	28d	60d	90d	180d	360d	14d	28d	60d	90d	180d	360d
<b>L</b>	<b>0,33</b>	<b>0,36</b>	<b>0,59</b>	<b>0,70</b>	<b>0,76</b>	<b>0,66</b>	<b>0,44</b>	<b>0,73</b>	<b>1,24</b>	<b>1,51</b>	<b>1,99</b>	<b>2,00</b>
	±0,03	±0,07	±0,05	±0,06	±0,07	±0,12	±0,07	±0,06	±0,04	±0,09	±0,32	±0,17
<b>LO</b>	<b>0,41</b>	<b>0,54</b>	<b>0,70</b>	<b>0,70</b>	<b>0,60</b>	-	<b>0,63</b>	<b>1,11</b>	<b>1,60</b>	<b>1,50</b>	<b>1,44</b>	-
	±0,03	±0,07	±0,05	±0,07	±0,0,5		±0,05	±0,07	±0,09	±0,10	±0,16	
<b>LM</b>	<b>2,39</b>	<b>2,51</b>	<b>1,80</b>	<b>1,68</b>	<b>1,68</b>	<b>2,31</b>	<b>3,65</b>	<b>3,87</b>	<b>4,83</b>	<b>5,55</b>	<b>4,46</b>	<b>6,00</b>
	±0,41	±0,19	±0,14	±0,16	±0,08	±0,15	±0,19	±0,58	±0,75	±0,57	±0,53	±0,43
<b>LMO</b>	<b>1,17</b>	<b>1,45</b>	<b>1,50</b>	<b>1,53</b>	<b>1,69</b>	-	<b>2,77</b>	<b>3,15</b>	<b>4,55</b>	<b>5,68</b>	<b>4,75</b>	-
	±0,13	±0,15	±0,28	±0,39	±0,28		±0,25	±0,33	±1,19	±1,21	±1,27	

**Tab. 13** Pevnosti v tahu za ohybu a tlakové pevnosti malt stanovené na vzorcích 40×40×160 mm v 90, 180 a 360 dnech zrání malty.

Označení malt	Pevnost v tahu za ohybu (MPa)			Pevnost v tlaku (MPa)		
	90 d	180 d	360 d	90 d	180 d	360 d
<b>L</b>	<b>0,50</b> ±0,01	<b>0,54</b> ±0,03	<b>0,62</b> ±0,05	<b>1,01</b> ±0,10	<b>1,39</b> ±0,11	<b>1,76</b> ±0,19
<b>LO</b>	<b>0,40</b> ±0,05	<b>0,49</b> ±0,01	-	<b>0,63</b> ±0,06	<b>1,64</b> ±0,08	-
<b>LM</b>	<b>1,65</b> ±0,20	<b>1,26</b> ±0,17	<b>1,97</b> ±0,36	<b>6,71</b> ±0,65	<b>5,04</b> ±0,68	<b>5,96</b> ±0,42
<b>LMO</b>	<b>1,26</b> ±0,36	<b>1,45</b> ±0,17	-	<b>4,02</b> ±0,23	<b>5,48</b> ±0,25	-

Vytvrzování a nárůst pevností malt souvisí s průběhem karbonatace a hydratace pojiva malty. Čistě vápenná malta je vytvrzována pouze karbonatační reakcí a nárůst pevností tak závisí zejména na okolních podmínkách, ve kterých malta zraje (Lawrence, 2006). Vápenná malta s metakaolinem tvrdne v důsledku obou procesů (karbonatace i hydratace) a záleží zejména na vlhkosti vzduchu v okolním prostředí, který z obou mechanismů tvrdnutí se uplatní více či méně. Průběh obou reakcí v čase byl sledován na základě kvantitativních analýz složek charakteristických pro obě reakce – uhličitanu vápenatého (karbonatace) a hydraulických složek (hydratace) vyskytujících se ve zrající maltě. Pomocí termické analýzy (DTG křivky) byl v analyzovaných vzorcích pojiva sledován úbytek vápna (hydroxidu vápenatého) a vznik reakčních produktů v průběhu zrání malty, viz **Obr. 7**. Píky na DTG křivce zaznamenávají děje, které jsou spojeny s úbytkem hmotnosti vzorku během jeho ohřevu na 1000 °C. V jednotlivých teplotních intervalech, (**Obr. 7** LM) dochází k následujícím jevům: 100 až 380 °C uvolnění chemicky vázané vody (dehydratace CSH a CAH); 380 až 550 °C dehydroxylace Ca(OH)<sub>2</sub>; 550 až 800 °C rozklad CaCO<sub>3</sub>.



**Obr. 7** DTG křivky analyzovaných vzorků pojiva malt ve 14, 28, 60 a 90 dnech stáří.

Průběh DTG křivek vápenné malty a vápenné s přídavkem lněného oleje se zdá být obdobný, totiž že s postupující karbonatací klesá intenzita pásu 2 ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) a roste intenzita pásu 3 ( $\text{CaCO}_3$ ). Malý rozdíl je patrný v oblasti 100 až 380 °C kde dochází k uvolňování chemicky vázané vody. U malty s přídavkem oleje jsou zaznamenány v této oblasti málo intenzivní širší pásy, které naznačují vyšší obsah vody, především v prvních 60 dnech.

Přítomnost oleje ve vápenné maltě s přídavkem metakaolinu způsobila podstatnější změny v průběhu zrání. Podobně jako u čistě vápenné malty se karbonatace malt s metakaolinem projevila klesající intenzitou pásu portlanditu a současně rostoucím pásem kalcitu. Ve stáří malt 180 dní byl zreagovaný veškerý portlandit jen u malty vápenometakaolinové, viz **Tab. 14**. Kromě karbonatace v maltách s metakaolinem také probíhá pucolánová reakce, jejíž produkty jsou hydratované křemičitany a hlinitany vápenaté. Jejich přítomnost se projevuje na DTG křivce v oblasti 100 až 380 °C. V této oblasti se projevila přítomnost oleje nejvíce. Při teplotách mezi 100 a 200 °C dochází k dehydrataci CSH i CAH, při teplotách vyšších než 200 °C spíše jen k uvolnění vody z CAH (Rojas a Cabrera, 2001 a 2002).

Na grafu LM malty je zřejmý pokles pásu s maximem okolo 150 °C, který je způsoben úbytkem CSH v důsledku jejich karbonatace. Na křivce vzorku ve stáří 180 dní tento pás zcela vymizel, současně došlo ke zvýraznění pásu kolem 220 °C, který zřejmě přísluší hydratovanému hlinitanu. V maltě s přidavkem oleje LMO je proces úbytku (karbonatace) CSH fází podstatně zpomalen, na DTG grafu nedochází k podstatným změnám při teplotách 100 až 380 °C.

**Tab. 14** Rychlost karbonatace v čase vyjádřená jako množství spotřebovaného portlanditu  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ku jeho počátečnímu množství.

Stáří vzorků	Spotřebovaný obsah $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (% hm.)			
	L	LO	LM	LMO
14 d	3	17	54	40
28 d	19	37	62	55
60 d	62	68	71	74
90 d	78	70	83	83
180 d	82	75	100	85
360 d	83	100	100	-

### 2.12.3.2. Pórovitost a distribuce velikostí pórů

Z literatury je známo, že následkem karbonatace dochází u vápenných malt ke snížení pórovitosti o cca 10%, nicméně tento pokles není stejný ve všech intervalech velikostí pórů. Během tohoto procesu se zároveň snižuje specifický povrch (Lawrence, 2006), (Arandigoyen a kol., 2006). Z výsledků naměřených pomocí rtuťové porozimetrie **Tab. 15** a hydrostatického vážení **Tab. 16** vyplývá, že malta vápenná v období od 90 do 180 dnů nezměnila významně svou pórovitost. Malé změně pórovitosti vápenné malty v intervalu 90 až 180 dnů zraní odpovídá malá změna pevnosti v tomto období. Pokud jde o distribuci pórů (**Obr. 8**), malta se vyznačuje přítomností dvou vrcholů: jednoho v oblasti 0,1-1  $\mu\text{m}$  (póry charakteristické pro pojivo) a druhého v oblasti 10-100  $\mu\text{m}$  (pravděpodobně jde o smršťovací trhliny, protože z důvodu poměrně velkého obsahu pojiva je málo pravděpodobné, že by pórovitost v této oblasti byla způsobena mezerovitostí mezi zrny písku). Vápenná malta s přidavkem lněného oleje se vyznačuje pórovitostí o 2-3 % vyšší než čistě vápenná malta. Je to způsobeno větším obsahem vzduchu v čerstvé maltě. Přídavek oleje do maltové směsi, která má vysoké pH, pravděpodobně stabilizuje bublinky vzduchu, vznikající během míchání malty. Kromě toho, vodní součinitel je zde větší než u čistě vápenné malty, což samozřejmě také vede k zvýšení pórovitosti. Vápenometakaolinová malta obsahuje metakaolin a projevuje mírně vyšší pórovitost než vápenná malta. Distribuční křivka ukazuje přítomnost pórů menších než 100 nm, což vzhledem k předpokládanému vzniku CSH gelu nepřekvapuje. Na rozdíl od malty čistě vápenné se zde nevyskytují smršťovací trhliny. Lze to vysvětlit tím, že pojivo má



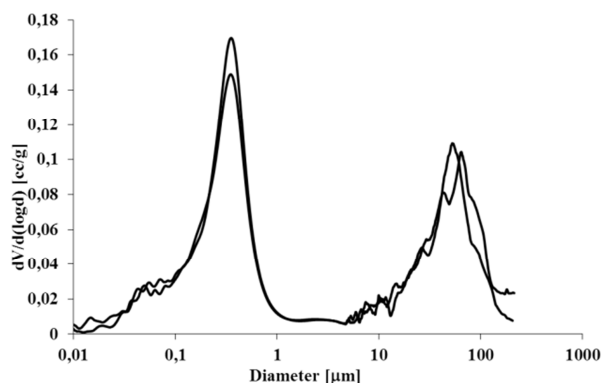
lepší mechanické vlastnosti z důvodu poměrně rychlé pucolánové reakce (Gameiro a kol., 2012).

**Tab. 15** Porozita vápenných malt v 90. dni zrání, výsledky ze rtuťové porozimetrie

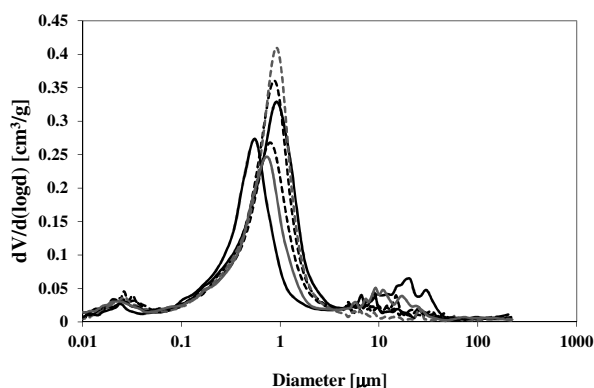
Označení malt	Objem (cm <sup>3</sup> )	Objemová hmotnost (kg·m <sup>-3</sup> )	Pórovitost (%)	Maximální velikost pórů (μm)
L	0,373	1811	31,75	0,76
LO	0,252	1718	35,72	0,55
LM	0,266	1743	32,60	0,14; 0,32
LMO	0,334	1688	34,88	0,59

**Tab. 16** Objemová hmotnost a otevřená pórovitost vápenných malt v 90. a 180. dni zrání zjištěná hydrostatickým vážením.

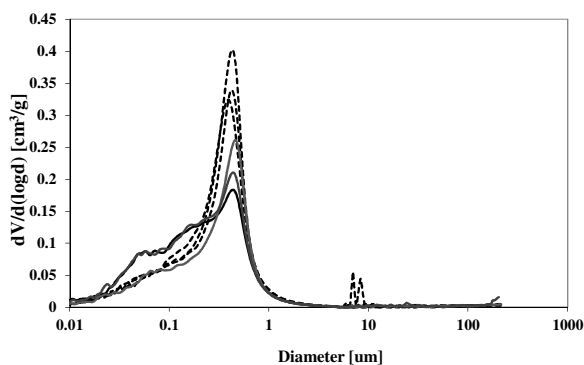
Označení malt	90 d		180 d	
	Objemová hmotnost (kg·m <sup>-3</sup> )	Otevřená pórovitost (%)	Objemová hmotnost (kg·m <sup>-3</sup> )	Otevřená pórovitost (%)
L	1767 ±18	32,0 ±0,2	1782 ±6	31,9 ±0,2
LO	1645 ±9	34,4 ±0,6	1672 ±15	33,5 ±0,8
LM	1688 ±19	34,4 ±0,1	1704 ±7	34,5 ±0,3
LMO	1611 ±7	32,4 ±0,5	1674 ±39	33,1 ±0,7



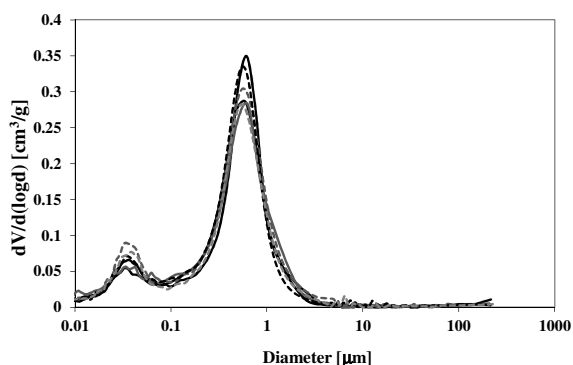
L - vápenná malta



LO - vápenná malta s olejem



LM - vápenometakaolinová malta



LMO - vápenometakaolinová malta s olejem

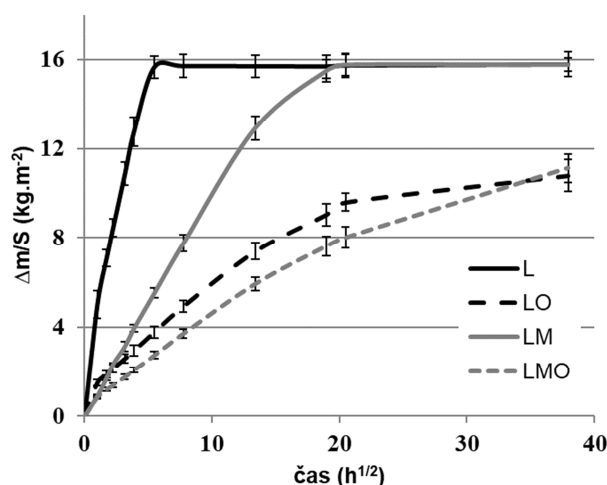
**Obr. 8** Distribuce velikosti částic v 90 a 180 dnech stáří vápenných malt (plná čára: 90 dní; čerchovaná čára: 180 dní). Pro vápennou maltu bylo provedeno měření pouze v 90. dnu zrání.

### 2.12.3.3. Transport vlhkosti a difúze vodní páry

Rychlost transportu kapalné vody maltami v důsledku kapilárních sil byla charakterizována stanovením koeficientu kapilární absorpce  $A$  ( $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1/2}$ ). Koeficient byl stanoven ve dvou různých obdobích zrání malt – po 90 dnech a po půl roce, výsledky jsou uvedeny v **Tab. 17**. Graficky jsou znázorněny výsledky pro malty v 90 dnech zrání, viz **Obr. 9**. Nejrychleji je voda absorbována vápennou maltou, pomalejší je průnik vody do vápenné malty s metakaolinem. Malty s obsahem oleje v důsledku změněného povrchového napětí vody absorbují kapalnou vodu pomaleji, přičemž vápenometakaolinová s olejem absorbuje pomaleji než vápenná malta s olejem. Z hlediska časového vývoje je u malt bez přídavku oleje evidentní tendence k nárůstu koeficientu, tedy k mírně rychlejší absorpci vody u více vyžralé malty, zatímco u malt s olejem voda penetruje do více vyžralé malty pomaleji.

**Tab. 17** Koeficienty kapilární absorpce malt v 90. a 180. dni zrání, měření s parotěsným nátěrem na povrchu testovaného tělíska kromě smáčené plochy.

Označení malt	Koeficient kapilární absorpce ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1/2}$ )	
	90 d	180 d
L	21,46 $\pm$ 0,26	24,67 $\pm$ 1,49
LO	3,95 $\pm$ 1,66	0,58 $\pm$ 0,03
LM	7,87 $\pm$ 0,26	11,46 $\pm$ 0,58
LMO	1,98 $\pm$ 0,04	1,11 $\pm$ 0,14



**Obr. 9** Křivky kapilární absorpce vápenných malt v 90. dni zrání.

Rychlost transportu vodní páry vápennými maltami byla charakterizována koeficientem difúze vodní páry  $D$  ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ) a difúzním odporem pro vodní páru  $\mu$  (-). Oba dva parametry byly změřeny metodou suché misky na diskových těliscích v 90. dnu zrání malt v podmínkách s konstantní teplotou vzduchu a relativní vlhkostí vzduchu 0/34 %. Transport vodní páry porézní strukturou malty je velmi důležitým parametrem, který souvisí s odolností malty vůči vlhkosti a kondenzací vodních par. Vodní pára stejně jako kapalná voda totiž umožňuje transport reaktivních komponent  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  a  $\text{CO}_2$  z atmosféry (Wendler a Charola, 2008). Z naměřených hodnot, které shrnuje **Tab. 18**, vyplynulo, že 1,5% přídavek lněného oleje ve vápenné maltě nemění její paropropustnost. Difúzní odpor pro vodní páru u vápenometakaolinové malty je ve srovnání s čistě vápennou maltou výrazně vyšší. Nejnižší paropropustnost pro vodní páru byla zjištěna u malty vápenometakaolinové s olejem.

**Tab. 18** Permeabilita vápenných omítek stanovená metodou suché misky v 90 dnech zrání.

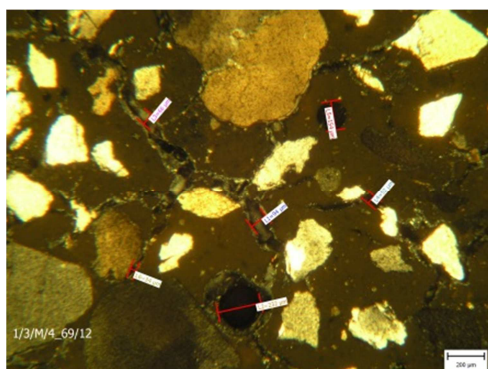
Označení malt	Koeficient difúze vodní páry D ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	Difúzní odpor pro vodní páru $\mu$ (-)
L	$(2,15 \pm 0,05) \times 10^{-6}$	$10,7 \pm 0,3$
LO	$(2,28 \pm 0,03) \times 10^{-6}$	$10,1 \pm 0,1$
LM	$(1,34 \pm 0,09) \times 10^{-6}$	$17,3 \pm 1,2$
LMO	$(1,03 \pm 0,04) \times 10^{-6}$	$22,5 \pm 0,8$

#### 2.12.3.4. Mikrostruktura

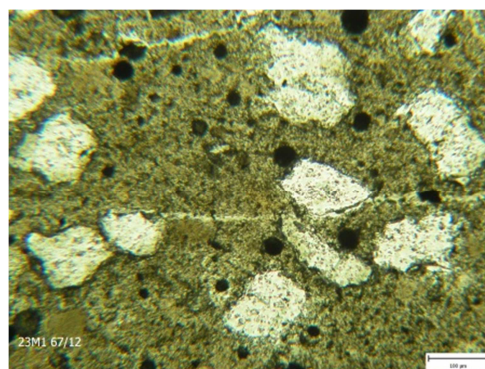
V každém porovnávaném stáří malty byl od každé malty vybrán jeden vzorek (polovina trámce 40×40×160 mm), a z něho byl připraven leštěný petrografický výbrus (4×4 cm). Mění se struktura malty byla sledována optickým mikroskopem v procházejícím (PPL), odraženém světle (RPL) a v polarizovaném světle se zkříženými nikoly (CPL).

Z pozorování vyplynuly obecné informace platné pro všechny malty. Křemenný písek je v maltách rovnoměrně rozmístěn, převažuje jemná a hrubá frakce. Křemen v plnivu je vykrytalizovaný, polykrytalický, jsou patrné různé srostlicové agregáty. Pojivo v centrální části výbrusu vykazuje vlastnosti izotropního materiálu - není vykrytalizované (nezkarbonatované pojivo). Naopak partie na okrajích výbrusů obsahují drobné klastry karbonátu.

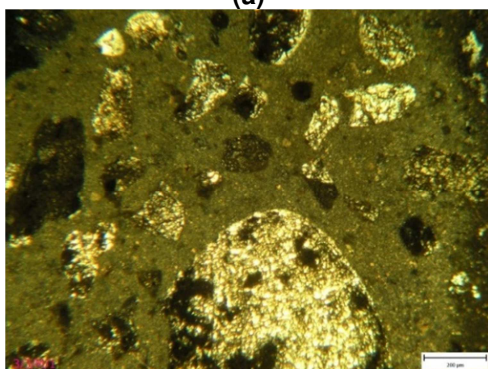
Mikrosnímky 90 dnů starých malt jsou uvedeny v **Obr. 10**. Čistě vápenná malta (a) vykazuje četné smršťovací trhliny, vyplývající z poměrně velkého množství pojiva v maltě. V matrici pojiva vápenné malty s olejem (b) je výrazně větší množství kulatých pórů, což bývá časté u malt, kde byly použity provzdušňovací látky (Cultrone a kol., 2005). Struktura vápenometakaolinové malty (c) stejně jako struktura vápenometakaolinové malty s olejem (d) je bez prasklin, pojivo je dobře vázané na zrna písku. Snímky z elektronového mikroskopu **Obr. 11** a **Obr. 12** ilustrují strukturu malty ve výbrusu na ploše několika  $\text{mm}^2$  (vlevo) a morfologii pojiva malt (vpravo) na 90 dnů starých vzorcích malt.



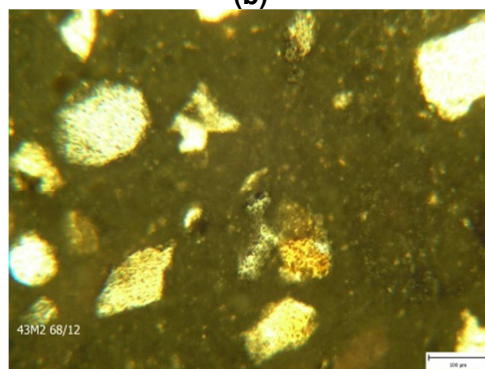
(a)



(b)

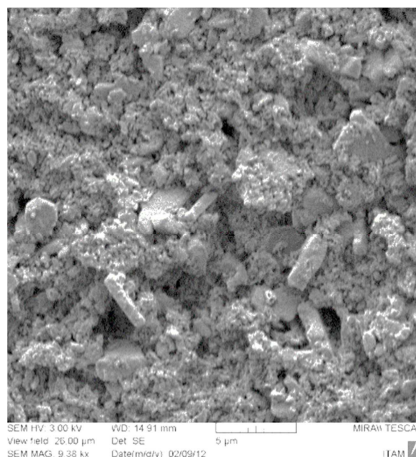
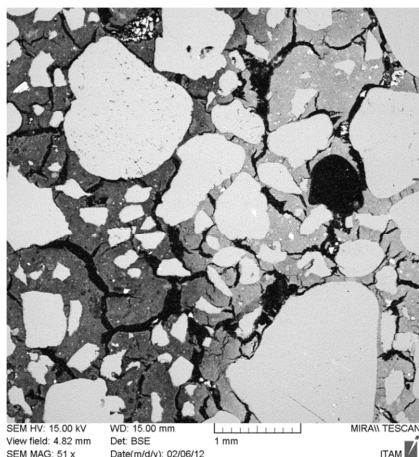


(c)

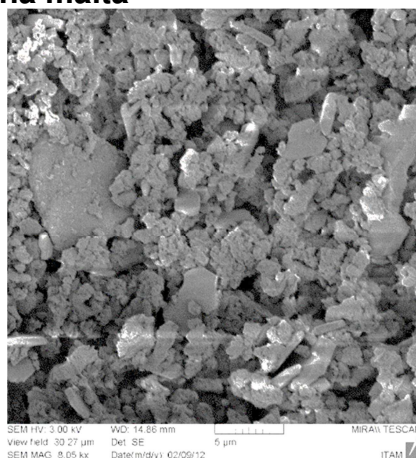
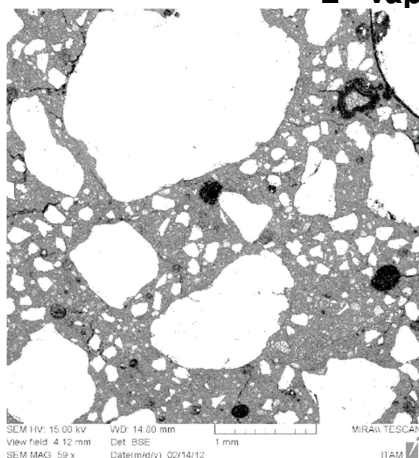


(d)

**Obr. 10** Mikrosnímky struktury malt z optického mikroskopu (CPL) z 90. dne zrání  
(a) L – vápenná malta, (b) LO – vápenná malta s olejem, (c) LM –  
vápenometakaolinová malta, (d) LMO – vápenometakaolinová malta s olejem.



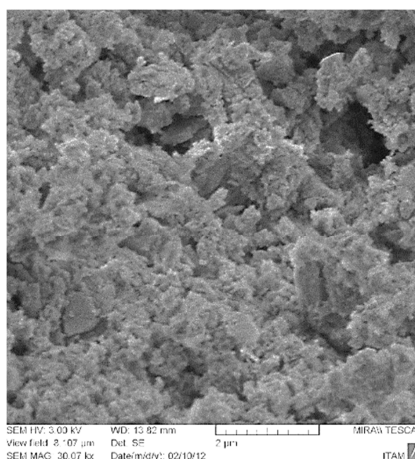
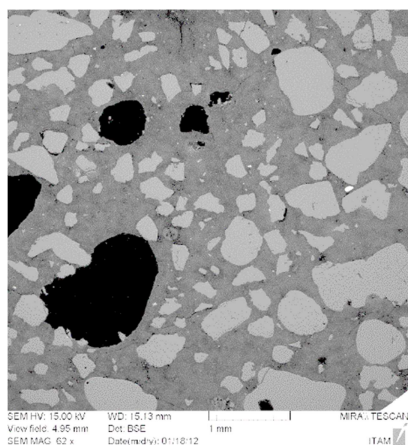
**L - vápenná malta**



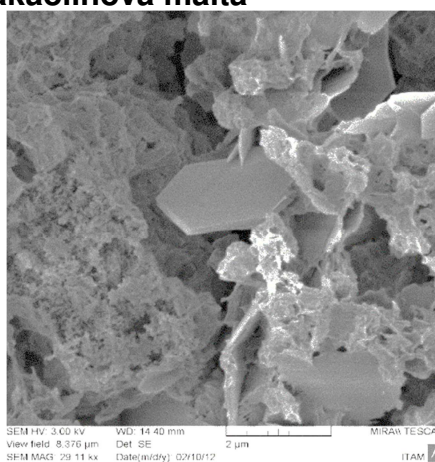
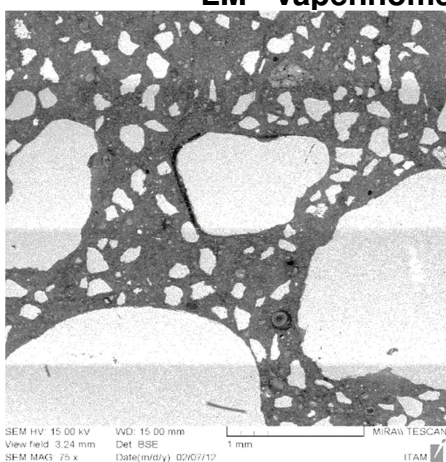
**LO - vápenná malta s olejem**

**Obr. 11** snímky vápenné malty a vápenné malty s olejem: snímky výbrusu – leštěná plocha (vlevo); morfologie malty na neobroušené ploše (vpravo).

Struktura vápenné malty vykazuje viditelné praskliny a trhliny, které podporují rychlý transport kapalné vody materiálem. Výskyt trhlin je intenzivnější ve vápenné maltě L bez přídavku oleje. Detailní snímky zobrazující morfologii pojiva malt ukazují, že obě malty mají obdobnou strukturu charakterizovanou převážně amorfním uhličitanem vápenatým, ale i krystalovými tvary kalcitu (klenec, ditrigonální sklenoedr nebo různé kombinace jejich tvarů). V maltě s olejem je výskyt krystalů vyšší a textura pojiva se jeví méně hutná (více uspořádaná). Malta s olejem má méně kompaktní texturu a mírně vyšší pórovitost, zatímco vápenná malta bez oleje má v detailu kompaktnější texturu, ale je více poškozená trhlínami. Mechanické vlastnosti obou malt se však příliš neliší (**Tab. 13**).



**LM - vápenometakaolinová malta**



**LMO - vápenometakaolinová malta s olejem**

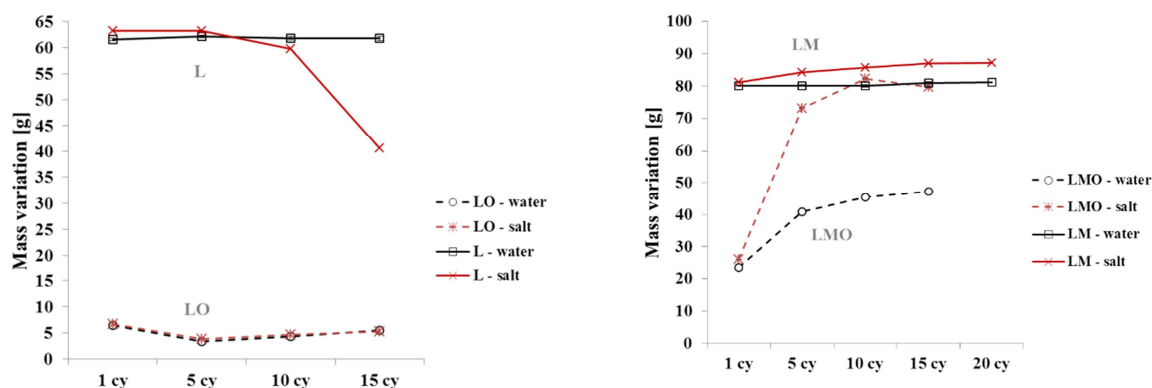
**Obr. 12** SEM snímky vápenometakaolinové malty bez a s přidavkem lněného oleje: snímky výbrusu – leštěná plocha (vlevo); morfologie malty na nebroušené ploše (vpravo).

Vápenometakaolinová malta je mnohem méně poškozena prasklinami než vápenná malta a zrna písku jsou dobře vázána na pojivo. Stejně jako v případě vápenné malty způsobuje přidavek oleje vznik bublin, které vytvářejí prostor a podmínky k růstu krystalů a vzniku méně konsistentní struktury. Mechanické vlastnosti malty s olejem jsou ve tříměsíčním stádiu zrání horší než vlastnosti malty bez oleje (**Tab. 13**).

### **2.12.3.5. Odolnost vápenných malt proti působení chloridu sodného**

Studované vápenné malty byly vystaveny 15 respektive 20 cyklům (u vápenometakaolinové malty) spočívajících v ponoření těles do roztoku NaCl a následném vysušení (tělesa označená S). Jiná sada referenčních těles byla máčena v destilované vodě a vysoušena ve stejném režimu (tělesa označena W). U obou sad byla monitorována hmotnost v průběhu zkoušek a výsledky jsou graficky znázorněny na **Obr. 13**. Z výsledků vyplývá, že malty s přidavkem oleje absorbují výrazně méně vody i roztoku soli ve srovnání s maltami bez oleje. Porovnáním

chování vápenné a vápenometakaolinové malty je vidět výraznější hydrofobní účinek oleje ve vápenné maltě než v maltě vápenometakaolinové.



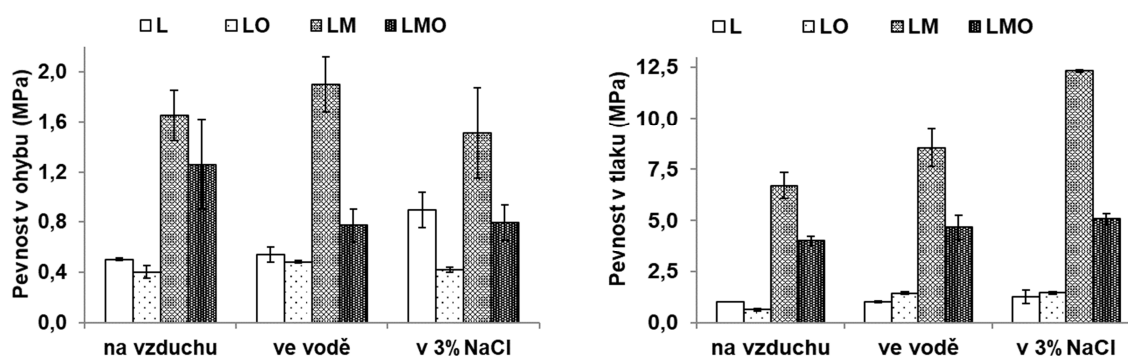
**Obr. 13** Změna hmotnosti tělesa po 1. a každém dalším 5. cyklu (v důsledku nasycení těles vodou nebo roztokem NaCl).

Po ukončení 15 resp. 20. cyklu byly na všech třech sadách těles provedeny pevnostní zkoušky. Výsledky jsou shrnuty v **Tab. 19** a **Obr. 14**. Pevnosti zkoušených těles byly srovnány s pevnostmi těles stejné malty ve stejném stáří. U vápenometakaolinové malty se projevila zpevňující (cementační) účinek soli (Rossi-Manaresi a Tucci, 1991). Pevnost v tlaku u těles vápenometakaolinové malty máčených ve vodě narůstá díky zvyšující se absorpci vody a jejím příznivým účinkům na hydraulické pojivo, které se zpevňuje. Zvyšující se absorpcí solného roztoku se zvyšuje množství soli ve vzorku. Adsorbovaná sůl vytmeluje porézní strukturu malty a následně zvyšuje její pevnost. Zdá se říct, že referenční i zkoušené vzorky vápenné malty s olejem byly střídavým máčením a sušením ovlivněny podobně.



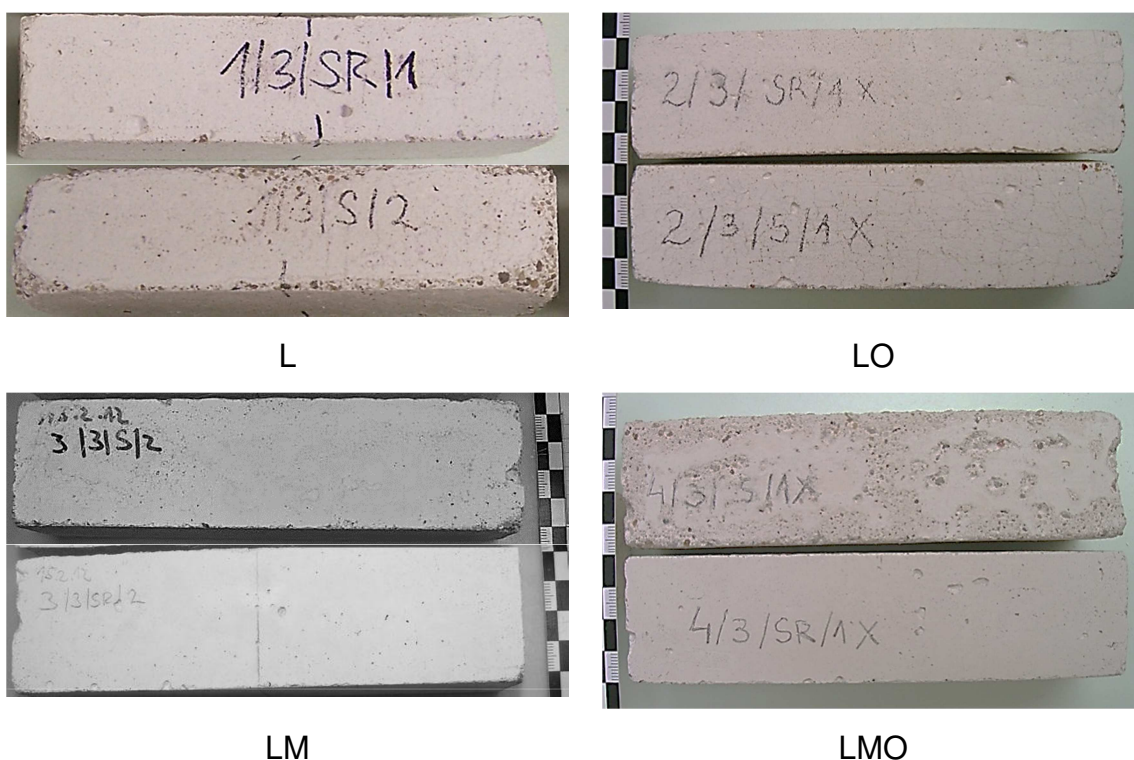
**Tab. 19** Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku stanovená na 90 dnů starých tělesech podrobených 15 cyklům, respektive 20 cyklům (v případě vápenometakaolinové malty) zkoušky odolnosti solím.

Označení malt	Pevnost v tahu za ohybu (MPa)			Pevnost v tlaku (MPa)		
	vzduch	voda	3%NaCl	vzduch	voda	3%NaCl
<b>L</b>	<b>0,50</b> ±0,01	<b>0,54</b> ±0,06	<b>0,89</b> ±0,14	<b>1,01</b> ±0,01	<b>1,01</b> ±0,03	<b>1,25</b> ±0,33
<b>LO</b>	<b>0,40</b> ±0,05	<b>0,48</b> ±0,01	<b>0,42</b> ±0,02	<b>0,63</b> ±0,06	<b>1,43</b> ±0,07	<b>1,44</b> ±0,07
<b>LM</b>	<b>1,65</b> ±0,20	<b>1,90</b> ±0,22	<b>1,51</b> ±0,36	<b>6,71</b> ±0,65	<b>8,55</b> ±0,92	<b>12,32</b> ±0,08
<b>LMO</b>	<b>1,26</b> ±0,36	<b>0,77</b> ±0,13	<b>0,79</b> ±0,14	<b>4,02</b> ±0,23	<b>4,67</b> ±0,59	<b>5,08</b> ±0,27



**Obr. 14** Pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku 90deních malt podrobených zkoušce odolnosti solím.

Vizuální stav malt po 15. zkušebním cyklu, respektive 20. cyklu u vápenometakaolinové malty, dokumentují fotografie v **Obr. 15**. U čistě vápenné malty L byl zaznamenán významný povrchový opad materiálu, zatímco na povrchu vápenné malty s olejem LO nejsou kromě jemných rýh patrné minimální známky porušení. U vápenometakaolinových malt se projevila povrchová eflorescence a s tím spojené odlupování materiálu. V případě vápenometakaolinové malty s olejem po 15-ti cyklech namáčení a sušení bylo porušení tělísek výraznější.



**Obr. 15** Stav vápenné malty po 15. cyklech působení roztoku NaCl (tělesa označená S) a působení vody (tělesa označená SR). Snímky nahoře vlevo (bez oleje) a vpravo (s olejem). Vápenometakaolinové malty byly podrobeny 20 cyklům. Snímky dole vlevo (bez oleje) a vpravo (s olejem).

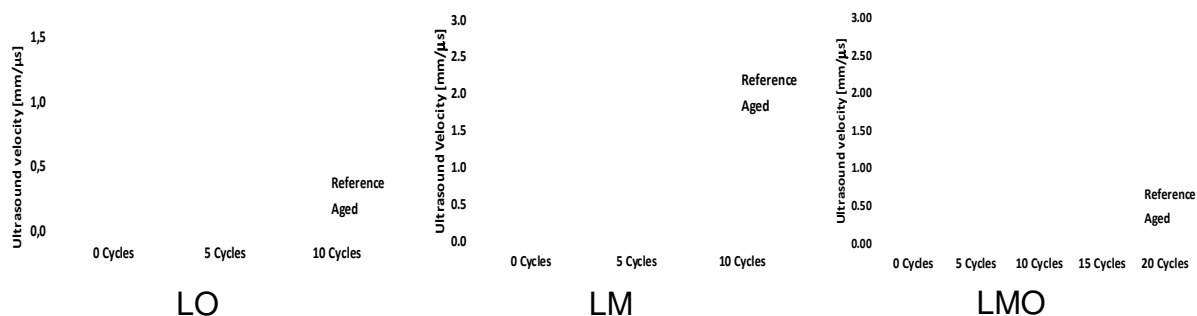
### **2.12.3.6. Odolnost vápenných malt proti cyklickému působení mrazu a tání**

Malty byly vystaveny různému počtu zmrazovacích cyklů podle své různé odolnosti vůči mrazu. Měnicí se vlastnosti sady třech zmrazovaných těles (označených F) byly po každém 5. cyklu a po skončení zkoušky porovnávány s vlastnostmi referenční sady, která byla uložena po celou dobu zkoušky pod vodou (označených W) a vlivem působení vody také měnila svoje vlastnosti. Třetí srovnávací sada nebyla podrobena degradačním cyklům a sloužila jako referenční pro mechanické zkoušky (označená N).

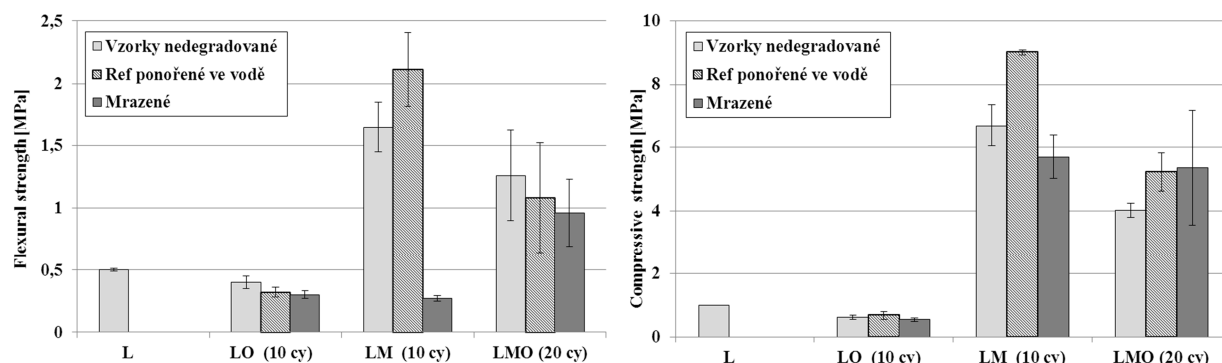
Čistě vápenná malta se rozpadla již po prvním zmrazení. U vápenné malty s olejem byla zkouška ukončena po desátém cyklu, nicméně zmrazovaná tělesa vykazovala jen lehkou degradaci (povrchové vymývání pojiva a drobení písku), což potvrzuje také velmi mírný pokles rychlosti šíření ultrazvukové vlny ve vzorcích patrné z **Obr. 16** a velmi mírný pokles pevností viz **Obr. 17** oproti pevnostem sady nedegradovaných stejně starých vzorků.

Na zmrazovaných vzorcích vápenometakaolinové malty se zhruba po třetím cyklu vytvořila síť drobných prasklinek, ze kterých při každém dalším zmrazení vyrůstaly krystalky ledu. Zkouška byla ukončena po 10. cyklu, kdy již zmrazovaná tělesa vykazovala závažná poškození, jak je patrné z průběhu ze změny rychlosti

ultrazvukového pulsu na **Obr. 16**, a jejich pevnost v tahu za ohybu klesla na 16% oproti stejně starým nezkoušeným tělesům. U referenčních těles uložených po celou dobu zkoušky ve vodě naopak narostla pevnost v tahu i v tlaku a zvýšila se rychlost šíření ultrazvukové vlny, což nasvědčuje příznivým účinkům vody na hydraulické pojivo, které se dále zpevňuje. Varianta vápenometakaolinové malty s olejem vydržela 20 zmrazovacích cyklů téměř beze změn jen s drobnými prasklinkami po 17. cyklu mrazení.



**Obr. 16** Změna rychlosti ultrazvukového pulsu s narůstajícím počtem zmrazovacích cyklů u zmrazovaných těles a dobou ponoření ve vodě u referenčních těles. Malty ve stáří 90 dnů.



**Obr. 17** Pevnost v ohybu a tlaková pevnost 90 dní starých malt stanovená po zmrazovací zkoušce.

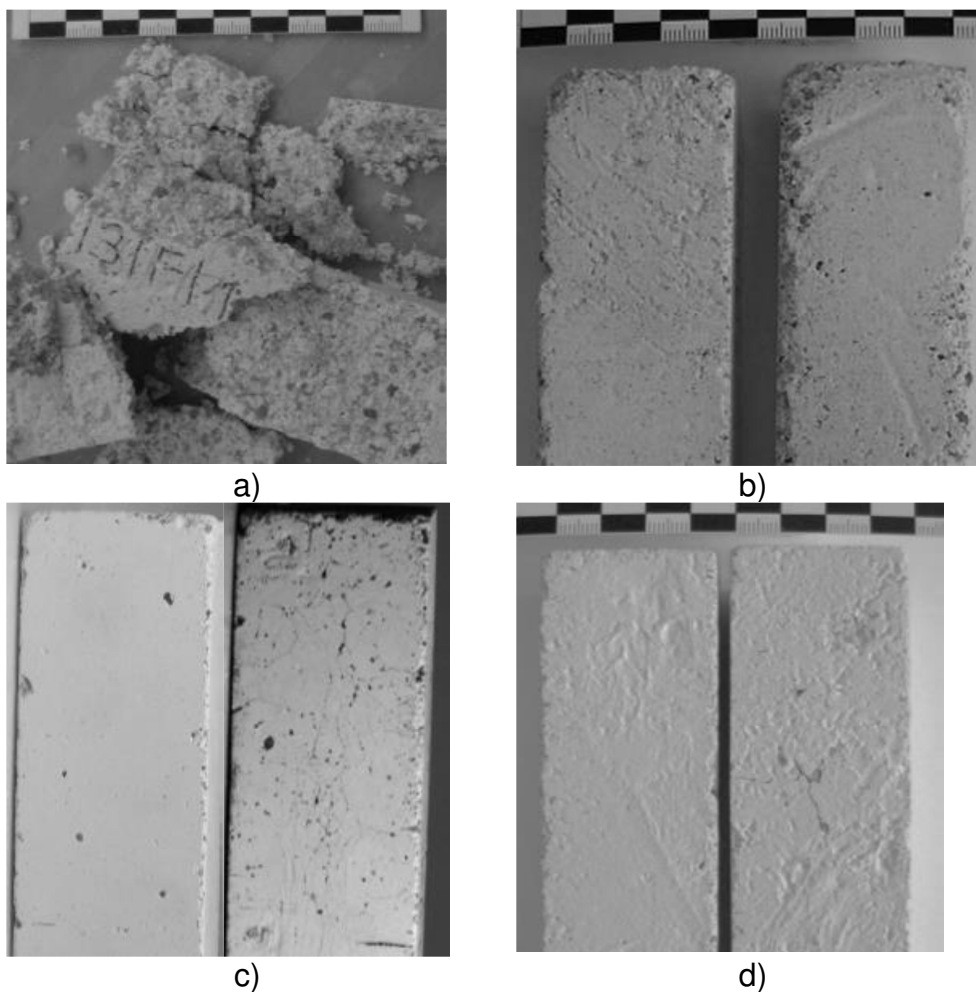
Poškození vzorků bylo dále zjišťováno stanovením otevřené pórovitosti a objemové hmotnosti za vakua na polovinách tělísek, zbylých po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu. Jak je patrné z **Tab. 20**, hodnoty pórovitostí i objemových hmotností jsou si velmi podobné, jak při vzájemném porovnání mrazených, referenčních vzorků ponořených ve vodě a stejně starých nedegradovaných těles, tak při porovnání jednotlivých maltových variant navzájem. Podobnost je dána podobným poměrem vody k pojivu, použitého v čerstvých maltách k dosažení stejné konzistence.

**Tab. 20** Otevřená pórovitost a objemová hmotnost malt (ve stáří 90 dnů) po zkoušce mrazuvzdornosti.

Označení malt	Podmínky uložení*	Pórovitost (%)	Objemová hmotnost (kg·m <sup>-3</sup> )
L	N	32,0 ± 0,2	1767 ± 18
LO	N	35,8 ± 0,3	1637 ± 7
	W	34,2 ± 0,2	1634 ± 2
	F	35,3 ± 0,6	1609 ± 15
LM	N	34,4 ± 0,1	1688 ± 20
	W	34,9 ± 0,1	1669 ± 4
	F	36,5 ± 0,3	1627 ± 8
LMO	N	32,4 ± 0,5	1611 ± 8
	W	35,9 ± 1,6	1680 ± 10
	F	36,4 ± 2,4	1594 ± 38

(\* podmínky uložení těles: nedegradované – N; ve vodě – W; zmrazované – F)

Po ukončení zkoušky mrazuvzdornosti vykazovaly vzorky malt různé známky degradace **Obr. 18**. Vápenná malta L se rozpadla po jednom zmrazovacím cyklu. Vápno s maltou a lněným olejem bylo podrobeno 10 cyklům, po kterých vzorky vykazovaly střední až závažnou degradaci projevující se sprašováním pojiva a opadem písku. Malta vápeno metakaolinová LM vykazovala po 3. cyklu výrazné známky degradace v podobě husté sítě jemných povrchových trhlin na povrchu vzorku. Bezprostředně po kroku zmrazování byly pozorovány velmi jemné ledové krystaly rostoucí z těchto trhlin. Po dokončení testu a konečném vysušení vzorky vydávaly při poklepání dutý zvuk. Vizuelní kontrolou lze odvodit, že metakaolinové malty vytvářejí povrchové trhliny, zatímco hydraulické vápenné malty vytvářejí hluboké trhliny. Vyšší hodnoty mechanické pevnosti cemento-vápenných malt mohou vysvětlovat, proč jsou trhliny vzniklé během stárnutí jemnější než trhliny pozorované u hydraulických vápenných malt.



**Obr. 18** Vzhled vzorků malty po zmrazovací zkoušce: a) L po 1 cyklu; b) LO po 10 cyklech; c) LM po 10 cyklech; d) LMO po 20 cyklech. Vpravo – těleso zmrazované, vlevo – těleso uložené po dobu zkoušky pod vodou.

Zvýšení životnosti vápenných malt může být dosaženo jednak zvýšením mechanické odolnosti pojiva a také zvýšením obsahu vzduchu v maltě. Vzduchové dutiny ovlivňují kapilární síť tím, že poskytují únikový prostor, kam může voda natéct a zmrznout, bez toho aniž by se struktura materiálu poškodila (Chatterji, 2003). Vzduchové bubliny ve vápenné maltě urychlují proces karbonatace, který má obrovský vliv na pevnosti malty. Je to zvláště důležité v případě malt se lněným olejem, protože se zdá, že olej na jedné straně karbonataci zpomaluje, ale na druhé straně splňuje podmínky k překonání tohoto problému tím, že v maltě zvyšuje obsah vzduchu.

#### 2.12.4. Shrnutí výsledků studia vápenných malt s metakaolinem a lněným olejem

Karbonatace čistě vápenné malty (pojené vzdušným vápnem) se projevila víceméně konstantním nárůstem pevností (ve sledovaném období do 1 roku stáří malty). Naměřená pevnost v tahu za ohybu stanovená na standardních tělesech se v období 90 až 360 měsíců pohybovala od 0,50 do 0,62 MPa a pevnost v tlaku od 1 do 1,70 MPa. Pórovitost vápenné malty zjištěná rtuťovou porozimetrií i hydrostatickým vážením se změnila zráním velmi málo a naměřené hodnoty se pohybovaly v 6. měsíci kolem 32 %. Výrazně se zráním nezměnila ani objemová hmotnost malty ( $1770 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Z výsledků rtuťové porozimetrie vyplývá, že pórovitost malty je ovlivněna větším množstvím smršťovacích trhlin a prasklin, které se v porozimetrii projeví v oblasti velikostí pórů od 10 do 100  $\mu\text{m}$ . Smršťovací praskliny byly pozorovány také opticky ve výbrusech pod optickým i elektronovým mikroskopem. Intenzivnější výskyt trhlin v čistě vápenné maltě vysvětluje její vysokou paropropustnost a rychlý transport kapalné vody. Koeficient kapilární absorpce s časem mírně vzrostl (ve 180 dnech na  $24 \text{ (kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1/2})$ ). Čistě vápenná malta nasycená vodou nebyla mrazuvzdorná (rozpadla se již po 1. cyklu zmrazení a rozmrazení). Cyklickým střídáním máčení malty v roztoku soli NaCl (3 % hm.) a vysoušení došlo po 15 cyklech k masivnímu rozpadu malty (opadáváním materiálu z povrchu zkušebního tělesa).

Vápenometakaolinová malta tvrdne v důsledku karbonatace i hydratace. Převaha jedné nebo druhé reakce záleží zejména na vlhkosti vzduchu v okolním prostředí. Prezentované laboratorní experimenty proběhly v prostředí spíše suchém (cca 65 % RH a 23 °C). Vývoj pevností vápenometakaolinové malty v tomto prostředí se projevil vysokými počátečními pevnostmi v tahu za ohybu i v tlaku, které vystřídal pokles pevnosti v tahu za ohybu mezi 3. a 6. měsícem zrání malty. Dobré počáteční mechanické vlastnosti malty lze vysvětlit poměrně rychlou pucolánovou reakcí. Podle výsledků termické analýzy je v malém tělísku ( $20\times 20\times 100 \text{ mm}$ ) veškerý hydroxid vápenatý (vápno) zreagován do půl roku zrání malty. Z mikroskopického pozorování vyplývá, že vápenometakaolinové pojivo je dobře vázáno na zrna písku a malta je mnohem méně poškozena smršťovacími prasklinami než malta ze vzdušného vápna. Objemová hmotnost malty se pohybovala kolem  $1690 \text{ (kg}\cdot\text{m}^{-3})$  a pórovitost kolem 34 %, přičemž velikost pórů pojiva se kvůli tvorbě CSH posunula k průměrům menším než 100 nm. Hutnější struktura vedla k pomalejšímu průniku vody do malty, nicméně u více vyztužené malty se absorpce vody mírně zrychlila. Již v nižších stupních vyztužení (90 dní) malta dobře odolávala opakovanému působení solného roztoku NaCl (máčení malty v solném roztoku v kombinaci s vysoušením prosolené malty). Zkouška pevnosti malty po 20 cyklech působení NaCl prokázala zpevňující (cementační) účinek této soli. Degradace vlivem roztoku soli se projevila jen opticky na povrchu tělesa, a to mírnou eflorescencí - výkvěty, mírnou povrchovou ztrátou materiálu a vymytím pojiva. Dlouhodobější máčení malty ve vodě se příznivě projevilo na nárůstu pevnosti zrající malty. Působením cyklického střídání mrazu a tání ve vodě se na maltě brzy vytvořila síť povrchových prasklinek. Ohybová pevnost

malty v důsledku mrazových cyklů významně klesla, po 10. cyklu až na 16 % pevnosti nedegradované stejně staré malty.

Vlastnosti vápenometakaolinové malty s olejem určuje hydrofobní charakter Iněného oleje a patrně také sloučeniny vznikající chemickou reakcí vápenného hydrátu, metakaolinu a oleje. Počáteční ohybové pevnosti této malty byly poměrně vysoké (1,2 MPa ve 14 dnech na tělesech 20×20×100 cm). Následující nárůst pevností byl již jen velmi pozvolný. Oproti vápenometakaolinové maltě nedošlo k poklesu ohybové pevnosti mezi 28 a 180 dnem zrání. Struktura malty nebyla nijak výrazně poškozena smrštěním a zrna písku jsou dobře vázána na pojivo. Příklad oleje do malty sice trochu zvýšil obsah vzduchu v čerstvé maltě, avšak na pórovitosti zatvrdlé malty se tento účinek projevil jen minimálně. Hydrofobní vlastnosti oleje výrazně zpomalily absorpci vody, přičemž do více vyzrálé malty voda penetrovala ještě pomaleji. Také paropropustnost malty je v 90 dnech zrání velmi nízká. Výrazně nižší absorpce vody i solného roztoku příznivě ovlivnila odolnost vápenometakaolinové malty s olejem vůči působení roztoku chloridu sodného a také vůči mrazu. Tělesa vydržela 20 zmrazovacích cyklů téměř beze změn jen s drobnými povrchovými prasklinkami. Zjištěná pevnost referenční sady uložené po dobu zkoušky mrazem pouze ve vodě byla v podstatě stejná jako pevnost sady nedegradovaných vzorků této malty.

1,5% přídavek oleje do čerstvé směsi malty pojené vzdušným vápnem ovlivnil průběh tvrdnutí (karbonatace) této malty. Pevnost v tahu za ohybu stanovená na tělesech 20×20×100 cm vzrostla v období do 60. dne, poté vývoj pevnosti malty stagnoval, až lehce klesl. Stejný trend se projevil ve vývoji ohybových pevností na tělesech standardní velikosti, kde byla naměřená pevnost ve stářích 90 a 180 dnů téměř stejná, zatímco tlaková pevnost se do 180. dne zrání více než zdvojnásobila (z 0,6 MPa na 1,6 MPa). V matrici pojiva se objevilo méně smršťovacích prasklinek a trhlin a zároveň výrazně více kulatých pórů ve srovnání s maltou bez oleje, které svědčí o provzdušňovacím účinku přísady (pozorovaném již na vlastnostech čerstvé malty). Pórovitost malty se pohybovala kolem 34 %. Absorpce vody je výrazně zpomalena hydrofobním účinkem oleje a ve více vyzrálé maltě (půl roku) byl koeficient kapilární absorpce ještě nižší. Nízká absorpce vody i roztoku NaCl významně zvýšila odolnost malty vůči účinkům cyklického namáčení a vysoušení malty. Také degradační účinek mrazu na maltu je velice mírný, což dokazuje velmi malý pokles pevností zkoušených těles oproti pevnostem sady nedegradovaných stejně starých vzorků této malty.

## **2.13. Optimalizované vápenné malty s metakaolinem a provzdušňovacími přísadami**

Ve snaze zvýšit mrazuvzdornosti vyvíjených vápenných malt se navazující laboratorní experimenty zaměřily na možnosti úpravy vlastností vápenné malty pomocí pucolánové příměsi k vápnu a zároveň pomocí provzdušňovacích přísad, kterých se za tímto účelem využívá v technologii betonu a při výrobě mrazuvzdorných cementových malt, nicméně jejich vliv na vlastnosti vápeno metakaolinových malt nebyl dosud zkoumán.

### **2.13.1. Materiál a příprava malt**

Laboratorní zkoušky probíhaly na zkušebních tělesech o rozměrech 20×20×100 cm a kruhových tělesech o průměru 7 cm a výšce 1,2 cm, dále byl pozměněn poměr mísení pojiva s kamenivem. Nově zvolený poměr 1:1,5 obj., odpovídá hmotnostnímu poměru složek přibližně 1:5. Křemičitý písek byl nahrazen přírodním maltovým pískem granulometrie 0/4 mm (EUROVIA Kamenolomy, a.s., pískovna Straškov). Spektrum vápenných pojiv se omezilo na 3 typy. První referenční sada obsahuje pouze vápenný hydrát CL 90 Čerťák (Vápenka Čertovy schovy, a.s.), druhá a třetí sada obsahuje 75 %hm. vápenného hydrátu doplněného o 25 %hm. pucolánovou příměsí, metalupkem Mefisto L05 nebo metakaolinem Mefisto K05, z produkce Českých lupkových závodů, a.s.. Za účelem zvýšení mrazuvzdornosti byla do základní směsi pojiva a plniva přidána jedna ze dvou provzdušňovacích přísad v množství 0,05 % nebo 0,5 % z celkové hmotnosti suché směsi. Přísada Berolan LP 50 (Berolan® Vertriebs-Ges.m.b.H) nebo Ligaphob N90 (Peter Greven GmbH & Co. KG). V laboratorním programu bylo studováno celkem o 15 různých maltových směsích. Složení malt a informace o zpracovatelnosti čerstvých směsí jsou uvedeny v **Tab. 21**.

#### **2.13.1.1. Reaktivita a stabilita přísad**

Reaktivita a stabilita provzdušňovacích přísad byla nejprve ověřena tzv. foam index testem, kterým se zjišťuje reaktivita přísad s pojivy a stabilita pěny vytvořené přísadou. Test byl proveden podle metodiky (Izaguirre a kol., 2009). Provzdušňovací přísada Ligaphob N90, jejíž chemickou podstatu tvoří sodná sůl kyseliny olejové, se snadno rozpouští ve vodě za vzniku čirého roztoku, po promíchání vzniká bohatá pěna, která je vysoce stabilní i po 5 min odstavce míchání. Přídavek suchého hydrátu  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  objem pěny výrazně snižuje. Zároveň vznikají mýdlové vločky, které sedimentují na dno nádoby. Velmi podobná je stabilita pěny oleátu sodného po přidavku různých druhů metakaolinů (Mefisto L05, Mefisto K05). Pěna poměrně rychle opadává, její úbytek je však v porovnání s účinkem vápna menší.

Druhá z testovaných provzdušňovacích přísad, Berolan LP 50 je na bázi dodecyl sulfátu sodného. Rozptýlením přísady ve vodě vzniká bíle zakalený roztok. V porovnání s oleátem sodným vzniká výrazně méně pěny, ta navíc velmi rychle mizí. Přidáním vápenného hydrátu vzniká jemná bílá sraženina, která sedimentuje na



dno. Také přídavek metakaolinů ovlivňuje stabilitu pěny, která mizí rychle, avšak výrazně pomaleji než po přidání vápna nebo CaCl<sub>2</sub>. Metakaolin rozptýlený v suspenzi sedimentuje na dno nádoby.

Zkouška stability pěny potvrdila, že obě studované provzdušňovací přísady mají tendenci v roztoku reagovat s Ca<sup>2+</sup> ionty za vzniku sraženiny. Při přípravě čerstvé malty je proto třeba počítat s tím, že část provzdušňovací přísady se vysráží a ztratí schopnost maltu provzdušnit (Stolz, 2008). Přísady proto budou do optimalizovaných malt přidávány ve dvou koncentracích: 0,05 a 0,5 % z hmotnosti suché směsi.

Čerstvá malta byla připravena stejným postupem jako vápeno-metakaolinová malta LM (**kapitola 2.5.1.**). Důraz byl kladen zejména na důkladné promíchání provzdušňovací přísady s malým množstvím suchého pojiva, až následně bylo celé množství pojiva homogenizováno s kamenivem. Množství záměsově vody bylo upraveno s ohledem na praktické využití studovaných malt na stavbě, proto byl rozliv čerstvých malt upraven v rozmezí 140 ±50 mm (maltu této konzistence je možné zpracovat pomocí zednické lžíce). Vzorky čerstvých malt byly po odformování uloženy v laboratorním prostředí s řízenou teplotou vzduchu 20 ±3 °C a relativní vlhkostí vzduchu 65 ±5 % a po dobu prvních 28 dní zrání byly 1x denně kropeny destilovanou vodou z rozprašovače.

**Tab. 21** Složení a zpracovatelnost čerstvých malt.

Označení malty	Hmotnostní poměr složek	Druh a množství přísady (hm.%)	Vodní součinitel (w/ds)	Obsah záměsově vody (hm.%)	Objemová hmotnost (g.cm <sup>-3</sup> )	Obsah vzduchu (obj.%)		
<b>L</b>		-	-	0,85	19,3	2,07 (±0,1)	6,1 (±0,3)	
0,05_LP50	CL90:agg (1:5)	Berolan	0,05	0,98	16,7	1,97 (±0,1)	7,0 (±0,3)	
0,5_LP50		LP50	0,5	1,0	16,5	1,93 (±0,1)	7,4 (±0,2)	
0,05_N90		Ligapho	0,05	0,90	18,3	2,05 (±0,2)	3,5 (±0,2)	
0,5_N90		b N90	0,5	0,92	18,2	1,98 (±0,2)	4,1 (±0,1)	
<b>LL05</b>			-	-	0,94	17,4	2,16 (±0,1)	3,2 (±0,3)
0,05_LP50		CL90:ML05:agg (0,75:0,25:5,1)	Berolan	0,05	1,0	16,8	2,11 (±0,0)	4,7 (±0,3)
0,5_LP50	LP50		0,5	1,0	16,5	2,10 (±0,1)	5,2 (±0,4)	
0,05_N90	Ligapho		0,05	1,0	17,2	2,08 (±0,2)	3,4 (±0,1)	
0,5_N90	b N90		0,5	1,1	17,8	2,04 (±0,1)	4,2 (±0,2)	
<b>LK05</b>			-	-	0,92	17,6	2,18 (±0,0)	3,5 (±0,2)
0,05_LP50	CL90:MK05:agg (0,75:0,25:5,1)		Berolan	0,05	1,0	16,8	2,04 (±0,1)	6,2 (±0,5)
0,5_LP50		LP50	0,5	1,1	16,5	2,02 (±0,0)	9,1 (±0,9)	
0,05_N90		Ligapho	0,05	1,1	17,2	2,08 (±0,1)	3,0 (±0,7)	
0,5_N90		b N90	0,5	1,1	18,2	1,97 (±0,0)	5,9 (±0,2)	

\*CL90 = vzdušné vápno; ML05 = metalupek Mefosto L05; MK05 = metakaolin MK05; agg = písek; LP50 = přísada Berolan LP 50; N90 = přísada Ligaphob N90; w/ds = poměr vody ku celkové hmotnosti suché směsi.

### **2.13.1.2. Vlastnosti čerstvých malt**

Z informací o zpracovatelnosti čerstvých směsí uvedených z **Tab. 21** vyplývá, že vodní součinitel (w/b) čerstvých malt nebyl ovlivněn ani druhem pucolánu, ani druhem přísady, a pohybuje se v rozmezí 0,85 – 1,1. Při dobré zpracovatelnosti čerstvé malty (s rozlivem 140±50 mm) potřebují nejméně vody malty s 0,5% dávkou přísady Berolan LP50 (16,5%), přičemž druh pucolánu na to nemá vliv. Mírně vyšší množství záměsové spotřebují malty s 0,05 a 0,5 % dávkou přísady Ligaphob N09, což potvrzuje chování vápenných malt s hydrofobní přísadou (Vejmelková a kol., 2012) i se 1,5 % lněho oleje. Výrobce provzdušňovací přísady Ligaphob N90 uvádí, že s tato přísada má smáčivý účinek - působí jako plastifikátor a s její rostoucím množstvím se snižuje spotřeba záměsové vody (Stolz, 2008), tento trend nelze z výsledků ani potvrdit ani vyvrátit. Malty s pucolánovou příměsí pojiva bez provzdušňovacích přísad potřebují k dosažení srovnatelné konzistence mírně vyšší množství záměsové vody, což je pravděpodobně způsobeno velikostí částic a a měrným povrchem jednotlivých typů pojiv. Rozdíly v objemových hmotnostech čerstvých malt jsou minimální. Přesto se ukazuje, že malty modifikované provzdušňovacími přísadami mají v porovnání s referenční maltou nižší objemovou hmotnost, která klesá s množstvím přísady, přičemž na to nemá vliv ani druh pucolánu, ani druh přísady. Nejnižší objemovou hmotnost mají malty s 0,05 % přísady Ligaphob N90.

Účinkem obou provzdušňovacích přísad nepatrně narostl obsah vzduchu v čerstvých maltách, přesto je třeba výsledky zkoušky považovat spíše za orientační, a doporučit opakování měření u jednoho typu malty minimálně na 6 vzorcích. Z výsledků v **Tab. 21** je patrné, že vyšší množství přísad vytvoří a stabilizuje vyšší množství vzduchu v čerstvé maltě, přičemž u malt s přísadou Berolan LP50 je tento efekt výraznější. Při porovnání množství vytvořené pěny ve foam index testu to nebylo patrné. Nárůst obsahu vzduchu v čerstvé maltě po použití provzdušňovací přísady Ligaphob N90 odpovídá zjištění (Izaguirre a kol., 2010), kteří oleát sodný přidávali v množství v 0,3 a 2,4 % do vápenné malty (1:1 obj.).

### **2.13.2. Metodika zkoušek**

Účinek pucolánových příměsí a provzdušňovacích přísad byl sledován laboratorními zkouškami zaměřenými na pórovitost malt (pórovitost přístupná vodě za atmosférického a za sníženého tlaku), na transport kapalně vlhkosti a vodní páry porézním systémem (kapilární nasákavost vodou, rychlost vysychání, propustnost pro vodní páry), na mechanické vlastnosti (pevnost v tahu za ohybu a v tlaku) a na odolnost malt vůči mrazovým cyklům. Vlastnosti byly zjišťovány na připravených laboratorních tělesech 20×20×100 mm, resp. jejich polovinách a kruhových tělesech o průměru 70 mm a výšce 12 mm a to ve stáří 28, 90 a 180 dní od jejich přípravy. Při provádění zkoušek se uplatnily stejné metodiky jako při studiu vápenných malt s metakaolinem a lněným olejem. Následující text popisující metodiky zkoušek se proto odkazuje na předchozí a podrobněji jsou níže popsány pouze odlišné postupy zkoušek. Přehled laboratorních zkoušek studia vápenných malt s metakaolinem

a provzdušňovacími přísadami (údaje o počtech, rozměrech a stáří těles) shrnuje **Tab. 22**.

**Tab. 22** Přehled laboratorních zkoušek studia vápenných malt s metakaolinem a provzdušňovacími přísadami.

Měřená vlastnost	Rozměry těles (mm)	Stáří těles (dny)	Počet těles
Dynamický modul pružnosti	20×20×100	28, 90	6
Pevnost v tahu za ohybu	20×20×100	28, 90	6
Pevnost v tlaku	20×20×40	28, 90	6
Otevřená pórovitost přístupná vodě za atmosférického a za sníženého tlaku	20×20×40	28, 90	3
Vysokotlaká rtuťová porozimetrie	z poloviny 20×20×100	28, 90	2
Kapilární nasákavost vodou	20×20×40	28, 90	3
Rychlost vysychání	20×20×40	28, 90	3
Propustnost pro vodní páru	disk, r = 70, v = 12	90	6
Zkouška mrazuvzdornosti, tání vzorků ve vodě	20×20×100	90	6
Zkouška mrazuvzdornosti, tání vzorků na vzduchu	20×20×100	90	6

### **2.13.2.1. Mechanické vlastnosti**

Zkoušení mechanických vlastností předcházelo vysušení zkušebních těles v sušárně při teplotě 60 °C do konstantní hmotnosti. Pevnost v tahu za ohybu a v tlaku byla zkoušena stejným způsobem jako v **kapitole 4.1.2.1**.

### **2.13.2.2. Popis porézní struktury a transportu vlhkosti**

Otevřená pórovitost přístupná vodě za atmosférického (po 48hodinovém ponoření ve vodě) a za sníženého tlaku byla stanovena hydrostatickým vážením postupem v **kapitole 4.1.2.2**.

### **2.13.2.3. Koeficient kapilární absorpce**

Absorpce vody kapilárním vztlínáním, postup se neliší od **kapitoly 4.1.2.3**. Tělesa byla pravidelně vážena, dokud absorpce nedosáhla asymptotické hodnoty. Křivky absorpce vody pomocí kapilárních křivek byly získány vynesemím hmotnosti vody

absorbované na jednotku plochy ( $\Delta m/S$ ) proti druhé odmocnině času. Kapilaritní koeficient odpovídá sklonu počátečního lineárního úseku těchto křivek.

#### 2.13.2.4. Propustnost pro vodní páry

Propustnost malt pro vodní páru byla vyjádřena faktorem difúzního odporu  $\mu$  (–) a koeficientem difúze pro vodní páru  $D$  ( $m^2 \cdot s^{-1}$ ) postupem dle standardů RILEM II.1. Test byl proveden metodou suché a mokré misky. Příprava vzorků do misky je popsána v kapitole 4.1.2.4. Informace o teplotně vlhkostních podmínkách stanovení propustnosti malt pro vodní páru metodou suché a mokré misky jsou shrnuty v Tab. 23.

**Tab. 23** Podmínky stanovení propustnosti malt pro vodní páru metodou suché a mokré misky.

Miska	Medium v misce pod vzorkem	RH vzduchu v misce pod vzorkem (%)	stálá RH vzduchu v okolí misek	RH vzduchu v okolí misek (%)	Teplota vzduchu v okolí misek (°C)
<b>Suchá</b>	vysušený granulovaný $CaCl_2$	0	nasyc. roztok $CaCl_2$	33	22
<b>Mokrá</b>	nasycený roztok $KNO_3$	55	nasyc. roztok $NaBr$	33	22

#### 2.13.2.5. Rychlost vysychání malt

Zkouška rychlosti vysychání byla provedena dle RILEM II. 5. Na 4 boční stěny vysušených trámečků  $20 \times 20 \times 40$  mm byla nanášena vrstva paronepropustného nátěru (mikrokrytalický vosk s parafínem). Vzorky byly následně na 48 hodin ponořeny do destilované vody. Následně byla i podstava vodou nasycených vzorků opatřena paronepropustnou folií (Parafilm). Vzorky byly zváženy a umístěny na rošt do boxu s roztokem uhličitanu draselného udržujícím konstantní relativní vlhkost  $55 \pm 5$  %. Odpařování vlhkosti probíhalo při konstantní teplotě vzduchu  $22 \pm 3$  °C. Vzorky byly ve zvolených intervalech váženy a byl sledován úbytek hmotnosti v závislosti na čase.

#### 2.13.2.6. Zkouška mrazuvzdornosti

Odolnost malt vůči cyklům zmrazování a tání byla zkoušena dvěma různými postupy (i) a (ii) vždy na 3 zkušebních zmrazovaných a 3 zkušebních referenčních tělesech o velikosti  $20 \times 20 \times 100$  mm, ve stáří 90 a 180 dnů od přípravy. Před začátkem zkoušky, byla tělesa (do té doby uložená na vzduchu v laboratorních podmínkách) vysušena do konstantní hmotnosti, podrobena měření vstupních charakteristik ve vysušeném stavu, následně ponechána 72 hodin v destilované vodě k nasycení

vodou a následně opět podrobena měření výchozích charakteristik ve vodou nasyceném stavu.

(i) dle prvního postupu byla vodou nasycená zmrazovaná tělesa ihned zmrazena v předem temperovaném mrazicím boxu. Jeden zkušební cyklus zahrnoval čtyřhodinové zmrazení zmrazovaných těles při  $-20 \pm 5$  °C a minimálně dvě hodiny tání v destilované vodě o teplotě  $20 \pm 5$  °C. Mimo zmrazování byla zkušební zmrazovaná tělesa (F) uchována pod vodou a zkušební referenční tělesa (W) byla pod vodou po celou dobu zkoušky (cca 30 dnů). Zkouška zahrnovala 15 cyklů zmrazení a tání (v případě rozpadu trámečků méně).

(ii) dle druhého postupu byla zmrazovaná tělesa po nasycení vodou jednotlivě uzavřena do silné PE folie a ihned mrazena v předem temperovaném mrazicím boxu. Jeden zkušební cyklus zahrnoval čtyřhodinové mražení zkoušených těles při  $-20 \pm 5$  °C a minimálně dvě hodiny tání na vzduchu o teplotě  $20 \pm 5$  °C. Mimo zmrazování byla zkušební zmrazovaná (F) i referenční tělesa (A) uchovávána na vzduchu stále uzavřena v PE foliích. Zkouška zahrnovala 25 cyklů zmrazení a tání.

Stupeň poškození zmrazovaných i referenčních těles vzorků byl po každém 5. cyklu měřen v podélném rozměru trámečku ultrazvukem, byly zaznamenány změny rozměrů těles a objemové hmotnosti, stav těles byl v průběhu zkoušky fotodokumentován. Po ukončení posledního cyklu byly vzorky vysušeny do konstantní hmotnosti a podrobeny zkoušce pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu.

### **2.13.3. Vlastnosti studovaných malt**

Mechanické vlastnosti **Tab. 24** prezentuje výsledky pevností v ohybu, pevností v tlaku a dynamický modul pružnosti pro malty staré 28 a 90 dní. Malta s příměsí Mefisto L05 měla po 28 dnech mírně vyšší pevnost v tahu za ohybu, ale po 90 dnech již mírně nižší než vápenná malta. Malta s příměsí K05 měla po 28 i po 90 dnech zraní pevnost mírně nižší než čistě vápenná malta. Odchylna od pevnosti v tahu za ohybu čistě vápenné malty, pokud je zrající malta pečlivě ošetřována kropením povrchu vodou po dobu 28 dní, je u malt s pucolánovou příměsí L05 nebo K05 malá. Pevnost v tahu za ohybu obou malt s pucolánovými příměsemi klesla po 90. dni zraní malt (ve srovnání s pevností těchto malt po 28 dnech zraní) v prostředí 20 °C a 65 % RH. U malt s příměsemi L05 a K05 je tento pokles velmi jemný (zanedbatelný – do 10%). V rámci studovaných pucolánových příměsí měla mírně vyšší pevnost v tahu za ohybu malta s pucolánem L05. Pevnosti v tlaku byly vždy vyšší u malt obsahujících některou z pucolánových příměsí pojiva ve srovnání s čistě vápennou maltou. Příklad Mefisto L05 a K05 způsobil přibližně o 260 % vyšší pevnost v tlaku vůči čistě vápenné maltě.

**Tab. 24** Pevnost v ohybu, pevnost v tlaku a dynamický modul pružnosti (malty ve stáří 28 a 90 dní).

Označení malt	Pevnost v ohybu (MPa)		Pevnost v tlaku (MPa)		Dynamický modul pružnosti (GPa)	
	28 d	90 d	28 d	90 d	28 d	90 d
<b>L</b>	1,1 ±0,1	1,3 ±0,1	1,7 ±0,2	2,3 ±0,1	5,5 ±0,3	6,9 ±0,2
0,05_LP50	1,2 ±0,2	1,3 ±0,2	1,4 ±0,2	2,1 ±0,2	6,1 ±0,3	6,8 ±0,4
0,5_LP50	0,7 ±0,1	0,7 ±0,1	0,9 ±0,1	1,1 ±0,2	3,6 ±0,3	4,0 ±0,4
0,05_N90	1,3 ±0,2	1,6 ±0,2	1,4 ±0,1	2,8 ±0,1	6,6 ±0,1	8,9 ±0,4
0,5_N90	0,4 ±0,0	0,4 ±0,0	0,6 ±0,1	0,8 ±0,1	2,6 ±0,2	3,0 ±0,1
<b>LL05</b>	1,2 ±0,1	1,1 ±0,1	4,5 ±0,3	4,0 ±0,3	6,7 ±0,3	5,8 ±0,2
0,05_LP50	1,3 ±0,1	2,1 ±0,2	5,0 ±0,3	6,9 ±0,3	5,8 ±0,4	10,0 ±0,2
0,5_LP50	1,4 ±0,2	1,0 ±0,0	4,4 ±0,2	2,8 ±0,2	6,1 ±0,4	4,5 ±0,1
0,05_N90	1,4 ±0,1	1,3 ±0,2	4,5 ±0,3	4,4 ±0,3	6,7 ±0,2	7,3 ±0,5
0,5_N90	1,3 ±0,1	1,0 ±0,1	4,1 ±0,3	4,2 ±0,2	5,4 ±0,2	4,7 ±0,2
<b>LK05</b>	0,9 ±0,1	0,9 ±0,1	4,6 ±0,3	4,3 ±0,2	5,2 ±0,2	4,9 ±0,2
0,05_LP50	1,2 ±0,1	1,1 ±0,2	3,0 ±0,3	3,9 ±0,2	4,9 ±0,4	6,1 ±0,5
0,5_LP50	1,1 ±0,2	0,8 ±0,1	3,4 ±0,2	1,7 ±0,2	5,1 ±0,4	4,1 ±0,4
0,05_N90	0,8 ±0,1	0,6 ±0,2	3,0 ±0,3	2,9 ±0,3	3,7 ±0,2	3,5 ±0,4
0,5_N90	0,7 ±0,1	0,6 ±0,1	2,5 ±0,3	2,8 ±0,2	3,2 ±0,2	4,9 ±0,2

**Tab. 25** zobrazuje procentuální změny hodnot pevností v tahu za ohybu a pevností v tlaku malt ve stáří 28 a 90 dní. Procentuální změna je vypočítána vždy vůči referenční maltě daného složení bez provzdušňovacích přísad. Pokud jde o vliv provzdušňovacích přísad, z výsledků uvedených v **Tab. 24** je zřejmé, že lepších pevností, ať už se jedná o pevnost v tahu za ohybu nebo v tlaku, dosahují malty s menším přídatkem provzdušňovací přísady (v množství 0,05 % z hmotnosti suché maltové směsi včetně kameniva).

Konkrétně se menší dávky provzdušňovacích přísad projeví na pevnosti v tahu za ohybu malt takto:

- u vápenné malty se přídatek Berolanu LP50 na ohybové pevnosti téměř neprojevil. Přísada Ligaphob N90 zvýšila ohybovou pevnost malty, a to až o 70%.
- u vápenopucolánové malty s příměsí L05 přísada Berolanu LP50 zvýšila pevnost až o 90%, přísada Ligaphobu N90 též zvýšila pevnost, ale pouze o 30%.

- u vápenopucolánové malty s příměsí K05 způsobila přísada Berolanu LP50 zvýšení ohybové pevnosti o 30%, zatímco přísada Ligaphobu N90 snížila ohybovou pevnost o 30%.

Pokud jde o pevnost v tlaku, působení přísad je následující:

- u vápenné malty přídavek menší dávky Berolanu LP50 nezvýšil pevnost, snížení je do 20%. Příklad přísada Ligaphob N90 zvýšila pevnost malty, a to až o 70%.
- u vápenopucolánové malty s příměsí L05 přísada menší dávky Berolanu LP50 zvýšila pevnost až o 70%, menší dávka Ligaphobu N90 též zvýšila pevnost, ale pouze o 40%.
- u vápenopucolánové malty s příměsí K05 způsobila přísada menší dávky obou zkoušených přísad snížení pevnosti v tlaku cca do 33%.

Malty s vyšším přídavkem provzdušňovacích přísad (0,5 % z hmotnosti suché maltové směsi včetně kameniva) měly obecně horší pevnosti v tlaku oproti maltám s nižší dávkou přísady.

**Tab. 25** Procentuální změny pevností v ohybu a v tlaku vůči referenčním maltám v důsledku přídavku provzdušňovacích přísad pro malty staré 28 a 90 dní.

Označení malt	28 dní		90 dní	
	Pevnost v ohybu (MPa)	Pevnost v tlaku (MPa)	Pevnost v ohybu (MPa)	Pevnost v tlaku (MPa)
<b>L</b>	-	-	-	-
0,05_LP50	2%	-20%	-6%	-5%
0,5_LP50	-44%	-26%	-43%	-46%
0,05_N90	60%	29%	67%	73%
0,5_N90	-86%	-46%	-87%	-85%
<b>LL05</b>	-	-	-	-
0,05_LP50	4%	10%	89%	73%
0,5_LP50	10%	-12%	-102%	-103%
0,05_N90	-3%	1%	34%	42%
0,5_N90	-9%	-9%	-31%	-6%
<b>LK05</b>	-	-	-	-
0,05_LP50	27%	-33%	23%	-11%
0,5_LP50	19%	-24%	-8%	-62%
0,05_N90	-12%	-34%	-28%	-33%
0,5_N90	-29%	-45%	-35%	-35%

**Tab. 26** shrnuje významnější změny pevností v tahu za ohybu a v tlaku pro sledované malty modifikované dávkou 0,05 % provzdušňovací přísady (změny pevnosti menší než 30% byly pominuty) ve stáří malt 90 dnů. V případech, kdy by bylo výhodné zvýšit provzdušňovací přísadou pevnost malty, zdá se být vhodné použít pro čistě vápennou maltu L spíše přísadu Ligaphob N90, zatímco pro maltu s příměsí L05 nebo K05 spíše přísadu Berolan LP50.

**Tab. 26** Procentuální změna pevností vůči referenční maltě v důsledku přidavku provzdušňovacích přísad v dávce 0,05 %. (Uvedeny jsou pouze změny nad 30 %, hodnoty jsou zaokrouhlené).

Označení malt	Typ malty	90 dní	
		Pevnost v tahu za ohybu (MPa)	Pevnost v tlaku (MPa)
<b>L</b>	čistě vápenná	-	-
0,05_LP50	s Berolanem LP50	0	0
0,05_N90	s Ligaphobem N90	zvýšení o 70 %	zvýšení o 70 %
<b>LL05</b>	malta s příměsí L05	-	-
0,05_LP50	s Berolanem LP50	zvýšení o 90 %	zvýšení o 70 %
0,05_N90	s Ligaphobem N90	zvýšení o 34%	zvýšení o 40 %
<b>LK05</b>	malta s příměsí LK05	-	-
0,05_LP50	s Berolanem LP50	0	0
0,05_N90	s Ligaphobem N90	0	0

### 2.13.3.1. Pórovitost přístupná vodě za atmosférického a sníženého tlaku

**Tab. 27** shrnuje výsledky měření pórovitosti přístupné vodě za atmosférického tlaku a za sníženého tlaku. Malty jsou v kategoriích seřazeny podle rostoucího obsahu provzdušňovací přísady. Vzorky byly hydrostaticky váženy a následně byla vypočítána objemová hustota, otevřená pórovitost a množství absorbované vody (nasákavost).

Ze získaných hodnot vyplývá, že s rostoucím množstvím provzdušňovací přísady se snižuje hustota malty. Přídavek provzdušňovací přísady způsobuje hydrofobní chování malt a v důsledku změny úhlu smáčení je penetrace vody do malty horší, přičemž nejvýraznější změny jsou u malty s vyšším přídavkem Ligaphobu N90. Otevřená pórovitost malt s provzdušňovací přísadou odvozená z měření nasákavosti vodou za atmosférického tlaku je proto nižší ve srovnání s referenční maltou bez přísady.



Snížení tlaku umožnilo lepší penetraci vody do vzorků se změněnou smáčivostí (malty modifikované provzdušňovací přísadou), nicméně výrazně hydrofobní varianta, jako je malta s vyšší dávkou přísady Ligaphob N90, vykazovala sníženou otevřenou pórovitost i při těchto podmínkách měření. Většina vzorků modifikovaných provzdušňovací přísadou má při sníženém tlaku otevřenou pórovitost přístupnou vodě vyšší ve srovnání s referenční maltou.

**Tab. 27** Pórovitost přístupná vodě a nasákavost za atmosférického a za sníženého tlaku zjištěná u vzorků malt ve stáří 90 dní od přípravy.

Označení malty	Objemová hustota (kg.m <sup>-3</sup> )		Otevřená pórovitost (% obj.)		Nasákavost (% hm.)	
	atm. tlak	snížený tlak	atm. tlak	snížený tlak	atm. tlak	snížený tlak
<b>Lref</b>	1897 ±8	1903 ±6	21,5 ±0,5	28,5 ±0,2	11,3 ±0,3	14,9 ±0,1
0,05_LP50	1774 ±16	1780 ±15	19,3 ±0,4	32,6 ±0,4	10,9 ±0,3	18,3 ±0,3
0,5_LP50	1691 ±23	1699 ±22	12,8 ±0,7	35,3 ±0,8	7,6 ±0,5	20,8 ±0,7
0,05_N90	1837 ±15	1778 ±79	9,4 ±0,1	33,9 ±0,7	5,1 ±0,1	19,2 ±0,9
0,5_N90	1736 ±14	1745 ±13	7,5 ±0,3	22,1 ±0,3	4,3 ±0,2	12,7 ±0,3
<b>LL05</b>	1846 ±9	1848 ±9	26,3 ±0,4	30,1 ±0,3	14,2 ±0,3	16,3 ±0,3
0,05_LP50	1830 ±8	1879 ±39	23,3 ±0,2	30,2 ±0,5	12,7 ±0,1	16 ±0,3
0,5_LP50	1712 ±9	-	22,5 ±0,2	-	13,1 ±0,2	-
0,05_N90	1855 ±14	1825 ±57	23,9 ±0,3	32,7 ±0,9	12,8 ±0,2	17,9 ±0,6
0,5_N90	1719 ±7	1717 ±7	7,9 ±0,2	23,8 ±0,1	4,6 ±0,1	13,8 ±0,1
<b>LK05</b>	1886 ±11	1887 ±14	24,9 ±0,5	28,6 ±0,5	13,2 ±0,3	15,1 ±0,4
0,05_LP50	1794 ±20	1795 ±2	23,2 ±0,4	31,9 ±0,7	12,9 ±0,4	17,8 ±0,6
0,5_LP50	1722 ±44	1730 ±9	23,1 ±0,2	33,6 ±0,3	13,4 ±0,3	19,4 ±0,3
0,05_N90	1829 ±15	1826 ±12	23,9 ±0,4	30,2 ±0,5	13 ±0,3	16,5 ±0,4
0,5_N90	1705 ±13	1704 ±13	12,9 ±0,2	26,4 ±0,2	7,5 ±0,1	15,5 ±0,2

Za atmosférického tlaku je pórovitost referenční vápenné malty přístupná vodě 21,5% a nasákavost 11,3%. Obě dvě studované pucolánové příměsi mírně zvyšují pórovitost a nasákavost malt až na hodnotu pórovitosti 26% a nasákavosti 14%. Výraznější efekt má na nárůst pórovitosti příměs L05. Příměs K05 zvyšuje pórovitost a nasákavost vápenné malty o něco málo méně. Vzhledem k tomu, že provzdušňovací přísady způsobují hydrofobní chování modifikované malty, za atmosférického tlaku se nasákavost malt a pórovitost přístupná vodě vlivem přísad nezvýšila.

Metoda měření pórovitosti přístupné vodě za sníženého tlaku byla použita zejména pro hodnocení pórovitosti malt s hydrofobními vlastnostmi. Jak ukazuje **Tab. 27**, při sníženém tlaku je pórovitost referenční vápenné malty přístupná vodě až 28,5%. Zvýšení vlivem pucolánové příměsi je za sníženého tlaku velmi mírné: pórovitost se zvyšuje pouze na 29,5%. Opět, výraznější efekt má na nárůst pórovitosti příměs L05; příměsi K05 zvyšuje pórovitost vápenné malty o něco málo méně, rozdíl je však velmi malý. Pokud jde o vliv provzdušňovacích přísad, největšímu nárůstu pórovitosti došlo v důsledku použití vyššího přídatku provzdušňovací přísady Berolan LP50. Pro výrazně hydrofobní varianty malt, jako jsou malty s vyšší dávkou přísady Ligaphob N90, není použita metodika zjišťování pórovitosti vhodná, protože voda proniká do takto málo smáčivé malty obtížně i při sníženém tlaku.

**Tab. 28** Procentuální změna otevřené pórovitosti v důsledku přítomnosti provzdušňovací přísady u malt ve stáří 90 dnů od přípravy.

Označení malt	Otevřená pórovitost (% obj.) atmosferický tlak	Otevřená pórovitost (% obj.) snížený tlak
<b>Lref</b>	-	-
0,05_LP50	-10%	15%
0,5_LP50	-40%	24%
0,05_N90	-56%	19%
0,5_N90	-65%	-22%
<b>LL05</b>	-	-
0,05_LP50	-11%	0%
0,5_LP50	-15%	-
0,05_N90	-9%	8%
0,5_N90	-70%	-21%
<b>LK05</b>	-	-
0,05_LP50	-7%	12%
0,5_LP50	-7%	18%
0,05_N90	-4%	6%
0,5_N90	-48%	-8%

### 2.13.3.2. Kapilární nasákavost vodou

Kapilární nasákavost vodou byla charakterizována stanovením absorpčního koeficientu vody ve stáří 28 a 90 dní od přípravy malt. Naměřené hodnoty shrnuje **Tab. 29**. Všechny referenční malty čistě vápenná i s pucolánovými příměsmi L05 a K05 dosáhly srovnatelného absorpčního koeficientu (8,2 – 8,9 pro maltu ve stáří 28

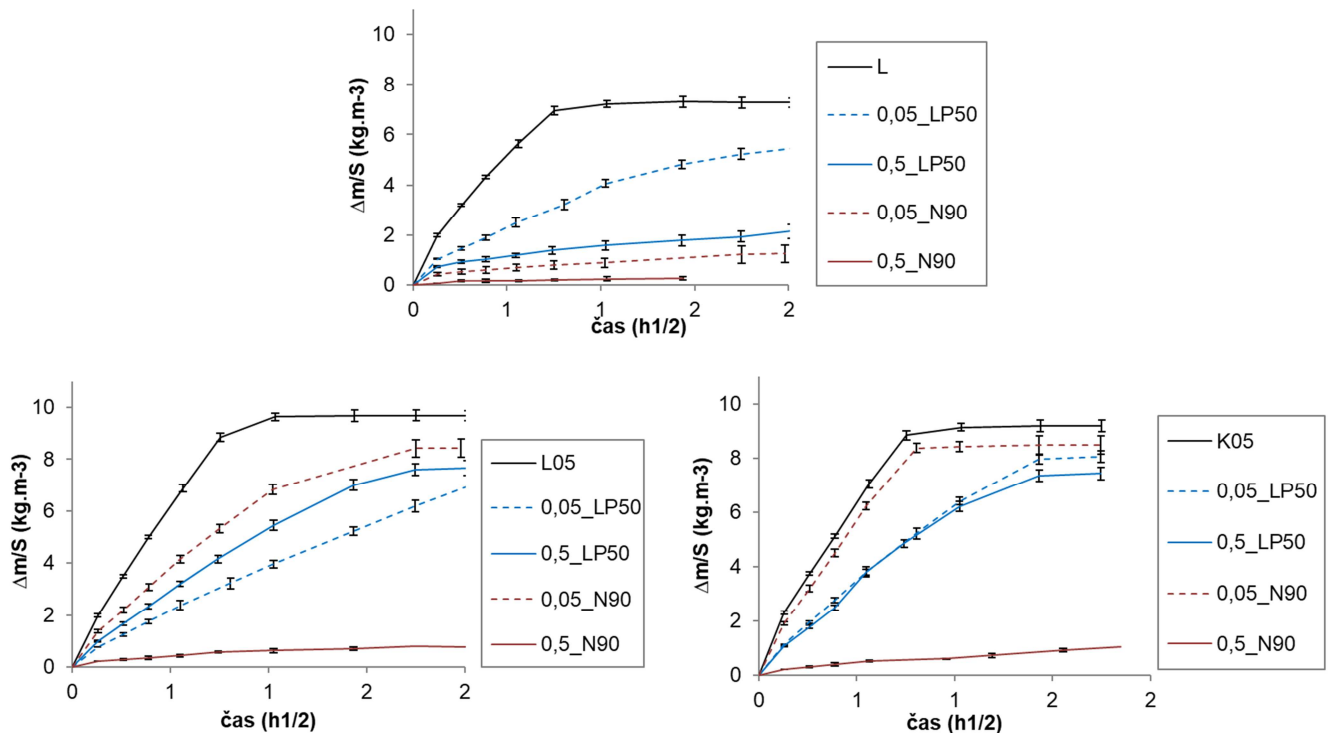
dní). V důsledku zrání malt se hodnota koeficientu absorpce zvyšuje u malt s pucolánovými příměsemi Mefisto L05 a Mefisto K05 (cca z 8 na 11).

V důsledku hydrofobního chování malt s přidavkem provzdušňovacích přísad klesá absorpční koeficient malt s rostoucím množstvím přísady. Zatímco např. referenční vápenná malta po 28 dnech má absorpční koeficient přibližně 9, i menší přídavek Berolanu LP50 do směsi způsobí pokles hodnoty o více než 67 % (viz **Tab. 29**). Přítomnost Ligaphobu N90 způsobí u vápenné malty pokles absorpčního koeficientu o téměř 95 %. Vyšší množství obou přísad způsobuje výraznější pokles absorpčního koeficientu v porovnání s referenční maltou. Hydrofobní účinek provzdušňovacích přísad se u malt s pucolánovou příměsí projevuje mírněji ve srovnání s čistě vápennou maltou. Průnik vody do vápeno pucolánových malt s provzdušňující přísadou je mírněji omezován hydrofobitou malty (koeficient absorpce vody je tím výrazně méně snížen). V rámci malt s pucolánovými příměsemi došlo k největší redukci absorpčního koeficientu (zpomalení průniku vody) u malty s příměsí L05.

**Tab. 29** Koeficient kapilární absorpce a procentuální změna absorpčního koeficientu v důsledku přidavku provzdušňovací přísady (malty ve stáří 28, 90 dní).

Označení malty	Absorpční koeficient vody ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{hod}^{-1/2}$ )		Procentuální změna vůči hodnotě referenční malty (%)	
	28 d	90 d	28 d	90 d
<b>L</b>	8,9 ±0,2	9,0 ±0,3	-	-
0,05_LP50	2,9 ±0,1	2,5 ±0,2	-67	-72
0,5_LP50	0,4 ±0,0	0,6 ±0,1	-96	-94
0,05_N90	0,5 ±0,0	0,5 ±0,2	-95	-94
0,5_N90	0,1 ±0,0	0,2 ±0,0	-99	-98
<b>LL05</b>	8,3 ±0,1	11,6 ±0,2	-	-
0,05_LP50	2,1 ±0,0	3,2 ±0,1	-75	-73
0,5_LP50	3,3 ±0,1	4,8 ±0,1	-61	-58
0,05_N90	1,8 ±0,2	6,9 ±0,6	-79	-40
0,5_N90	0,2 ±0,0	0,4 ±0,0	-97	-96
<b>LK05</b>	8,2 ±0,6	11,4 ±0,1	-	-
0,05_LP50	5,0 ±1,5	5,6 ±0,1	-40	-51
0,5_LP50	4,2 ±0,2	5,2 ±0,1	-49	-54
0,05_N90	6,7 ±0,6	10,3 ±0,1	-18	-10
0,5_N90	0,3 ±0,1	0,5 ±0,1	-96	-96

Křivky kapilární absorpce na **Obr. 19** vyznačují charakter kapilárního sání malt po dosažení asymptotických hodnot. Malty s provzdušňovacími přísadami vykazují zpomalení rychlosti kapilární absorpce, což ukazuje na účinek vzduchových pórů, které přerušují kapilární póry a v důsledku toho dochází ke zpomalení kapilárního sání, které se projeví poklesem hodnoty koeficientu kapilární absorpce (Silva a kol., 2021).



**Obr. 19** Křivky kapilární absorpce (malty ve stáří 90 dní).

### 2.13.3.3. Propustnost pro vodní páru

Propustnost malt pro vodní páru vyjádřená faktorem difúzního odporu, který popisuje kolikrát je transport vodní páry materiálem pomalejší v porovnání s transportem vodní páry ve vzduchu. **Tab. 30** uvádí hodnoty faktor difúzního odporu  $\mu$  (-) naměřené metodou suché a mokré misky a zároveň je v tabulce uvedena procentuální změna faktoru difúzního odporu malt, k jaké došlo přidáním provzdušňovací přísady do malt.

**Tab. 30** Faktor difúzního odporu stanovený metodou suché a mokré misky a procentuální změna faktoru difuzního odporu v důsledku přítomnosti provzdušňovací přísady (malty staré 90 dní).

Označení malty	Faktor difúzního odporu $\mu$ (-)		Procentuální změna vůči hodnotě referenční malty (%)	
	suchá miska 0/55%	mokrá miska 35/55%	suchá miska	mokrá miska
<b>L</b>	9,6 ±0,4	8,6 ±1,1	-	-
0,05_LP50	12,9 ±1,2	18,9 ±2,3	+35	+119
0,5_LP50	9,4 ±0,4	9,0 ±1,8	-2	+4
0,05_N90	12,8 ±0,6	12,6 ±1,7	+34	+47
0,5_N90	9,6 ±0,7	10,8 ±0,4	+1	+26
<b>LL05</b>	13,4 ±0,5	12,9 ±1,8	-	-
0,05_LP50	26,8 ±3,2	36,0 ±3,2	+100	+179
0,5_LP50	12,0 ±1,1	11,5 ±1,1	-11	-11
0,05_N90	14,9 ±1,2	15,2 ±2,2	+11	+17
0,5_N90	16,5 ±0,9	16,5 ±1,8	+22	+28
<b>LK05</b>	15,6 ±0,5	12,5 ±1,2	-	-
0,05_LP50	7,1 ±1,9	19,4 ±1,7	-54	+56
0,5_LP50	11,0 ±0,8		-29	-100
0,05_N90	5,4 ±0,3	16,0 ±1,2	-65	+29
0,5_N90	14,3 ±0,6	15,8 ±0,9	-8	+26

Metoda suché i mokré misky naznačuje, že důsledkem přidavku pucolánové příměsi došlo k nárůstu faktoru difuzního odporu malt bez provzdušňovací přísady oproti referenční čistě vápenné maltě (cca z 9 na 11 až 15, tj. o 20 až 60%).

U čistě vápenných malt dochází v důsledku přidavku menšího množství obou provzdušňovacích přísad k nárůstu faktoru difuzního odporu o přibližně 35 % (suchá miska), měření metodou mokré misky naznačuje ještě vyšší nárůst. Nárůst faktoru difuzního odporu referuje o pomalejším odpařování vody přes vrstvu malty. Větší přídavek provzdušňovacích přísad do čistě vápenné malty nezpůsobil významnou změnu faktoru difuzního odporu. Výjimku tvoří malta s větším přídavkem Ligaphobu N90, která při měření metodou mokré misky vykazovala nárůst faktoru difuzního odporu o cca 26 %.

Podobný trend lze vypočítat u malt s pucolánovou příměsí pojiva Mefisto L05. U obou provzdušňovacích přísad došlo při menším množství k nárůstu  $\mu$ , a to řádově více v případě Berolanu LP50 (zejména při měření metodou mokré misky). Zatímco

vyšší přídavek Berolanu LP50 způsobil naopak pokles faktoru difuzního odporu malt o přibližně 11 %, větší množství Ligaphobu N90 způsobil jeho nárůst.

U malt s přídatkem pucolánových příměsí Mefisto K05 jsou získané hodnoty faktoru  $\mu$  velmi rozptýlené. Výsledky zjištěné metodou suché a mokré misky se výrazně liší, jsou nejednoznačné, pravděpodobně došlo k chybě při měření. Příčinou je pravděpodobně naleptání hliníkové misky roztokem  $\text{KNO}_3$  v průběhu měření metodou mokré misky u některých vzorků. Uvnitř misky pravděpodobně došlo k reakci, která mohla ovlivnit průběh zkoušky. V případě malt s přídatkem Mefisto K05 byl metodou suché misky naměřen pokles hodnot faktoru difuzního odporu v důsledku přídatku provzdušňovacích přísad, oproti tomu metoda mokré misky ukázala nárůst hodnot (s výjimkou vyššího přídatku Berolanu LP50).

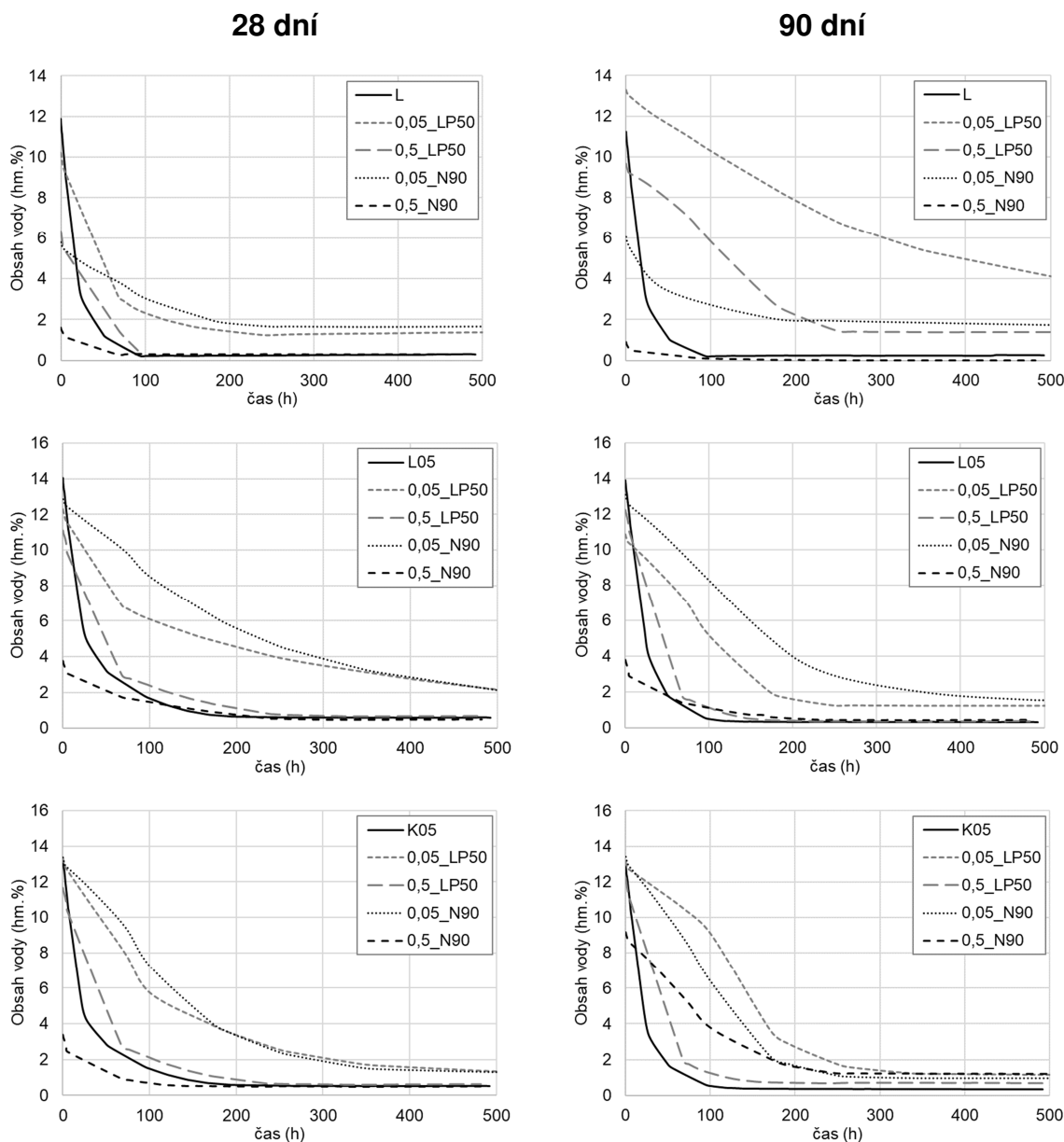
#### **2.13.3.4. Rychlost vysychání malt**

**Tab. 31** zobrazuje výsledky zkoušky rychlosti vysychání vody pro malty ve stáří 28 a 90 dní. Jak se ukázalo, přídavek pucolánové příměsi ovlivňuje rychlost vysychání malt jen minimálně. Malty obsahující příměs Mefisto L05 vysychá o málo rychleji než malta s příměsí Mefisto K05. Zdá se, že s rostoucím stářím malty jsou naznačené tendence výraznější. Tento trend vykazují i malty s provzdušňovacími přísadami. Vysychání vápenné malty má stejnou rychlost ve stáří 28 a 90 dní.

Přídavek provzdušňovacích přísad zpomaluje vysychání všech zkoušených malt. Zkoušky zaměřené na sledování vlivu množství provzdušňovací přísady na rychlost vysychání malty nevedou k jednoznačným závěrům. Provzdušňovací přísady ovlivňují každý typ malty jiným způsobem, pokud jde o rychlost vysychání. Nejednoznačnost trendů vysychání malt dokresluje křivky vysychání vodou nasáknutých vzorků malt ve věku 28 a 90 dní na **Obr. 20**. U vápenné malty byl vyšší přídavek obou provzdušňovacích přísad spojen s pomalejším vysycháním malty. U vápenno-pucolánových malt je důsledek množství přídatku provzdušňovacích přísad různý podle typu příměsi i přísady.

**Tab. 31** Rychlost vysychání vody: množství absorbované vody, koeficient vysychání a index vysychání malt ve stáří 28 a 90 dní.

Označení malty	Počáteční množství absorbované vody (hm.%)		Koeficient vysychání (kg.m <sup>-2</sup> .hod <sup>-1/2</sup> )		Index vysychání (-)	
	28 d	90 d	28 d	90 d	28 d	90 d
<b>L</b>	11,2	11,2	0,79	0,80	0,1	0,1
0,05_LP50	10,2	10,9	0,63	0,38	0,2	0,2
0,5_LP50	6,3	9,6	0,32	0,29	0,3	0,3
0,05_N90	5,8	6	0,12	-	0,4	0,4
0,5_N90	1,6	0,9	0,12	0,05	0,2	0,0
<b>L05</b>	13,2	13,2	0,82	0,88	0,1	0,1
0,05_LP50	12,3	13,3	0,29	0,19	0,4	0,5
0,5_LP50	11,1	12,2	0,48	0,63	0,2	0,1
0,05_N90	12,9	13,1	0,27	-	0,3	0,4
0,5_N90	3,7	3,8	0,09	0,11	0,2	0,2
<b>K05</b>	13,1	13,1	0,86	0,92	0,1	0,1
0,05_LP50	13,3	13,1	0,34	0,54	0,2	0,2
0,5_LP50	11,6	12,2	0,50	0,63	0,1	0,1
0,05_N90	13,4	13,4	0,40	0,48	0,2	0,2
0,5_N90	3,4	9,2	0,29	0,26	0,2	0,2



Obr. 20 Křivky vyschání vodou nasycených malt ve stáří 28 a 90 dní.

### 2.13.3.5. Zkouška mrazuvzdornosti

V Tab. 32 uvádí pevnosti v ohybu a tlaku stanovené na 90 dnů starých tělesech po ukončení zmrazovací zkoušky provedené oběma postupy. Je zde také uvedena změny dynamických modulů pružnosti spočítané z dynamických modulů pružnosti suchých maltových těles na počátku zkoušky a z konečných dynamických modulů pružnosti suchých maltových těles po skončení zkoušek.

V případě malt s pucolánovou příměsí Mefisto L05 došlo v důsledku použití provzdušňující přísady Berolan LP50 k mírnému poklesu dynamického modulu E vůči



referenční maltě. Tento pokles byl pro malý i větší přídavek provzdušňovací přísady srovnatelný. Ligaphob N90 naopak způsobil nárůst dynamického modulu E, který se nejvíce projevil při menším přídavku přísady. U malty s příměsí Mefisto K05 došlo důsledkem vyššího přídavku Ligaphobu N90 ke snížení dynamického modulu E.




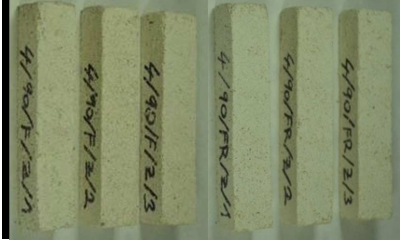


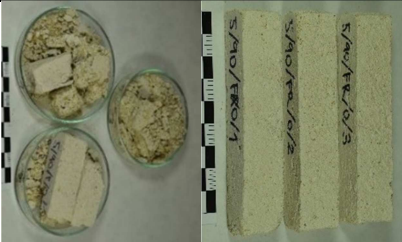
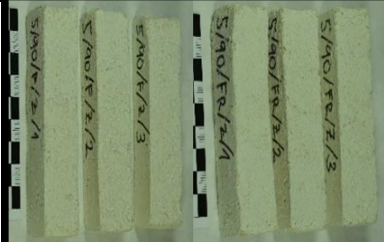

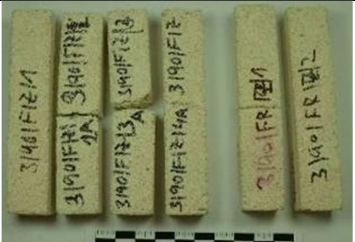
Jak se ukázalo, 25 zmrazovacích cyklů při zmrazování a tání na vzduchu nezpůsobilo takové poškození malt, které by se projevilo na změně dynamického modulu. Malty měly po absolvování 25 cyklů srovnatelný (nebo vyšší) dynamický modul jako na začátku. Přírůstek dynamického modulu pružnosti u některých malt je možné vysvětlit tím, že v prostředí s vysokou relativní vlhkostí vzduchu, které se vytvořilo uvnitř PE folie, došlo k dalšímu zrání malt.

Naopak zkouška mrazuvzdornosti, při které tělesa tála pod vodou, se ukázala jako zcela likvidační pro většinu zkoumaných malt. U některých z nich začalo docházet k rozpadu ještě dříve, než bylo dosaženo 15. zmrazovacího cyklu. Jak naznačuje tabulka **Tab. 32**, nejlépe zmrazovacím cyklům při tání pod vodou odolávají malty s pucolánovou příměsí Mefisto L05, které obsahovaly přídavek provzdušňovací přísady Ligaphob N90. Vzhledem k tomu, že v průběhu zkoušky došlo k poklesu dynamického modulu E i u referenčních těles, která nebyla vystavena mrazu, pouze byla po dobu zkoušky ponořena v destilované vodě, zůstává otázkou, do jaké míry stojí za snížením dynamického modulu zkoumaných těles vliv zmrazovacích cyklů a co je způsobeno přítomností vody.




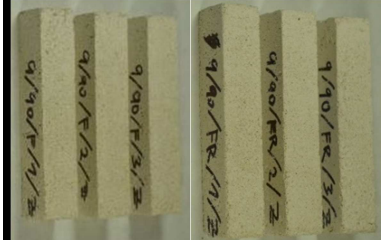

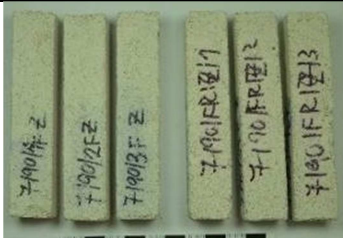




**Obr. 21, Obr. 22 a Obr. 23** dokládá, že 25 cyklů zmrazovací zkoušky s táním na vzduchu se nepodepsalo na vzorcích malt tak významně jako 15 cyklů zmrazovací zkoušky s táním ve vodě. Tato zkouška naopak způsobila silné poškození u většiny vzorků malt. Největší poškození bylo zaznamenáno u vápenných malt, zejména u malty s menším přídavkem provzdušňovací přísady Ligaphob N90.

**Tab. 32** Pevnosti v ohybu a tlaku změřené po ukončení zkoušky zmrazování a procentuální změna dyn. modulu pružnosti změřeného na začátku a na konci zmrazovací zkoušky na tělesech vysušených do konst. hmotnosti, malty staré 90 dnů.








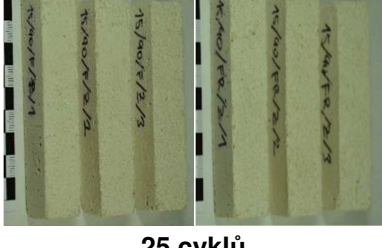

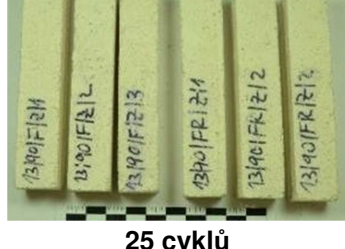
Označení malt	Podmín. zkoušky	Postup (i): zmrazování a tání ve vodě			Postup (ii): zmrazování a tání na vzduchu v PE obalech		
		Pevnost v ohybu (MPa)	Pevnost v tlaku (MPa)	Změna dyn. modul. pružn. (%)	Pevnost v ohybu (MPa)	Pevnost v tlaku (MPa)	Změna dyn. modul. pružn. (%)
<b>L</b>	(i) W; (ii) A	1,04 ±0,06	2,27 ±0,40	0	1,30 ±0,03	2,31 ±0,84	-18
	F	0,15 ±0,04	0,63 ±0,16	-78	0,35 ±0,13	1,27 ±0,58	-36
0,05_LP50	(i) W; (ii) A	1,77 ±0,10	2,93 ±0,15	+3	1,47 ±0,0,5	3,28 ±0,22	+5
	F	0,12 ±0,03	0,54 ±0,27	-72	1,26 ±0,15	3,24 ±0,10	+4
0,5_LP50	(i) W; (ii) A	0,80 ±0,12	1,78 ±0,12	+1	0,85 ±0,14	1,69 ±0,37	+3
	F	0,62 ±0,18	1,44 ±0,50	-12	0,62 ±0,18	1,44 ±0,50	-3
0,05_N90	(i) W; (ii) A	1,18 ±0,12	2,65 ±0,02	14	1,54 ±0,13	3,76 ±0,08	+25
	F	-	-	-	1,53 ±0,04	3,60 ±0,33	+24
0,5_N90	(i) W; (ii) A	0,53 ±0,05	0,77 ±0,13	-44	0,35 ±0,06	0,78 ±0,33	-12
	F	0,28 ±0,11	0,67 ±0,21	-	0,25 ±0,02	0,78 ±0,06	-8
<b>L05</b>	(i) W; (ii) A	0,78 ±0,12	2,86 ±0,24	-7	0,84 ±0,24	3,49 ±0,05	-5
	F	0,19 ±0,05	0,54 ±0,14	-66	0,74 ±0,17	3,56 ±0,48	-17
0,05_LP50	(i) W; (ii) A	1,87 ±0,19	6,64 ±0,01	0	1,90 ±0,24	5,34 ±0,04	-9
	F	0,21 ±0,10	0,72 ±0,08	-25	2,31 ±0,16	6,59 ±0,57	-4
0,5_LP50	(i) W; (ii) A	0,81 ±0,42	3,02 ±0,08	+15	0,86 ±0,20	2,73 ±0,11	+8
	F	0,75 ±0,10	1,05 ±0,17	+30	0,85 ±0,04	2,54 ±0,14	+5
0,05_N90	(i) W; (ii) A	1,35 ±0,19	4,96 ±0,65	+29	1,61 ±0,35	5,06 ±0,02	+15
	F	1,51 ±0,10	3,07 ±0,78	+29	1,42 ±0,35	5,16 ±0,50	+35
0,5_N90	(i) W; (ii) A	0,97 ±0,05	4,99 ±0,05	+29	0,94 ±0,11	4,55 ±0,22	+13
	F	0,98 ±0,14	4,43 ±0,17	-12	1,18 ±0,12	4,62 ±0,14	+10
<b>K05</b>	(i) W; (ii) A	0,66 ±0,01	2,80 ±0,20	-9	0,74 ±0,08	3,00 ±0,03	0
	F	0,21 ±0,05	1,85 ±0,36	-59	0,53 ±0,09	0,53 ±0,09	-15
0,05_LP50	(i) W; (ii) A	1,22 ±0,13	2,93 ±0,06	+4	1,64 ±0,15	4,14 ±0,37	+1
	F	0,35 ±0,19	0,97 ±0,06	-13	1,35 ±0,33	4,29 ±0,90	0
0,5_LP50	(i) W; (ii) A	0,95 ±0,13	2,34 ±0,18	+28	0,81 ±0,02	2,22 ±0,12	+6
	F	0,70 ±0,08	1,20 ±0,25	0	0,74 ±0,05	2,14 ±0,07	+1
0,05_N90	(i) W; (ii) A	0,94 ±0,08	2,98 ±0,21	-	0,67 ±0,38	2,74 ±0,22	+35
	F	0,51 ±0,10	0,30 ±0,52	-	0,68 ±0,24	2,39 ±0,17	+26
0,5_N90	(i) W; (ii) A	0,71 ±0,04	2,23 ±0,49	-	0,53 ±0,04	2,74 ±0,03	+24
	F	0,55 ±0,07	2,27 ±0,17	-	0,51 ±0,05	2,54 ±0,23	+38

	Postup (i) Zmrazování a tání ve vodě	Postup (ii) Zmrazování a tání na vzduchu v PE obalu
L	 15 cyklů	 25 cyklů *
L_0,05_LP50	 10 cyklů	 25 cyklů
L_0,5_LP50	 10 cyklů	 25 cyklů
L_0,05_N90	 13 cyklů	 25 cyklů
L_0,5_N90	 15 cyklů	 25 cyklů*

**Obr. 21** Vzhled vzorků malt po ukončení zkoušky zmrazování a tání. Skupina malt s vápenným hydrátem: levý sloupec fotografií: vlevo – 3 tělesa zmrazovaná a tající ve vodě a vpravo - 3 tělesa referenční uložená pod vodou. Pravý sloupec fotografií: vlevo – 3 tělesa zmrazovaná po počátečním namočení v PE obalu, tající v PE obalu na vzduchu, vpravo – 3 (\*nebo 4) tělesa referenční po počátečním namočení v PE obalu do ukončení zkoušky. Tělesa 20×20×100 mm, 90 dnů.

	Postup (i) Zmrazování a tání ve vodě	Postup (ii) Zmrazování a tání na vzduchu v PE obalu
LL05	 15 cyklů	 25 cyklů
LL05_0,05_LP50	 15 cyklů	 25 cyklů
LLO5_0,5_LP50	 15 cyklů	 25 cyklů
LL05_0,05_N90	 15 cyklů	 25 cyklů
LL05_0,5_N90	 15 cyklů	 25 cyklů*

**Obr. 22** Vzhled vzorků malt po ukončení zkoušky zmrazování a tání. Skupina vápenometakaolinové malty LL05: levý sloupec fotografií: vlevo – 3 tělesa zmrazovaná a tající ve vodě a vpravo - 3 tělesa referenční uložená pod vodou. Pravý sloupec fotografií: vlevo – 3 tělesa zmrazovaná po počátečním namočení v PE obalu, tající v PE obalu na vzduchu, vpravo – 3 (\*nebo 4) tělesa referenční po počátečním namočení v PE obalu do ukončení zkoušky. Tělesa 20×20×100 mm, 90 dnů.

	Postup (i) Zmrazování a tání ve vodě	Postup (ii) Zmrazování a tání na vzduchu v PE obalu
LK05	 15 cyklů	 25 cyklů*
LK05_0,05_LP50	 15 cyklů	 25 cyklů
LK05_0,5_LP50	 15 cyklů	 25 cyklů
LK05_0,05_N90	 15 cyklů	 25 cyklů
LK05_0,5_N90	 15 cyklů	 25 cyklů

**Obr. 23** Vzhled vzorků malt po ukončení zkoušky zmrazování a tání. Skupina vápenometakaolinové malty LK05: levý sloupec fotografií: vlevo – 3 tělesa zmrazovaná a tající ve vodě a vpravo - 3 tělesa referenční uložená pod vodou. Pravý sloupec fotografií: vlevo – 3 (\*nebo 4) tělesa zmrazovaná po počátečním namočení v PE obalu, tající v PE obalu na vzduchu, vpravo – 3 tělesa referenční po počátečním namočení v PE obalu do ukončení zkoušky. Tělesa 20×20×100 mm, 90 dnů.

#### **2.13.4. Shrnutí výsledků studia vápenných malt s metakaolinem a provzdušňovacími přísadami**

Studium laboratorních vápenných malt modifikovaných dvěma typy pucolánů a dvěma provzdušňovacími přísadami přidávanými ve dvou množstvích, potvrdilo zvýšení mechanických pevností a zlepšení mrazuvzdornosti malt vlivem obou studovaných pucolánových přísad. Vlastnosti malt s provzdušňovacími přísadami určuje hydrofobní charakter přísad a patrně také sloučeniny vznikající chemickou reakcí vápenného hydrátu, metakaolinu a provzdušňovací přísady. Důsledkem změny úhlu smáčení je penetrace vody do provzdušněných malt obtížnější.

Zkouška stability pěny vytvořené během míchání pojiva s rozpuštěnými provzdušňovacími přísadami potvrdila srážení obou provzdušňovacích přísad s  $\text{Ca}^{2+}$  ionty, jisté množství přísady proto ztrácí schopnost maltu provzdušnit. Nicméně obsah vzduchu v čerstvých maltách s provzdušňovacími přísadami stoupl oproti referenčním maltám. Vyšší míry provzdušnění bylo dosaženo přísadou Berolan LP50. Malty modifikované provzdušňujícími přísadami měly v porovnání s referenčními maltami nižší objemovou hmotnost, která klesá s množstvím přísady, a neměl na to vliv ani druh pucolánu, ani druh přísady.

Mírně vyšších pevností v tahu za ohybu dosáhla malta s pucolánem L05, naopak malta s příměsí K05 měla po 28 i po 90 dni zrání mírně nižší pevnost v ohybu než čistě vápenná malta a to i přesto, že byly zrající malty po dobu 28 dní pečlivě ošetřovány (kropením povrchu vodou). Mezi 28. a 90. dnem zrání byl zaznamenán pokles ohybových pevností charakteristický pro vápeno pucolánové malty. Pevnosti malt s pucolánovou příměsí pojiva v tlaku byly vždy vyšší ve srovnání s čistě vápennou maltou. Malty s přídavkem provzdušňovací přísady dosáhly lepších výsledků pevností v tahu nebo v tlaku s množstvím přísady 0,05 % z hmotnosti suché směsi. V případech, kdy by bylo výhodné zvýšit provzdušňovací přísadou pevnost malty, se zdá být vhodné použít pro čistě vápennou maltu L spíše přísadu Ligaphob N90, zatímco pro maltu s příměsí L05 a K05 spíše přísadu Berolan LP50.

Pórovitost referenční vápenné malty přístupná vodě byla za atmosférického tlaku 21,5% a nasákavost 11,3%. Obě studované pucolánové příměsi pórovitost a nasákavost malt mírně zvyšují až na hodnotu 26% a nasákavost 14%. Výraznější efekt má na nárůst pórovitosti příměs L05. Příměs K05 zvyšuje pórovitost a nasákavost vápenné malty o něco málo méně. Vzhledem k tomu, že provzdušňovací přísady způsobují hydrofobní chování modifikované malty, za atmosférického tlaku se nasákavost malt a pórovitost přístupná vodě vlivem přísad nezvýšila. Měřením za sníženého tlaku, které bylo použito zejména pro hodnocení pórovitosti malt s hydrofobními vlastnostmi, byla stanovena pórovitost referenční vápenné malty přístupná vodě až 28,5 %, zvýšení vlivem pucolánových příměsí je za sníženého tlaku velice malé (29,5%). Vlivem provzdušňovacích přísad došlo k nejvyššímu nárůstu pórovitosti v důsledku přidání vyššího množství přísady Berolan LP50. Pro výrazně hydrofobní malty s vyšší dávkou přísady Ligaphob N90, není použitá metodika zjišťování pórovitosti vhodná, protože voda proniká i při sníženém tlaku do takto málo smáčivé malty velice obtížně.

Rychlost kapilární absorpce vody maltami je v případě referenčních malt v rozmezí 9 – 11 kg.m<sup>2</sup>.hod<sup>-1/2</sup>. V důsledku hydrofobního chování malt s přidavkem provzdušňovacích přísad klesá absorpční koeficient nasákavosti s rostoucím množstvím přísady.

Pokud se jedná o difúzní propustnost malt pro vodní páru, pro popis tohoto děje byl vybrán faktor difúzního odporu, který udává, kolikrát je transport vodní páry materiálem pomalejší v porovnání s transportem vodní páry ve vzduchu. Hodnoty metodou suché i mokré misky naznačují, že důsledkem přidavku pucolánové příměsi došlo k nárůstu faktoru difúzního odporu malt bez provzdušňovací přísady oproti referenční vápenné maltě cca z 9 na 11 až 15. U čistě vápenné malty dochází důsledkem přidání menšího množství obou provzdušňovacích přísad k nárůstu faktoru difúzního odporu o 35 % (mokrou miskou) a tudíž k pomalejšímu odpařování vody přes vrstvu malty. Vyšší přídavek Ligaphob N90 do vápenné malty způsobil nárůst faktoru difúzního odporu (mokrou miskou) o cca 26%. Podobný trend ukázaly malty s pucolánovou příměsí L05. U malt s pucolánovou příměsí K05 se výsledky mokré i suché misky výrazně lišily, protože pravděpodobně došlo k chemické reakci misky a KNO<sub>3</sub>. Metodou suché misky byl naměřen pokles hodnot faktoru difúzního odporu v důsledku přidavku provzdušňovacích přísad, oproti tomu metoda mokré misky ukázala nárůst hodnot (s výjimkou přidavku Berolan LP50).

Rychlost vysychání vody z malt je přidavkem pucolánových příměsí ovlivněna jen minimálně, malty s příměsí L05 vysychají o maličko rychleji než malta s příměsí K05. Stejný trend vykazují i malty s provzdušňovacími přísadami. Přidavkem provzdušňovacích přísad se vysychání všech zkoušených malt zpomaluje, ale vliv množství přísady nelze jednoduše stanovit.

Pro odolnost malt vůči účinkům zmrazovací zkoušky je ozhodující nastavený režim zmrazování a tání. Podmínky zkoušky provedené postupem (i), kdy se tělesa po počátečním namočení ve vodě zmrazují a následně tají ve vodě, důsledkem čehož může množství absorbované vody uvnitř porézní struktury měnit v průběhu zkoušky, se ukázaly jako likvidační pro většinu studovaných malt, což potvrdilo výrazné zhoršení dynamického modulu pružnosti a propad ohybových pevností zmrazovaných zkušebních těles. U některých malt došlo k rozpadu ještě před dosažením 15. cyklu. Nejlépe zmrazovacím cyklům při tání pod vodou odolávají malty s pucolánovou příměsí Mefisto L05, a přidavkem provzdušňovací přísady Ligaphob N90. Pokud byla zmrazovací zkouška provedena postupem (ii), kdy jsou tělesa po počátečním namočení ve vodě zabalena do PE obalů a po celou dobu zmrazování i tání v obalech zůstávají s téměř konstantním množstvím vlhkosti v porézní struktuře, nezpůsobí ani 25 cyklů zmrazení a tání u většiny malt významnější poškození, které by se projevilo změnou mechanických pevností.

## **2.14. Monitorování projevů stárnutí malt na ohradní zdi hřbitova**

Pro ověření chování laboratorně studovaných malt na reálném objektu byla vybrána ohradní zeď kolem hřbitova a kostela sv. Václava v Krchlebech u Čáslavi. Zeď byla zatížena vztlínající vlhkostí a přítomností solí ve zdivu. Vzorky malt byly aplikovány jako omítky. Monitorování projevů stárnutí omítek proběhlo ve dvou etapách. První vzorky vápenných malt s metakaolinem a se lněným olejem (L, LO, LM, LMO) byly aplikovány červenci 2013. Vzorky vápeno metakaoliné malty s provzdušňovacími přísadami (LL05, LL05\_0,5LP50, LL05\_0,5N90, LK05, LK05\_0,5LP50, LK05\_0,5N90) byly aplikovány na začátku října 2014.

### **2.14.1. Aplikace vápenných malt s metakaolinem a lněným olejem**

#### **2.14.1.1. Stav omítané konstrukce**

Průzkum objektu se zaměřil na určení a popis negativních zátěžových vlivů a vysvětlení možných příčin stávajících poruch. Na ohradní zdi hřbitova v Krchlebech byla vymezena experimentální plocha pro aplikaci vzorků omítek o rozloze přibližně 30 m<sup>2</sup>. Experimentální plocha je orientovaná na jihovýchod a tvoří ji tři zkušební pole. Jedno pole je široké cca 5 m, vysoké cca 170 až 190 cm. Tloušťka zdiva odpovídá šířce jedné cihly cca 14 až 20 cm. Koruna ohradní zdi je osazena jednou řadou cihel se sklonem na severozápad. Navýšený terén za zdí sahá do výšky 80 až 90 cm.

Výchozí stav konstrukce před zahájením stavebních prací dokumentuje fotografie na **Obr. 24**. Ohradní zeď byla z obou stran omítnuta dvěma vrstvami hrubě hozené vápeno-cementové omítky. Omítka na jihovýchodní straně ohradní zdi již značně degradovaná a nesoudržná s podkladem a na mnoha místech již zcela chybí. Do výšky 1 až 1,5 m nad zemí vztlíná zemní vlhkost a krystalizují zde soli, čímž dochází k povrchovému rozpadu cihel. Z této vnější strany je ohradní zeď zatěžována odstříkující vodou a v zimním období také chemickým posypem přilehlé komunikace. Omítka na vnitřní straně zdi (od hřbitova) je v poměrně dobrém stavu.





**Obr. 24** Výchozí stav hřbitovní zdi v Krchlebech v roce 2013, vpravo experimentální plochy A, B a C.

Z každého pole experimentální plochy byly v jedné ose odebrány vzorky pro stanovení výškového a hloubkového gradientu zasolení a zavlhčení objektu. Místa odběru vzorků v jednotlivých polích vyznačují bílé rámečky na **Obr. 24**. Dva větší kusy uvolněných cihel byly použity pro stanovení otevřené pórovitosti zdiva hydrostatickým vážením a stanovení pórovitosti a distribuce velikosti pórů rtuťovou porozimetrií. Vzorek souvrství dožilé novodobé omítky a vzorek cihelného zdiva se zdicí maltou byly použity pro analýzu chemického složení. Odběr vzorků proběhl při teplotě vzduchu  $24 \pm 1$  °C a relativní vlhkosti vzduchu  $53 \pm 6$  %.

Zasolení zdiva bylo zjišťováno semikvantitativními analytickými testy i přesnou iontovou chromatografií. Z výsledků vyplývá, že omítaný podklad je kontaminován vodorozpustnými solemi takto: V dolních partiích zdiva, se ve zvýšeném až velmi vysokém množství objevují chloridy. Ve výšce cca 1 až 1,75 m od paty ohradní zdi (pás největších poruch), byl stanoven vysoký a velmi vysoký stupeň dusičnanů, ale i velmi vysoký stupeň chloridů. Sířany byly obsaženy ve zvýšené míře ve všech analyzovaných vzorcích.

Ve stavebním materiálu odebraném do hloubky 5 cm od povrchu zdiva byla gravimetricky stanovena vlhkost. Dle klasifikace zavlhčení v normě (ČSN P 73 0610) vyplývá, že do jednoho metru výšky je zdivo zavlhčeno velmi vysokým stupněm vlhkosti. Tato výška zhruba odpovídá úrovni navýšeného terénu na druhé straně za zdí. Pórovitost cihlového podkladu stanovená rtuťovou porozimetrií představuje cca 30 % a je srovnatelná s pórovitostí doposud laboratorně zkoumaných malt (L – cca 32 %, LO – cca 34 %, LM – cca 34 %, LMO – cca 33 %). Ve vzorcích cihelného zdiva se vyskytují převážně póry o velikosti 0,04, 0,4 a 1  $\mu\text{m}$ . Nasákavost cihelného podkladu je zhruba 15 hm. %.

### 2.14.1.2. Materiál a složení staveništních malt

Laboratorně testované malty L, LO, LM a LMO a dalších optimalizované receptury byly na objekt nanášeny ve formě omítek, jejich složení uvádí **Tab. 33**. Seznam všech materiálů použitých pro přípravu omítek je uveden v **Tab. 34**. Granulometrické křivky použitých písků jsou v grafu na **Obr. 25**.

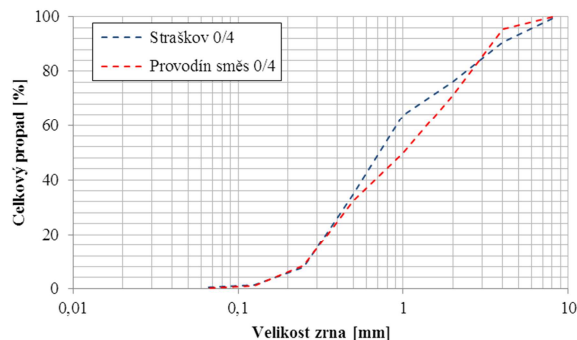
**Tab. 33** Složení vzorků omítek aplikovaných na cihelnou ohradní zeď hřbitova 2013.

Označení maltové směsi	Složení	Hmotnostní poměr složek	Objemový poměr složek
L-m	vápenný hydrát CL90: směs provodínského písku	1:3	1,2:1
LO-m	vápenný hydrát CL90: směs provodínského písku + 1,5 % lněného oleje	1:3 + 1,5 % oleje z hm. pojiva	1,2:1 + 1,5 % oleje z hm. pojiva
LM-m	vápenný hydrát CL90: metalupek Mefisto L05: směs provodínského písku	0,75:0,25:3	3:1:3,3
LMO-m	vápenný hydrát CL90: metalupek Mefisto L05: směs provodínského písku + 1,5 % lněného oleje	0,75:0,25:3 + 1,5 % oleje z hm. pojiva	3:1:3,3 + 1,5 % oleje z hm. pojiva
L-v	vápenný hydrát CL90: Straškov 0/4	1 : 5	1 : 1,5
LO-v	vápenný hydrát CL90: Straškov 0/4+ 1,5 % lněného oleje	1 : 5 + 1,5 % oleje z hm. i pojiva	1 : 1,5 + 1,5 % oleje z hm. pojiva
LM-v	vápenný hydrát CL90: metalupek Mefisto L05: Straškov 0/4	3:1:20	3:1:6
LMO-v	vápenný hydrát CL90: metalupek Mefisto L05: Straškov 0/4 + 1,5 % lněného oleje	3:1:20 + 1,5 % oleje z hm. pojiva	3:1:6 + 1,5 % oleje z hm. pojiva

**Tab. 34** Materiál použitý pro přípravu vzorků omítek na cihelnou ohradní zeď hřbitova 2013.

Materiál	Označení pojiva	Obchodní název	Výrobce
vzdušné vápno CL90	L	Čerták®	Vápenka Čertovy schody, a.s.
metalupěk	M nebo MKL05	Mefisto L05	České lupkové závody, s.r.o.
směs křemenného písku		směs písků Provodín *	Provodínské písky, a.s.
přírodně těžný písek frakce 0/4 mm		Straškov frakce 0/4 mm	EUROVIA Kamenolomy, a.s., provozovna Straškov

\* slévárenský písek PR33 0,1-0,5 mm (27 %); filtrační písky PR 0,5-1 mm (18 %); PR 1-2 mm /29 %) a PR 1,6-4 mm (26 %)



**Obr. 25** Zrnitost použitých písků: Provodín směs 0/4; Straškov 0/4

První sada omítek, složením odpovídající laboratorně testovaným maltám L, LO, LM a LMO, obsahovala směs čtyř zrnitostních frakcí křemičitého písku Provodín. Vzorčky byly označeny zkratkami L-m, LO-m, LM-m a LMO-m.

V druhé sadě omítek označených zkratkami L-v, LO-v, LM-v a LMO-v, byl použit přírodně těžný maltový písek Straškov 0/4 mm s přirozenou granulometrií. Složky omítek byly míchány v objemovém poměru pojiva a plniva 1:1,5.

Všechny složky byly odměřovány v hmotnostním poměru, objemový poměr složek byl přepočítán následně.

### **2.14.1.3. Příprava podkladu**

Z povrchu zdiva byla před aplikací vzorků omítek odstraněna degradovaná novodobá vápeno-cementová omítka a spáry mezi cihlami byly proškrabány. Místa ve spodních partiích zdiva, kde omítka již delší dobu chyběla, a kde se usadil mech, byla očištěna ocelovým kartáčem. Vydrolené cihly a hluboké spáry byly doplněny starými střešními taškami a úlomky cihel. Dozdívaná místa se nejprve ometla koštětem od prachu, pomocí štětky se namočila vodou a byla dozděna zdicí maltou a navlhčeným kouskem cihly. Polovina experimentální plochy (celé pole A polovina pole B, celkem 7,5 m zdiva) byla následně v tenké vrstvě omítnuta řídkou maltou tzv. „špricem“, který se běžně nanáší za účelem zdrsnění a zpevnění zdiva před nahazováním jádrové omítky. Složky zdicí i špricové malty byly odměřovány objemovými poměry, receptura obou malt je uvedena v **Tab. 35**. Opravené zdivo bylo překryto silnou bílou netkanou textilií a následující 4 dny bylo pravidelně kropeno vodou.

**Tab. 35** Složení zdicí a špricové vápenometakaolinové malty (\*směs kameniva 3 obj. díly písku Zálezlice 0/4 mm s 1 obj. dílem vápencové drti 2/4 mm, lom Skoupý)

Malta	Objemový poměr složek	Směs kameniva
zdicí malta	3 : 1 : 12 obj. dílů vápenný hydrát CL90 : metalupek Mefisto L05: směs kameniva	3 : 1 obj. díly písek Zálezlice 0/4 mm : vápencová drť 2/4 mm, lom Skoupý
řídká špricová malta	3 : 1 : 8 obj. dílů vápenný hydrát CL90 : metalupek Mefisto L05 : směs kameniva*	3 : 1 obj. díly písek Zálezlice 0/4 mm : vápencová drť 2/4 mm, lom Skoupý

Rozdílný způsob opravy podkladového zdiva rozdělil experimentální plochu na dvě poloviny. První polovina podkladu (pole A polovina pole B) byla dozděna a omítnuta špricem, na druhé polovině podkladu byly pouze dozděny největší nerovnosti. Plocha byla rozdělena na 30 stejně velkých panelů o velikosti 0,5 m × 1,8 m. Jeden vzorek omítky od každé z 15 navržených směsí byl vždy nahozen na špricovaný podklad a jeden vzorek byl nahozen na zdivo, které bylo pouze vyspravené.

#### **2.14.1.4. Příprava staveništních malt, omítání, povrchová úprava a ošetřování čerstvých omítek**

Malty byly připravovány v plastovém kalfasu v dávkách po 20 až 30 l, což vystačilo pro omítnutí jednoho panelu (0,5 m × 1,8 m při tloušťce cca 1,5 – 2 cm). Malta byla míchána ručním elektrickým míchadlem s regulací otáček (Protool MXP 1000 E EF). Dávky stejného složení byly připravovány stejným způsobem. Nejprve byly vždy řádně promíchány suché složky a následně byla k suché směsi přimíchávána voda. Množství záměsové vody bylo voleno tak, aby odpovídalo dobré zpracovatelnosti malty (při nahazování omítky zednickou lžicí).

Doprava čerstvé malty na stavbu trvala asi 3 minuty. Omítaný podklad byl před nanesením omítky navlhčen vodou. Vzorky omítek byly nanášeny nahazováním v jedné vrstvě mezi dvě latě, které vymezily šířku panelu a tloušťku omítkové vrstvy (cca 1,5 až 2 cm). Nadbytečná malta byla stržena dřevěnou latí a povrch byl „zatočen“ dřevěným hladítkem (rajblíkem). Po počátečním zavadnutí (cca po půl hodině) byl povrch opětovně zatočen dřevěným rajblíkem. Již omítnuté panely byly překryty netkanou textilí a byly opakovaně (ráno, v poledne a večer) vlhčeny rozprašovačem. Po skončení stavebních prací byly panely na dobu 7 dnů překryty plachtou a po tuto dobu byly také vzorky omítek vždy ráno a večer kropeny vodou. Nahazování omítek prováděl profesionální štukatér pan Lukáš Sýkora.

Ihned po namíchání každé dávky malty (20 nebo 50 l) byly vždy cca 2 litry čerstvé malty odebrány pro stanovení vlastností čerstvé směsi. Konzistence čerstvé malty byla charakterizována vodním součinitelem, hodnotou rozlivu malty na střešacím

stole (ČSN EN 1015-3, A1) a hloubkou spontánního průniku penetračního válečku čerstvou maltou (dle ČSN EN 1015-4). Obsah vzduchu v čerstvé maltě byl stanoven dle ČSN EN 1015-7 ve zkušecím zařízení TESTING s ruční pumpičkou. Objemová hmotnost čerstvé malty byla vyjádřena jako poměr hmotnosti a objemu, který čerstvá malta zaujímala po naplnění zkušební nádoby pro stanovení obsahu vzduchu o objemu 1 litr. Zjištěné vlastnosti čerstvých malt shrnuje tabulka **Tab. 36**.

Malé množství čerstvé malty (odpovídající ½ čajové lžičky) bylo odebráno za účelem stanovení počátečního stupně hydratace a karbonatace čerstvé záměsi. Malta byla nejprve promyta 20 ml acetonu, následně přefiltrována přes filtrační papír (389) a po krátkém vysušení na vzduchu uzavřena do plastové vzorkovnice. Po příjezdu do laboratoře byly vzorky v otevřených vzorkovnicích cca 2 hod sušeny při teplotě 60 °C.

**Tab. 36** Vlastnosti čerstvých staveništních malt aplikovaných na hřbitovní zeď v roce 2013.

Označení malty	Množství záměsové vody (hm. %)	Rozliv na střešacím stole (cm)	Objemová hmotnost čerstvé malty (g.cm <sup>-3</sup> )	Obsah vzduchu (%)
L-m	25	15,7	1,92	2,7
LO-m	25	14,8	2,27	3,6
LM-m	21	14,0	1,97	2,9
LMO-m	25	13,3	2,00	4,0
L-v	19	14,0	2,00	3,3
LO-v	20	14,5	2,32	4,6
LM-v	17	15,6	2,03	3,1
LMO-v	17	14,5	1,98	4,9

#### **2.14.1.5. Monitorování stavu omítek**

Omítky byly na ohradní zeď hřbitova v Krchlebech aplikovány v červenci 2013. Vzhledem k tomu, že se omítané zdivo před nahozením nových omítek neodsolovalo, a ani nebylo provedeno žádné opatření proti vzlínající vlhkosti, předpokládalo se, že tyto zátěžové faktory reálně prověří laboratorně stanovenou odolnost. Monitoring stavu omítek v následujících letech zahrnoval: monitorování vzhledu omítek, vlhkosti,

Destruktivní metody průzkumu a odběry vzorků byly uplatněny v závislosti na stavu omítnuté plochy v pozdějším stádiu vyžrállosti omítek (1 až 1,5 roku od aplikace).

## Vzhled omítek

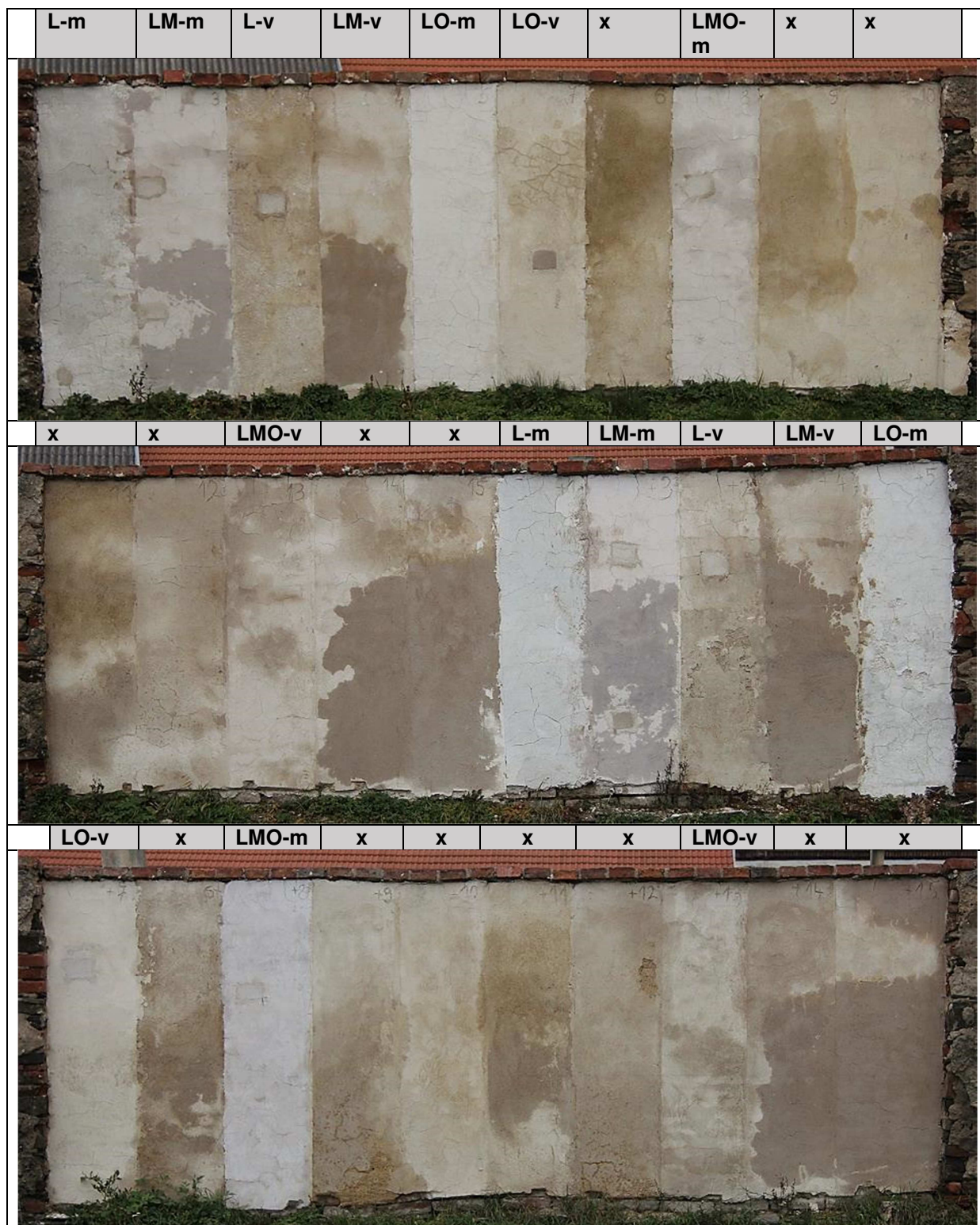
Omítky aplikované na hřbitovní zeď v Krchlebech v roce 2013 vykazovaly po 15 měsících zranění drobná až závažná poškození **Obr. 26**. Před aplikací omítek nebyla provedena žádná technická opatření, snižující negativní vliv vztlínající zemní vlhkosti a ve zdivu přítomných rozpustných solí. Tyto dva faktory byly hlavními příčinami evidovaných projevů poškození omítek.

Smršťovací praskliny: Největší smrštění bylo pozorováno u omítek, které obsahují velké množství pojiva a pouze křemenný písek (L-m, LO-m, LM-m a LMO-m). Varianty omítek s pískem Straškov a s nižším obsahem pojiva smršťovaly výrazně méně

(L-v, LO-v, LM-v a LMO-v). Zdá se, že přítomnost či nepřítomnost podhozu neměla na smrštění omítek žádný vliv. (Podhoz byl proveden aplikací řídké suspenze pojiva ve vodě na očištěnou zeď, pojivem byla vápenometakaolinová směs.)

Estetické závady – barevné skvrny: Vápenné omítky s metakaolinem (LM-m, LM-v), měly na části povrchu výrazně tmavší barvu. Tmavé partie omítky sahají odspodu do poloviny až do tří čtvrtin výšky zdi, vznikly již v prvním měsíci po aplikaci omítek na zeď a odpovídají místům s výrazně vyšším obsahem vlhkosti. Na povrchu vápenometakaolinových malt s olejem (LMO-m, LMO-v) se tmavé skvrny netvořily, nebo jen ve velmi malých, esteticky zanedbatelných, plochách.

Poškození rozpustnými solemi: Omítky ze vzdušného vápna L-m, aplikované na zeď bez podhozu, vykazovaly ve své spodní části poškození způsobené pravděpodobně solemi ze zdiva. Vykrytalizované soli narušily soudržnost omítek, místy se vydrolil písek a vznikly drobné důlky v povrchu omítky. Situace byla lepší v případě stejných omítek aplikovaných na podhoz, omítky L-m aplikované na podhoz nebyla solemi porušena vůbec.

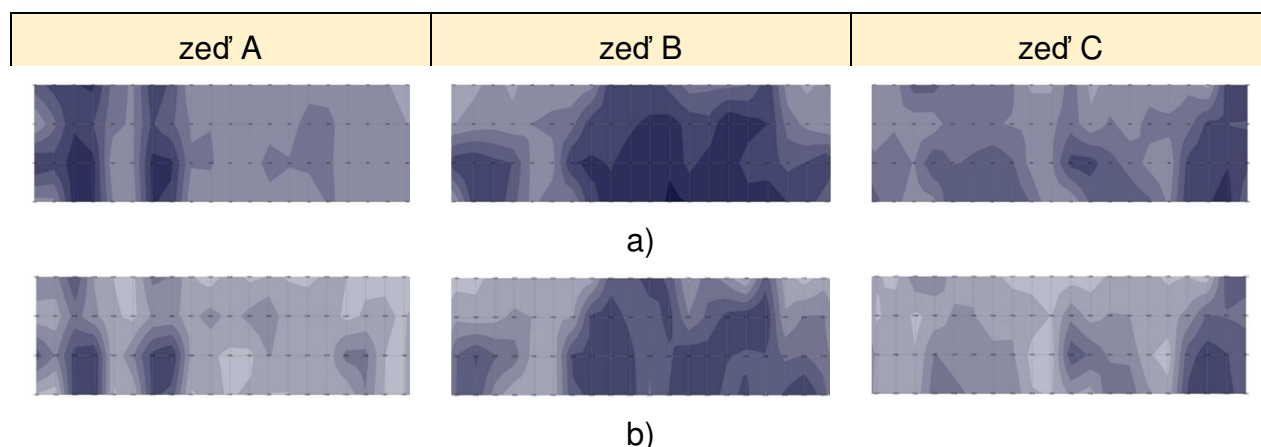


**Obr. 26** Vzhled experimentálních omítek 15 měsíců od aplikace, Krchleby 2014 (x označuje malt, které nejsou předmětem textu disertační práce).

### **Vlhkost omítek a zdiva**

V průběhu zrání vzorků omítek na experimentální zdi byla pomocí mikrovlnné metody monitorována jejich vlhkost za použití třech HF sond s hloubkami detekce 0 až 3 cm, 0 až 9 cm a 0 až 30 cm pod povrch omítky. Vlhkost byla mapována v pravidelné síti (v rámci jednoho panelu vždy ve dvou sloupcích a čtyřech výškách).

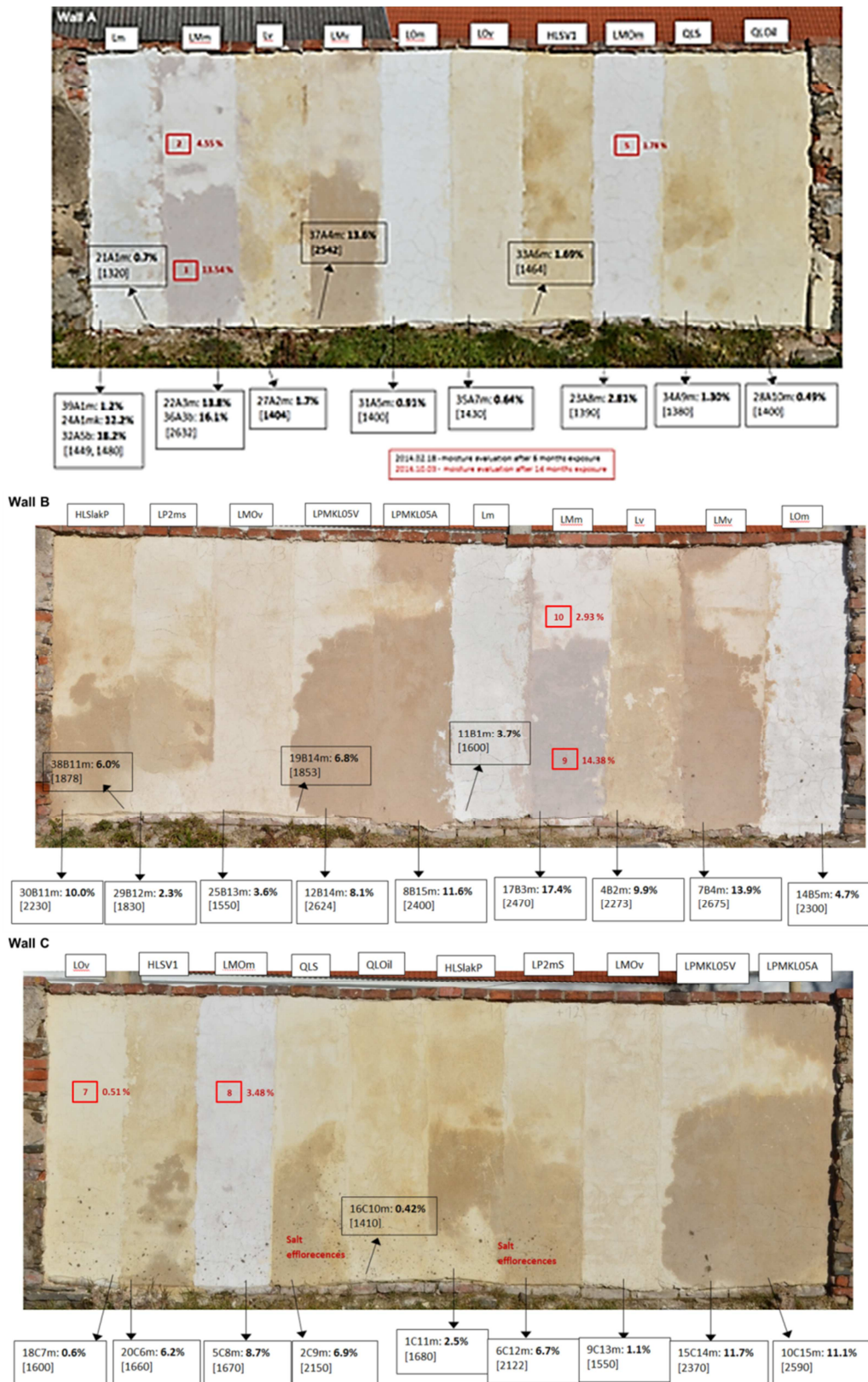
Mapy na **Obr. 27** dokumentují obsah vlhkosti v omítkách a cihelném zdivu ve 3. a 6. měsíci po aplikaci. Z měření vyplynulo, že v omítkách s metakaolinem je obsah vlhkosti vyšší (tyto omítky vodu drží), zatímco v omítkách s olejem jsou díky hydrofobním vlastnostem hodnoty vlhkosti minimální.



**Obr. 27** Distribuce povrchové vlhkosti změřená HF sondou s detekcí do hloubky 0 až 3 cm ve: a) 3 měsících a b) 6 měsících stáří vzorků omítek.

Na **Obr. 28** jsou uvedeny hodnoty gravimetricky stanovené vlhkosti v omítkách na základě odběru vzorků v 6. a 14. měsíci po aplikaci omítek. Gravimetrické stanovení vlhkosti prokázalo, že omítky s olejem (s nebo bez metakaolinu) byly obecně sušší. Tmavě zbarvené omítky LMm měly výrazně vyšší vlhkost (14 hmotn. %) zatímco světlejší oblasti omítky LMm měly cca 5 % vlhkosti.





**Obr. 28** Celkové pohledy na experimentální plochy A, B a C se vzorky omítek starých 6 měsíců. Ve spodní části fotografií jsou výsledky gravimetrického stanovení vlhkosti omítek v 6. a 14. měsíci po nahození.

## Fázové složení omítek

Omítky nahozené v roce 2013 na hřbitovní zeď v Krchlebech byly po celou dobu zrání vystaveny vlivu solí z cihelného zdiva, vlivu vztlínající vlhkosti, ostřikující vody, mrazu. Všechny tyto faktory ovlivnily průběh hydratace a karbonatace pojiva v maltách. Po půl roce od aplikace omítek byly v dolní okrajové části zdi odebrány vzorky omítek. Pomocí termické analýzy byly ve vzorcích stanoveny hlavní složky pojiva malty. Hodnoty zjištěné na vyztřelé maltě (půl roku) byly porovnány se složením čerstvé malty. Dále byl hodnocen vliv podhozu na fázové složení malty, byly proto porovnávány stejné malty aplikované bez podhozu a na vápenometakaolinový podhoz. Vzhledem k velkému počtu mixů jsou zde prezentovány pouze výsledky zrání pojiv malt L, LM, LO a LMO s pískem Provodín a malt L, LM, LO a LMO s pískem Straškov, nanesených na zdivo ve dvou variantách - s podhozem a bez podhozu.

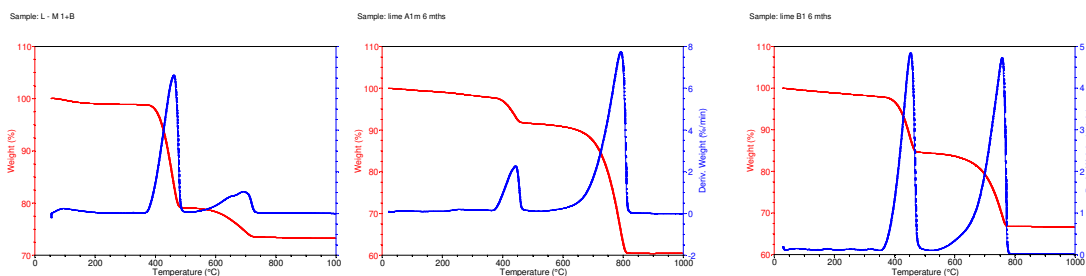
Termogravimetrické křivky v **Obr. 29** a **Obr. 30** znázorňují průběh jednotlivých dějů ve 3 teplotních intervalech: (20 až 380° - dehydratace hydr. složek; 380 až 550°C - dehydratace  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ; 550 až 800°C - rozklad  $\text{CaCO}_3$ ). V grafech na **Obr. 31** a **Obr. 32** je uvedeno množství  $\text{CaO}$  vázaného v reakčních produktech (v portlanditu, kalcitu a hydraulických složkách).

Čerstvá malta

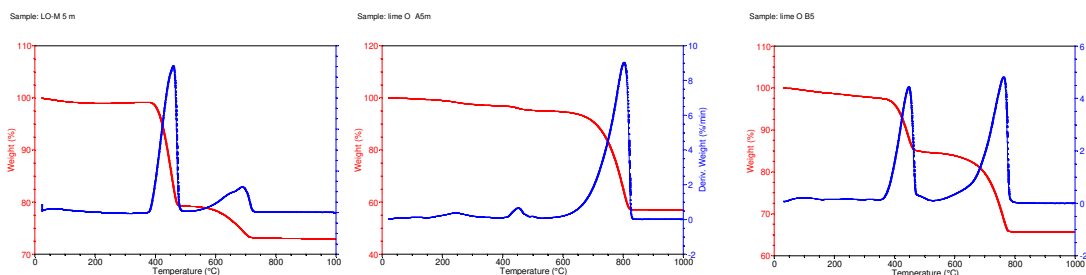
Po 6 měsících zrání na  
zdivu s podhozem

Po 6 měsících zrání na  
zdivu bez podhozu

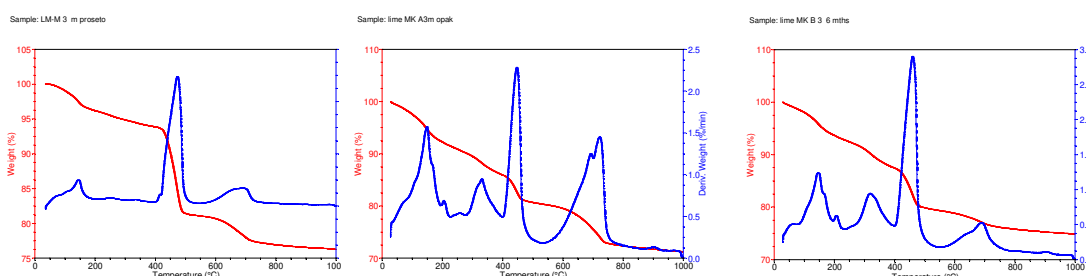
L-m



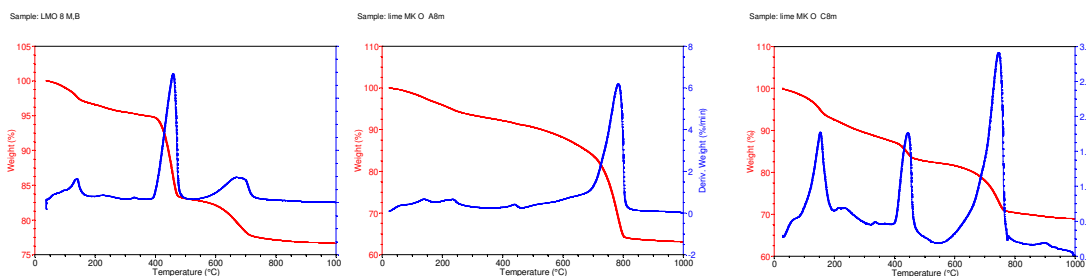
LO-m



LM-m



LMO-m



Obr. 29 Záznamy termické analýzy malty s pískem Provodín.

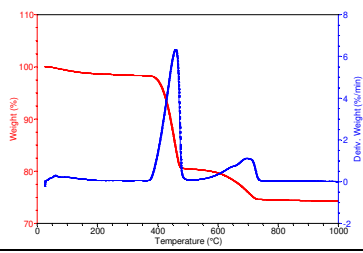
Čerstvá malta

Po 6 měsících zrání na  
zdivu s podhozem

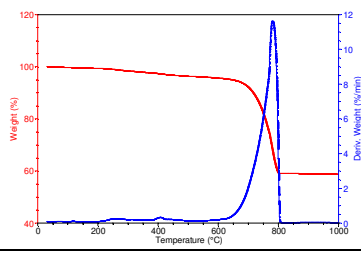
Po 6 měsících zrání na  
zdivu bez podhozu

L-v

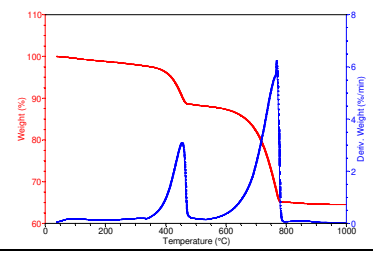
Sample: L-V 2 + B



Sample: lime A Z 6 mths provodni

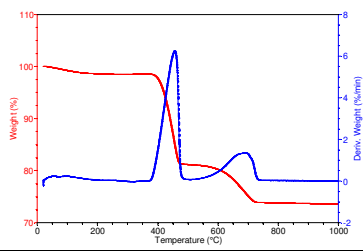


Sample: lime B2 6 mths provodni

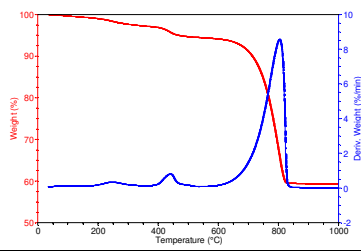


LO-v

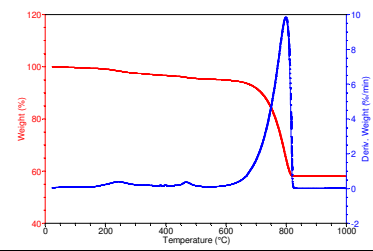
Sample: LO-V 7 M



Sample: lime O A7m strážkov spric

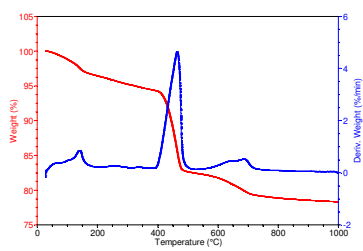


Sample: lime O C7m strážkov nespric

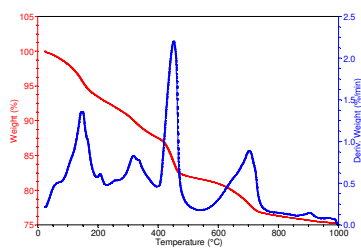


LM-v

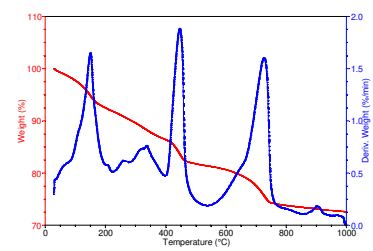
Sample: LM-V 4 m proseito



Sample: lime MK A4 strážkov

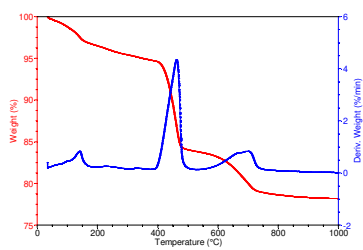


Sample: lime MK B4 strážkov

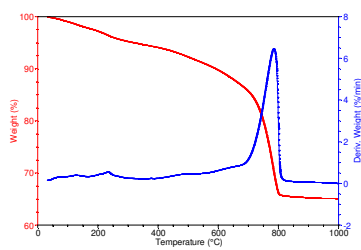


LMO-v

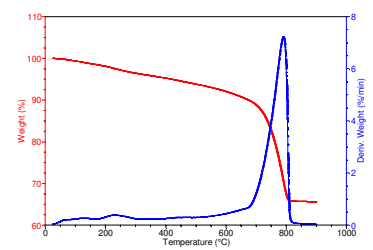
Sample: LMO-V 13 +B



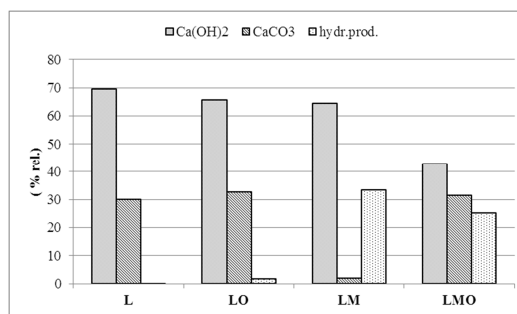
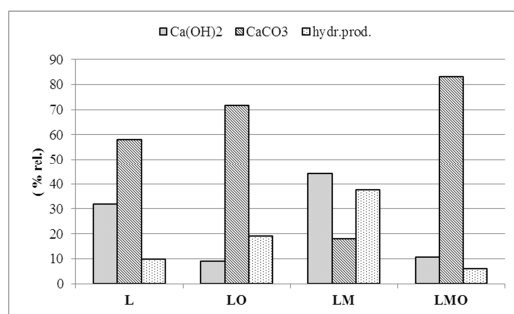
Sample: lime 27 A2



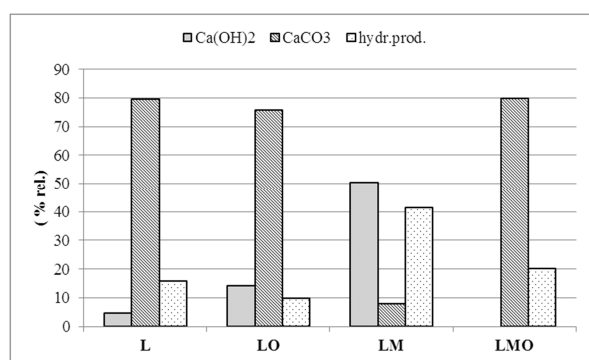
Sample: lime MKOv C13m strážkov



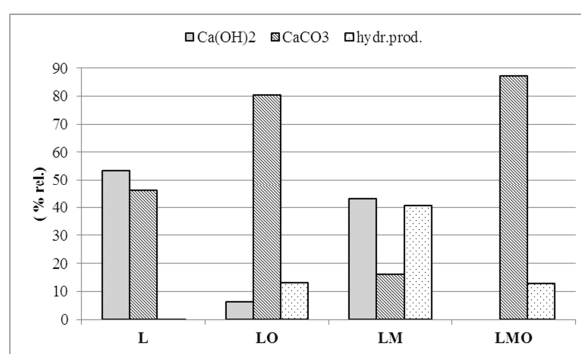
Obr. 30 Záznamy termické analýzy malty s pískem Straškov.



**Obr. 31** Množství CaO vázaného v portlanditu a reakčních produktech, pojivo malt s pískem Provozdín: a) Na zdivu s podhozem; b) na zdivu bez podhozu.



a)



b)

**Obr. 32** Množství CaO vázaného v portlanditu a reakčních produktech, pojivo malt s pískem Straškov: a) Na zdivu s podhozem, b) na zdivu bez podhozu.

Z uvedených termogramů je možno vyvodit následující závěry:

- Příklad Iněného oleje do malty urychluje karbonataci, přičemž efekt je výraznější u malt s podhozem oproti maltám bez podhozu (jediná výjimka je LO Straškov s podhozem, kde LO má nepatrně nižší obsah uhličitane vápenatého než malta L bez oleje).
- Příklad oleje do malt s metakaolinem snižuje obsah hydraulických fází ve směsi.
- Příklad oleje v maltě s pojivem vápno – metakaolin způsobuje vznik odlišných hydratovaných fází oproti těm, které vznikají v maltě bez přídatku oleje (viz pás 200-400 °C u LM a LMO).
- Aplikace podhozu měla významný vliv na urychlení karbonatace malt s pískem Provozdín, zatímco u malt s pískem Straškov byl tento vliv patrný jen u čistě vápenné malty.

## 2.14.2. Aplikace optimalizovaných vápenných malt s metakaolinem a provzdušňovacími přísadami

V roce 2014 byly na experimentální zeď hřbitova v Krchlebech u Čáslavi aplikovány optimalizované receptury malt s provzdušňovacími přísadami na bázi oleátu sodného a dodecyl sulfátu sodného (LLO5, LLO5\_0,5LP50, LLO5\_0,5N90; LK05, LK05\_0,5\_LP50, LK05\_0,5N90). Složení těchto malt je uvedeno v **Tab. 37**, seznam všech materiálů použitých pro přípravu omítek uvádí **Tab. 38**. Všechny složky byly odměřovány v hmotnostním poměru, objemový poměr složek byl přepočítán následně.

**Tab. 37** Složení optimalizovaných malt aplikovaných na hřbitovní zeď v roce 2014.

Označení malty	Složení malty	Objemový poměr složek	Hmotnostní poměr složek
LLO5	Čerták : Mefisto L05 : Straškov 0/4 mm	(3:1):6 = 1:1,5	0,75 : 0,25 : 5,10
LLO5_0,5N90	Čerták : Mefisto L05 : Straškov 0/4 mm + 0,5% LN90	(3:1):6 = 1:1,5	0,75 : 0,25 : 5,10
LLO5_0,5LP50	Čerták : Mefisto L05 : Straškov 0/4 mm + 0,5% LP50	(3:1):6 = 1:1,5	0,75 : 0,25 : 5,10
LK05	Čerták : Mefisto K05 : Straškov 0/4 mm	(2:1):5 = 1:1,5	0,75 : 0,25 : 5,47
LK05_0,5N90	Čerták : Mefisto K05 : Straškov 0/4 mm + 0,5% LN90	(2:1):5 = 1:1,5	0,75 : 0,25 : 5,47
LK05_0,5LP50	Čerták : Mefisto K05 : Straškov 0/4 mm + 0,5% PL50	(2:1):5 = 1:1,5	0,75 : 0,25 : 5,47

**Tab. 38** Materiál použitý pro přípravu malt.

Materiál	Obchodní název	Výrobce
vzdušné vápno CL90	Čerták®	Vápenka Čertovy schody, a.s.
metalupek	Mefisto L05	České lupkové závody, s.r.o.
metakaolin	Mefisto K05	České lupkové závody, s.r.o.
provzdušňovací přísada Ligaphob N90	Ligaphob N90	Peter Greven GmbH & Co. KG
Hydrofobizační a provzdušňovací přísada Berolan LP50	Berolan LP50	Berolan® Vertriebs-Ges.m.b.H
přírodně těžený písek frakce 0/4 mm	Straškov mm	0/4 EUROVIA Kamenolomy, a.s., provozovna Straškov

### 2.14.2.1. Výchozí stav omítané konstrukce

Před omítáním zdiva novými vzorky malt se neprováděly žádné stavební úpravy, které by snižovaly míru zasolení nebo zavlhčení podkladového zdiva. Tyto faktory představují reálné podmínky, kterými byla odolnost testovaných malt prověřena.

Průzkum objektů se omezil na popis a vysvětlení možných příčin stávajících poruch. Z každé zdi o rozloze (cca 20 m<sup>2</sup>) byly v jedné ose odebrány vzorky pro stanovení výškového a hloubkového gradientu zasolení.

Zkušební plochy jsou orientovány na jihovýchod. Každý vymezený pás zdi pro omítnutí určitou maltou je široký cca 5 m, vysoký cca 170 až 190 cm. Tloušťka zdiva odpovídá šířce jedné cihly cca 14 až 20 cm. Koruna ohradní zdi je osazena jednou řadou cihel se sklonem na severozápad. Za zdívem je navýšený terén, který sahá do výšky 60 až 40 cm od paty zdi. Vnější jihovýchodní strana zdiva je do výšky 60 až 100 cm nad zemí viditelně poškozena odparem vztlínající vlhkosti, v této úrovni dochází také ke krystalizaci solí, která vede k povrchovému rozpadu cihel. Vnější strana ohradní zdi je atakována odstříkující vodou a v zimním období také chemickým posypem z přilehlé komunikace. Stav vybrané části zdiva před zahájením experimentálních prací dokumentuje fotografie na **Obr. 33**.



**Obr. 33** Výchozí stav další části zdiva v září 2014. Experimentální plochy D (vlevo) a E (vpravo).

### 2.14.2.2. Příprava podkladu

Před aplikací vzorků byla z povrchu zdiva odstraněna veškerá novodobá vápeno-cementová omítka, spáry mezi cihlami byly proškrabány do hloubky cca 2cm, zvětralý povrch cihel byl osekán a v poli „D“ byly vyměněny zdegradované cihly. Zeď byla následně ometena od prachu koštětem a omyta tlakovou vodou. Složení malty, která byla aplikována při opravách zdiva, uvádí Tab. 39. Připravená experimentální plocha byla rozdělena do 10 pásů o velikosti cca 1 × 1,8 m.

**Tab. 39** Složení zdicí malty.

Malta	Objemový poměr složek	Kamenivo
<b>zdicí malta</b>	<b>3 : 1 : 12 obj. dílů</b> naložený vápenný hydrát CL90 : Mefisto K05: písek	písek Straškov 0/4 mm

### **2.14.2.3. Příprava staveništních malt, omítání, povrchová úprava a ošetřování čerstvých omítek**

Čerstvá malta byla připravována v plastovém kalfasu po cca 30 l dávkách, což vystačilo pro omítnutí jedné poloviny zkušebního pásu o velikosti 1 m × 1,8 m, při tloušťce omítky cca 1,5 až 2 cm. Malta byla míchána ručním elektrickým míchadlem s regulací otáček /Protool MXP 1000 E EF/. Suché složky byly nejprve řádně promíchány a následně byla k suché směsi přidávána záměsová voda, její množství odpovídalo dobré zpracovatelnosti malty – omítky se nahazovaly zednickou lžící. Doprava čerstvé malty na stavbu trvala asi 3 minuty. Omítaný podklad byl těsně před nahazováním omítky navlhčen vodou. Vzorky omítek byly nanášeny nahazováním v jedné vrstvě mezi dvě latě, které vymezily šířku zkušebního pásu a tloušťku omítkové vrstvy (cca 1,5 až 2 cm).

Povrch jedné poloviny omítaného panelu byl zpracován tak, že nadbytečná malta byla stržena dřevěnou latí a povrch byl „zatočen“ dřevěným hladítkem (rajblíkem). Po počátečním zavadnutí (cca po půl hodině) byl povrch opětovně zatočen dřevěným rajblíkem. Druhá polovina omítaného panelu byla po stržení přebytečného množství malty pomocí latě a po počátečním zavadnutí opakovaně utažena dohladka, tzv. kletována.

Omítnuté zkušební panely byly překryty netkanou textilií a po skončení stavebních prací byly po dobu třech dní opakovaně vlhčeny vodou z rozprašovače. Nahazování omítek prováděl profesionální štukatér. Stav cca 1 měsíc starých omítek nahozených na experimentálních plochách D a E dokumentují fotografie na **Obr. 34**.





Obr. 34 Vzorky malt na ohradním zdivu po 1 měsíci od nahození (x - označuje malty, které nejsou předmětem textu disertační práce).

Vlastnosti čerstvé malty připravené na staveništi byly charakterizovány stanovením vodního součinitele, rozlivu malty na střešacím stole (ČSN EN 1015-3, A1), stanovením obsahu vzduchu v čerstvé maltě (ČSN EN 1015-7) a objemové hmotnosti, která byla vyjádřena poměrem hmotnosti a objemu, který čerstvá malta zaujímala po naplnění zkušební nádoby pro stanovení obsahu vzduchu o objemu 1 litr. Zjištěné vlastnosti čerstvých malt shrnuje **Tab. 40**.

Označení malt	Množství					vodní součinitel (W/B)	obj. hmotnost (kg.m <sup>-3</sup> )	rozliv (cm)	obsah vzduchu (%)
	vápno (kg)	metakaoli n (kg)	písek (kg)	přísada (kg)	voda (kg)				
LL05	5,096	1,699	34,625	0,207	7,628	2,5-3,2	2118; 2100	13; 13,7	1,5; 3,5
LL05 _0,5N90	5,096	1,699	34,625	0,207	7,010- 8,006	2,3-2,7	1921-2033	13,7- 14,2	3,6;10,5
LL05 _0,5LP50	5,096	1,699	34,625	0,207	8,000	2,7	1884	13,5	13,5; 11,5
LK05	4,802	1,601	35,017	x	7,48	2,5	2126	16,5	1,3
LK05 _0,5N90	4,802	1,601	35,017	0,207	6,791	2,3	2034	14	5,1
LK05 _0,5LP50	4,802	1,601	35,017	0,207	6,600- 6,758	2,2-2,3	1951	13,0- 13,5	6,3




**Tab. 40** Vlastnosti čerstvých staveništních malt aplikovaných v roce 2014.

#### 2.14.2.4. Monitorování stavu omítek

Vápenometakaolinové omítky optimalizovaného složení, aplikované v říjnu 2014, byly v červenci 2015 podrobeny detailnímu vizuálnímu průzkumu, jehož výsledky shrnuje **Tab. 41**. Monitoring stavu omítek v červenci 2015 odhalil drobná poškození: Vápenné omítky s pucolánovou příměsí pojiva (LL05 a LK05), měly na části povrchu výrazně tmavší barvu. Tmavé partie omítky sahají odspodu do poloviny výšky zdi, vznikly již v prvním měsíci po aplikaci omítek na zeď Obr. 34 a odpovídají místům s vyšším obsahem vlhkosti. Jak bylo potvrzeno gravimetrickým stanovením obsahu vlhkosti ve vzorcích odebraných ve spodní a v horní části zdiva. Spodní partie zdiva je z druhé strany ohradní zdi zasypána zeminou a omítnuté zdivo je tak neustále v kontaktu s vlhkostí, zatímco horní partie zdiva je sušší vzhledem k poklesu kapilarity zdiva s výškou. Vzhledem k tomu, že jsou omítky aplikovány na podklad s trvale rozdílným obsahem vlhkosti, projevuje se tato skutečnost v barevně nejednotném vzhledu omítky (flekatosti). Vápenné omítky s pucolánovou příměsí pojiva a provzdušňovacími přísadami (LLO5\_0,5\_N90, LLO5\_0,5\_N90 a LKO5\_0,5\_LP50, LKO5\_0,5\_N90) působí na pohled celkově sušším dojmem, respektive jejich povrch. V odebraných vzorcích byla stanovena nižší množství vlhkosti ve srovnání s referenčními omítkami bez provzdušňovacích přísad. Nicméně známky prostupující vlhkosti se po 9 měsících od aplikace projevují i na povrchu provzdušňovaných malt v okolí smršťovacích prasklin, které vznikly krátce po nahození omítky na zdivo. Drobné důlky na povrchu omítek (LLO5\_0,5\_LP50, LKO5\_0,5\_LP50 a LKO5\_0,5\_N90) jsou projevem přítomnosti vodorozpuštěných solí.

**Tab. 41** Monitoring omítek aplikovaných na hřbitovní zdi v Krchlebech v říjnu 2014. Stav po 9 měsících v červenci 2015.

<p>K05</p>  <p>Plocha: K05</p>	<p><b>Malta: LKO5</b>            (Čerťák : Mefisto K05) : Straškov 0/4 mm,            hmotnostní poměr složek (0,75 : 0,25) : 5,47            (objemový poměr složek (2:1):5 = 1:1,5)</p> <p><u>Poruchy:</u>            vlhkostní skvrny, trhliny            vlhkost omítky ve spodní partii zdiva = <b>11 % hm.</b>            vlhkost omítky v horní partii zdiva = <b>2,1 % hm.</b></p>
<p>K05LP</p>  <p>Plocha: K05_0,5LP50</p>	<p><b>Malta: LKO5_0,5_LP50</b>            (Čerťák : Mefisto K05) : Straškov 0/4 mm + 0,5% PL50,            hmotnostní poměr složek (0,75 : 0,25) : 5,47            (objemový poměr složek (2:1):5 = 1:1,5)</p> <p><u>Poruchy:</u>            důlky, vlhkostní skvrny, trhliny            vlhkost omítky ve spodní partii zdiva = <b>3,4 % hm.</b>            vlhkost omítky v horní partii zdiva = <b>1,0 % hm.</b></p>
<p>K05LN</p>  <p>Plocha: K05 N90</p>	<p><b>Malta: LKO5_0,5_N90</b>            (Čerťák : Mefisto K05) : Straškov 0/4 mm + 0,5% N90,            hmotnostní poměr složek (0,75 : 0,25) : 5,47            (objemový poměr složek (2:1):5 = 1:1,5)</p> <p><u>Poruchy:</u>            důlky, trhliny            vlhkost omítky ve spodní partii zdiva = <b>2,3 % hm.</b>            vlhkost omítky v horní partii zdiva = <b>1,0 % hm.</b></p>

<p>LLO5</p>  <p>Plocha: LL05</p>	<p><b>Malta: LLO5</b>  (Čerťák : Mefisto L05) : Straškov 0/4 mm,  hmotnostní poměr složek (0,75 : 0,25) : 5,10  (objemový poměr složek (3:1):6 = 1:1,5)</p> <p><u>Poruchy:</u>  vlhkostní skvrny, trhliny  vlhkost omítky ve spodní partii zdiva = <b>4,0 % hm.</b>  vlhkost omítky v horní partii zdiva = <b>1,1 % hm.</b></p>
<p>LLO5LP</p>  <p>Plocha: LL05_0,5LP50</p>	<p><b>Malta: LLO5_0,5_LP50</b>  (Čerťák :Mefisto L05):Straškov 0/4 mm +0,5% LP50,  hmotnostní poměr složek (0,75 : 0,25) : 5,10  (objemový poměr složek (3:1):6 = 1:1,5)</p> <p><u>Poruchy:</u>  důlky, trhliny  vlhkost omítky ve spodní partii zdiva = <b>2,4 % hm.</b>  vlhkost omítky v horní partii zdiva = <b>1,0 % hm.</b></p>
<p>LLO5LN</p>  <p>Plocha: LL05_N90</p>	<p><b>Malta: LLO50,5_N90</b>  (Čerťák : Mefisto L05) : Straškov 0/4 mm + 0,5% N90,  hmotnostní poměr složek (0,75 : 0,25) : 5,10  (objemový poměr složek (3:1):6 = 1:1,5)</p> <p><u>Poruchy:</u>  vlhkostní skvrny, trhliny  vlhkost omítky ve spodní partii zdiva = <b>1,0 % hm.</b>  vlhkost omítky v horní partii zdiva = <b>0,6 % hm.</b></p>

### 3. ZÁVĚR

---

#### 1 Shrnutí výsledků výzkumu vápenných malt s metakaolinem a lněným olejem

- Metakaolin přidáný k vápennému pojivu v množství 25 % z hmotnosti pojiva pozitivně ovlivnil pevnost v tahu za ohybu i v tlaku malty. 28denní pevnost vápenometakaolinové malty v tahu i v tlaku představuje trojnásobek pevností, kterých dosáhla referenční vápenná malta bez metakaolinu.
- V důsledku pucolánové reakce pojiva se vytvořila hutnější struktura malty, ve které převažují póry o průměrech menších než 0,1  $\mu\text{m}$ , zároveň má vápenometakaolinová malta poměrně vysokou pórovitost přístupnou vodě: cca 34 %. Vápenometakaolinová malta se výrazně méně smršťuje a zpomaluje průnik vody kapilárním sáním o cca 45 % oproti referenční vápenné maltě.
- Vápenometakaolinová malta dobře odolala opakovanému působení solného roztoku NaCl a prokázala vyšší mrazuvzdornost oproti referenční vápenné maltě. Zatímco vápenná malta se rozpadla již po prvním zmrazovacím cyklu, vápenometakaolinová malta vydržela 10 cyklů mrazu, nicméně po 10 cyklu byl zaznamenán významný pokles ohybové pevnosti této malty. Projevem poškození pozorovatelných pouhým okem byla síť povrchových prasklinek, která se začala vytvářet v průběhu mrazové zkoušky.
- Bylo zjištěno, že pokud byla vápenometakaolinová malta namočena do vody, její pevnost rostla více než pevnost stejné malty zrající na vzduchu. Této zkoušce byla vystavena malta ve stáří 90 dní. Vysvětlením nárůstu pevnosti malty exponované vodě je hydratace dosud nezhydratovaných složek pojiva.
- Hydrofobní charakter lněného oleje, a také sloučenin vzniklých chemickou reakcí vápenného hydrátu, metakaolinu a oleje, ovlivňuje vlastnosti vápenné i vápenometakaolinové malty. U malt s příměsí oleje byly zjištěny následující charakteristiky:
  - pevnosti, kterých malty dosáhly do cca prvních 28 dnů, se dalším zráním již nezvyšovaly,
  - bylo prokázáno snížení nasákavosti porézního systému malt s přísadou lněného oleje,
  - přidavek oleje trochu zvýšil obsah vzduchu v čerstvé maltě, ale pórovitost zatvrdlých malt s olejem se oproti referenčním maltám zvýšila minimálně,
  - bylo prokázáno výrazné zpomalení absorpce vody, starší malty (180 dní) nasávaly vodu ještě pomaleji,
  - nízká nasákavost vody i roztoku NaCl napomohla tomu, že malty s olejem měly vyšší odolnost vůči účinkům opakovaného máčení ve vodě a vysoušení,

- byla prokázána vyšší mrazuvzdornost vápenometakaolinové malty s olejem oproti referenční vápenometakaolinové maltě bez oleje. Malta s olejem vydržela 20 cyklů mrazu bez výrazného snížení pevnosti. Více cyklů mrazu než 20 již nebylo zkoušeno a mrazuvzdornost vápenometakaolinové malty s olejem tak může být vyšší než 20 cyklů.

## **2 Shrnutí výsledků výzkumu vápenopucolánových malt s provzdušňovacími přísadami**

- Vlastnosti zatvrdlých malt s provzdušňovacími přísadami jsou ovlivněny hydrofobním charakterem zvolených přísad. V případě obou užitých přísad se změnila smáčivost zatvrdlých malt vodou a penetrace vody do modifikovaných malt byla výrazně nižší. Nižší schopnost provzdušněných malt absorbovat vodu se projevila v lepší odolnosti těchto malt vůči cyklům zmrazení a tání vody.
- Při přípravě čerstvých malt, potvrdila zkouška stability pěny (vytvořené během míchání pojiva s rozpuštěnými provzdušňovacími přísadami) srážení obou provzdušňovacích přísad s  $\text{Ca}^{2+}$  ionty. Určité množství užitých přísad proto ztratilo schopnost maltu provzdušnit. Přesto obsah vzduchu v čerstvých maltách s provzdušňovacími přísadami stoupl oproti referenčním maltám. Vyšší míry provzdušnění bylo dosaženo přísadou Berolan LP50.
- Zatvrdlé vápenometakaolinové malty modifikované provzdušňovacími přísadami měly v porovnání s referenčními maltami nižší objemovou hmotnost. Ta dále klesala se zvyšujícím se množstvím provzdušňovací přísady v maltě.
- Pokud jde o efekty různých pucolánových přísad na mechanické vlastnosti vápenometakaolinové malty, vyšších pevností v tahu za ohybu dosáhla malta s lupkovým typem metakaolinu (Mefisto L 05). Mezi 28. a 90. dnem zrání malty byl zaznamenán pokles ohybových pevností charakteristický pro vápenopucolánové malty. Pevnosti v tlaku vápenometakaolinových malt byly vždy vyšší ve srovnání s referenční čistě vápennou maltou. Malty s přídavkem provzdušňovací přísady dosáhly lepších mechanických charakteristik s množstvím přísady 0,05 % z hmotnosti suché směsi. Pro zvýšení pevnosti čistě vápenné malty byla více funkční přísada Ligaphob N90, zatímco pro vápenopucolánové malty s lupkem nebo metakaolinem lépe fungovala příměs Berolan LP50.
- Pórovitost přístupná vodě byla u referenční čistě vápenné malty 21,5% (za atmosférického tlaku) a nasákavost 11,3%. Obě studované pucolánové příměsi (lupková a metakaolinová) otevřenou pórovitost a nasákavost vápenné malty zvýšily, až na hodnotu 26% a nasákavost 14%. Mírně výraznější efekt na nárůst pórovitosti měla lupková příměs oproti metakaolinové. Pokud jde o efekt provzdušňovacích přísad Berolan a Ligaphob, vzhledem k jejich hydrofobizujícímu charakteru tyto přísady příliš

nezvýšily nasákavost malt a pórovitost přístupnou vodě. Vlivem provzdušňovacích přísad došlo k nejvyššímu nárůstu pórovitosti v důsledku přidání vyššího množství přísady Berolan LP50. Pro výrazně hydrofobní malty s vyšší dávkou přísady Ligaphob N90 se metodika zjišťování otevřené pórovitosti na základě nasáknutí měřených vzorků vodou ukázala jako méně vhodná, protože voda proniká i při sníženém tlaku do takto málo smáčivé malty velice obtížně.

- Rychlost kapilární absorpce vody maltami je v případě referenčních malt bez provzdušnění v rozmezí 9 – 11 kg.m<sup>2</sup>.hod<sup>-1/2</sup>. V důsledku hydrofobního chování malt s přídavkem provzdušňovacích přísad klesá absorpční koeficient nasákavosti s rostoucím množstvím přísady.
- Rychlost vysychání vody z malt je přídavkem pucolánových příměsí ovlivněna jen minimálně. Zaměříme-li přesto pozornost na typ pucolánové přísady, malty s lupkovou příměsí L05 vysychají o maličko rychleji než malty s příměsí K05. Přídavkem provzdušňovacích přísad se vysychání všech zkoušených malt zpomaluje, ale vliv typu a množství přísady nelze jednoznačně interpretovat.
- Pokud se jedná o difúzní propustnost malt pro vodní páru, důsledkem přídavku pucolánové příměsi došlo k nárůstu faktoru difúzního odporu malt oproti referenční vápenné maltě cca z 9 na 11 až 15. U čistě vápenné malty dochází důsledkem přidání menšího množství obou provzdušňovacích přísad k pomalejšímu odpařování vody přes vrstvu malty. Vyšší přídavek Ligaphob N90 do vápenné malty způsobil nárůst faktoru difúzního odporu (mokrou miskou) o cca 26%. Podobný trend ukázaly malty s pucolánovou příměsí L05. U malt s pucolánovou příměsí K05 se výsledky mokré i suché misky výrazně lišily, protože pravděpodobně došlo k chemické reakci misky a KNO<sub>3</sub>. Metodou suché misky byl naměřen pokles hodnot faktoru difúzního odporu v důsledku přídavku provzdušňovacích přísad.
- Pro odolnost malt vůči účinkům zmrazovací zkoušky je rozhodující volba zkušební postupu zmrazování a tání. Podmínky zkoušky, kdy se tělesa po počátečním namočení ve vodě zmrazují a následně tají ve vodě (a znovu nasávají vodu), přispívají k rychlejšímu postupu degradace zkušebních zmrazovaných těles. Výsledky zmrazovací zkoušky potvrdilo výrazné zhoršení dynamického modulu pružnosti propad ohybových pevností zmrazovaných zkušebních těles. U některých malt došlo k rozpadu ještě před dosažením 15. cyklu. Nejlépe zmrazovacím cyklům při tání pod vodou odolaly malty s lupkovým typem pucolánové příměsi a s přídavkem provzdušňovací přísady Ligaphob N90. Pokud byla zmrazovací zkouška provedena mírnějším postupem, kdy jsou tělesa po počátečním namočení ve vodě zabalena do PE obalů a po celou dobu zmrazování i tání v obalech zůstávají s téměř konstantním množstvím vody v porézní struktuře, nezpůsobí ani 25 cyklů zmrazení a tání u většiny malt významnější poškození, které by se projevilo změnou mechanických vlastností.

### 3 Chování studovaných omítek na reálném objektu

- Řada vápenných a vápenopucolánových malt s příměsemi byla studována na povětrnosti po omítnutí na zkušební plochy vymezené na zdi kolem hřbitova a kostela sv. Václava v Krchlebech u Čáslavi. Vybraná historická zeď byla zatížená vlhkostí a solemi a tyto dva faktory ovlivňovaly způsob stárnutí a životnost studovaných omítek. Po 15 měsících vykazovaly vzorky omítek již různé stupně a projevy poškození, které byly popsány.
- Vzorky omítek s vysokým množstvím vápenného nebo vápenometakaolinového pojiva s čistě křemenným pískem bez hlinité složky byly poškozeny zejména smršťovacími trhlinami. Varianty omítek s přírodním maltovým pískem (s hlinitou složkou) a s nižším obsahem pojiva se smršťovaly výrazně méně. Z hlediska smršťení se ukázaly jako vyhovující omítky s objemovým poměrem pojiva a písku 1:1,5. Lepší vzhled (nižší smršťení) měly omítky s pískem Straškov (maltový písek) oproti omítkám s pískem Provodín (čistě křemenný písek s optimální křivkou zrnitosti). Přítomnost či nepřítomnost podhozu (provedeného aplikací řídké suspenze vápenometakaolinového pojiva ve vodě na očištěnou zeď) neměla na smršťení omítek žádný vliv.
- Omítky s metakaolinem, bez obsahu oleje, byly velmi náchylné k ztmavnutí růžovohnědé barvy v souvislosti s vyšším obsahem vlhkosti v omítce. V případě, že byla tato omítka aplikovaná na podklad s trvale rozdílným obsahem vlhkosti, tato skutečnost se projevila v barevně nejednotném vzhledu omítky (flekatosti). Barevné rozdíly byly tím výraznější, čím byly vyšší rozdíly v obsahu vlhkosti. Zvýšená vlhkost omítky byla důsledkem vztlínání vody z terénu do určité výšky zdi, a pravděpodobně také přítomností hygroskopických solí přešlých ze zdiva do omítky. Barevná nejednotnost povrchu omítky může být považována za vadu. Odchytky v barvě mohou být na historických objektech přijatelné, ale jen do určité míry. Pro případy aplikace růžovohnědé vápenometakaolinové omítky na vlhkostí zatíženou zeď byl z experimentu vyvozen závěr doporučit úpravu povrchu omítky bílým vápenným nátěrem, protože ztmavnutí v důsledku vlhkosti je méně esteticky rušivé v případě bílé nebo hodně světlé barvy povrchu. Z hlediska homogenosti barvy omítky byl vyhovující vzhled povrchu vápenných omítek bez metakaolinu a vápenometakaolinových omítek s olejem.
- Poškození omítek solemi (přítomnými ve zdi) bylo výrazně ovlivněno podmínkou, zda omítky byly aplikovány přímo na zeď nebo na zeď omítnutou podhozem. Stav omítek aplikovaných na podhoz byl výrazně lepší. Lépe odolaly omítky s metakaolinem a s olejem. Vápenné omítky (včetně omítek připravených z hydraulického vápna) bez metakaolinu vykazovaly již po 1. roce své existence poškození (na zdi bez podhozu).



- Po stránce estetické, nejlepší vzhled měl po roce expozice malt povrch vápenné omítky s olejem. Nejvíce poškozená (v dolních partiích) byla čistě vápenná omítka bez přísad a příměsí.

#### 4. SEZNAM TABULEK

---

<b>Tab. 1</b> Pevnostní charakteristiky a pórovitost vápenné a vápenno-pucolánové malty (Slížková a kol., 2007). .....	13
<b>Tab. 2</b> Zkouška mrazuvzdornosti (Slížková a kol., 2007). .....	14
<b>Tab. 3</b> Odolnost proti krystalizaci solí (Slížková a kol., 2007). .....	14
<b>Tab. 4</b> Základní vlastnosti malty Nestor P 0/4. ....	14
<b>Tab. 5</b> Základní vlastnosti malty Nestor W 0/4. ....	15
<b>Tab. 6</b> Vlastnosti čerstvé vápenné malty poměru 1:3 (Čechová, 2009). ....	25
<b>Tab. 7</b> Složení maltových směsí. ....	30
<b>Tab. 8</b> Materiály použité pro přípravu malt (obchodní značky a výrobci). ....	30
<b>Tab. 9</b> Předepsaná hodnota rozlití pro různé druhy mat vztahující se na objemovou hmotnost čerstvé malty dle ČSN EN 1015-2. ....	31
<b>Tab. 10</b> Vlastnosti čerstvých malt. ....	32
<b>Tab. 11</b> Přehled laboratorních zkoušek studia vápenných malt s metakaolinem a lněným olejem. ....	34
<b>Tab. 12</b> Pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku stanovené na vzorcích 20×20×100 mm ve 14, 28, 60, 90 a 180 dnech zrání malty. ....	37
<b>Tab. 13</b> Pevnosti v tahu za ohybu a tlakové pevnosti malt stanovené na vzorcích 40×40×160 mm v 90, 180 a 360 dnech zrání malty. ....	38
<b>Tab. 14</b> Rychlost karbonatace v čase vyjádřená jako množství spotřebovaného portlanditu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ku jeho počátečnímu množství. ....	40
<b>Tab. 15</b> Porozita vápenných malt v 90. dni zrání, výsledky ze rtuťové porozimetrie	41
<b>Tab. 16</b> Objemová hmotnost a otevřená pórovitost vápenných malt v 90. a 180. dni zrání zjištěná hydrostatickým vážením. ....	41
<b>Tab. 17</b> Koeficienty kapilární absorpce malt v 90. a 180. dni zrání, měření s parotěsným nátěrem na povrchu testovaného tělíska kromě smáčené plochy. ....	43
<b>Tab. 18</b> Permeabilita vápenných omítek stanovená metodou suché misky v 90 dnech zrání. ....	44
<b>Tab. 19</b> Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku stanovená na 90 dnů starých tělesech podrobených 15 cyklům, respektive 20 cyklům (v případě vápenometakaolinové malty) zkoušky odolnosti solím. ....	49
<b>Tab. 20</b> Otevřená pórovitost a objemová hmotnost malt (ve stáří 90 dnů) po zkoušce mrazuvzdornosti. ....	52
<b>Tab. 21</b> Složení a zpracovatelnost čerstvých malt. ....	57

<b>Tab. 22</b> Přehled laboratorních zkoušek studia vápenných malt s metakaolinem a provzdušňovacími přísadami. ....	59
<b>Tab. 23</b> Podmínky stanovení propustnosti malt pro vodní páru metodou suché a mokré misky. ....	60
<b>Tab. 24</b> Pevnost v ohybu, pevnost v tlaku a dynamický modul pružnosti (malty ve stáří 28 a 90 dní). ....	62
<b>Tab. 25</b> Procentuální změny pevností v ohybu a v tlaku vůči referenčním maltám v důsledku přidavku provzdušňovacích přísad pro malty staré 28 a 90 dní. ....	63
<b>Tab. 26</b> Procentuální změna pevností vůči referenční maltě v důsledku přidavku provzdušňovacích přísad v dávce 0,05 %. (Uvedeny jsou pouze změny nad 30 %, hodnoty jsou zaokrouhlené).....	64
<b>Tab. 27</b> Pórovitost přístupná vodě a nasákavost za atmosférického a za sníženého tlaku zjištěná u vzorků malt ve stáří 90 dní od přípravy. ....	65
<b>Tab. 28</b> Procentuální změna otevřené pórovitosti v důsledku přítomnosti provzdušňovací přísady u malt ve stáří 90 dnů od přípravy.....	66
<b>Tab. 29</b> Koeficient kapilární absorpce a procentuální změna absorpčního koeficientu v důsledku přidavku provzdušňovací přísady (malty ve stáří 28, 90 dní).....	67
<b>Tab. 30</b> Faktor difúzního odporu stanovený metodou suché a mokré misky a procentuální změna faktoru difúzního odporu v důsledku přítomnosti provzdušňovací přísady (malty staré 90 dní). ....	69
<b>Tab. 31</b> Rychlost vysychání vody: množství absorbované vody, koeficient vysychání a index vysychání malt ve stáří 28 a 90 dní.....	71
<b>Tab. 32</b> Pevnosti v ohybu a tlaku změřené po ukončení zkoušky zmrazování a procentuální změna dyn. modulu pružnosti změřeného na začátku a na konci zmrazovací zkoušky na tělesech vysušených do konst. hmotnosti, malty staré 90 dnů. ....	74
<b>Tab. 33</b> Složení vzorků omítek aplikovaných na cihelnou ohradní zeď hřbitova 2013. ....	82
<b>Tab. 34</b> Materiál použitý pro přípravu vzorků omítek na cihelnou ohradní zeď hřbitova 2013.....	82
<b>Tab. 35</b> Složení zdicí a špricové vápenometakaolinové malty (*směs kameniva 3 obj. díly písku Zálezlice 0/4 mm s 1 obj. dílem vápencové drti 2/4 mm, lom Skoupý) .....	84
<b>Tab. 36</b> Vlastnosti čerstvých staveništních malt aplikovaných na hřbitovní zeď v roce 2013.....	85
<b>Tab. 37</b> Složení optimalizovaných malt aplikovaných na hřbitovní zeď v roce 2014. ....	94
<b>Tab. 38</b> Materiál použitý pro přípravu malt. ....	94
<b>Tab. 39</b> Složení zdicí malty. ....	96
<b>Tab. 40</b> Vlastnosti čerstvých staveništních malt aplikovaných v roce 2014.....	98

**Tab. 41** Monitoring omítek aplikovaných na hřbitovní zdi v Krchlebech v říjnu 2014.  
Stav po 9 měsících v červenci 2015. .... 99

## 5. SEZNAM OBRÁZKŮ

---

- Obr. 1** Pucolánová aktivita různých materiálů (aerosil, metakaolin Mefisto K05, cihla, popel z pšeničné slámy a smrkového dřeva, frita) (Křístek a Rovnaníková, 2005)... 12
- Obr. 2** Karbonatace vápenné omítky (Rovnaníková, 2002)..... 16
- Obr. 3** DTA termogram - vývoj hydratovaných fází v MK/vápenné pastě s časem hydratace při 20°C (a) a při 60°C (b) (Frías a kol., 2003). ..... 18
- Obr. 4** (a) Vývoj pevností v tahu za ohybu, (b) vývoj pevností v tlaku. .... 19
- Obr. 5** (a) Objemová hmotnost zatvrdlé malty, (b) pórovitost zatvrdlé malty. .... 19
- Obr. 6** Vliv intenzity míchání suché směsi na vodoodpudivost (Riethmayer, 1960). 24
- Obr. 7** DTG křivky analyzovaných vzorků pojiva malt ve 14, 28, 60 a 90 dnech stáří. .... 39
- Obr. 8** Distribuce velikosti částic v 90 a 180 dnech stáří vápenných malt (plná čára: 90 dní; čerchovaná čára: 180 dní). Pro vápennou maltu bylo provedeno měření pouze v 90. dnu zrání. .... 42
- Obr. 9** Křivky kapilární absorpce vápenných malt v 90. dni zrání..... 43
- Obr. 10** Mikrosnímky struktury malt z optického mikroskopu (CPL) z 90. dne zrání (a) L – vápenná malta, (b) LO – vápenná malta s olejem, (c) LM – vápenometakaolinová malta, (d) LMO – vápenometakaolinová malta s olejem. .... 45
- Obr. 11** snímky vápenné malty a vápenné malty s olejem: snímky výbrusu – leštěná plocha (vlevo); morfologie malty na nebroušené ploše (vpravo)..... 46
- Obr. 12** SEM snímky vápenometakaolinové malty bez a s přidavkem lněného oleje: snímky výbrusu – leštěná plocha (vlevo); morfologie malty na nebroušené ploše (vpravo). .... 47
- Obr. 13** Změna hmotnosti tělesa po 1. a každém dalším 5. cyklu (v důsledku nasycení těles vodou nebo roztokem NaCl). .... 48
- Obr. 14** Pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku 90denních malt podrobených zkoušce odolnosti solím..... 49
- Obr. 15** Stav vápenné malty po 15. cyklech působení roztoku NaCl (tělesa označená S) a působení vody (tělesa označená SR). Snímky nahoře vlevo (bez oleje) a vpravo (s olejem). Vápenometakaolinové malty byly podrobeny 20 cyklům. Snímky dole vlevo (bez oleje) a vpravo (s olejem)..... 50
- Obr. 16** Změna rychlosti ultrazvukového pulzu s narůstajícím počtem zmrazovacích cyklů u zmrazovaných těles a dobou ponoření ve vodě u referenčních těles. Malty ve stáří 90 dnů..... 51
- Obr. 17** Pevnost v ohybu a tlaková pevnost 90 dní starých malt stanovená po zmrazovací zkoušce. .... 51

<b>Obr. 18</b> Vzhled vzorků malty po zmrazovací zkoušce: a) L po 1 cyklu; b) LO po 10 cyklech; c) LM po 10 cyklech; d) LMO po 20 cyklech. Vpravo – těleso zmrazované, vlevo – těleso uložené po dobu zkoušky pod vodou.....	53
<b>Obr. 19</b> Křivky kapilární absorpce (malty ve stáří 90 dní).....	68
<b>Obr. 20</b> Křivky vyschání vodou nasycených malt ve stáří 28 a 90 dní.....	72
<b>Obr. 21</b> Vzhled vzorků malt po ukončení zkoušky zmrazování a tání. Skupina malt s vápenným hydrátem: levý sloupec fotografií: vlevo – 3 tělesa zmrazovaná a tající ve vodě a vpravo - 3 tělesa referenční uložená pod vodou. Pravý sloupec fotografií: vlevo – 3 tělesa zmrazovaná po počátečním namočení v PE obalu, tající v PE obalu na vzduchu, vpravo – 3 (*nebo 4) tělesa referenční po počátečním namočení v PE obalu do ukončení zkoušky. Tělesa 20×20×100 mm, 90 dnů.....	75
<b>Obr. 22</b> Vzhled vzorků malt po ukončení zkoušky zmrazování a tání. Skupina vápenometakaolinové malty LL05: levý sloupec fotografií: vlevo – 3 tělesa zmrazovaná a tající ve vodě a vpravo - 3 tělesa referenční uložená pod vodou. Pravý sloupec fotografií: vlevo – 3 tělesa zmrazovaná po počátečním namočení v PE obalu, tající v PE obalu na vzduchu, vpravo – 3 (*nebo 4) tělesa referenční po počátečním namočení v PE obalu do ukončení zkoušky. Tělesa 20×20×100 mm, 90 dnů.....	76
<b>Obr. 23</b> Vzhled vzorků malt po ukončení zkoušky zmrazování a tání. Skupina vápenometakaolinové malty LK05: levý sloupec fotografií: vlevo – 3 tělesa zmrazovaná a tající ve vodě a vpravo - 3 tělesa referenční uložená pod vodou. Pravý sloupec fotografií: vlevo – 3 (*nebo 4) tělesa zmrazovaná po počátečním namočení v PE obalu, tající v PE obalu na vzduchu, vpravo – 3 tělesa referenční po počátečním namočení v PE obalu do ukončení zkoušky. Tělesa 20×20×100 mm, 90 dnů.....	77
<b>Obr. 24</b> Výchozí stav hřbitovní zdi v Krchlebech v roce 2013, vpravo experimentální plochy A, B a C.....	81
<b>Obr. 25</b> Zrnitost použitých písků: Provodín směs 0/4; Straškov 0/4 .....	83
<b>Obr. 26</b> Vzhled experimentálních omítek 15 měsíců od aplikace, Krchleby 2014 (x označuje malt, které nejsou předmětem textu disertační práce).....	87
<b>Obr. 27</b> Distribuce povrchové vlhkosti změřená HF sondou s detekcí do hloubky 0 až 3 cm ve: a) 3 měsících a b) 6 měsících stáří vzorků omítek. ....	88
<b>Obr. 28</b> Celkové pohledy na experimentální plochy A, B a C se vzorky omítek starých 6 měsíců. Ve spodní části fotografií jsou výsledky gravimetrického stanovení vlhkosti omítek v 6. a 14. měsíci po nahození. ....	89
<b>Obr. 29</b> Záznamy termické analýzy malty s pískem Provodín.....	91
<b>Obr. 30</b> Záznamy termické analýzy malty s pískem Straškov. ....	92
<b>Obr. 31</b> Množství CaO vázaného v portlanditu a reakčních produktech, pojivo malt s pískem Provodín: a) Na zdivu s podhozem; b) na zdivu bez podhozu.....	93
<b>Obr. 32</b> Množství CaO vázaného v portlanditu a reakčních produktech, pojivo malt s pískem Straškov: a) Na zdivu s podhozem, b) na zdivu bez podhozu.....	93

<b>Obr. 33</b> Výchozí stav další části zdiva v září 2014. Experimentální plochy D (vlevo) a E (vpravo). .....	95
<b>Obr. 34</b> Vzorok malt na ohradním zdivu po 1 měsíci od nahození (x - označuje malty, které nejsou předmětem textu disertační práce). .....	97

## 6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

---

- (Arandigoyen a kol., 2006) Arandigoyen, M., Bicer-Simsir, B., Alvarez, J.I. Lange, D.A., Variation of microstructure with carbonation in lime and blended pastes. *Applied Surface Science*, 252, 7562-7571, 2006.
- (Arizzi, a kol., 2012) A. Arizzi, H. Viles, G. Cultrone, Experimental testing of the durability of lime-based mortars used for rendering historic buildings. *Construction and Building Materials*, (28), 807–818, 2012.
- (Ashurst a kol., 1988) J. Ashurst, N. Ashurst. *Practical Building Conservation: Mortars, Plasters and Renders*, New York: Halsted Press, 34, 1988.
- (Banfill, 2000) P. F. Banfill. A relationship between hydraulicity and permeability of hydraulic lime, 173, 2000.
- (Baronio a kol., 1997) G. Baronio, L. Binda, N. Lombardini, The role of brick pebbles and dust in conglomerates based on hydrated lime and crushed bricks. *Construction and Building Materials*, (11), 33-40, 1997.
- (Balek a kol., 1996) V. Balek, M. Murat. The emanation thermal analysis of kaolinite clay minerals, *Thermochimica Acta*, 385-397, 1996.
- (Balksten, 2007) K. Balksten, *Traditional Lime Mortar and Plaster – Reconstruction with emphasis on durability*. PhD thesis, Chalmers university of technology Göteborg, Sverige 2007.
- (Balksten a Magnusson, 2004) K. Balksten, S. Magnusson, The pore structure in lime plaster as a key to understanding moisture transportation properties and frost damages. *Proceedings of the 10th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone*. Stockholm, Sweden 2004.
- (Benešová a kol., 2010) H. Benešová, P. Volfová, M. Pavlíková. Stanovení pucolánové aktivity alternativních silikátových pojiv. *Seminář Metakaolin*, VUT Brno, 5-11, 2010.
- (Binda a Baronio, 1997) L. Binda, G. Baronio, Study of the pozzolanicity of some bricks and clays, *Construction and Building Materials* (11), 41-46, 1997.
- (Biscontin a kol., 2002) G. Biscontin, M. Pellizon, B. E. Zendri, Characterization of binders employed in the manufacture of Venetian historical mortars. *Journal of Cultural Heritage*, (3), 31-37, 2002.
- (Blachnik, 2001) B. Blachnik. *Zusatzmittel in Putzmörteln - Wirksamkeit, Dauerhaftigkeit und Auslaugung*, PhD Thesis, Universität-Gesamthochschule Siegen, Siegen, 2001.
- (Böke a kol., 2006) E. H. Böke, S. Akkurt, B. İpekoglu, E. Ugurlu. Characteristics of brick used as aggregate in historic brick-lime mortars and plasters, *Cement and Concrete Research*, 1115-1122, 2006.
- (Buchwald a Schulz, 2005) A. Buchwald, M. Schulz, Alkali-activated binders by use of industrial by-products. *Cement and Concrete Research*, (35), 968-973, 2005 <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.019>
- (Cabrera a kol., 2001) J. Cabrera, M.R. Frías. Mechanism of hydration of the metakaolin-lime-water system, *Cement and Concrete Research* (31), 177-182, 2001.
- (Cahoon a kol., 2008) E.B. Cahoon a M. Schimd. Metabolic engineering of the content and fatty acid composition of vegetable oils, *Bioengineering and Molecular Biology of Plant Pathways*, Ed(s). Hans J. Bohnert, Henry Nguyen and Norman G. Lewis, (1), 163-192, 2008.



- (Cizer, Thesis 2009) O. Cizer, Competition between carbonation and hydration on the hardening of calcium hydroxide and calcium silicate binders, PhD thesis, KU, Leuven, 2009.
- (Cultrone a kol., 2005) G. Cultrone, E. Sebastián, M. Ortega Huertas, Forced and natural carbonation of lime-based mortars with and without additives: Mineralogical and textural changes. *Cement and Concrete Research* 35, 2278–2289, 2005.
- (Čechová, 2009) E. Čechová. The effect of linseed oil on the properties of lime-based restoration mortars, PhD thesis, Bologna: Università di Bologna, 2009.
- (Dolch, 1996) W. Dolch, *Concrete Admixtures Handbook. Air-entraining admixtures. Concrete Admixtures Handbook. Properties, Science, and Technology*, Second Edition, 1996.
- (Fagerlund, 2002) G. Fagerlund, Mechanical damage and fatigue effects associated with freeze-thaw of materials, International RILEM Workshop on Frost Resistance of Concrete, Editor(s): M. J. Setzer, R. Auberg and H. - J. Keck, Print-ISBN: 2-912143-30-6, e-ISBN: 2351580370, Publisher: RILEM Publications SARL, 117 – 132, 2002. <http://www.rilem.org/images/publis/pro024-013.pdf>
- (Frías a kol., 2003) M. R. Frías, M.I. Sánchez de Rojas. The effect of high curing temperature on the reaction kinetics in MK/lime and MK-blended cement matrices at 60 °C, *Cement and Concrete Research* (33), 643–649, 2003.
- (Frías a kol., 2007) M. Frías, E. Villar-Cociña, E. Valencia-Morales, Characterisation of sugar cane straw waste as pozzolanic material for construction: Calcining temperature and kinetic parameters. *Waste Management*, (27), 533-538, 2007.
- (Gameiro a kol., 2012) A. Gameiro, S.A. Santos, R. Veiga, A. Velosa, Hydration products of lime–metakaolin pastes at ambient temperature with ageing. *Thermochimica Acta*, (535), 36-41, 2012.
- (Gibson, 2011) P. Gibson, Pozzolans for Lime Mortars. <http://www.buildingconservation.com/articles/pozzo/pozzo.htm>
- (Gonnerman, 1944) H.F. Gonnerman. Tests of concretes containing air-entraining Portland cements or air-entraining materials added to batch at mixer, *Research Department Bulletin RX013*, Portland Cement Association, 1944.
- (Gruber, 2001) A. Gruber. Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin, *Cement and Concrete Composites*, 479-484, 2001.
- (van Hees a kol., 2004) R.P.J. van Hees, L. Binda, I. Papayianni, E. Toumbakari, Damage analysis as a step towards compatible repair mortars. C. Groot, G. Ashall, J. Hughes (Eds.), *Characterization of old materials with respect to their repair – RILEM TC 167-COM*, RILEM Publications SARL, 107-152, 2004.
- (Heide a kol., 2006) K. Heide, M. Földvari. High temperature mass spectrometric gas-release studies of kaolinite  $\text{Al}_2[\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$  decomposition, *Thermochimica Acta*, (446), 106–112, 2006.
- (Chandra, 2003) S. Chandra. *History of Architecture and Ancient Building Materials in India, Part II*. New Delhi, India: Tech Books International, 81-88305-03-0, 2003.
- (Chatterji, 1999a) S. Chatterji, Aspects of the freezing process in a porous material–water system: Part 1. Freezing and the properties of water and ice. *Cement and Concrete Research*, (29), 627-630, 1999.

- (Chatterji, 2003) S. Chatterji, Freezing of air-entrained cement-based materials and specific actions of air-entraining agents. *Cement and Concrete Composites*, (25), 759-765, 2003.
- (Izaguirre a kol., 2009) Izaguirre, A., Lanás, J., Álvarez, J.I. Effect of water-repellent admixtures on the behaviour of aerial lime-based mortars. *Cement and Concrete Research*, (39), 1095–1104, 2009.
- (Izaguirre a kol., 2010) A. Izaguirre, J. Lanás, J.I. Álvarez. Ageing of lime mortars with admixtures: Durability and strength assessment, *Cement and Concrete Research* (40), 1081–1095, 2010.
- (Justnes a kol., 2003) H. Justnes, T.A. Østnor, V.N. Barnils. Vegetable oils as water repellents for mortars. *Proceedings of the International Conference on Recent Trends in Concrete Technology and Structures*, Coimbatore, India, 2003.
- (Kakali a kol., 2001) G. Kakali, T. Perraki, S. Tsvilis, E. Badogiannis. Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity, *Applied Clay Science*, (20), 73-80, 2001.
- (Khabit a Hibbert, 2005) J.M. Khabit, J.J. Hibbert, Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin. *Construction and Building Materials*, (9), 460 - 472, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.07.017>
- (Khatib a Wild, 1996) Khatib J. M. a Wild S. Pore size distribution of metakaolin paste, *Cement and Concrete Research* (26), 1545-1553, 1996.
- (Koutník a kol., 2009) P. Koutník, P. Bezucha, M. Poslední, P. Antoš, P. Rovnaníková, P. Roubíček. *Seminář Metakaolin 2011*, VUT Brno, 74-81, 2009.
- (Koutník a kol., 2011) P. Koutník, P. Antoš, P. Rovnaníková, P. Roubíček, J. Červinka. *Aplikace vápenno-pucolánových malt*, *Seminář Metakaolin*, VUT Brno, 19-27, 2011.
- (Křístek a kol., 2003) R. Křístek, M. Žídková, P. Rovnaníková, Vliv podmínek na vytváření pevné struktury vápennopucolánových omítek, *Sanace a rekonstrukce budov*, 75-78, 2003.
- (Křístek a kol., 2005) R. Křístek, P. Rovnaníková. *Modifikace stanovení pucolánové aktivity různých materiálů. Sanace a rekonstrukce staveb*. 74-77, 2005.
- (Lawrence, 2006) R. M. H. Lawrence, A study of carbonation in nonhydraulic lime mortars. PhD thesis, Faculty of Engineering and Design Department of Architecture and Civil Engineering, 2006.
- (Lawrence a kol., 2007) R. M. Lawrence, T. J. Mays, S. P. Rigby, P. Walker, D. D'Ayala, Effects of carbonation on the pore structure of non-hydraulic lime mortars. *Cement and Concrete Research*, (37), 1059–1069, 2007.
- (Lanas a Alvarez, 2003) J. Lanás, J.I. Alvarez, Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behavior. *Cem Concr Res*, (33), 1867-1876, 2003.
- (Masschelein-Kleiner, 1995) L. Masschelein-Kleiner. *Ancient Binding Media, Varnishes and Adhesives*. Rome: ICCROM, 1995.
- (Meng, 1996) B. Meng. Determination and interpretation of fractal properties of the sandstone pore system, *Materials and Structure* (29), 195-205, 1996.
- (Michoinová, 2004) Michoinová, Vliv dodržování technologické kázně na výsledné vlastnosti vápenných malt používaných při obnově historických stavebních památek. *Závěrečná zpráva úkolů 03-22*, 2004.
- (Mosquera a kol., 2002) M.J. Mosquera, D. Benitez, S.H. Perry, Pore structure in mortars applied on restoration: effects on properties relevant to decay of

- granite buildings. *Cement and Concrete Research*, (32), 1883-1888 2002.
- (Morris, 1961) C.E. Morris. Linseed oil for the protection of concrete surfaces, *Journal of the American Oil Chemists' Society* 38 (5), DOI: 10.1007/BF02636783, 24-26, 1961.
- (Moropoulou a kol., 2005a) A. Moropoulou, A. Bakolas, K. Bisbikou, Investigation of the technology of historic mortars. *J Cult Herit*, (1), 45-48, 2000.
- (Moropoulou a kol., 2005b) A. Moropoulou, A. Bakolas, P. Moundoulas, E. Aggelakopoulou, S. Anagnostopoulou, Strength development and lime reaction in mortars for repairing historic masonries. *Cement and Concrete Composites*, (27), 289-294, 2005.
- (Opravil a kol., 2001) T. Opravil, P. Ptáček, F. Šoukal, J. Havlica, P. Bartoňová. Příprava kompozitů na bázi metakaolinu a energosádrovce, *Seminář Metakaolin*, VUT Brno, 88-94, 2009.
- (Paiva a kol., 2009) Paiva H, Esteves LP, Cachim PB, Ferreira VM. Rheology and hardened properties of single-coat render mortars with different types of water retaining agents. *Construction and Building Materials*, (23), 1141–1146, 2009.
- (Powers, 1945) T.C. Powers, A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete, *Journal Proceedings*, (41), 245–272, 1945.
- (Powers a Helmuth, 1953) T.C. Powers, R.A. Helmuth, Theory of volume changes in hardened portland-cement paste during freezing, *Highway Research Board Proceedings*, (32), 285–297, 1953.
- (Pytlík, 2000) P. Pytlík, *Technologie betonu*. 2. vydání, Vysoké učení technické v Brně 2000, nakladatelství VUTIUM, ISBN 80-214-1647-5.
- (Riethmayer, 1960) S.A. Riethmayer. Metallseife als Hydrophobierungsmittel, *DBZ, Heft*, 2007.
- (Roels, 2000) S. Roels. Modelling unsaturated moisture transport in heterogeneous limestone, KU Leuven, 2000. PhD Thesis. ISBN 90-5682-264-0, 2000.
- (Rojas a Cabrera, 2001) J. Cabrera, M.F.Rojas, Mechanism of hydravion of the metakaolin – lime - water system. *Cement and Concrete Research* 31, 177-182, 2001.
- (Rojas a Cabrera, 2002) M.F.Rojas, J. Cabrera, The effect of temperature on the hydration rate and stability of the hydravion phases of metakaolin–lime–water systems. *Cement and Concrete Research* 32, 133–138, 2002.
- (Rossi-Manaresi a Tucci, 1991) R. Rossi-Manaresi, A. Tucci, Pore structure and the disruptive or cementing effect of salt crystallization in various stypes of stone. *Studies in Conservation*, (36), 53-58, 1991.
- (Rovnaníková, 2001) P. Rovnaníková. Vápenné omítky s pucolánovými přísadami, *Sanace a rekonstrukce staveb*, 118-123, 2001.
- (Rovnaníková, 2002) P. Rovnaníková. Omítky, *Chemické a technologické vlastnosti*. STOP, Praha 2002.
- (Rovnaníková a Horká, 2002) P. Rovnaníková, I. Horká. Vliv mrazu na vývin pevné struktury vápenných malt, *Sanace a rekonstrukce staveb*, 83-87, 2002.
- (Rovnaníková, 2003) P. Rovnaníková. Pucolány ve vápenných omítkách, *Sanace a rekonstrukce staveb*, 69-73, 2003.
- (Rovnaníková, a kol., 2004) P. Rovnaníková, P. Bayer, R. Křístek, Odolnost vápenných a vápenopucolánových omítek proti krystalizaci solí. *Sanace a rekonstrukce staveb*, 52-57, 2004.

- (Rovnaníková a kol., 2007) P. Rovnaníková, M. Chromá, N. Krmíčková. Vlastnosti vápenných malt modifikovaných metakaoliny, Seminář Metakaolin, VUT Brno, 78-87, 2007.
- (Rovnaníková, 2008) P. Rovnaníková. Vápenné omítky modifikované metakaolinem, Sanace a rekonstrukce budov, 56-61, 2008.
- (Rovnaníková a kol., 2008a) P. Rovnaníková, N. Krmíčková. Frost resistance of lime-pozzolana mortar, 13. Mezinárodní konference, VUSTAH Brno, 2008.
- (Rovnaníková a kol., 2008b) P. Rovnaníková, P. Rovnaník, P. Schmid. Korozní odolnost betonů s metakaolinem, Seminář Metakaolin, 94-99, 2008.
- (Rudnik a kol., 2001) E. Rudnik, A. Szczucinska, H. Gwardiak, A. Szulc, A. Winiarska. Comparative studies of oxidative stability of linseed oil, *Thermochimica Acta* (370), 135-140, 2001.
- (Rykwert a kol., 1988) Rykwert, A. Tavenor, L. Battista. *On the Art of Building in Ten Books*, Translation by Rykwert, J., & Tavenor, R., Cambridge: The MIT Press, 1988.
- (Sabir a kol. 2001) B.Sabir, S. Wild, J. Bai, Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, (23), 441-454, 2001.
- (Sá, 2005) A.F.G. Sá. *Rebocos em Paredes de Pedra e Cal. (Renders in walls of lime and stone)*. Master thesis, Lisbon: Instituto Superior Técnico, 2005.
- (Sebrara a kol., 2009) M.P. Seabra, H. Paiva, J.A. Labrincha, V.M. Ferreira, Admixtures effect on fresh state properties of aerial lime based mortars. *Construction and Building Materials*, (23), 1147–1153, 2009.
- (Silva a kol., 2020) B.A. Silva, A.P. Ferreira Pinto, A. Gomes, A. Candeias, Suitability of different surfactants as air-entraining admixtures for lime mortars. *Construction and Building Materials*, (256), 118986, 2020.
- (Silva a kol., 2021) B. Silva, A. P. Ferreira Pinto, A. Gomes, A. Candeias, Admixtures potential role on the improvement of the freeze-thaw resistance of lime mortars. *Journal of Building Engineering*, (35), 101977, 2021.
- (Slížková, 2004) Z. Slížková. *Omítky historických staveb, Obnova památek*, 2004.
- (Slížková a kol., 2007) Z. Slížková, L. Matal, J. Bárta. *Poznámky k praktické aplikaci metakaolinu*, Seminář Metakaolin, VUT Brno, 2007.
- (Stolz, 2007) H.J. Stolz. *Oleochemicals – important additives for building protection. Proceedings of the 2nd National Congress in Building Mortars*, Lisbon: APFAC, 2007.
- (Špaček a Janotka, 2011) A. Špaček, I. Janotka, *Portlandské zmesové cementy a ich význam v praxi*, *Geotechnika*, 24-28, 2011.
- (Torgal a kol., 2011) F.P. Torgal, J. Said. *Eco-efficient Construction and Building Materials*. London: Springer-Verlag, 205-207, 2011.
- (Van Balen a Van Gemert, 1994) K. Van Balen, D. Van Gemert, *Modeling lime mortar carbonation*, *Materials and structures* (27), 393-398, 1994.
- (Vejmelková a kol., 2012) E. Vejmalkova, D. Konňáková, M. Čachova, M. Keppert, R. Černý, *Effect of hydrophobization on the properties of lime - metakaolin plasters*. *Construction and Building Materials* 37 (2012) 556-561
- (Velosa a kol., 2009) A.L. Velosa, F. Rocha, R. Veiga. Influence of chemical and mineralogical composition of metakaolin on mortar characteristic, *Acta Geodyn. Geomater*, (153), 121-126, 2009.

- (Ventola a kol., 2011) L. Ventola, M. Vendrell, P. Giraldez, L. Merino. Traditional organic additives improve lime mortars: New old materials for restoration and building natural stone fabrics. *Construction and Building Materials*, (25), 3313–3318, 2011.
- (Vidovszky, 2011) I. Vidovszky. Historical technologies in the field of finishing works, Budapest: Technical University of Budapest, 2011.
- (Vikan a Justnes, 2006) H. Vikan, H. Justnes. Influence of vegetable oils on durability and pore structure of mortars. *Proceedings of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete*, ACI SP-234-25, 417-430, 2006.
- (Wendler a Charola, 2008) E. Wendler, A.E. Charola, Water and its Interaction with Porous Inorganic Building Materials, *Hydrophobe V – 5th International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials* Aedificatio Publishers, 57-74, 2008.
- (Wong a kol., 2011) H.S. Wong, A.M. Pappas, R.W. Zimmerman, N.R. Buenfeld. Effect of entrained air voids on the microstructure and mass transport properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, (41), 1067–1077, 2011.

## Normy

- (ČSN EN 1015-2) ČSN EN 1015-2 (722400) Zkušební metody malt pro zdivo - Část 2: Odběr základních vzorků malt a příprava zkušebních malt.
- (ČSN EN 1015-3) ČSN EN 1015-3 (722400) Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešáckého stolku).
- (ČSN EN 1015-4) ČSN EN 1015-4 (722400) Zkušební metody malt pro zdivo - Část 4: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím přístroje pro stanovení hodnoty penetrace).
- (ČSN EN 1015-7) ČSN EN 1015-7 (722400) Zkušební metody malt pro zdivo - Část 7: Stanovení obsahu vzduchu v čerstvé maltě.
- (ČSN EN 1015-11) ČSN EN 1015-11 (722400) Zkušební metody malt pro zdivo - Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku.
- (ČSN EN 1015-18) ČSN EN 1015-18 (722400) Zkušební metody malt pro zdivo - Část 18: Stanovení koeficientu kapilární absorpce vody v zatvrdlé maltě.
- (ČSN EN 1925) ČSN EN 1925 (721141) Zkušební metody přírodního kamene - Stanovení součinitele nasákavosti vodou působením vztlakovosti.
- (ČSN EN 1936) ČSN EN 1936 (721143) Zkušební metody přírodního kamene - Stanovení měrné a objemové hmotnosti a celkové a otevřené pórovitosti.
- (ČSN 72 2452) ČSN 72 2452 (722452) Zkouška mrazuvzdornosti malty.
- (ČSN P 73 0610) ČSN P 73 0610 (730610) Hydroizolace staveb - Sanace vlhkého zdiva - Základní ustanovení.
- (RILEM II. 1) RILEM II. 1 Air permeability. RILEM 25-PEM (1980) Recommandations provisoires. Essais recommandés pour mesurer l'altération des pierres et évaluer l'efficacité des méthodes de traitement, *Matériaux et Construction*. 13, Nr. 75, 197-199, 1980.
- (RILEM II. 5) Evaporation curve, RILEM 25-PEM: Recommandations provisoires. Essais recommandés pour mesurer l'altération des pierres et évaluer l'efficacité des méthodes de traitement, *Matériaux et Construction*. 13, Nr. 75, 205–207, 1980.

## 7. PŘÍLOHA

---

### Užitný vzor č. 28676

#### **Suchá maltová směs pro výrobu vápenopucolánové omítky se zvýšenou mrazuvzdorností**

##### Oblast techniky

Technické řešení se týká složení suché maltové směsi pro výrobu vápenopucolánové omítky se zvýšenou mrazuvzdorností.

##### Dosavadní stav techniky

V současné době je produkována velká řada suchých maltových směsí, v nichž je pojivo nejčastěji zastoupeno cementem, vápenným hydrátem nebo jejich kombinací. Problémem vyžadujícím speciální technické řešení je složení omítek pro historické konstrukce vystavené zvláště drsným povětrnostním podmínkám (fasády a zdiva silně zatížená vodou, mrazem a průnikem vodorozpustných solí). Pro opravu většiny historických staveb nejsou vhodným řešením cementové malty z hlediska nízké paropropustnosti (prodyšnosti), příliš vysoké pevnosti, modulu pružnosti a obsahu vodorozpustných solí v cementu vzhledem k vlastnostem historického zdiva. Z hlediska kompatibility s historickým zdivem jsou upřednostňovány malty vápenné, případně v místech více exponovaných vodě a mrazu malty pojené přirozeně hydraulickým vápnem nebo směsným hydraulickým vápnem (s využitím hydraulické nebo pucolánové příměsi ke vzdušnému bílému vápnu).

Technické řešení si klade za úkol navrhnout suchou maltovou směs pro přípravu vápenné omítky s vysokou mrazuvzdorností, která je podmínkou její delší životnosti při popsáných podmínkách expozice. Dosavadní praxe nevyužívá možnosti úpravy vlastností vápenné omítky pomocí provzdušňovací přísady a zároveň pucolánové příměsi k vápnu. V odborné literatuře existuje jen velmi málo studií, které se zabývají vlivem provzdušňovacích přísad na vlastnosti vápenných malt. Výzkum účinků těchto přísad doposud probíhal zejména s cílem jejich využití v betonech a cementových maltách. Žádná z odborných prací se nevěnuje vlivu provzdušňovacích přísad na vlastnosti vápenopucolánových malt.

Úkolem technického řešení je navrhnout suchou maltovou směs, která by byla využitelná pro výrobu omítky obsahující jako pojivo vápenný hydrát s pucolánovou příměsí, přičemž mrazuvzdornost takové omítky by byla vyšší než je vápenopucolánová omítka připravená ze směsi kameniva, vápenného hydrátu a pucolánové příměsi.

## Podstata technického řešení

Podstatou technického řešení vyšší mrazuvzdornosti vápenopucolánové malty je optimalizace její porézní struktury a smáčivosti provzdušňovací přísadou. Díky optimalizované velikosti pórů, mikrostruktura a smáčivosti má omítka s provzdušňovací přísadou nízkou kapilární nasákavost. Rychlost průniku vody do omítky i celkové množství nasáknuté vody do provzdušněné omítky jsou velmi nízké. Omezením množství proniklé vody do omítky je výrazně sníženo riziko jejího poškození mrazem. Omítka upravená provzdušňovací přísadou má tak delší životnost a zároveň je funkční ochranou zdiva před degradačními účinky pronikající vody.

Hlavním znakem technického řešení je použití provzdušňovací přísady v množství do 0,5 % hm. k celkové hmotnosti suchých složek maltové směsi. Účinná složka provzdušňovací přísady je oleát sodný nebo dodecylsulfát sodný.

Suchá maltová směs pro výrobu omítky obsahuje vápenné pojivo modifikované pucolánovou příměsí. Výhodné je využití jemnozrnného metakaolinu s velikostí částic do 63  $\mu\text{m}$  jako pucolánové příměsi, z důvodu jeho vysoké pucolánové aktivity (reaktivity s hašeným vápnem). Významným funkčním faktorem pucolánové příměsi k vápennému pojivu je vytvoření pojiva na bázi směsného hydraulického vápna, které vykazuje kompromisní vlastnosti mezi vzdušným vápnem a cementem. Omítku je tak možné použít i na zdivo vykazující trvale zvýšenou vlhkost, kde je použití vápenné malty bez pucolánové nebo hydraulické (cementové) příměsi problematické, neboť nedochází k úplné karbonataci, vytvoření dostatečné pevnosti a mrazuvzdornosti malty. Vápenopucolánové pojivo s výhodou využití metakaolinu je funkční technické řešení náhrady cementového pojiva pro aplikace omítek na historická zdiva nebo v jiných případech, kdy je omítka s cementovým pojivem nekompatibilní s podkladem.

## Příklad uskutečnění

Suchá maltová směs pro výrobu mrazuvzdorné vápenopucolánové omítky sestává z 5 hmotnostních dílů kameniva o velikosti částic 0–4 mm se spojitou křivkou zrnitosti, 0,75 hmotnostních dílů vápna ve formě vápenného hydrátu CL 90 o velikosti částic 0–63  $\mu\text{m}$ , 0,25 hmotnostních dílů pucolánové příměsi ve formě metakaolinu o velikosti částic 0–10  $\mu\text{m}$  a 0,5 % hm. provzdušňovací přísady na bázi oleátu sodného.

Do suché maltové směsi s provzdušňovací přísadou se dává voda v takovém množství, aby rozlití čerstvé malty dle ČSN EN 1015-3 bylo 135 mm. Pro homogenizaci čerstvé malty se využívají postupy a nástroje obvyklé pro přípravu vápenných malt. Přednostně se využívá míchačka s domíchávačem, která zaručuje optimální mísení vápna, metakaolinu a písku spolu s minimálním množstvím záměsové vody. Míchání pomocí míchadla ve vrtačce, ve spádové míchačce nebo dokonce jen ruční míchání vyžaduje delší dobu míchání pro dosažení dokonalého promísení všech složek malty. Malta se aplikuje na zdivo nanášením ručně nebo strojní omítačkou.

Zatvrdlá omítka je mrazuvzdorná na 15 zmrazovacích cyklů prováděných podle ČSN 72 2452: 1968 - Zkouška mrazuvzdornosti malty.

### Průmyslová využitelnost

Suchou maltovou směs podle technického řešení lze průmyslově vyrábět pro využití ve stavebnictví jak pro nové stavby, tak pro sanaci a obnovu historických staveb a památkových objektů.

### NÁROKY NA OCHRANU

1. Suchá maltová směs pro výrobu mrazuvzdorných vápenopucolánových omítek, **vyznačující se tím**, že obsahuje 5 hmotnostních dílů kameniva o velikosti částic 0–4 mm, 0,75 hmotnostních dílů vápna ve formě vápenného hydrátu CL 90 o velikosti částic 0-63  $\mu\text{m}$  a 0,25 hmotnostních dílů pucolánové příměsi ve formě metakaolinu o velikosti částic 0-63  $\mu\text{m}$ .

2. Suchá maltová směs pro výrobu mrazuvzdorných vápenopucolánových omítek podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že její další složkou je provzdušňovací přísada na bázi oleátu sodného nebo dodecylsulfátu sodného v množství do 0,5 % hmotnostních z hmotnosti směsi kameniva, vápenného hydrátu a pucolánové příměsi.

Konec dokumentu