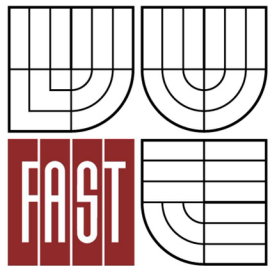




**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STAVEBNÍ**  
**ÚSTAV CHEMIE**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF CHEMISTRY

# **STUDIUM VLASTNOSTÍ VÁPENNÝCH MALT PRO OBNOVU OMÍTEK HISTORICKÝCH STAVEB**

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF LIME MORTARS FOR THE RENOVATION OF HISTORICAL  
BUILDING PLASTERS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**BC. ELIŠKA KOLOUCHOVÁ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**prof. RNDr. PAVLA ROVNANÍKOVÁ, CSc.**

BRNO 2015



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	N3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
<b>Pracoviště</b>	Ústav chemie

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Diplomant</b>	Bc. Eliška Kolouchová
<b>Název</b>	Studium vlastností vápenných malt pro obnovu omítek historických staveb
<b>Vedoucí diplomové práce</b>	prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc.
<b>Datum zadání diplomové práce</b>	31. 3. 2014
<b>Datum odevzdání diplomové práce</b>	16. 1. 2015
V Brně dne 31. 3. 2014	

.....  
doc. Ing. Jitka Malá, Ph.D.  
Vedoucí ústavu

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

## **Podklady a literatura**

CHROUST, F., KVASNIČKA, I., KVASNIČKOVÁ, R. Omítky. Praha: SNTL, 1959, 188 stran.

MICHOINOVÁ, D. Příprava vápenných malt v péči o stavební památky. Praha: ČKAIT, 2006, 76 stran. ISBN 80-86769-81-X.

HOŠEK, J., LOSOS, L. Historické omítky. 1. vydání. Praha: Grada Publishing, a.s., 2007, 168 stran. ISBN 978-80-247-1395-3.

KOTLÍK, P. et al. Vápno. Praha: Společnost pro technologie ochrany památek. 76 stran. ISBN 80-902668-8-6.

MĚŠŤAN, R. Omítkářské a štukatérské práce. Praha: SNTL, 1988, 304 stran.

ASHURST, J., ASHURST, N. Mortars, Plasters and Renders. Aldershot: Ashgate Publishing Limited, 82005, 86 stran. ISBN 0-291-39747-6.

## **Zásady pro vypracování**

Proveďte literární rešerši v oblasti tradičních metod přípravy vápenných malt. Za použití doporučené literatury a provedené rešerše zpracujte teoretickou část práce na cca 20 stran. Stručně popište suroviny pro výrobu tradičních vápenných malt a rozdíl vlastností tradičních a současných vápen. Pozornost věnujte tradičním způsobům přípravy vápenných malt používaným v minulosti a současným možnostem přípravy vápenných malt pro historické stavby.

V 1. etapě experimentální části charakterizujte použité suroviny, tj. vápna a kamenivo. Ve 2. etapě vyrobte zkušební tělesa z vápenných malt, připravených z vápenného hydrátu, vápenného hydrátu aktivovaného mixováním a z vápenné kaše. Ve 3. etapě vyrobte stejná zkušební tělesa z malt o stejném složení, které byly ponechány pod vrstvou vody po dobu 1 měsíce. U čerstvých malt stanovte konzistenci, u ztvrdlých malt stanovte základní mechanické parametry v čase, smrštění, nasákavost a mrazuvzdornost. Věnujte rovněž pozornost mikrostruktuře vyrobených malt. Výsledky zpracujte do přehledných tabulek a grafů, v závěru práce proveďte diskusi a zhodnocení dosažených výsledků. Rozsah diplomové práce 60 až 80 stran.

## **Předepsané přílohy**

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací

.....  
prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc.  
Vedoucí diplomové práce

## **Abstrakt**

Teoretická část této diplomové práce pojednává o historických postupech přípravy vápenné malty a současných možnostech obnovy vápenných omítek památkově chráněných objektů. Experimentální část je zaměřena na srovnání fyzikálně mechanických vlastností vápenných malt připravených s použitím různých forem stavebního vápna. Hlavním cílem je ověření pozitivního vlivu odležení čerstvé malty na její fyzikálně mechanické vlastnosti.

## **Abstract**

The theoretic part of this diploma thesis interprets historical procedures of lime mortar manufacturing and modern options for the historical lime plaster renovation. The experimental part of this diploma thesis aims for the comparison of physical-mechanic characteristic of lime mortar manufactured with different kinds of lime. The main goal is verifying of positive influence of using the aged lime mortar on its physical-mechanic characteristics.

## **Klíčová slova**

Vápno, vápenná malta, omítka, historické stavby, obnova, vápenný hydrát, vápenná kaše, odležení, vlastnosti.

## **Keywords**

Lime, lime mortar, plaster, historical building, renovation, lime hydrate, lime putty, aging, characteristics.

## **Bibliografická citace díla**

Bc. Eliška Kolouchová *Studium vlastností vápenných malt pro obnovu omítek historických staveb*. Brno, 2015. 104 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie. Vedoucí práce prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc.

## **Prohlášení**

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

V Brně dne 16. ledna 2015.

.....

Eliška Kolouchová

## **Poděkování**

Děkuji vedoucí diplomové práce prof. RNDr. Pavle Rovnaníkové, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování této diplomové práce.

# Obsah

1	Úvod.....	6
2	Cíle práce.....	7
3	Tradiční způsoby přípravy vápenné malty.....	8
3.1	Suroviny pro přípravu vápenné malty .....	8
3.1.1	Vápno .....	8
3.1.2	Plniva ve vápenných maltách .....	11
3.1.3	Záměsová voda .....	12
3.2	Příprava malty z vápenné kaše .....	12
3.3	Příprava malty ze suchého hydrátu .....	13
3.4	Příprava malty z nehašeného vápna - horká malta .....	14
3.5	Tradiční metody hašení vápna .....	15
3.5.1	Přepouštění .....	15
3.5.2	Hašení v jámě – Grande Acqua.....	15
3.5.3	Namáčení .....	15
3.6	Odležení vápenné kaše .....	16
3.7	Odležení čerstvé vápenné malty .....	20
3.8	Karbonatace vápenné malty .....	20
4	Současné možnosti obnovy omítek historických staveb .....	22
4.1	Průzkum stavebních památek .....	22
4.2	Doplňky a náhrada historických omítek .....	23
4.2.1	Staveništní malty .....	24
4.2.2	Suché maltové a omítkové směsi .....	25
4.3	Konsolidace historických omítek.....	25
4.3.1	Vápenná voda .....	25
4.3.2	Barytová voda.....	26
4.3.3	Alkoholové disperze vápna.....	26
4.3.4	Nanovápno v památkové péči .....	27
4.3.5	Konsolidace syntetickými polymery .....	28
5	Metodika práce .....	30
6	Charakteristika použitých surovin .....	31
6.1	Pojivo.....	31

6.1.1	Vápenný hydrát .....	31
6.1.2	Odležená vápenná kaše .....	31
6.1.3	Vápenný hydrát aktivovaný mixováním .....	31
6.1.4	Kusové vápno .....	32
6.2	Písek .....	32
6.3	Voda .....	37
7	Receptury zkoušených vápenných malt .....	38
7.1	Receptura z vápenného hydrátu .....	38
7.2	Receptura z vápenné kaše .....	39
7.3	Receptura horké malty .....	39
7.4	Příprava zkušebních těles .....	40
7.4.1	Odležení .....	41
8	Prováděné zkoušky .....	42
8.1	Zkoušky prováděné na čerstvé maltě .....	42
8.1.1	Stanovení konzistence čerstvé malty .....	42
8.2	Zkoušky prováděné na ztvrdlé maltě .....	42
8.2.1	Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku .....	42
8.2.2	Nasákavost .....	42
8.2.3	Smrštění délkové a objemové, objemová hmotnost .....	43
8.2.4	Mrazuvzdornost .....	43
8.2.5	Snímkování elektronovým mikroskopem .....	43
9	Výsledky experimentů a jejich vyhodnocení .....	44
9.1	Zkoušky prováděné na čerstvé maltě .....	44
9.1.1	Stanovení konzistence čerstvé malty .....	44
9.2	Zkoušky prováděné na ztvrdlé maltě .....	47
9.2.1	Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku .....	47
9.2.2	Nasákavost .....	66
9.2.3	Smrštění délkové a objemové, objemová hmotnost .....	67
9.2.4	Mrazuvzdornost .....	81
9.2.5	Snímkování pomocí elektronového mikroskopu .....	85
10	Diskuse výsledků a závěr .....	90
11	Seznamy .....	93
11.1	Použitá literatura .....	93

11.2 Seznam použitých chemických značek a vzorců.....	95
11.3 Seznam použitých zkratek a značek.....	95
11.4 Seznam použitých fyzikálních symbolů .....	96
11.5 Seznam obrázků.....	97
11.6 Seznam tabulek.....	102



# 1 Úvod

Omítky představují nejstarší a dodnes i nejčastější formu povrchové úpravy staveb, plní funkci jednak ochrany stavební konstrukce před vnějšími vlivy a jednak estetickou. Pomineme-li omítky hliněné, pak vápno je nejstarším pojivem používaným ve stavebnictví. Během uplynulých staletí vzniklo bezpočet staveb, z nichž mnohé byly zařazeny mezi nemovité kulturní památky, a v zájmu zachování kulturního dědictví je třeba provádět jejich obnovu či rekonstrukce. Také proto tvoří obnova historických objektů podstatnou část projekčních i stavebních aktivit jak v ČR, tak v zahraničí. Základním dokumentem pro obnovu omítek historických staveb je Benátská charta (z roku 1964), která požaduje zachování autentických konstrukcí a materiálů památky a prostředí, ve kterém se nachází, v co největší míře [32].

Tradiční postupy přípravy vápenných omítek byly po generace rozvíjeny a předávány, avšak od začátku 20. století se dovednosti pojící se s přípravou vápenných malt zvolna začaly vytrácet. Ústup od používání vápenných omítek je spojen zejména se zdokonalením technologie výroby portlandského cementu a od poloviny 20. století také s rozvojem produkce suchých maltových a omítkových směsí (SOMS). Současná památková péče stále více prosazuje používání tradičních vápenných technologií. Avšak aby staveništní vápenné malty splnily požadavky na jejich vlastnosti, je třeba tradiční postupy dodržet, což klade nároky na odbornost pracovníků na stavbě a zejména na čas potřebný k řádnému odležení jak vápenné kaše, tak čerstvé malty.

Tato diplomová práce si klade za cíl představit tradiční postupy přípravy vápenné malty a experimentálně dokázat, jak důležitý je proces odležení a jaký je jeho vliv na užité vlastnosti vápenné malty.

## 2 Cíle práce

Motivací pro zpracování této diplomové práce je získání exaktních dat o vlastnostech vápenných malt a zejména o vlivu odležení čerstvé malty na její užité vlastnosti. Empiricky bylo již v historii potvrzeno, že odležením se vápenná malta stává kvalitnější, komplexních experimentů se však v této oblasti nedostává.

Teoretická část práce (kapitoly 3 a 4) je věnována rešerši v oblasti tradičních způsobů přípravy vápenných malt používaných v minulosti a vlivu odležení na vlastnosti vápenné malty. Dalším cílem teoretické části je rešerše současných možností a materiálů pro obnovu historických staveb.

Cílem experimentální části této diplomové práce (kapitoly 5 až 9) je srovnání fyzikálně mechanických vlastností vápenných malt připravených se stejným poměrem složek (pojivo, plnivo, voda) za použití různých druhů vápenného pojiva. Pro přípravu zkušebních těles byly vybrány tyto druhy pojiva: vápenný hydrát, vápenná kaše, vápenný hydrát aktivovaný mixováním (aktivovaný hydrát).

Hlavním cílem diplomové práce je ověření vlivu odležení vápenné malty na její užité vlastnosti.

# Teoretická část

## 3 Tradiční způsoby přípravy vápenné malty

Vápno bylo používáno jako pojivo do malty a omítek již od starověku, a to zejména ve Středomoří, neboť tato oblast je bohatá na vápencové a dolomitické horniny. Od poloviny 19. století začalo být vápno v omítkářství částečně nahrazováno cementem a zejména pak ve 2. polovině 20. století tradiční vápenné technologie ustoupily průmyslově vyráběným suchým omítkovým směsí (SOMS), čímž dochází k postupnému vytrácení znalostí tradičních postupů. Nicméně zejména na severu Itálie je vápno dosud nejčastěji používaným materiálem při opravách a obnově památek [2].

Kvalita vápenných omítek vždy závisela na mnoha faktorech, jako je původ a složení vypalovaného vápence, postup při hašení a stáří vápenné kaše. Velmi důležitým faktorem je také zručnost a zkušenost pracovníků, kteří se na celém procesu podílí od hašení vápna až po aplikaci.

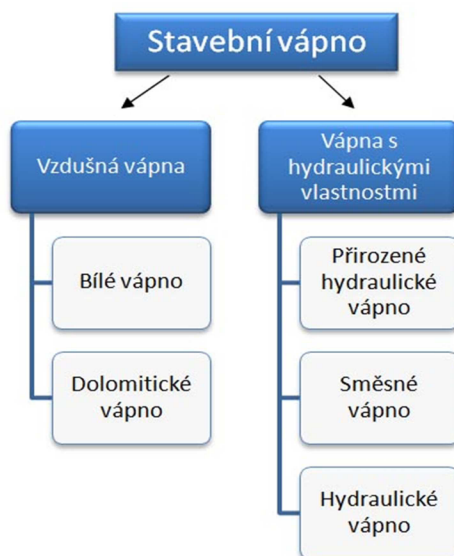
### 3.1 Suroviny pro přípravu vápenné malty

#### 3.1.1 Vápno

Vápenné malty jsou geograficky i historicky nejrozšířenější stavební hmoty. Ve stavební praxi jsou často pojmem vápenné omítky označovány malty s různým složením pojiva, většinou se jedná o malty připravené ze vzdušného vápna, ale také z vápna hydraulického nebo vápna s hydraulickými přísadami [5]. Norma ČSN EN 459-1 [7] rozděluje vápna na vzdušná a s hydraulickými vlastnostmi. Vzdušná vápna rozlišujeme jako bílé a dolomitické, vápna s hydraulickými vlastnostmi se dělí na přirozené hydraulické vápno, směsné vápno a hydraulické vápno. Vzdušná vápna nejsou definována pevností v tlaku, ale obsahem sumy  $\text{CaO} + \text{MgO}$ , hydraulická pevností v tlaku.

Vápno nejvyšší kvality se získává pálením čistého vápence. Kvalitu vápna určuje především aktivita vápna, která se stanovuje měřením vzrůstu teploty při jeho hydrataci, a vydatnost, která se stanoví objemem vápenné kaše při reakci páleného vápna s vodou za standardních podmínek [l/kg vápna]. Důležité je také stanovení objemové stálosti a obsahu částic přepáleného nehašeného vápna. Zkušební

metody pro stanovení vlastností vápen jsou uvedeny v ČSN EN 459-2 [8]. Rozdělení stavebních vápen je uvedeno ve schématech na obr. 1.



Obr. 1 - Rozdělení stavebního vápna

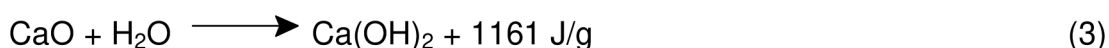
### 3.1.1.1 Vzdušné vápno

Vzdušné vápno se vyrábí výpalem vápence s vysokým obsahem uhličitanu vápenatého  $\text{CaCO}_3$ . Během výpalu se kalcit  $\text{CaCO}_3$  rozkládá za vzniku  $\text{CaO}$  (páleného vápna) a oxidu uhličitého  $\text{CO}_2$  (1). Vzdušné vápno obsahuje převážně oxid vápenatý,  $\text{CaO}$ , tvrdne na vzduchu reakcí s atmosférickým oxidem uhličitým  $\text{CO}_2$  (2).



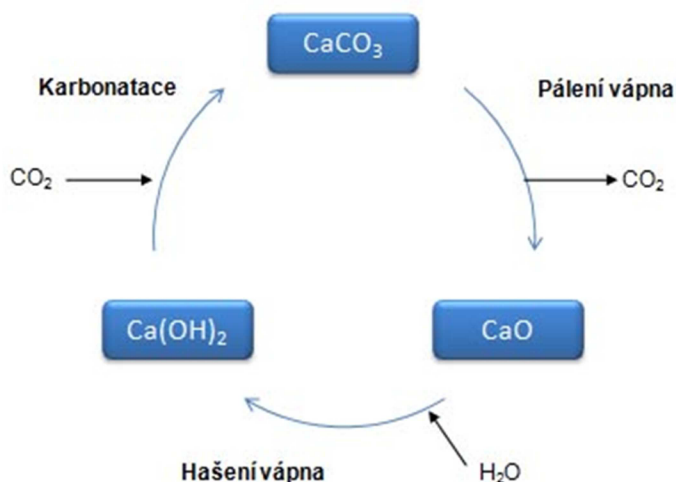
Na teplotě výpalu závisí mikrostruktura i fyzikální a chemické vlastnosti páleného vápna, tj. reaktivita, rychlost hašení, plasticita atd. Podle stupně výpalu rozeznáváme vápno ostře pálené (při teplotě vyšší než  $1100\text{ }^\circ\text{C}$ ) a měkce pálené (při teplotě do  $1050\text{ }^\circ\text{C}$ ). Ostře pálené vápno se většinou používalo pro zdící a spárovací malty nebo na dezinfekci (nátěry chlévů), měkce pálené vápno se používalo pro přípravu omítkových směsí nebo pro fasádní nátěry [5].

Pálené vápno se dále zpracovává hašením, tj. hydratací, při níž vzniká hydroxid vápenatý  $\text{Ca(OH)}_2$  a dochází k uvolnění značného množství tepla (3).



Způsob provedení hydratace, tj. technologie hašení, ovlivňuje vlastnosti hašeného vápna. Vzhledem k tomu, že krystalové mřížky oxidu a hydroxidu vápenatého nemají stejnou velikost, při postupné hydrataci zrn CaO vzniká napětí, které rozdrůžuje částice vápna na velmi jemné částice hydroxidu. Tato kaše, tvořená suspenzí hydroxidu vápenatého ve vodě, se nazývá vápenná kaše (hašené vápno).

Proces vytváření pevné struktury vzdušného vápna se nazývá karbonatace a vzniká při ní nerozpustný uhličitán vápenatý  $\text{CaCO}_3$  (4). Proces karbonatace vápna je pomalý a je závislý na koncentraci  $\text{CO}_2$  v okolním vzduchu, na teplotě a na relativní vlhkosti vzduchu (RH). Při  $\text{RH} < 50\%$  nebo  $\text{RH} > 95\%$  probíhá reakce velmi pomalu. Po ukončení karbonatace, když se z  $\text{Ca(OH)}_2$  vytvoří  $\text{CaCO}_3$ , začne probíhat dlouhodobý proces rekrystalizace  $\text{CaCO}_3$  [9]. Proces výroby a tvrdnutí vápna je znázorněn na obr. 2. Podrobněji o procesu karbonatace vápenné malty pojednává kapitola 3.8.



Obr. 2 - Vápenný cyklus

### 3.1.1.2 Přirozené hydraulické vápno

Přirozené hydraulické vápno (NHL) vzniká při výpalu vápence s křemičitými a hlinitými příměsmi při teplotě 1100 až 1200 °C. Při této teplotě hydraulické oxidy  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , resp.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  reagují s CaO za vzniku křemičitanů, hlinitanů a železitanů vápenatých, jako jsou  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$ ,  $\text{C}_2\text{F}$  a  $\text{C}_4\text{AF}$ . Část CaO je ve formě volného vápna, které při tvrdnutí malty karbonatuje, zatímco uvedené vápenaté sloučeniny reagují s vodou za vzniku CSH a CAH sloučenin. Od portlandského cementu se hydraulické

vápno liší přítomností určitého množství volného CaO a absencí trikalciumsilikátu  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  (vzniká až při teplotě vyšší než  $1350\text{ }^\circ\text{C}$  - nad tzv. mezí slinutí) [9].

Hydraulické vápno je charakterizováno hydraulickým modulem, tj. poměrem obsahu CaO k obsahu hydraulických oxidů (5).

$$H_M = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (5)$$

### 3.1.1.3 Vzdušné vápno modifikované hydraulickými příměsmi

Vápno s hydraulickými a nebo pucolánovými příměsmi je podle ČSN EN 459-1 [7] klasifikováno jako směsné hydraulické vápno (FL). Tato vápna mohou obsahovat portlandský slínek, přírodní pucolán, kalcinovaný přírodní pucolán, vápenec a granulovanou vysokopecní strusku.

U směsných vápen dochází ke konkurenci mezi pucolánovou, nebo hydraulickou reakcí a karbonatací vápna. Průběh reakce je závislý na okolních podmínkách (teplota, RH). Při vyšším obsahu vody v maltě nebo vyšší RH se bude více prosazovat pucolánová nebo hydraulická reakce, při nižší RH bude malta spíše karbonatovat. Po zatvrdnutí vytváří vápenné malty s hydraulickými příměsmi pevné hmoty, které jsou odolné proti působení vlhkosti a mají zvýšenou odolnost proti působení agresivních látek z okolí [9].

### 3.1.2 Plniva ve vápenných maltách

Nejčastěji používaným plnivem byl, a stále je, křemenný písek. Rozlišujeme písek kopaný, původu aluviálního i eluviálního, nebo těžžený a následně drcený či mletý kámen [5]. Kopaný říční písek má zpravidla zrna oblá nebo tupohranná a hladká, kdežto drcené kamenivo mívá částice ostrohranné. Podle Vitruvia [10] je vhodné použít tzv. ostrý písek (křemenný bez jílových podílů) a kopaný (s obsahem jílových částic) v poměru 1:1. Nízký podíl jílu zlepšuje plasticitu čerstvé směsi, křemenná zrna zvyšují pevnost, a to zvláště při dodržení plynulé granulometrie v daném rozmezí velikosti částic. Obvykle se používá kamenivo velikosti 0 až 4 mm pro jádrové malty, pro štuky do 1 mm. V historických omítkách jsou nacházena často i zrna větších velikostí, mezi 10 až 15 mm [6].

Při obnově omítek historických staveb je nutno volit takovou skladbu kameniva, aby byl zachován původní vzhled omítky.

V historických omítkách lze najít také organické plniva. V minulosti se do omítek poměrně běžně přidávala rostlinná i živočišná vlákna (sláma, pazdeří, dřevěné hobliny, zvířecí chlupy) [5]. Dnes se vláknité přírodní materiály v omítkách nahrazují především polypropylenovými (PP) vlákny, která se vyznačují stálostí v zásaditém prostředí čerstvých maltových směsí [2].

Největším přínosem použití vláknitých materiálů do vápenných malt je jejich příznivý vliv na zlepšení objemové stability při tuhnutí a tvrdnutí. U malt s přídavkem vláknitých materiálů bylo zjištěno smrštění menší než u vápenné malty neobsahující organická vlákna (smrštění více než 4 %). V případě použití vláken s jedním dominantním rozměrem (chlupy, PP vlákna) smrštění klesá s množstvím použitých vláken. U přídavků vláken s vyšší nasákavostí (piliny, plevy) naopak smrštění s rostoucí dávkou roste [11].

### **3.1.3 Záměsová voda**

Pro přípravu maltových směsí je vhodná voda, která splňuje požadavky pro přípravu prostého betonu, uvedené v normě ČSN EN 1008. Bez provádění chemického rozboru lze použít vodu pitnou, která požadavkům zcela vyhovuje [6].

Nevhodná je voda s nadměrným obsahem organických látek, které nepříznivě ovlivňují hydratační reakce křemičitanů a hlinitanů, ve vyšších koncentracích mohou způsobit až úplné zastavení hydratačních reakcí. Dále jsou nevhodné vody z oblastí s humózními půdami, z nichž se vyluhují především tzv. huminové látky kyselého charakteru, které ovlivňují purolánové a hydraulické reakce. Tyto vody se vyznačují žlutým až hnědým zbarvením [9, 17].

## **3.2 Příprava malty z vápenné kaše**

Jedním z tradičních historických postupů přípravy vápenné malty je příprava z vápenné kaše. Předpokládá se, že taková malta se v minulosti používala především na jemnější práce, např. štuky nebo zdobené interiérové omítky [4].

Jako pojivo se používala vyzrálá vápenná kaše. Vápenná kaše musela být připravena z vzdušného vápna, protože vápno s hydraulickými vlastnostmi by během odležení tvrdlo. Kaše měla mít takovou konzistenci, aby po vyklopení z nádoby držela tvar a deformovala se jen minimálně. Jako kamenivo se používal písek nebo

štěrkopísek vhodné skladby a složení. Celkové množství vody bylo během celého procesu přípravy vápenné malty minimalizováno [4].

Po homogenizaci, kdy se směs promíchala na stejnorodou hutnou maltu, byla často malta ukládána k odležení do maltnice nebo na zajištěnou hromadu. Před uložením bylo třeba maltu dobře zhutnit, aby se zajistil co nejtěsnější kontakt mezi kamenivem a pojivem. Důležité bylo také ochránit uloženou maltu před vysycháním, a tím také před karbonatací, a případně před promrznutím, např. přikrytím vrstvou jílového písku, drny nebo jiným málo propustným materiálem. Takto uložená malta mohla být ponechána k odležení po libovolně dlouhou dobu [33].

Před vlastním použitím bylo nutné odleženou maltu důkladně promíchat, a to nejdříve bez přidání další záměsové vody. Voda byla přidávána až po částečném zlepšení zpracovatelnosti a domícháním byla finální konzistence malty přizpůsobena danému účelu [33].

### **3.3 Příprava malty ze suchého hydrátu**

Poměrně běžná byla v minulosti také příprava malty ze suchého vápenného hydrátu. Již v 16. století byly popsány postupy suchého hašení vápna a jeho použití jak na zdění, tak na vnější omítky. Pojivem takové malty bylo vápno vyhašené nasucho do podoby vápenného hydrátu.

Práškový vápenný hydrát byl provrstven suchým pískem, pojivo a kamenivo se postupně promíchávalo na stejnorodou směs. Tato směs se postupně kropila vodou a promíchávala tak, aby vznikla stejnoměrně probarvená malta [4]. Podobně jako u malty připravované z vápenné kaše, i v tomto případě bylo přidávané množství vody co nejmenší. Následující postup při odležení a aplikaci malty byl shodný (viz 3.1).

Nevýhodou práškového vápenného hydrátu je jeho sklon k vytváření shluků, které je nutné mechanicky rozdužit. Přítomnost těchto shluků v maltě má za následek zpomalení procesu karbonatace [36].



### 3.4 Příprava malty z nehašeného vápna - horká malta

Dalším z tradičních postupů byla také příprava vápenné malty přímo z nehašeného vápna, taková malta byla nazývána malta z horkého vápna nebo horká malta. Podle historických pramenů to byl zejména ve středověku běžný postup přípravy vápenné malty, který se pravděpodobně používal zejména při výrobě velkých objemů malty jak na zdění, tak omítání staveb, např. při stavbě rozsáhlých hradů [4].

Pojivem pro horkou maltu bylo pálené nehašené vápno, jehož hašení probíhalo až přímo v maltě, jako kamenivo se používal písek nebo štěrkopísek, zejména z místních zdrojů, stejně jako u ostatních tradičních postupů.

Drcené nebo nahrubo mleté pálené vápno se v požadovaném poměru provrstvilo s pískem a štěrkem a obě složky se postupně promíchávaly. Dále se postupy přípravy mírně lišily. Při jedné variantě docházelo k hašení vápna zřejmě přímo ve zdivu. Suchá směs páleného vápna a kameniva se navrstvila spolu s kameny mezi dvě vyzděné vnější stěny a poté se směs zalila vodou [4]. Rozpínání vápna během hašení přispělo k zesílení spojení mezi maltou a zdivem, a také ke zvýšení pevnosti celé konstrukce [38].

Při druhé variantě se malta před použitím hasila zkrápěním vodou a následně se nechávala odležet po dobu 3 až 30 dní [38]. Průběh hašení a výsledná konzistence závisela na množství přidané vody. Také zde platilo, že množství záměsové vody bylo minimalizováno tak, aby došlo ke kompletnímu vyhašení vápna ve směsi, ale zároveň aby vznikla tuhá malta. Po vyhašení se malta ukládala k odležení na různě dlouhou dobu na dobře zhutněné hromady nebo do maltnice. Po odležení byla malta znovu promíchána, její konzistence byla v případě potřeby upravena přidáním vody a malta byla připravena k použití [4]. Takto připravená malta byla používána zejména pro omítání. Tento způsob přípravy horké malty vedl k zesílení vazeb mezi pojivem a kamenivem, k němuž došlo při expanzi vápna během hašení [38].

Poměr pojiva: kamenivu se pohyboval v rozmezí 1 : 5 (tzv. bohatá malta) až 1 : 13 (běžná malta). Uvádí se, že po jednom roce zrání dosáhla horká malta vyšší mechanické pevnosti a nižší pórovitosti než malta připravená z vápenné kaše, na druhou stranu se na horké maltě objevily trhlinky [38].

## 3.5 Tradiční metody hašení vápna

Množství vody nutné k vyhašení páleného vápna je závislé na reaktivitě a ploše povrchu kusového vápna. Maximální teplota, které je dosaženo během procesu hašení, závisí na velikosti částic, ploše povrchu a obsahu CaO [2].

### 3.5.1 Přepouštění

Při této metodě hašení vápna byly hrudky páleného vápna rozprostřeny po dřevěné hasnici o rozměrech 3 x 6 x 0,4 m, byly odstraněny zjevné nedopalky a pak byla směs promíchávána a největší hroudy rozduřovány. Voda se přidávala do té doby, než vznikla řídká kaše, čímž bylo dosaženo kompletního vyhašení CaO. Shluky a nečistoty byly odstraněny prosíváním a poté byla vzniklá řídká kaše přepouštěním rozdělena podle rychlosti sedimentace na 2 fáze (viz obr. 3 a, b) [2].

Výsledkem je vápenná kaše s menšími částicemi a vyšší viskozitou.

### 3.5.2 Hašení v jámě – Grande Acqua

Prvním krokem při hašení vápna touto metodou bylo vykopání jámy o rozměrech cca 1,2 x 0,6 x 1 m, která byla naplněna do poloviny své hloubky kusovým páleným vápnem. Pálené vápno bylo zalito asi 200 l vody. Za pár minut po kontaktu vody s CaO se tato začala vařit a bylo nutné za stálého míchání přidávat další vodu, celkem dalších cca 400 l. Hmotnostní poměr páleného vápna a vody byl přibližně 1 : 2 [2]. Tato metoda hašení je zobrazena na obr. 3 c, d.

### 3.5.3 Namáčení

Tato metoda hašení vápna spočívala v namáčení proutěného košíku naplněného kusovým páleným vápnem do nádoby s vodou. Košík byl zcela ponořen do vody, a poté ihned vyjmut a ponechán na vzduchu, zatímco docházelo k hydrataci CaO (viz obr. 3 e, f). Tento proces hašení trval až několik hodin [2].

Tento způsob hašení vápna se vyznačuje pomalejší reakční kinetikou hydratace a v důsledku nižšího množství vody nedojde ke kompletní hydrataci MgO, je-li v páleném vápnu obsažen [2].



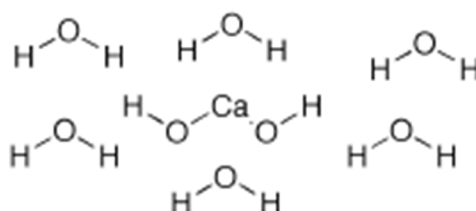
Obr. 3 - Tradiční metody hašení vápna: a, b – přepouštění, c, d – Grande Acqua, e, f – namáčení [2]

### 3.6 Odležení vápenné kaše

Mnoho odborníků se shoduje, že vyhašené vápno by mělo být před použitím na stavbě uloženo pod vodou po určitou dobu, doporučená doba odležení se však liší, pohybuje se od 2 měsíců po několik let [10]. Vitruvius [10] uvádí, že vápenná kaše by měla být používána až po alespoň 3 letech odležení. Čerstvá malta připravená

z odležené vápenné kaše má oproti maltě připravené z vápenného hydrátu lepší zpracovatelnost a retenci vody i lepší fyzikální vlastnosti jako takové [18, 34].

Vlastnosti vyhašeného  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , jako je velikost a tvar částic, plasticita, retence vody a zpracovatelnost, jsou ovlivněny teplotou výpalu, vlastnostmi použité suroviny (vápence) a podmínkami při hašení. Později během odležení tyto rozdíly ve vlastnostech vápenné kaše mizí. Během odležení dochází ke změně morfologie krystalů portlanditu a k redukci velikosti částic (z řádově krystalů o velikosti  $> 2 \mu\text{m}$  na velikost  $< 1 \mu\text{m}$ ) [20] a zvětšení povrchu, čímž se vysvětluje zlepšení plasticity, zpracovatelnosti a retence vody [18]. K těmto změnám v krystalové struktuře dochází z důvodu větší rozpustnosti ploch šestibokých krystalů portlanditu, jak je vidět na obr. 5. Na obr. 5 b lze pozorovat zdánlivou korozi svislých ploch šestibokých krystalů portlanditu (naznačeno šipkami). Schematicky je tento proces naznačen na obr. 6 [37]. Báze krystalů zůstávají beze změny a šestiboké krystaly se tak postupně mění v menší ploché krystalky [20]. Chování vápenné kaše v průběhu odležení, kdy dochází ke zmenšování velikosti krystalů, se odlišuje od průběhu krystalizace dle tzv. Ostwaldova zrání, kdy naopak dochází k růstu velkých krystalů na úkor těch menších [37]. Odležená vápenná kaše postupem času získává strukturu hydrogelu, který obsahuje větší množství vody, než odpovídá jeho chemickému vzorci, obr. 4 [9].



Obr. 4 - Schéma struktury hydrogelu

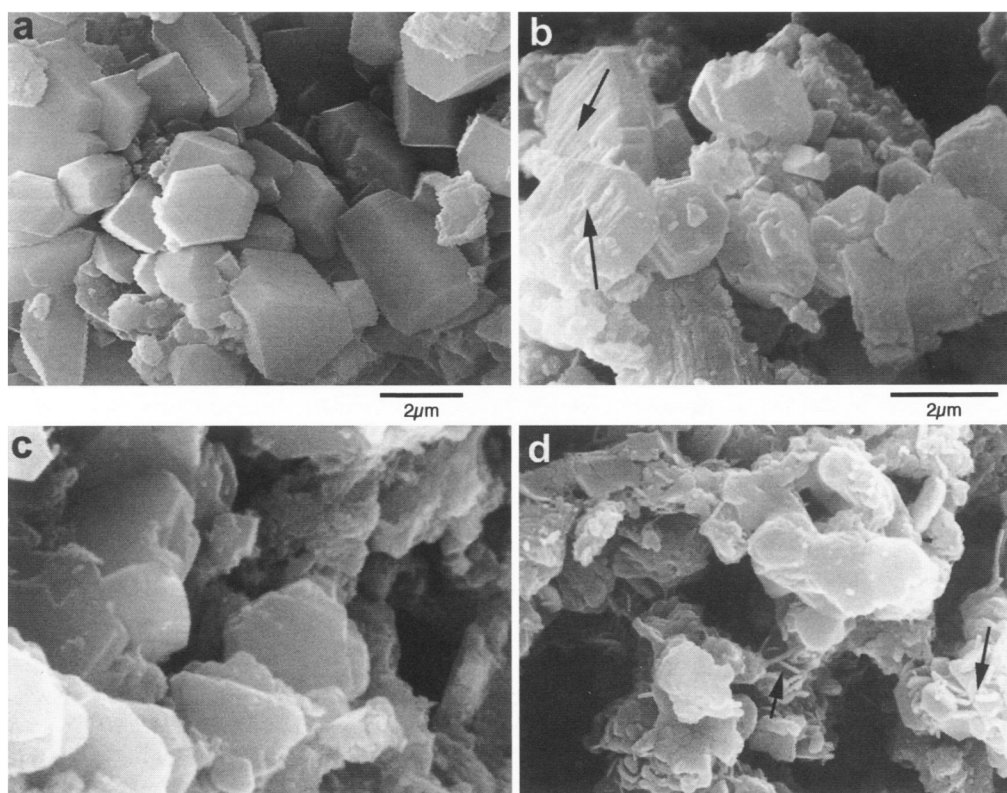
Ke kompletnímu vyhašení, tedy přeměně  $\text{CaO}$  na portlandit, dochází až po relativně dlouhé době, uvádí se až 12 měsíců. Dokladem toho je mineralogický rozbor vápenné kaše po různé době odležení, viz tab. 1. Pro odleženou vápennou kaši je typická také přítomnost určitého množství  $\text{CaCO}_3$ , a to až 10 % hm. Důvodem ke vzniku brucitu je přítomnost malého množství  $\text{MgO}$  v původním páleném vápnu [37].

Tab 1. Mineralogické složení vápenné kaše po různé době odležení [37]

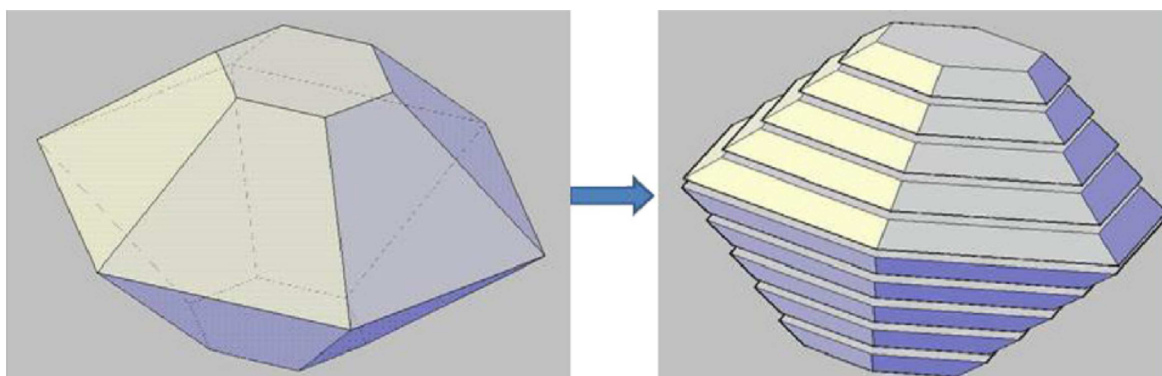
Čas odležení [měsíc]	3	12	24	36	48	66
Portlandit [% hm.]	81,30	85,70	86,80	86,10	86,09	86,98
Kalcit [% hm.]	12,31	9,50	10,10	9,87	10,60	10,49
Brucit [% hm.]	0,81	1,35	1,45	1,62	2,50	2,60

V průběhu odležení vápenné kaše dochází ke změnám ve velikosti průměru pórů. Zpočátku (cca 3 měsíce odležení) se průměr pórů pohybuje mezi 10 až 40  $\mu\text{m}$ , později, po 2 letech odležení, mají póry velikost 100 až 200  $\mu\text{m}$  a po 5 letech odležení se velikost pórů pohybuje v rozmezí 2 až 8  $\mu\text{m}$ . Důvodem ke změnám velikosti pórů i širokému rozpětí jejich velikosti, je rozduřování shluků částic a změna velikosti krystalů portlanditu [37].

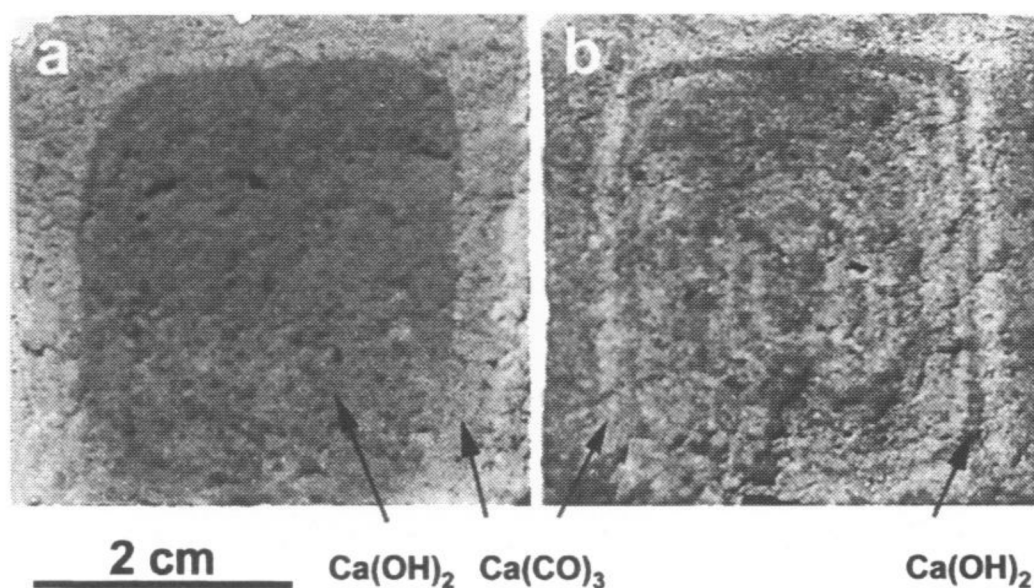
Malé krystaly portlanditu s velkým povrchem jsou velmi reaktivní, což má za následek urychlení procesu karbonatace malt vyrobených z odležené vápenné kaše. Ve srovnání s maltou připravenou z neodležené vápenné kaše nebo hydrátu byl zjištěn vyšší podíl karbonatačních produktů. Při vyšším poměru plniva ku pojivu však vyšší retence vody malých krystalků portlanditu v odležené vápenné kaši má za následek tvorbu trhlin v maltě, a tím i nižší výsledné pevnosti. Tradiční receptury vápenných malt proto doporučují vyšší podíl pojiva v maltě (poměr např. 1 : 3 až 4) nebo aplikaci tlaku během ošetřování vápenné malty. Pro obnovu architektonických památek se proto doporučuje připravovat maltu z vápenné kaše odležené alespoň po dobu jednoho roku a s poměrem vápenné kaše ku plnivu menším než 1 : 4, doporučen je poměr 1 : 3 [18].



Obr. 5 - SEM Snímky vápenné kaše s různou dobou odležení: a – ihned po vyhašení, b – po 2 měsících odležení, c – po 14 měsících odležení, d – detail snímku kaše po 14 měsících odležení [20]



Obr. 6 - Schematická ilustrace rozpadu šestibokého krystalu portlanditu na menší, ploché krystalky [37]



Obr. 7 - Postup karbonatace: a – neodležená vápenná malta, b – odležená vápenná malta; oba vzorky byly zkoušeny fenolftaleinem [20]

Odležení vápenné kaše má také vliv na průběh karbonatace vápenné malty. Kromě již zmíněné vyšší rychlosti procesu karbonatace vykazují malty připravené z odležené vápenné malty lepší difuzní vlastnosti pro průnik  $\text{CO}_2$  a karbonatace pak probíhá v soustředných kruzích podle tzv. Liesegangova jevu, viz obr. 7 [20]. Experimentálně již bylo prokázáno, že malta připravená z odležené vápenné kaše má lepší vlastnosti (pevnost, odolnost vůči chloridům, zpracovatelnost, kapilární absorpce), než malta připravená z vápenného hydrátu [34].

### 3.7 Odležení čerstvé vápenné malty

Některé procesy při přípravě vápenné malty tradičními způsoby jsou velmi náročné na čas. Jedná se zejména o odležení vápenné kaše a odležení čerstvé vápenné malty.

Názory na dobu odležení vápenné malty jsou různé, nicméně odborníci se shodují, že odležením by měla vápenná malta projít vždy. Odležením získává čerstvá malta lepší vlastnosti, jedná se zejména o rychlost karbonatace, pevnost a mrazuvzdornost [4].

Vápenná malta se před odležením připravovala s minimálním množstvím vody, aby bylo možné ji před ukládáním důkladně zhutnit. Tím se zajistí jednak co nejtěsnější kontakt pojiva a kameniva, a jednak se omezí průnik vzduchu do malty. K odležení se malta ukládala do vhodné nádoby – tzv. maltnice, nebo na dobře zhutněnou zakrytou hromadu. Malta takto uložená k odležení nesměla vysychat ani zmrznout, proto byla odležovací hromada převrstvena jílovým pískem a přikryta drny, maltnice bývala zasypána jílovým pískem a přikryta dřevěnými deskami [4].

Už po několikátýdenním odležení se vápenná malta stává poněkud tužší, než když byla ukládána k uložení [16]. Změna konzistence malty je způsobena částečným odpařením či odsátím vody do podkladu při uložení, ale především ji způsobují tixotropní vlastnosti vápenného pojiva. Mícháním lze do jisté míry vrátit tekutost malty i bez přidání vody, protože se rozrušují slabé vazby mezi částicemi vápna a vodou a roztírají se případné shluky vápenného pojiva. Další záměsovou vodu je vhodné přidat v případě nutnosti až po prvotním rozmíchání odležené malty [4].

Velmi důležité je podotknout, že k odležení nelze uložit maltu s hydraulickými ani latentně hydraulickými vlastnostmi. Hydraulická pojiva, která tvrdnou i bez přístupu vzduchu, odležením ztrácí kvalitu nebo zcela ztvrdnou. Maltu ze vzdušného vápna lze zhutněnou a správně uloženou skladovat prakticky neomezeně dlouhou dobu a mít ji tak připravenou k použití.

### 3.8 Karbonatace vápenné malty

V čerstvé vápenné maltě se voda nachází ve dvou formách a vazebných stavech. Jedná se o vodu kapilární (volnou) a adsorbovanou na povrchu pevných

částic. Přítomnost vody je nutná pro průběh karbonatační reakce (4), a to z toho důvodu, že karbonatace probíhá tehdy, když se  $\text{CO}_2$  rozpouští ve vodě a reaguje s rozpuštěným  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [36].

Proces karbonatace lze rozdělit do 5 fází [36]:

- Difuze plynného  $\text{CO}_2$  do pórové struktury vápenné malty,
- Rozpouštění  $\text{CO}_2$  v kapilární vodě,
- Rozpouštění portlanditu v kapilární vodě,
- Reakce v roztoku mezi  $\text{CO}_2$  a  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,
- Srážení pevného  $\text{CaCO}_3$ .

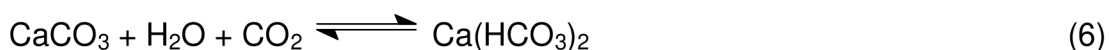
V počáteční fázi tvrdnutí vápenné malty dochází k odpaření kapilární vody a lze zaznamenat výrazné smrštění. Současně s tím začíná proces karbonatace, tedy reakce se vzdušným  $\text{CO}_2$  a přeměna portlanditu na kalcit. Je všeobecně známo, že tento proces je pomalý a ke zkarbonatování veškerého portlanditu dojde až za několik let. Se zvyšováním množství kalcitu ve struktuře vápenné malty dochází k nárůstu pevnosti vápenné malty v průběhu jejího zrání. Nejvyšší nárůst pevnosti vápenné malty byl zaznamenán mezi 28 a 365 dny zrání. Nikdy však nebyla stanovena doba, kdy vápenná malta dosáhne své maximální pevnosti, ani přesná závislost pevnosti vápenné malty na stupni karbonatace [35].

Nejvyšší pevnosti je dosaženo při minimálním množství vody v kapilárních pórech. Avšak, přítomnost vody adsorbované na povrchu částic je nutná pro průběh karbonatace. Optimální množství relativní vnitřní vlhkosti je alespoň 30 % [36].



## 4 Současné možnosti obnovy omítek historických staveb

Ze všech materiálů použitých na architektonických památkách nejvíce podléhají degradaci vnější omítky a malty. Důvodem je jednak jejich charakter (porozita, chemické složení apod.), jednak jsou v přímém kontaktu s korozními faktory, jako jsou srážky, vzlínající vlhkost a imise [5]. Nízká pórovitost a s ní související nízká nasákavost je podmínkou pro plnění hlavní funkce omítky, tj. uzavírat objekt proti průniku dešťové vody a udržovat tepelnou rovnováhu vnitřního prostředí v budově. S rostoucím obsahem vody v pórech se přikře zvyšuje tepelná vodivost zdiva a zhoršují se mechanické vlastnosti i přímým rozpouštěním pojiva podle rovnice (6).



### 4.1 Průzkum stavebních památek

Před započítím samotné obnovy je nutné provést průzkum stavebně historický a stavebně technický. Stavebně historický průzkum je prováděn pracovníky památkové péče a poskytuje návod, na co se má zaměřit následný stavebně technický průzkum [6]. V rámci stavebně technického průzkumu omítek historických objektů se provádí tyto laboratorní zkoušky [5]:

- Vlhkost se stanovuje nejčastěji na základě gravimetrické analýzy podle ČSN P 730610-2000: Hydroizolace staveb – Sanace vlhkého zdiva – Základní ustanovení [12].
- Salinita, tj. obsah síranů, dusičnanů a chloridů, se obvykle zjišťuje metodou iontové chromatografie nebo semikvantitativním stanovením pomocí indikačních papírků. Zkoušky se vyhodnocují podle normy ČSN P 730610-2000 [12] a směrnic WTA 4-5-99: Posuzování zdiva – diagnostika zdiva [13] a WTA 2-9-04: Sanační omítkové systémy [14].
- Mineralogický popis použitých malt se provádí na výbrusu, který se následně zkoumá polarizačním mikroskopem [5]. Lze stanovit charakter pojivové složky, mineralogické složení klastické složky (kameniva) a zjistit případné anorganické příměsi. Z mineralogického složení lze rovněž určit, do jaké míry je malta degradovaná [5].

- Mineralogické složení pojiva a kameniva malty se stanovuje pomocí rentgenové difrakční analýzy (XRD) analýzy, která určí kvalitativní mineralogické složení pojiva a kameniva [5].
- Poměrné zastoupení pojiva a kameniva v maltě se stanovuje silikátovou analýzou, nebo častěji zjednodušeně gravimetrickým stanovením podílu pojiva a kameniva po rozpuštění mechanicky rozdružené malty v kyselině chlorovodíkové HCl, následné filtraci a vysušení nerozpustného podílu (kameniva). Metodami termické analýzy (TA, DTA, DSC) lze kvantitativně popsat jednotlivé fáze malty a stanovit i přítomnost organických látek [5].
- Granulometrie se stanovuje síťovým rozborem, na jehož základě je sestavena granulometrická křivka.
- K identifikaci organických příměsí se využívá většinou infračervená (FTIR) nebo Ramanova spektroskopie (RS). Vlákna organického původu je možné identifikovat ve vysokém zvětšení skenovacím elektronovým mikroskopem [5].
- Identifikace mikroorganismů uchycených na povrchu malt a omítek se provádí např. kultivací na agarovém substrátu, barvením světlocitlivými barvivy a dalšími mikrobiologickými postupy [5].
- Stratigrafický průzkum stanovuje následnost barevných vrstev povrchových nátěrů. Provádí se mikroskopickým pozorováním nábrusu, dalšími metodami (RS, SEM/EDX) lze stanovit druhy pigmentu a pojiva povrchových nátěrů (metody spektroskopické FTIR, RS nebo chromatografické TLC, GPC, GC, GC/MS) [5].

Na základě výsledků provedených průzkumů je třeba rozhodnout, jak se bude k obnově dané architektonické památky přistupovat, jaké zvolit materiály a pracovní postupy. Tato rozhodnutí by však měla být v souladu s doporučením pracovníků památkové péče.

## 4.2 Doplnky a náhrada historických omítek

Pro novodobé doplňky a náhrady historických omítek platí, že by měly být co nejpodobnější původní maltě, a to jak vizuálně, tak svým materiálovým složením, za předpokladu, že tím nebude ohrožena životnost stavby. Složení novodobé omítky by mělo být navrženo na základě výsledků provedených průzkumů původního materiálu.

Měl by být zachován charakter pojiva i kameniva, a také poměr pojiva, kameniva a příměsí. Pro zlepšení některých vlastností nové omítkové směsi lze použít moderní aditiva na polymerní bázi (především akrylátové a metakrylátové polymery a kopolymery). Zejména se jedná o přísady plastifikační, provzdušňovací a hydrofobizační, přidávané v množství 1 až 5 % hm. suchých složek. Jako alternativa k tradičním anorganickým plnivům se v dnešní době využívají např. lehčená plniva (např. perlit) [5].

V průběhu 20. století se upouštělo od používání vápenných technologií a při obnově historických objektů byly původní vápenné omítky běžně nahrazovány vápenocementovými. Právě kvůli nekompatibilitě původního vápenného pojiva a opravné vápenocementové malty to vedlo k problémům, které tehdy nikdo nemohl předvídat. Oproti vápenocementové maltě je vápenná malta měkčí a více se deformuje, proto se lépe přizpůsobí případným pohybům ve struktuře zdiva. V posledních dvou dekádách však v památkové péči dochází k návratu k tradičním vápenným technologiím. Tyto tradice se podařilo uchovat především ve Velké Británii a v Itálii [34, 35]. Odstranění omítkových vrstev otlučením až na konstrukci nenávratně znemožňuje další studium materiálů a technik historických omítek. Na druhé straně mnohdy právě požadavek na zachování původního stavu může ohrozit stavbu jako celek. Jako nejschůdnější kompromis památkového a technického hlediska se jeví doplňování starých zachovalých částí fasády novou omítkou co nejpodobnějších vlastností i vzhledu [1].

#### **4.2.1 Staveništní malty**

Při obnově architektonických památek jsou zejména pracovníky památkové péče preferovány staveništní malty. Jedná se o malty připravované z výchozích surovin přímo na stavbě, což umožňuje jednak přípravu malty se složením co nejbližším původní maltě na objektu, a jednak použití místních písků, které byly pravděpodobně používány v dané lokalitě i v minulosti [6]. Příprava staveništních malt je náročná jednak na čas (odležení vápenné kaše, příp. odležení čerstvé malty), a jednak na odbornost pracovníků na stavbě, aby bylo dosaženo požadované kvality.

Je nutné podotknout, že nová malta nebude mít stejné vlastnosti jako malta původní ani v případě, že bude použita stejná surovina na výrobu vápna a bude vypálena stejným technologickým postupem ve stejné peci a za použití stejného

paliva. Bude se lišit o výsledky fyzikálně chemických procesů, které proběhly během doby od její aplikace, tj. rekrystalizace pojiva, degradace apod. [15].

Trvat za každou cenu na tradičních postupech a materiálech, u nichž není zaručena za určitých podmínek efektivita takové obnovy, může být pro architektonickou památku spíše na škodu [5].

## **4.2.2 Suché maltové a omítkové směsi**

Na českém trhu lze v současnosti najít širokou škálu průmyslově vyráběných suchých omítkových směsí (SOMS), kterými je možné nahradit nevratně degradované historické omítky. Jak již bylo zmíněno, použitá SOMS musí být co nejpodobnější původní omítce jak vzhledově, tak materiálově, a to zejména pokud se jedná o doplnění degradovaných ploch omítky novodobým materiálem.

Výhodou SOMS jsou zejména výrobcem deklarované vlastnosti a složení, které zaručují konstantní složení malty, a také snadné zpracování a aplikace.

Předpokladem pro použití suchých omítkových směsí na památkově chráněných objektech je zejména výběr vhodné směsi pro konkrétní případ použití. K tomuto účelu lze využít metodu multikriteriální optimalizace, která je zpracována v literatuře [6].

## **4.3 Konsolidace historických omítek**

Vnější omítky jsou často zkorodované do hloubky a v rámci restaurátorských prací se přistupuje k jejich konsolidaci, tj. hloubkovému zpevnění. V současné době jsou pro konsolidaci vápenných omítek používány organokřemičitany a vápenná voda [5].

### **4.3.1 Vápenná voda**

Vápenná voda patří k nejstarším materiálům používaným ke zpevnění vápenných malt a omítek. Jejich aplikace vycházela z požadavku dodat maltě ztracené pojivo [5]. Použití vápenné vody však není vždy úspěšné, protože degradovaná omítka vyžaduje hloubkové zpevnění větším množstvím pojiva. Vápenná voda představuje vodný roztok  $\text{Ca(OH)}_2$ , který je ovšem ve vodě málo

rozpuštěný (rozpuštěnost 1,6 g v 1 l vody při 20 °C). K zaplnění pórů povrchové vrstvy degradované omítky dostatečným množstvím  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  je potřeba opakované nanášení vápenné vody (cca 100 cyklů), čímž ovšem dochází k neúměrné zátěži degradované omítky vodou. Může tak dojít k sesutí ošetřované omítky v důsledku nárůstu její hmotnosti a také k aktivaci vodou rozpustných solí, např. síranů, dusičnanů a chloridů, jejich zanášení do hloubky zdiva a rekrystalizaci při vysychání vody [5].

Přínosem ošetřování vápennou vodou je bezpochyby zvyšování alkality ošetřované omítky a z toho vyplývající potlačení růstu mikroorganismů a ochrana před kyselými složkami atmosféry. Z pohledu pracovníků památkové péče je aplikace vápenné vody žádoucí také z estetických důvodů, jako je zachování historického vzhledu vápenné omítky [5].

### **4.3.2 Barytová voda**

Další možností konsolidace vápenných omítek je barytová voda. Chemicky se jedná o roztok hydroxidu barnatého,  $\text{Ba}(\text{OH})_2$ , jehož funkce je jednak zpevnění, a jednak blokování síranů přítomných v konsolidované omítce ve formě nerozpustného síranu barnatého. Reakce probíhá ve dvou návazných krocích, nejprve ze sádrovce vzniká síran barnatý  $\text{BaSO}_4$  a  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Druhým krokem je přeměna hydroxidů barnatého a vápenatého na uhličitany, které zaplňují póry konsolidované malty, čímž dochází k jejímu zpevnění [5].

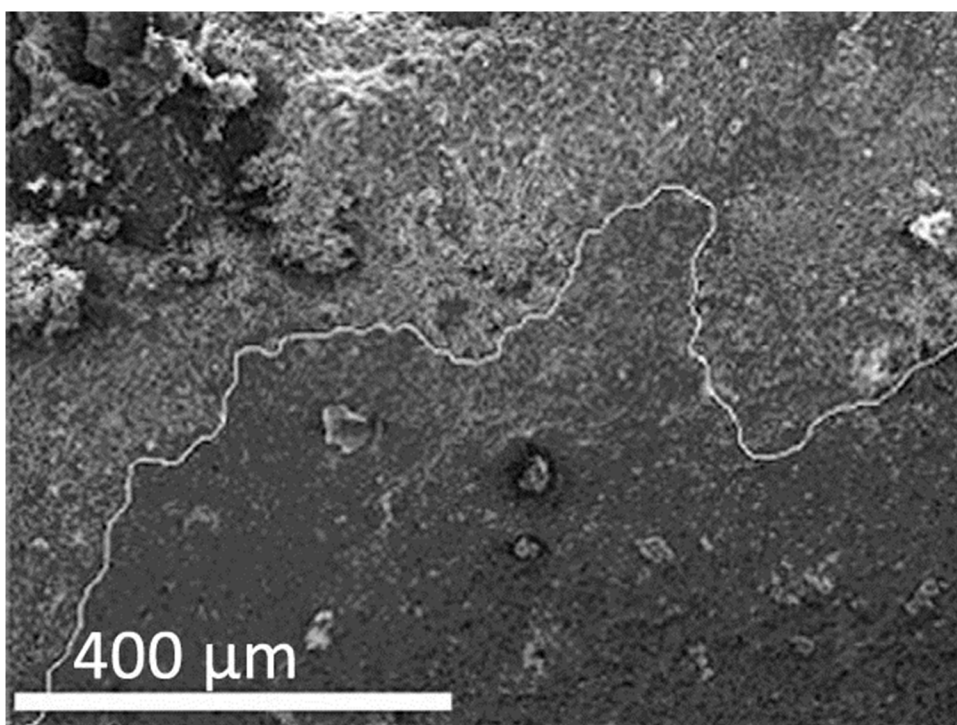
Použití barytové vody je však z dnešního pohledu toxicity sloučenin barya vzhledem k platným zákonům z používání vyloučena.

### **4.3.3 Alkoholové disperze vápna**

Principem zpevnění je opět dodání chemicky shodného pojiva do konsolidovaného materiálu. Nosným médiem pro účinnou látku ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) jsou v tomto případě organická rozpouštědla – alkoholy, které zaručují hlubší penetraci  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  do omítky. Používají se buď alkoholáty vápna, nebo disperze vápna ve vyšších alkoholech [5]. Podmínkou úspěšného zpevnění omítky je větší pórovitost a velikost pórů, které umožní dostatečnou hloubku penetrace alkoholové disperze [19].

#### 4.3.4 Nanovápno v památkové péči

Novou metodou konsolidace vápenných omítek je aplikace nanočástic  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  v alkoholových disperzích. Oproti běžně používaným polymerním konsolidantům mají anorganické látky velkou výhodu v kompatibilitě s ošetřovanými materiály. Zmenšením částic hydroxidu vápenatého dispergovaného v alkoholech na velikost menší než mikrometr se docílilo hlubší penetrace vápenné disperze do omítky, lepší stability a zabránilo se vytváření tenké sklovité vrstvičky na ošetřovaném povrchu, obr. 8 [19].



Obr. 8 - Srovnání omítky neošetřené (nad bílou linkou) a ošetřené disperzí nanočástic  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  - SEM snímek [19]

Pro konsolidaci povrchů s nižší pórovitostí je třeba použít konsolidant s co nejmenšími dispergovanými částicemi účinné látky, proto byla vyvinuta metoda snižující velikost částic  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  na řádově nanometry. Tato metoda je založena na hydrolyze roztoku chloridu vápenatého  $\text{CaCl}_2$  v 1,2-ethandiolu přidáním hydroxidu sodného  $\text{NaOH}$  za zvýšené teploty (150 °C). Následně jsou vzniklé shluky částic rozduženy pomocí peptizace v propan-2-olu v ultrazvukové lázni [19].



Obr. 9 - Stav fresky před aplikací (vpravo od čárkované čáry) a po aplikaci disperze nanočástic  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [19]

Nanočástice  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  byly úspěšně aplikovány na poškozené nástěnné malby ze 14. století v Museo del Bargello ve Florencii a fresky ze 13. století v chrámu San Zeno ve Veroně (obr. 9). Po ošetření disperzí nanočástic  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  byla obnovena kompaktnost povrchu (zvýšil se poměr  $\text{Ca} : \text{Si}$  v maltě) a u fresek nedošlo ke změnám v barevnosti [19].

#### 4.3.5 Konsolidace syntetickými polymery

Prvním syntetickým polymerem, který byl využit ke konsolidaci historických omítek, byla vodná **disperze polyvinylacetátu** (latex). Ta se však příliš neosvědčila, a to z důvodů nízké stability ve vodném prostředí, nízké odolnosti oxidům síry a mikroorganismům a velmi malého průniku do omítky a zpětné migrace disperze k povrchu omítky. Docházelo proto ke snížení paropropustnosti ošetřované omítky [5].

V 80. letech 20. století byly historické omítky často ošetřovány polymery na bázi polyakrylátových pryskyřic ve formě **vodné disperze nebo vodnými roztoky**

**alkalických křemičitanů** (vodní sklo), eventuálně fluorokřemičitanů. Od jejich používání se upustilo zejména z důvodu vysoké viskozity disperze a s ní související nízké penetrační schopnosti. Úspěšnější byly **akryláty** aplikované ve formě roztoků v organických rozpouštědlech. Výhodou akrylátů je jejich vysoká pojivá schopnost, vysoká fotooxidační a hydrolytická stabilita a zejména dostatečná penetrační schopnost. V současnosti se akryláty běžně používají při konsolidaci nástěnných maleb a sgrafit [5].

Nejvíce využívanými polymerními konsolidanty jsou v současné době **organokřemičitany**, tj. estery kyseliny křemičité. Nejčastěji jsou aplikovány jako vodné emulze nebo roztoky v organických rozpouštědlech. Princip zpevnění spočívá ve vytvoření chemické vazby mezi  $\text{SiO}_2$  obsaženým v plnivu malty a vznikajícím gelem  $\text{SiO}_2$ . [5].



# Experimentální část

## 5 Metodika práce

Experimentální část diplomové práce je zaměřena na porovnání vlastností vápenných malt připravených z různých forem stavebního vápna (vápenný hydrát, aktivovaný vápenný hydrát a odležená vápenná kaše) a zejména na ověření vlivu odležení čerstvé vápenné malty na její vlastnosti. Navíc byla podle tradiční receptury a postupu připravena tzv. horká malta.

U čerstvých malt byla stanovena konzistence, u ztvrdlých malt byly stanovovány tyto parametry:

- pevnost v tlaku a v tahu za ohybu po 7, 28, 60, 90 dnech,
- mrazuvzdornost,
- nasákavost,
- smrštění.

Vzorky ztvrdlé malty byly po 28 dnech rovněž použity pro zkoumání mikrostruktury s použitím elektronového mikroskopu.

Výsledky prováděných zkoušek jsou uvedeny v kapitole 9.

## 6 Charakteristika použitých surovin

### 6.1 Pojivo

#### 6.1.1 Vápenný hydrát

Jako pojivo bylo použito stavební vápno ve třech různých formách, a to vápenný hydrát, odležená vápenná kaše a aktivovaný vápenný hydrát.

Pro přípravu zkušebních těles byl použit vápenný hydrát CL 90-S od firmy Carmeuse Czech Republic s. r. o., vyrobený v závodě Mokrá [23]. Tento vápenný hydrát splňuje požadavky normy ČSN EN 459-1 [7]. Informace o výrobku z technického listu jsou uvedeny v tab. 2.

**Tab 2. Technické parametry vápenného hydrátu CL 90-S z technického listu [23]**

Bílé vápno CL 90-S	m. j.	Požadavek EN	Skutečnost
CaO + MgO	%	min. 90	92,0 - 95,5
Z toho MgO	%	max. 5	0,3 - 0,6
CO <sub>2</sub>	%	max. 4	1,0 - 3,0
SO <sub>3</sub>	%	max. 2	0,1 - 0,4
Ztráta žíháním	%	-	23,5 - 25,0
Ca(OH) <sub>2</sub> rozpustný	%	-	93,0 - 95,0
Objemová stálost	-	musí vyhovět	vyhovuje
Zbytek na síť 0,2 mm	%	max. 2	0,0
Zbytek na síť 0,09 mm	%	max. 7	3,5 - 5,5
Sypná hmotnost	kg/m <sup>3</sup>	-	330 - 400

#### 6.1.2 Odležená vápenná kaše

Vápenná kaše byla připravena z kusového vápna a byla hašena v přebytku vody v hasnici. Před použitím byla ponechána k odležení po dobu 14 měsíců. Před samotnou výrobou zkušebních těles bylo třeba stanovit podíl sušiny v kaši. Byl odebrán vzorek vápenné kaše a v sušárně vysušen do konstantní hmotnosti. Podíl Ca(OH)<sub>2</sub> v použité vápenné kaši činil 48,99 %.

#### 6.1.3 Vápenný hydrát aktivovaný mixováním

Aktivovaný hydrát je pojem použitý pro vápenný hydrát aktivovaný mixováním. Aktivovaný hydrát použitý pro přípravu zkušebních těles pro účely této diplomové

práce byl připraven z výše uvedeného vápenného hydrátu [23] a vody mixováním po dobu 10 minut. K tomuto účelu byl použit mixér Braun.

### 6.1.4 Kusové vápno

Pro přípravu horké malty bylo použito kusové bílé vápno CL 90-Q od firmy Carmeuse Czech Republic s. r. o., vyrobený v závodě Mokrá [24]. Informace o kusovém vápnu z technického listu jsou uvedeny v tab. 3. Před použitím byly velké kusy páleného vápna rozduženy na kousky o velikosti do 20 mm, aby bylo docíleno většího povrchu částic.

**Tab 3. Technické parametry kusového bílého vápna CL 90-Q z technického listu [24]**

Bílé vápno CL 90-Q	m. j.	požadavek EN	skutečnost
CaO + MgO	%	min. 90	92,0 - 95,5
z toho MgO	%	max. 5	0,3 - 0,5
CO <sub>2</sub>	%	max. 4	1,5 - 3,5
R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	-	0,5 - 1,5
SiO <sub>2</sub>	%	-	0,5 - 1,5
SO <sub>3</sub>	%	max. 2	0,1 - 0,4
vydatnost	dm <sup>3</sup> /10 kg	min. 26	26 - 29
objemová stálost	-	musí vyhovět	vyhovuje
reaktivita T max.	°C	-	70 - 75
reaktivita t 60	min.	-	1:00 - 2:00
reaktivita t max.	min.	-	3 - 8
zrnitost max	min.	-	0 - 63

## 6.2 Písek

Oba druhy písku použité pro přípravu zkušebních vzorků jsou v souladu s požadavky normy ČSN EN 13139 Kamenivo pro malty [27]. Pro výrobu zkušebních těles byl použit kopaný písek maltový (dále označován jako omítkový písek) od firmy Českomoravský štěrk a. s. Jedná se o těžené kamenivo frakce 0 až 4 mm, pocházející ze štěrkovny v Hulíně [25].

Dále byla vyrobena zkušební tělesa s použitím alternativního kameniva, a to zkušební křemenný písek (dále označován jako normový písek, složený z frakcí označených PG 1, PG 2 a PG 3 v poměru 1 : 1 : 1), a také kopaný písek frakce 0 až

4 mm pocházející z pískovny v Bratčicích, dodaný firmou Štěrkopísek Bratčice s. r. o. (dále označován jako písek Bratčice) [26].

Všechny použité písky byly před použitím vysušeny v sušárně do konstantní hmotnosti, aby byly zbaveny veškeré vlhkosti. Pro všechny použité druhy písku byly stanoveny křivky zrnitosti na sadě sít. Sítový rozbor použitého kameniva byl proveden podle normy ČSN EN 933-1 [32] a jsou uvedeny v tab. 4 až 8 a grafech na obr. 10 až 14.

**Tab 4. Sítový rozbor normového písku frakce PG 1**

Navážka [g]			227,64
Velikost ok síta [mm]	Zbytek na síť		Celkový propad [%]
	[g]	[%]	
0,045	0,11	0,05	0,05
0,063	0,44	0,19	0,248
0,090	4,95	2,17	2,41
0,125	3,40	1,49	3,90
0,25	163,23	71,71	75,61
0,5	55,53	24,39	100,00
1,0	0,00	0,00	100,00

**Tab 5. Sítový rozbor normového písku frakce PG 2**

Navážka [g]			204,68
Velikost ok síta [mm]	Zbytek na síť		Celkový propad [%]
	[g]	[%]	
0,125	0,11	0,05	0,05
0,250	1,21	0,59	0,64
0,5	5,58	2,73	3,37
1,0	182,05	88,94	92,31
2,5	15,59	7,62	99,93
5,0	0,15	0,07	100,00

**Tab 6. Sítový rozbor normového písku frakce PG 3**

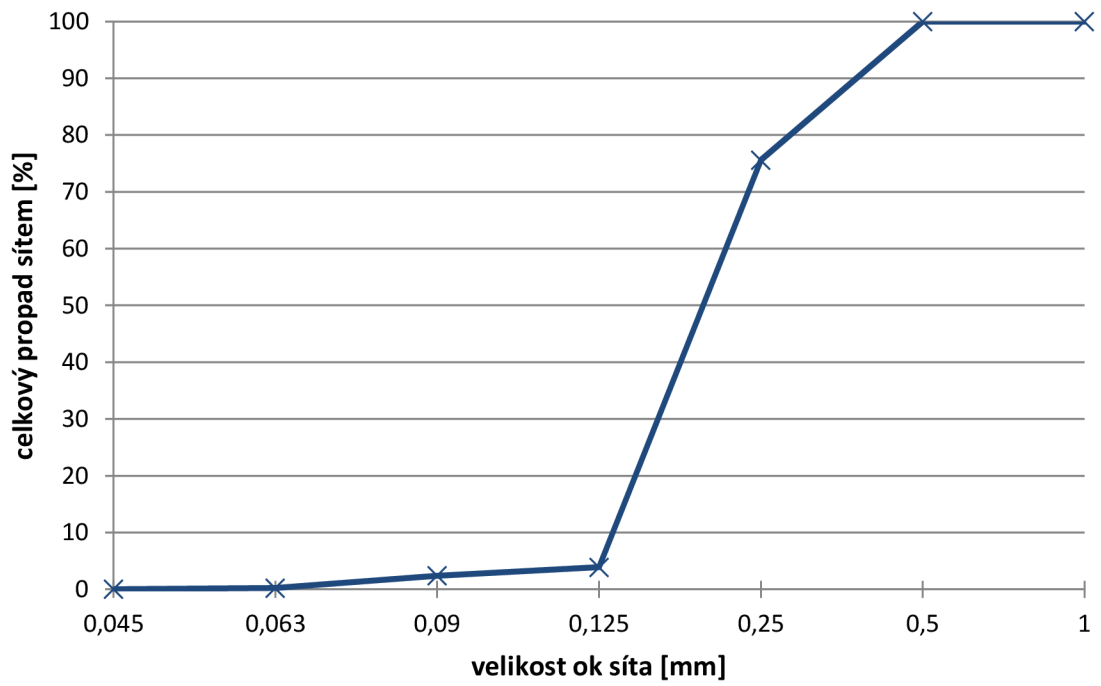
Navážka [g]			226,262
Velikost ok síta [mm]	Zbytek na síť		Celkový propad [%]
	[g]	[%]	
0,5	0,05	0,02	0,02
1,0	0,60	0,27	0,29
2,5	225,28	99,57	99,85
5,0	0,33	0,15	100,00

**Tab 7. Sítový rozbor omítkového písku**

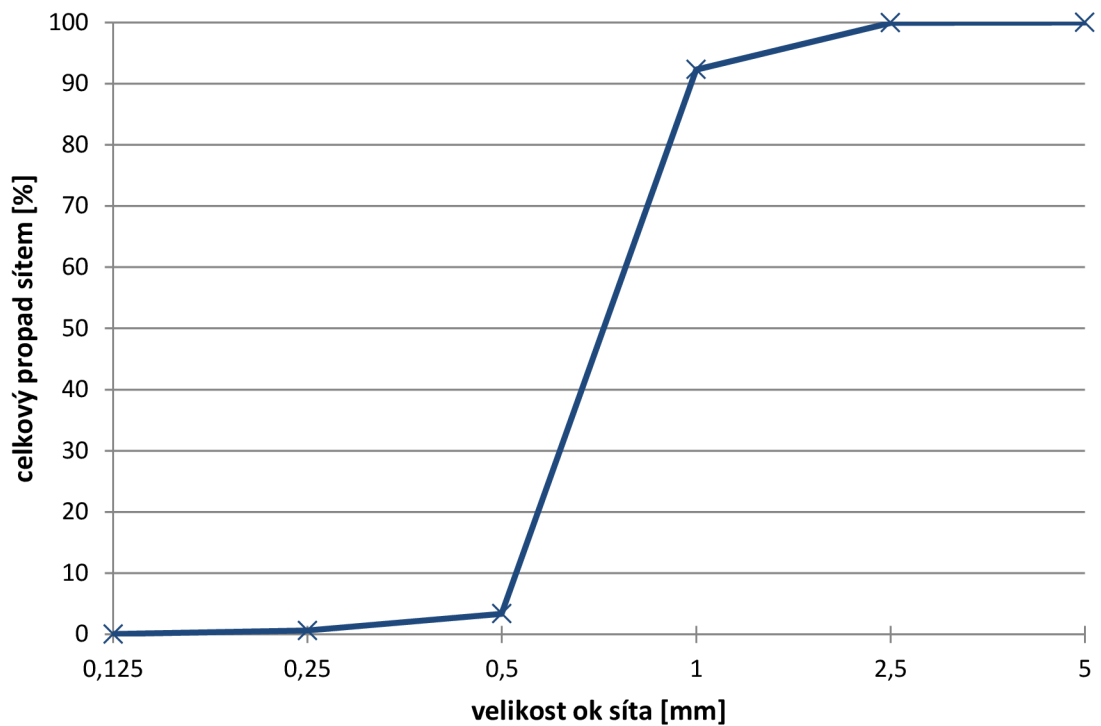
Navážka [g]		119,06	
Velikost ok síta [mm]	Zbytek na síť		Celkový propad [%]
	[g]	[%]	
0,0	0,53	0,45	0,00
0,045	0,28	0,23	0,45
0,063	0,78	0,65	0,69
0,090	1,39	1,17	1,34
0,125	16,23	13,63	2,51
0,25	42,48	35,68	16,14
0,5	31,45	26,41	51,81
1,0	18,51	15,55	78,23
2,5	5,33	4,47	93,77
4,0	2,09	1,75	98,25
suma	119,06	100,00	100,00

**Tab 8. Sítový rozbor písku Bratčice**

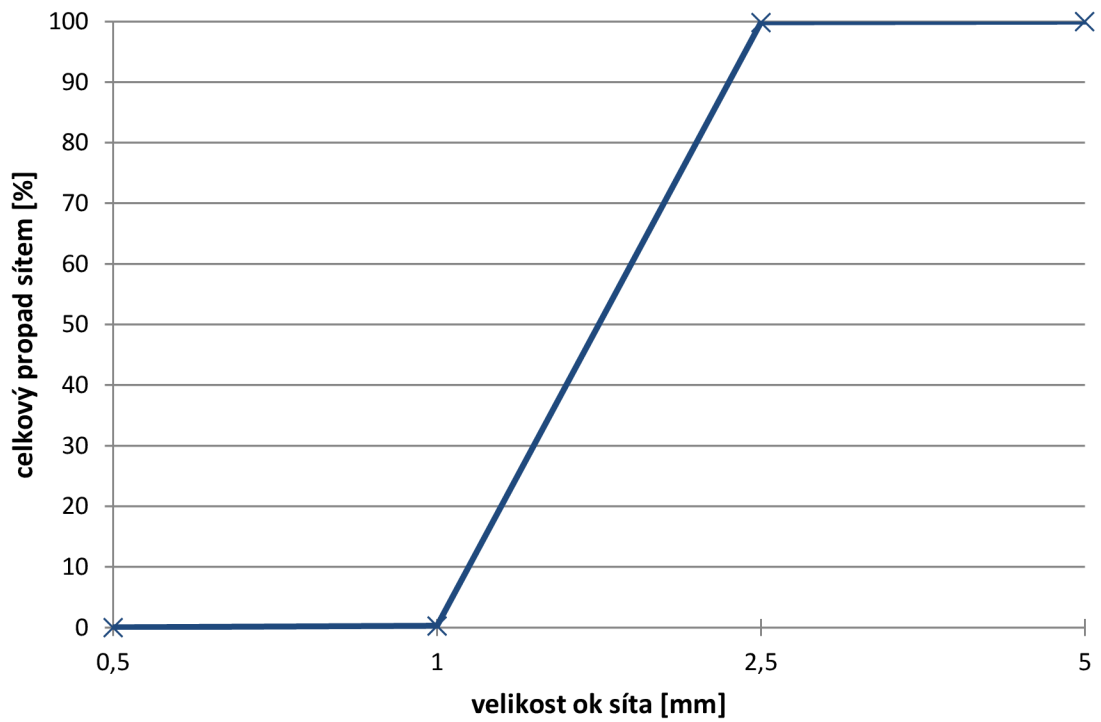
Navážka [g]		227,25	
Velikost ok síta [mm]	Zbytek na síť		Celkový propad [%]
	[g]	[%]	
0,0	0,59	0,26	0,00
0,045	0,87	0,38	0,26
0,063	2,04	0,90	0,64
0,090	4,07	1,79	1,54
0,125	28,45	12,52	3,33
0,25	60,07	26,43	15,85
0,5	71,45	31,44	42,28
1,0	40,34	17,75	73,72
2,5	14,57	6,41	91,47
4,0	4,83	2,13	97,88
suma	227,25	100,00	100,00



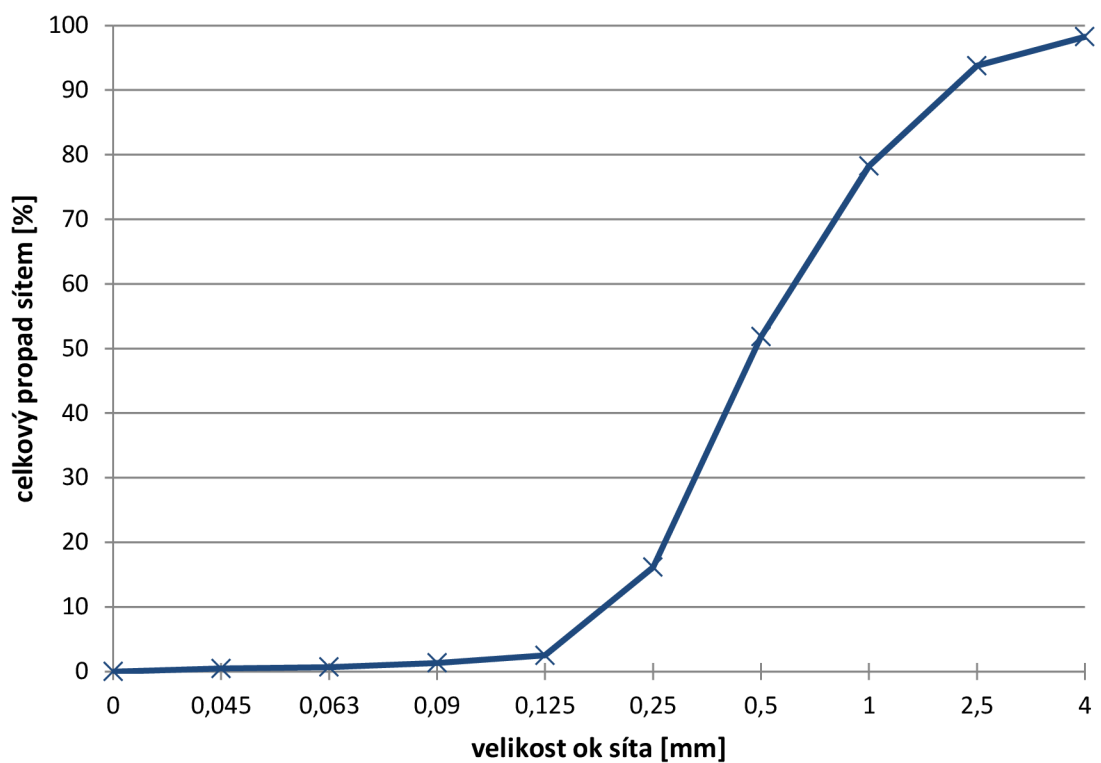
Obr. 10 - Křivka zrnitosti normového písku frakce PG 1



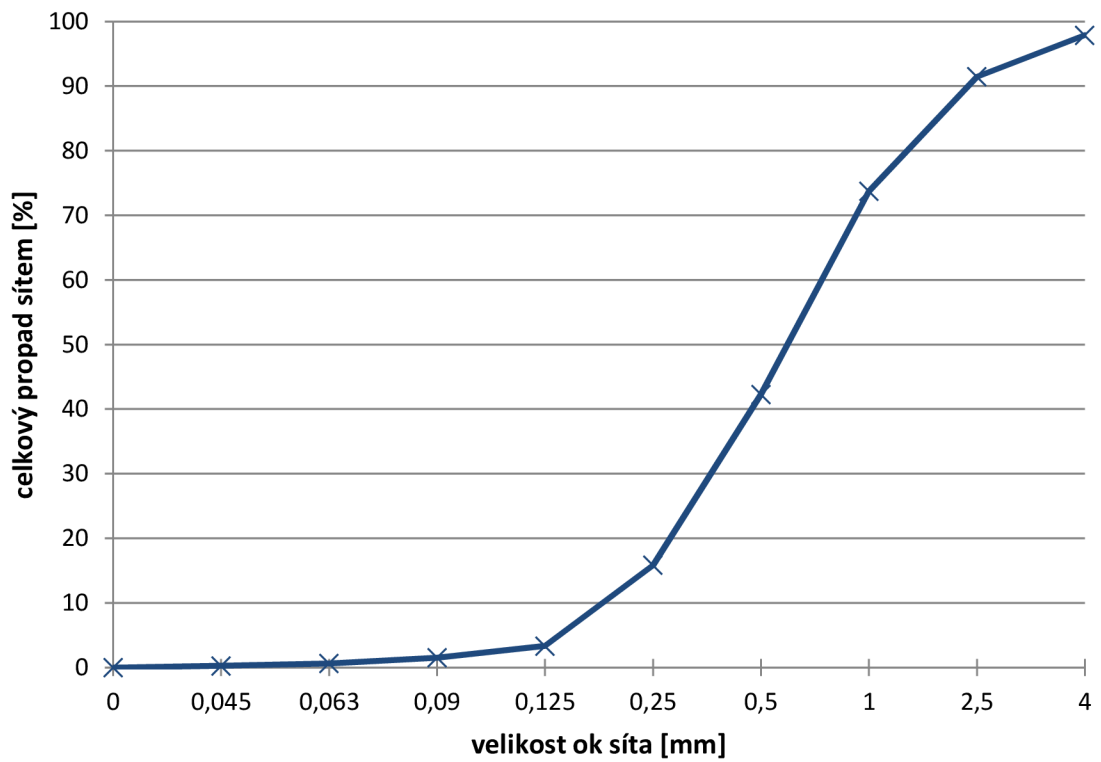
Obr. 11 - Křivka zrnitosti normového písku frakce PG 2



Obr. 12 - Křivka zrnitosti normového písku frakce PG 3



Obr. 13 - Křivka zrnitosti omítkového písku



Obr. 14 - Křivka zrnitosti písku Bratčice

## 6.3 Voda

Jako záměsová voda byla použita pitná voda z vodovodního řadu, která splňuje požadavky na záměsovou vodu uvedené v normě ČSN EN 1008 [28].



## 7 Receptury zkoušených vápenných malt

Celkem bylo připraveno 6 variant vápenné malty podle níže uvedených receptur se 3 typy pojiva (vápenný hydrát, aktivovaný vápenný hydrát, vápenná kaše), vždy ve variantě neodležená a odležená (viz tab. 9). Bylo připraveno vždy 10 trojforem, tzn. 30 zkušebních těles o rozměrech 40 x 40 x 160 mm pro každou variantu vápenné malty. Navíc byla připravena tzv. horká malta podle tradičního postupu, z důvodu časově náročné přípravy pouze ve v neodležená variantě.

**Tab 9. Přehled připravovaných variant vápenné malty**

Druh malty	Způsob zpracování	Označení
Malta z vápenného hydrátu	Neodležená	VHN
	Odležená	VHO
Malta z odležené vápenné kaše	Neodležená	VKN
	Odležená	VKO
Malta z aktivovaného vápenného hydrátu	Neodležená	AHN
	Odležená	AHO
Horká malta	Neodležená	HM

### 7.1 Receptura z vápenného hydrátu

Pro možnost srovnání vlastností vápenných malt, byly všechny malty připravovány se stejným poměrem složek i vodním součinitelem. Byl zvolen poměr vápna : písku 1 : 4, tedy poměr používaný jak v minulosti při přípravě vápenných omítek [1], tak v současnosti při obnově historických staveb.

$$w = \frac{m_{voda}}{m_{vápno}} \quad (9)$$

Vodní součinitel byl stanoven pro neodleženou maltu připravenou z vápenného hydrátu tak, aby při zkoušce rozlitím na střešacím stolku podle normy ČSN EN 1015-3 [22] bylo rozlití 160±5 mm. Vodní součinitel byl vypočten podle vztahu (9) a činil  $w = 1,08$ . Tento vodní součinitel pak byl použit při přípravě všech ostatních malt. V tab. 10 je uvedena receptura pro přípravu jedné trojformy zkušebních těles o rozměrech 40 x 40 x 160 mm.

**Tab 10. Receptura pro přípravu jedné trojformy zkušebních těles o rozměrech 40 x 40 x 160 mm**

Surovina	Hmotnost [g]
Pojivo	300
Písek	1200
Voda	325

## 7.2 Receptura z vápenné kaše

Pro přípravu zkušebních těles s pojivem z odležené vápenné kaše byl použit opět poměr pojiva a plniva 1 : 4 a vodní součinitel  $w = 1,08$ . Protože vápenná kaše je připravována hašením v přebytku vody, bylo nutné stanovit podíl sušiny a vodu doplnit na požadované množství. V tab. 11 je uvedena receptura pro přípravu malty z vápenné kaše pro jednu trojformu.

**Tab 11. Receptura pro přípravu s použitím vápenné kaše**

Surovina	Hmotnost [g]
Vápenná kaše	612,4
Písek	1200
Voda	12,6

## 7.3 Receptura horké malty

Horká malta byla připravena podle tradiční receptury a tradičním postupem. Pro její přípravu bylo použito kusové vápno CL 90 a písek (obr. 15). Hmotnostní dávkování (hmotnostní poměr písku k vápnu 7,8 : 1) bylo prováděno tak, aby poměr písku : pojivu objemově činil 5 : 1 (dle starých receptur). Příprava horké malty probíhala tak, že se do nádoby střídavě vrstvil písek a vápno tak, aby poslední vrstvu tvořil písek, jak je zachyceno na obr. 16. Poté byla hmota zalita vodou v množství 2 l a pálené vápno se začalo hasit. Nádoba byla zakryta a ponechána k odležení po dobu 3 týdny, aby došlo k hydrataci CaO. Po odležení byla směs promíchána a doplněna vodou o 1,5 l tak, aby měla požadovanou konzistenci. V tab. 12 je uvedena receptura pro horkou maltu. Vodní součinitel pro horkou maltu byl stanoven podle vztahu (9)  $w = 1,56$ .

**Tab 12. Receptura pro přípravu 10 trojforem zkušebních těles o rozměrech 40 x 40 x 160 mm z horké malty**

Surovina	Hmotnost [g]
Kusové vápno	2 000
Písek	15 600
Voda	3 500



*Obr. 15 - Suroviny pro přípravu horké malty: kusové pálené vápno a omítkový písek*



*Obr. 16 - Při přípravě horké malty se vrstvy písku střídají s vrstvami kusového vápna*

## **7.4 Příprava zkušebních těles**

Zkušební tělesa o rozměrech 40 x 40 x 160 mm byla vyráběna v souladu s normou ČSN EN 1015-2 [29]. Po 3 až 4 dnech byla zkušební tělesa odformována a uložena v laboratorních podmínkách (teplota  $21 \pm 2$  °C, R. H.  $50 \pm 5$  %) s přístupem vzduchu, aby byla umožněna karbonatace vápenného pojiva.

### **7.4.1 Odležení**

Část připravené čerstvé malty každé varianty (kromě horké malty) byla uložena k odležení. Odležení vápenné malty v laboratorních podmínkách realizováno v uzavřené nádobě, čerstvá malta byla po uložení do nádoby zhutněna a zalita vrstvou vody, aby nedocházelo k její karbonataci. Takto byla čerstvá malta ponechána po dobu 4 týdnů, poté byla znovu důkladně promíchána a následně z ní byla připravena zkušební tělesa.

## 8 Prováděné zkoušky

### 8.1 Zkoušky prováděné na čerstvé maltě

#### 8.1.1 Stanovení konzistence čerstvé malty

U každé varianty vápenné malty byla stanovena konzistence čerstvé malty s použitím střešacího stolku podle normy ČSN EN 1015-3 [22]. U odležené malty byla konzistence stanovována po odležení, tzn. bezprostředně před přípravou zkušebních těles.

### 8.2 Zkoušky prováděné na ztvrdlé maltě

#### 8.2.1 Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku

Pro všechny varianty připravené vápenné malty byla stanovována pevnost v tahu za ohybu a na zlomcích pevnost v tlaku. Pevnosti byly stanovovány po 7, 28, 60 a 90 (event. 180) dnech, aby bylo možné sledovat a srovnávat vývoj pevnosti vápenné malty v čase. Zkoušení pevnosti v tlaku i v tahu za ohybu probíhalo v souladu s normou ČSN EN 1015-11 [30]. Vždy byla zkoušena sada 3 zkušebních těles a stanovena průměrná hodnota pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu. Pevnost v tahu za ohybu byla vypočtena podle vztahu (10) a pevnost v tlaku podle vztahu (11).

$$R_f = \frac{3F_f l'}{2bh^2} \quad (10)$$

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (11)$$

$$N = \frac{m_n - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (12)$$

#### 8.2.2 Nasákavost

Nasákavost byla stanovována na sadě 3 zkušebních těles po 28 dnech od jejich výroby. Tělesa byla uložena do nádoby na porcelánové distanční podložky a zalita vodou tak, aby hladina dosahovala 50 mm nad jejich horní okraj. Takto byla tělesa ponechána po dobu 24 hodin a po vyjmutí a osušení byla stanovena jejich hmotnost

při nasycení vodou  $m_n$ . Poté byla tělesa vysušena při 80 °C do konstantní hmotnosti  $m_s$ . Nasákavost  $N$  [%] pak byla vypočtena podle vztahu (12).

### 8.2.3 Smrštění délkové a objemové, objemová hmotnost

U zkušebních vzorků byl také sledován vývoj délkového a objemového smrštění po 7, 28, 60 a 90 dnech. Objemové i délkové smrštění je vyjádřeno jako podíl délkové (objemové) změny  $\Delta l$  ( $\Delta V$ ) k původní délce  $l_0$  (objemu  $V_0$ ), vyjádřený v [%] (viz vztahy (13) a (14)). Objemová hmotnost ztvrdlé malty byla stanovována výpočtem ze změřených rozměrů zkušebních těles podle vztahu (15).

$$S_d = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 = \frac{l-l_0}{l_0} \cdot 100 \quad (13)$$

$$S_o = \frac{\Delta V}{V_0} \cdot 100 = \frac{V-V_0}{V_0} \cdot 100 \quad (14)$$

$$\rho = \frac{m}{bh} \quad (15)$$

### 8.2.4 Mrazuvzdornost

Zkoušení mrazuvzdornosti se provádělo po 28 dnech, jedna sada 3 zkušebních těles podstoupila zatížení mrazem podle normy ČSN 72 2452 [31], druhá sada 3 zkušebních těles sloužila jako srovnávací. Mrazuvzdornost je hodnocena úbytkem hmotnosti  $\Delta m$  [g] (vztah (16)), k němuž dojde během zmrazovacích cyklů, a součinitelem mrazuvzdornosti  $KM_f$ , který je dán poměrem pevnosti v tahu za ohybu zmrazovaných vzorků ku pevnosti v tahu za ohybu referenčních vzorků (viz vztah (17)). Pokud je hodnota součinitele mrazuvzdornosti  $KM_f$  menší než 0,25, je zkoušená směs mrazuvzdorná pro daný počet cyklů [31].

$$\Delta m = m_1 - m_0 \quad (16)$$

$$souč = \frac{R_{f,zmrazované}}{R_{f,referenční}} \quad (17)$$

### 8.2.5 Snímkování elektronovým mikroskopem

Na snímcích pořízených elektronovým mikroskopem byla zkoumána mikrostruktura zkušebních těles. Pro snímky mikrostruktury vápenných malt bylo použito zvětšení 5000x, resp. 10000x.

## 9 Výsledky experimentů a jejich vyhodnocení

Tato kapitola je věnována naměřeným výsledkům prováděných zkoušek popsaných v předchozí kapitole a vyhodnocení a interpretaci těchto výsledků.

### 9.1 Zkoušky prováděné na čerstvé maltě

#### 9.1.1 Stanovení konzistence čerstvé malty

Konzistence čerstvé malty se stanovovala pomocí střešovacího stolku podle normy ČSN EN 1015-3 [22]. Neodležená malta připravená z omítkového písku a vápenného hydrátu sloužila jako referenční. Vodní součinitel  $w = 1,08$  byl stanoven tak, aby průměr koláče po rozlití čerstvé malty byl  $160 \pm 5$  mm. Takto stanovený vodní součinitel byl pak použit i pro ostatní připravované malty. V tab. 13 a 14 jsou uvedeny výsledky stanovení konzistence čerstvé malty pro připravované malty. Grafy na obr. 17 a 18 ukazují srovnání konzistence odležené a neodležené malty s různými formami stavebního vápna připravené z omítkového, obr. 17, a normového písku, obr. 18. Graf na obr. 19 pak představuje srovnání konzistence čerstvé malty všech připravovaných typů vápenné malty.

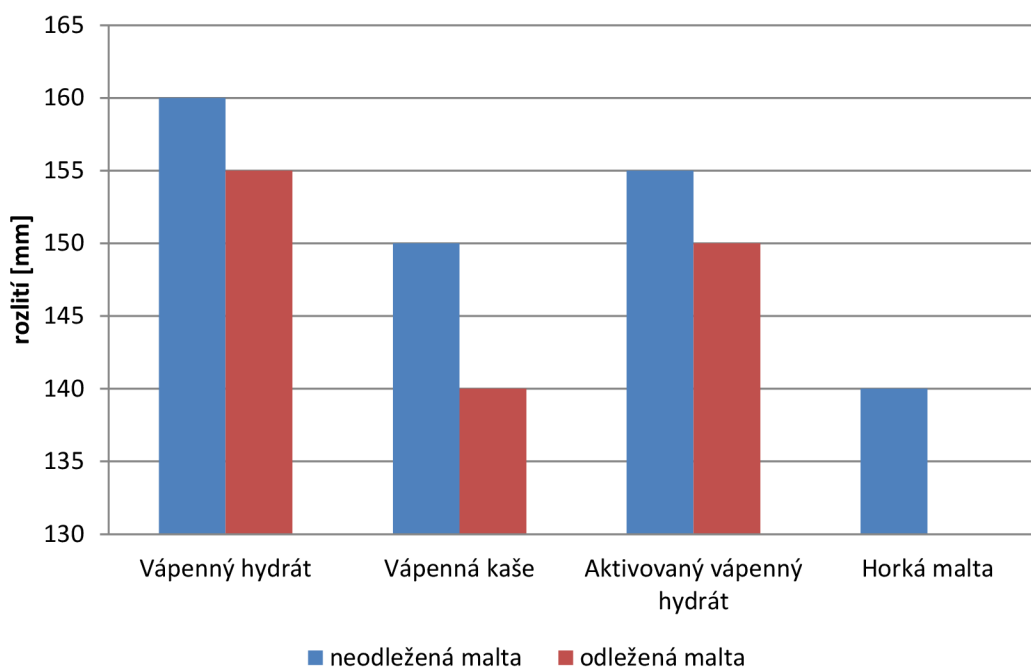
U všech malt, které prošly odležením, je patrné mírné snížení rozlití oproti neodležené maltě se stejným pojivem i pískem. Srovnáme-li hodnotu rozlití pro různé formy stavebního vápna, pak nejnižší hodnotu zaznamenáváme u vápenné kaše, nejvyšší u vápenného hydrátu. Horká malta má hodnotu rozlití jednu z nejnižších, ač její vodní součinitel ( $w = 1,56$ ) je výrazně vyšší než u ostatních malt. Je to dáno vyšším podílem písku v horké maltě.

**Tab 13. Konzistence vápenných malt připravených z omítkového písku**

Omítkový písek		Rozlití [mm]		
Pojivo	Malta	$d_1$	$d_2$	$d_{\text{prům.}}$
Vápenný hydrát	neodležená	155	160	160
	odležená	150	155	155
Vápenná kaše	neodležená	150	150	150
	odležená	135	145	140
Aktivovaný vápenný hydrát	neodležená	150	155	155
	odležená	145	155	150
Horká malta	neodležená	135	140	140

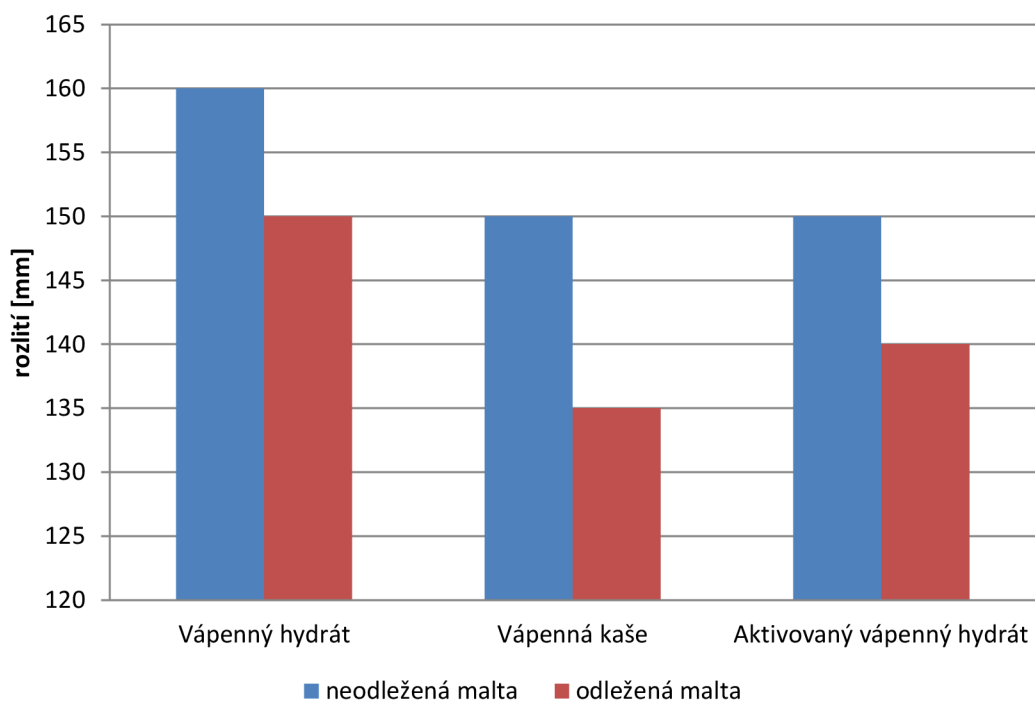
**Tab 14. Konzistence vápenných malt připravených z alternativních písků (normový písek, písek Bratčice)**

Normový písek		Rozlití [mm]		
Pojivo	Malta	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>prům.</sub>
Vápenný hydrát	neodležená	160	160	160
	odležená	145	150	150
Vápenná kaše	neodležená	155	145	150
	odležená	140	130	135
Aktivovaný vápenný hydrát	neodležená	145	155	150
	odležená	140	140	140
Písek Bratčice				
Vápenný hydrát	neodležená	150	155	155

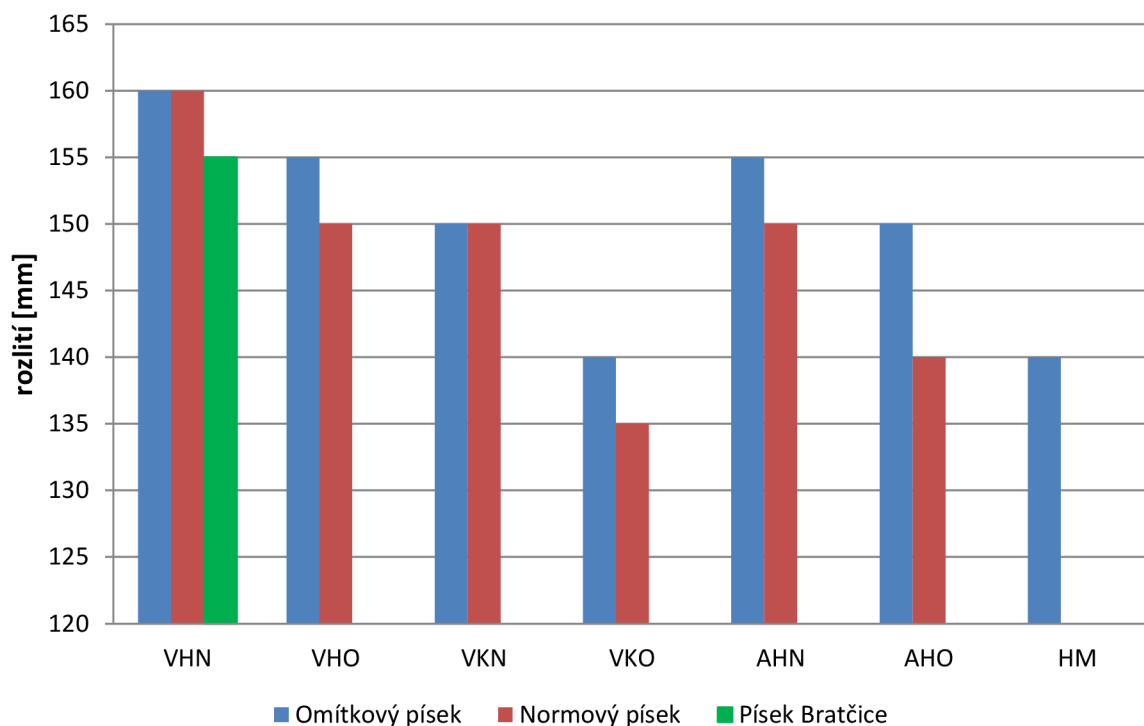


*Obr. 17 - Konzistence čerstvé malty připravené z omítkového písku v závislosti na typu pojiva*





Obr. 18 - Konzistence čerstvé malty připravené z normového písku v závislosti na typu pojiva



Obr. 19 - Konzistence čerstvé malty v závislosti na druhu pojiva pro různé druhy písku (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, HM - horká malta)

## 9.2 Zkoušky prováděné na ztvrdlé maltě

### 9.2.1 Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku

Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku ztvrdlé malty byla stanovována na zkušebních tělesech o rozměrech 40 x 40 x 160 mm s ohledem na vývoj v čase. Zkoušky byly prováděny po 7, 28, 60 a 90 (ev. 180) dnech podle normy ČSN EN 1015-11 [30]. V daném čase byla zkoušena vždy sada 3 zkušební těles. Výsledky provedených zkoušek pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku jsou uvedeny v tab. 15 až 28. Obr. 20 až 33 představují grafy vývoje pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku pro maltu připravenou z dané formy stavebního vápna a daného druhu písku, současně se srovnáním vývoje pevnosti v tlaku pro maltu odleženou a neodleženou. Grafy na obr. 34 až 37 pak ukazují srovnání pevnosti v tahu za ohybu pro různé druhy malty v daném čase (7, 28, 60 a 90 dní). Obr. 38 až 41 představují grafické srovnání pevnosti v tlaku pro různé druhy malty v daném čase.

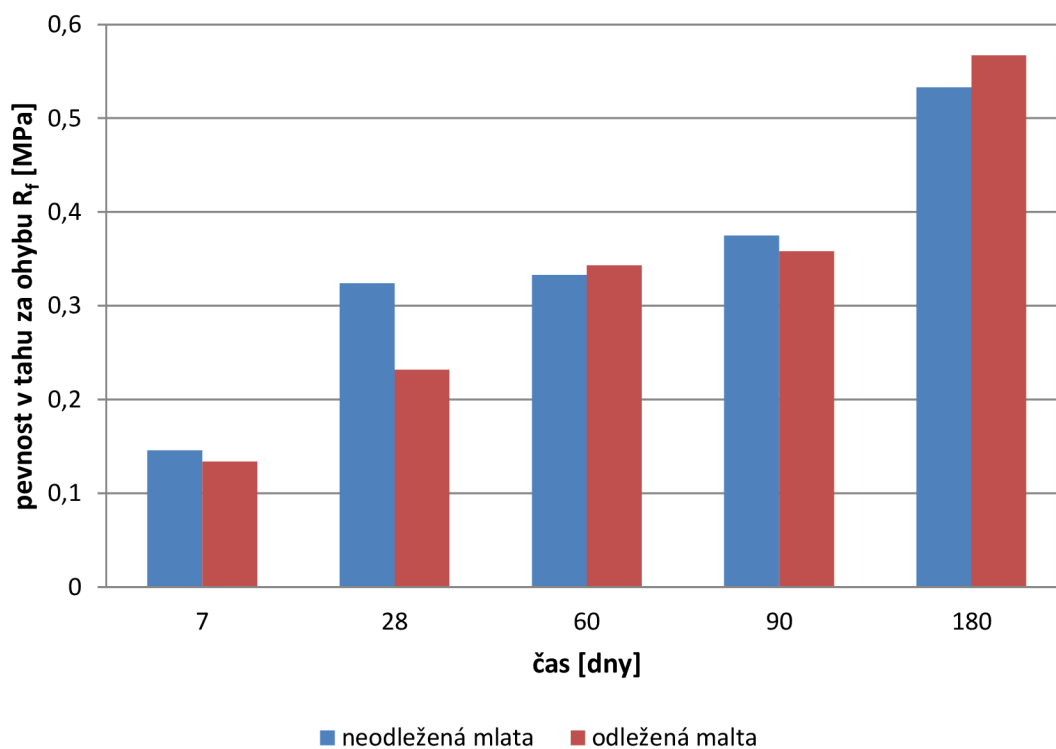
U všech připravených malt byl v čase vysledován nárůst pevnosti v tlaku i v tahu za ohybu. U horké malty nebylo možné stanovit pevnostní charakteristiky po 7 dnech, neboť nebylo možné je vyjmout z forem. I přes pomalý průběh karbonatace však horká malta dosáhla nejvyšších hodnot pevnosti v tahu za ohybu ze všech zkoušených malt. Po 90 dnech zrání je tento rozdíl již velmi markantní (viz graf na obr. 37). Obecně lze říci, že odležení čerstvé malty má pozitivní vliv na pevnostní charakteristiky vápenné malty, a to zejména na pevnost v tlaku. Pevnost v tahu za ohybu je u všech zkoušených vápenných malt nízká a rozdíly mezi jednotlivými druhy malt nejsou příliš výrazné. Ale i zde lze pozorovat pozitivní vliv odležení. U malty připravené z vápenného hydrátu a omítkového písku (graf na obr. 21) tomu sice tak není, ale rozdíly nejsou nijak velké a lze je přičíst nejpravděpodobněji chybě při měření. Srovnáme-li pevnostní charakteristiky vápenných malt připravených s různými druhy písku, nejvyšších hodnot pevnosti v tlaku i v tahu za ohybu dosáhla malta připravená z bratčického kopaného písku. Nejnížší a nejvíce kolísavé hodnoty pevnostních charakteristik byly zaznamenány u omítkového písku z Hulína. Ze srovnání výsledků zkoušek pevnosti v tlaku pro různé formy stavebního vápna vychází nejlépe vápenná kaše, a to jak v maltě odležené, tak neodležené. Naopak nejnižších hodnot pevnosti v tlaku dosáhla horká malta, což lze vysvětlit nižším podílem pojiva v maltě.

**Tab 15. Pevnost v tahu za ohybu  $R_f$  a pevnost v tlaku  $R_c$  neodležené malty připravené z vápenného hydrátu a omítkového písku**

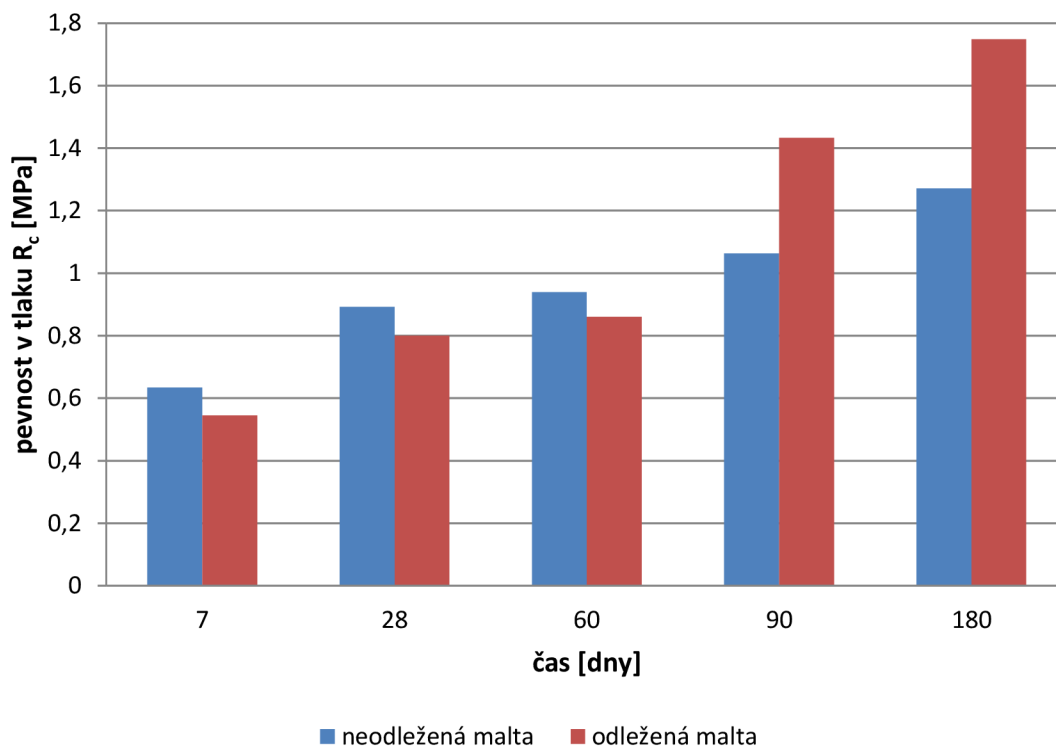
Čas [dny]	Ozn. vzorku	m [g]	$F_f$ [kN]	$R_f$ [MPa]	$R_f$ prům. [MPa]	$F_c$ [kN]		$R_c$ [MPa]		$R_c$ prům. [MPa]
7	H1	442,0	0,062	0,139	0,16	1,04	0,96	0,652	0,602	0,63
	H2	447,9	0,065	0,150		0,99	0,99	0,606	0,606	
	H3	444,9	0,063	0,148		1,05	1,08	0,661	0,680	
28	H4	416,0	0,129	0,311	0,32	1,37	1,49	0,876	0,953	0,89
	H5	414,5	0,133	0,318		1,40	1,40	0,882	0,882	
	H6	414,3	0,143	0,344		1,54	1,23	0,977	0,780	
60	H27	421,3	0,132	0,314	0,33	1,51	1,50	0,950	0,943	0,94
	H28	421,4	0,116	0,280		1,65	1,54	1,037	0,968	
	H29	421,2	0,168	0,403		1,55	1,22	0,971	0,764	
90	H16	424,4	0,164	0,379	0,37	1,80	1,82	1,113	1,126	1,06
	H17	428,3	0,145	0,337		1,50	1,82	0,924	1,121	
	H18	428,0	0,175	0,408		1,57	1,84	0,964	1,130	
180	H19	417,3	0,220	0,524	0,53	1,96	2,13	1,230	1,337	1,27
	H20	425,8	0,242	0,575		2,32	2,11	1,457	1,325	
	H21	418,2	0,203	0,498		1,63	1,93	1,043	1,235	

**Tab 16. Pevnost v tahu za ohybu  $R_f$  a pevnost v tlaku  $R_c$  odležené malty připravené z vápenného hydrátu a omítkového písku**

Čas [dny]	Ozn. vzorku	m [g]	$F_f$ [kN]	$R_f$ [MPa]	$R_f$ prům. [MPa]	$F_c$ [kN]		$R_c$ [MPa]		$R_c$ prům. [MPa]
7	HO34	473,7	0,055	0,129	0,13	0,88	0,90	0,544	0,557	0,55
	HO35	473,0	0,056	0,135		0,81	0,82	0,512	0,518	
	HO36	470,1	0,058	0,138		1,01	0,82	0,629	0,511	
28	HO31	408,8	0,087	0,213	0,23	1,27	1,32	0,806	0,838	0,80
	HO32	404,0	0,092	0,226		1,31	1,34	0,829	0,848	
	HO33	405,4	0,106	0,256		1,20	1,17	0,750	0,732	
60	HO4	415,0	0,205	0,485	0,34	1,58	1,53	0,983	0,952	0,86
	HO5	407,9	0,127	0,297		1,28	1,19	0,797	0,741	
	HO6	407,4	0,102	0,245		1,29	1,39	0,811	0,874	
90	HO27	412,6	0,153	0,361	0,36	2,38	2,69	1,459	1,649	1,43
	HO28	415,7	0,142	0,345		2,25	2,14	1,397	1,328	
	HO29	423,6	0,155	0,369		2,19	2,23	1,370	1,395	
180	HO13	420,0	0,21	0,511	0,57	2,68	2,49	1,693	1,573	1,75
	HO18	425,2	0,235	0,573		2,93	2,73	1,843	1,717	
	HO23	419,5	0,256	0,617		2,87	2,94	1,810	1,854	



Obr. 20 - Vývoj pevnosti v tahu za ohybu  $R_f$  odležené a neodležené malty připravené z vápenného hydrátu a omítkového písku



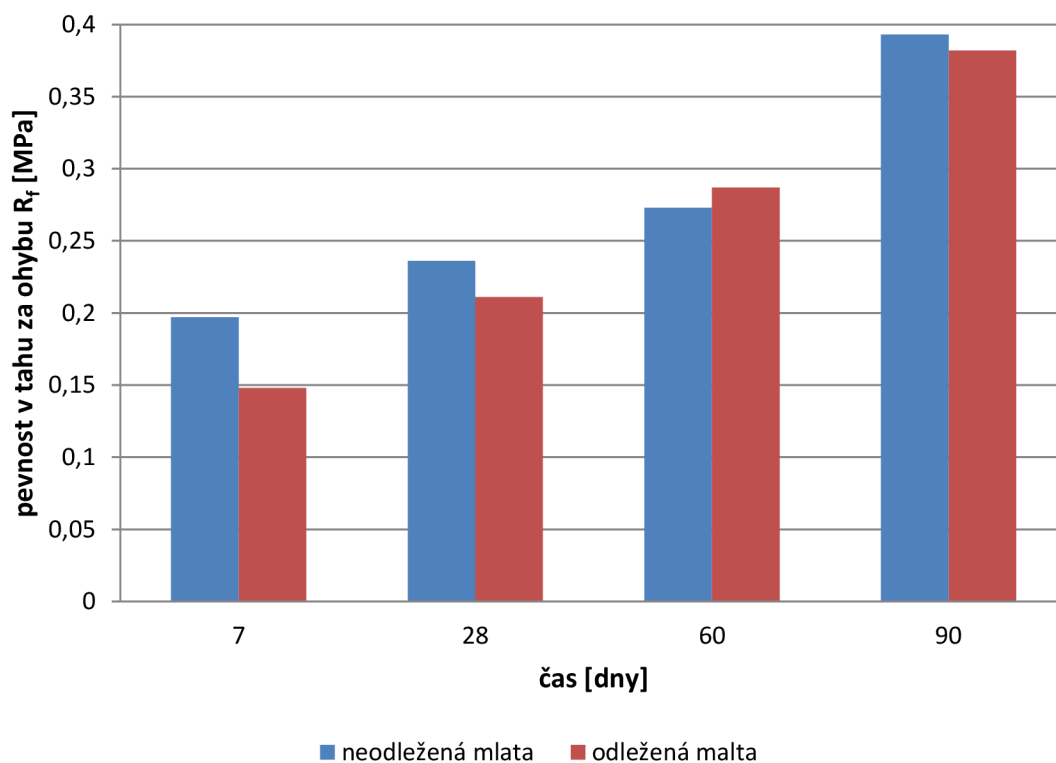
Obr. 21 - Vývoj pevnosti v tlaku  $R_c$  odležené a neodležené malty připravené z vápenného hydrátu a omítkového písku

**Tab 17. Pevnost v tahu za ohybu  $R_f$  a pevnost v tlaku  $R_c$  neodležené malty připravené z aktivovaného vápenného hydrátu a omítkového písku**

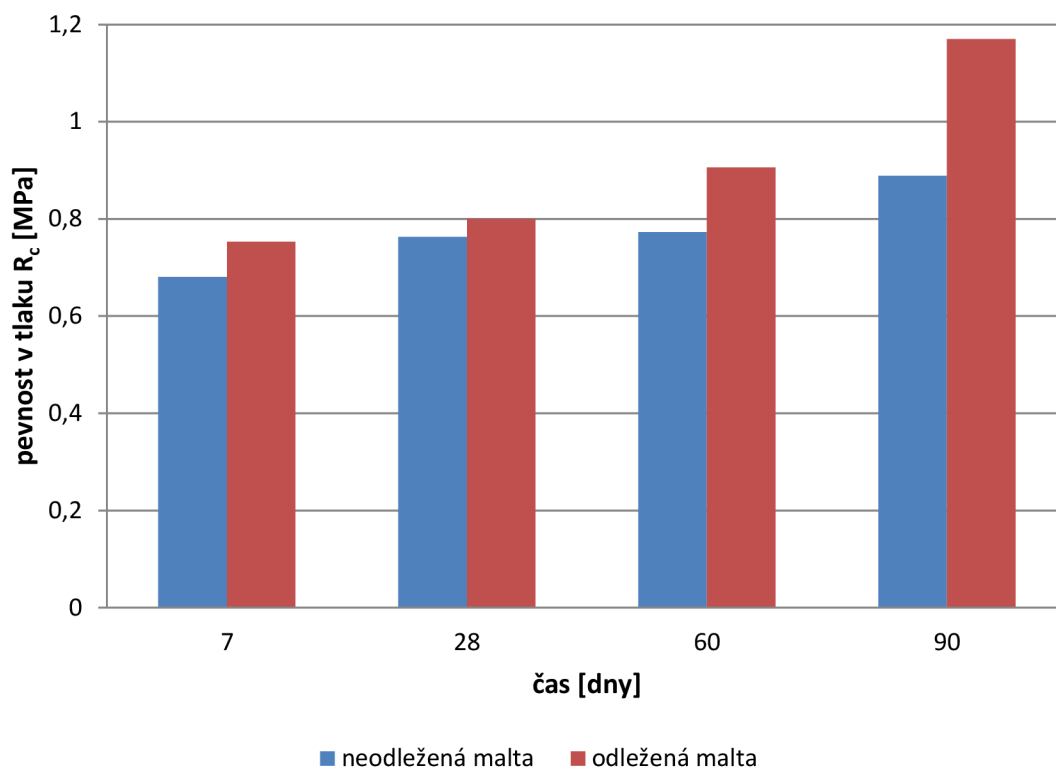
Čas [dny]	Ozn. vzorku	m [g]	$F_f$ [kN]	$R_f$ [MPa]	$R_f$ prům. [MPa]	$F_c$ [kN]		$R_c$ [MPa]		$R_c$ prům. [MPa]
7	MH16	461,5	0,092	0,219	0,20	1,15	1,12	0,717	0,698	0,68
	MH17	472,2	0,058	0,145		1,03	1,08	0,645	0,676	
	MH18	462,3	0,095	0,229		1,07	1,11	0,664	0,689	
28	MH27	408,6	0,085	0,202	0,23	1,14	1,11	0,709	0,690	0,76
	MH25	413,2	0,101	0,244		1,25	1,32	0,791	0,835	
	MH24	408,1	0,110	0,261		1,24	1,27	0,769	0,787	
60	MH19	410,2	0,108	0,259	0,27	1,29	1,15	0,808	0,720	0,77
	MH20	412,9	0,118	0,285		1,30	1,21	0,813	0,757	
	MH21	408,0	0,114	0,275		1,27	1,16	0,805	0,735	
90	MH15	413,1	0,163	0,405	0,39	1,36	1,40	0,865	0,891	0,89
	MH22	411,9	0,157	0,382		1,42	1,39	0,900	0,881	
	MH26	415,9	0,166	0,391		1,49	1,38	0,932	0,864	

**Tab 18. Pevnost v tahu za ohybu  $R_f$  a pevnost v tlaku  $R_c$  odležené malty připravené z aktivovaného vápenného hydrátu a omítkového písku**

Čas [dny]	Ozn. vzorku	m [g]	$F_f$ [kN]	$R_f$ [MPa]	$R_f$ prům. [MPa]	$F_c$ [kN]		$R_c$ [MPa]		$R_c$ prům. [MPa]
7	MHO27	454,2	0,074	0,172	0,15	1,21	1,21	0,754	0,754	0,75
	MHO26	458,0	0,058	0,137		1,20	1,21	0,747	0,753	
	MHO25	459,1	0,057	0,135		1,16	1,28	0,718	0,792	
28	MHO29	419,2	0,077	0,183	0,21	1,28	1,27	0,799	0,792	0,80
	MHO32	418,0	0,114	0,271		1,28	1,24	0,799	0,774	
	MHO33	422,0	0,075	0,181		1,28	1,31	0,808	0,827	
60	MHO6	413,2	0,119	0,284	0,29	1,43	1,40	0,897	0,878	0,91
	MHO7	411,8	0,113	0,270		1,39	1,46	0,871	0,915	
	MHO8	409,5	0,127	0,306		1,51	1,47	0,950	0,925	
90	MHO28	413,7	0,156	0,373	0,38	1,89	1,93	1,195	1,220	1,17
	MHO21	414,8	0,171	0,404		1,93	1,87	1,215	1,177	
	MHO22	417,9	0,154	0,369		1,76	1,75	1,110	1,104	



Obr. 22 - Vývoj pevnosti v tahu za ohybu  $R_f$  odležené a neodležené malty připravené z aktivovaného vápenného hydrátu a omítkového písku



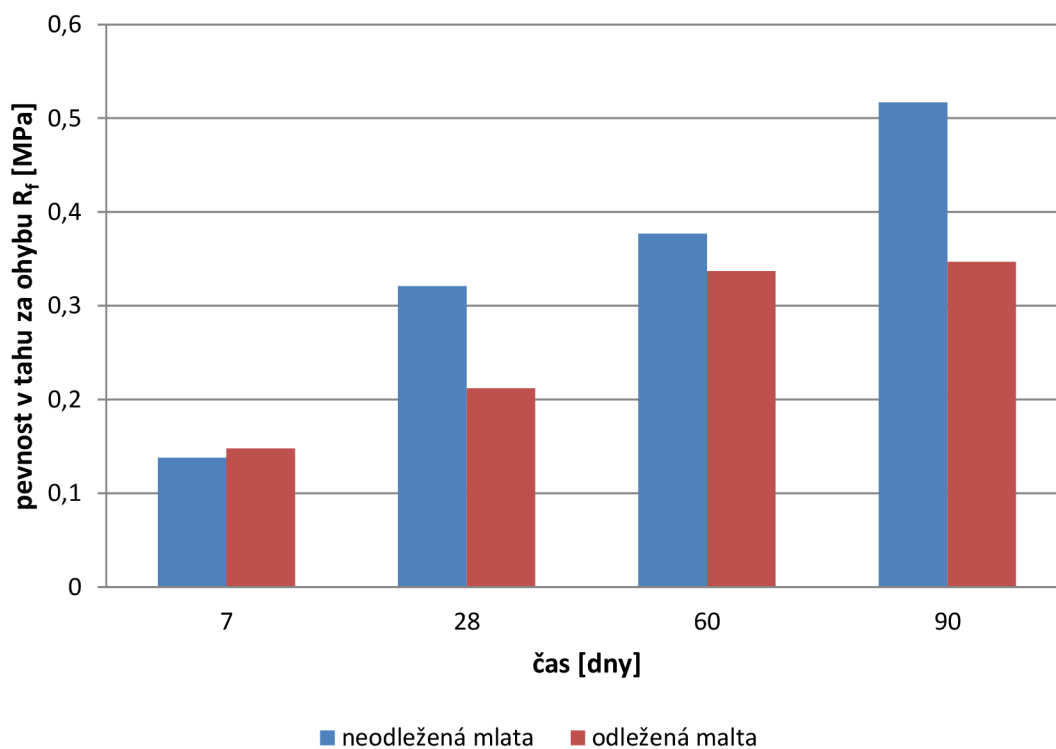
Obr. 23 - Vývoj pevnosti v tlaku  $R_c$  odležené a neodležené malty připravené z aktivovaného vápenného hydrátu a omítkového písku

**Tab 19. Pevnost v tahu za ohybu  $R_f$  a pevnost v tlaku  $R_c$  neodležené malty připravené z vápenné kaše a omítkového písku**

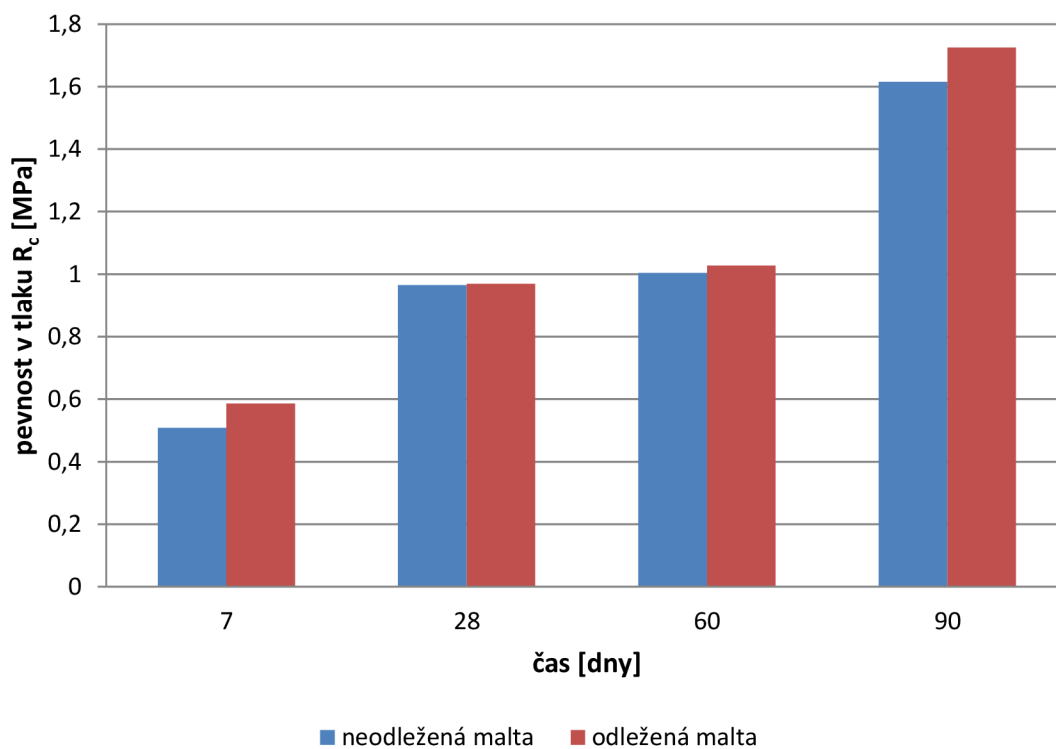
Čas [dny]	Ozn. vzorku	m [g]	$F_f$ [kN]	$R_f$ [MPa]	$R_f$ prům. [MPa]	$F_c$ [kN]		$R_c$ [MPa]		$R_c$ prům. [MPa]
7	VK30	464,0	0,055	0,131	0,14	0,79	0,80	0,490	0,497	0,51
	VK29	470,5	0,057	0,133		0,80	0,80	0,500	0,500	
	VK28	468,2	0,063	0,151		0,85	0,84	0,534	0,527	
28	VK19	440,1	0,135	0,322	0,32	1,59	1,45	0,995	0,907	0,97
	VK20	438,8	0,125	0,296		1,49	1,58	0,930	0,986	
	VK26	447,4	0,143	0,345		1,51	1,65	0,943	1,031	
60	VK13	416,1	0,164	0,394	0,38	1,64	1,58	1,045	1,007	1,00
	VK15	409,6	0,152	0,364		1,52	1,58	0,972	1,011	
	VK18	413,5	0,155	0,374		1,56	1,57	0,990	0,996	
90	VK7	414,1	0,210	0,518	0,52	2,53	2,51	1,582	1,570	1,62
	VK8	412,0	0,176	0,441		2,74	2,60	1,710	1,623	
	VK9	418,2	0,239	0,593		2,58	2,56	1,609	1,597	

**Tab 20. Pevnost v tahu za ohybu  $R_f$  a pevnost v tlaku  $R_c$  odležené malty připravené z vápenné kaše a omítkového písku**

Čas [dny]	Ozn. vzorku	m [g]	$F_f$ [kN]	$R_f$ [MPa]	$R_f$ prům. [MPa]	$F_c$ [kN]		$R_c$ [MPa]		$R_c$ prům. [MPa]
7	VKO22	452,6	0,061	0,147	0,15	0,85	1,03	0,532	0,644	0,59
	VKO23	452,5	0,058	0,138		0,92	0,97	0,574	0,605	
	VKO24	452,2	0,065	0,158		0,92	0,93	0,578	0,584	
28	VKO19	440,7	0,091	0,223	0,21	1,56	1,49	0,990	0,945	0,97
	VKO20	438,8	0,087	0,208		1,49	1,57	0,937	0,987	
	VKO21	442,9	0,087	0,205		1,53	1,59	0,957	0,995	
60	VKO4	411,6	0,129	0,316	0,34	1,63	1,57	1,028	0,991	1,03
	VKO5	409,9	0,146	0,351		1,57	1,69	0,997	1,073	
	VKO6	415,2	0,139	0,344		1,67	1,61	1,056	1,018	
90	VKO11	413,8	0,143	0,344	0,35	2,6	2,63	1,653	1,672	1,73
	VKO12	416,8	0,143	0,337		2,86	2,79	1,794	1,750	
	VKO14	412,0	0,149	0,362		2,81	2,67	1,784	1,695	



Obr. 24 - Vývoj pevnosti v tahu za ohybu  $R_f$  odležené a neodležené malty připravené z vápenné kaše a omítkového písku

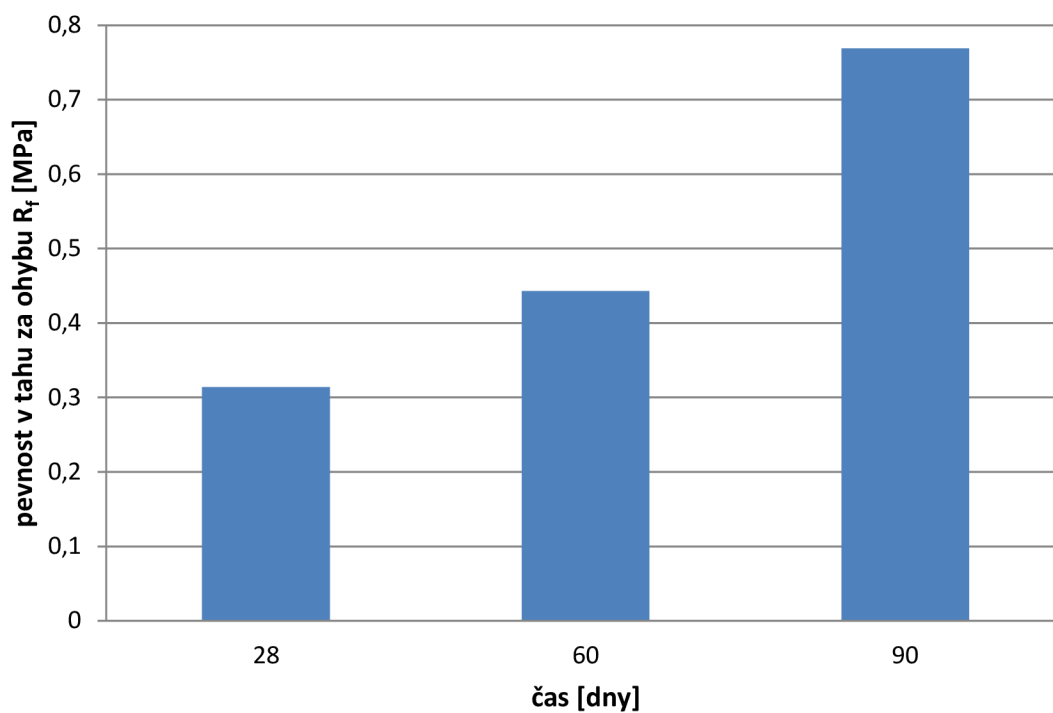


Obr. 25 - Vývoj pevnosti v tlaku  $R_c$  odležené a neodležené malty připravené z vápenné kaše a omítkového písku

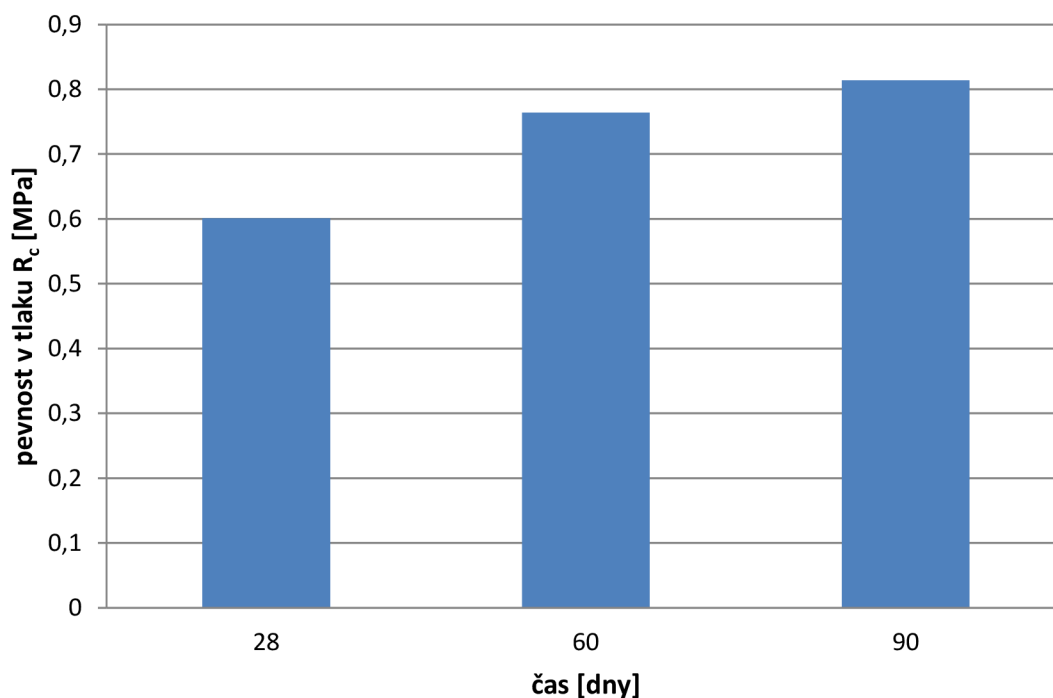


**Tab 21. Pevnost v tahu za ohybu  $R_f$  a pevnost v tlaku  $R_c$  horké malty připravené z kusového vápna a omítkového písku**

Čas [dny]	Ozn. vzorku	m [g]	$F_f$ [kN]	$R_f$ [MPa]	$R_f$ prům. [MPa]	$F_c$ [kN]		$R_c$ [MPa]		$R_c$ prům. [MPa]
28	HM20	441,6	0,129	0,302	0,31	0,88	0,94	0,550	0,587	0,60
	HM18	437,0	0,156	0,372		0,93	0,88	0,583	0,552	
	HM21	448,0	0,114	0,267		1,06	1,09	0,658	0,676	
60	HM4	415,8	0,134	0,321	0,44	1,31	1,21	0,819	0,756	0,76
	HM24	406,7	0,230	0,548		1,16	1,16	0,732	0,732	
	HM27	404,9	0,193	0,462		1,20	1,27	0,752	0,796	
90	HM5	414,2	0,395	0,971	0,77	1,28	1,25	0,816	0,797	0,81
	HM17	402,0	0,273	0,651		1,24	1,32	0,787	0,838	
	HM26	405,5	0,284	0,686		1,37	1,22	0,870	0,775	



*Obr. 26 - Vývoj pevnosti v tahu za ohybu  $R_f$  horké malty připravené z kusového vápna a omítkového písku*



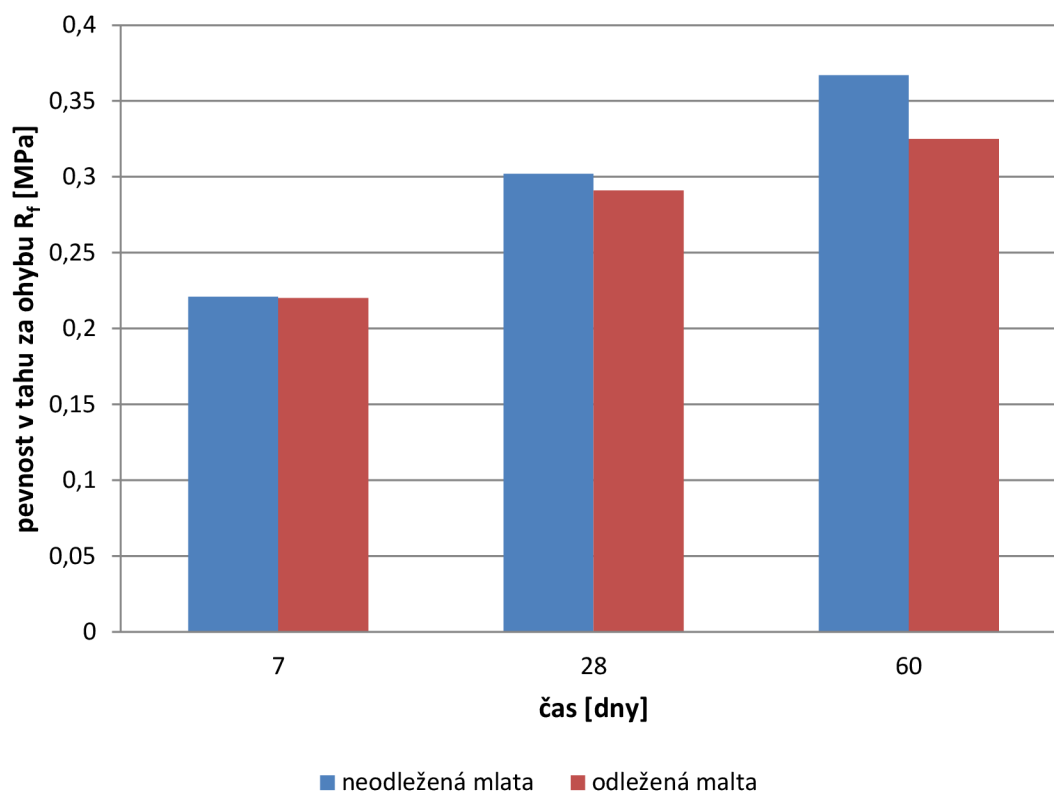
Obr. 27 - Vývoj pevnosti v tlaku  $R_c$  horké malty připravené z kusového vápna a omítkového písku

Tab 22. Pevnost v tahu za ohybu  $R_f$  a pevnost v tlaku  $R_c$  neodležené malty připravené z vápenného hydrátu a normového písku

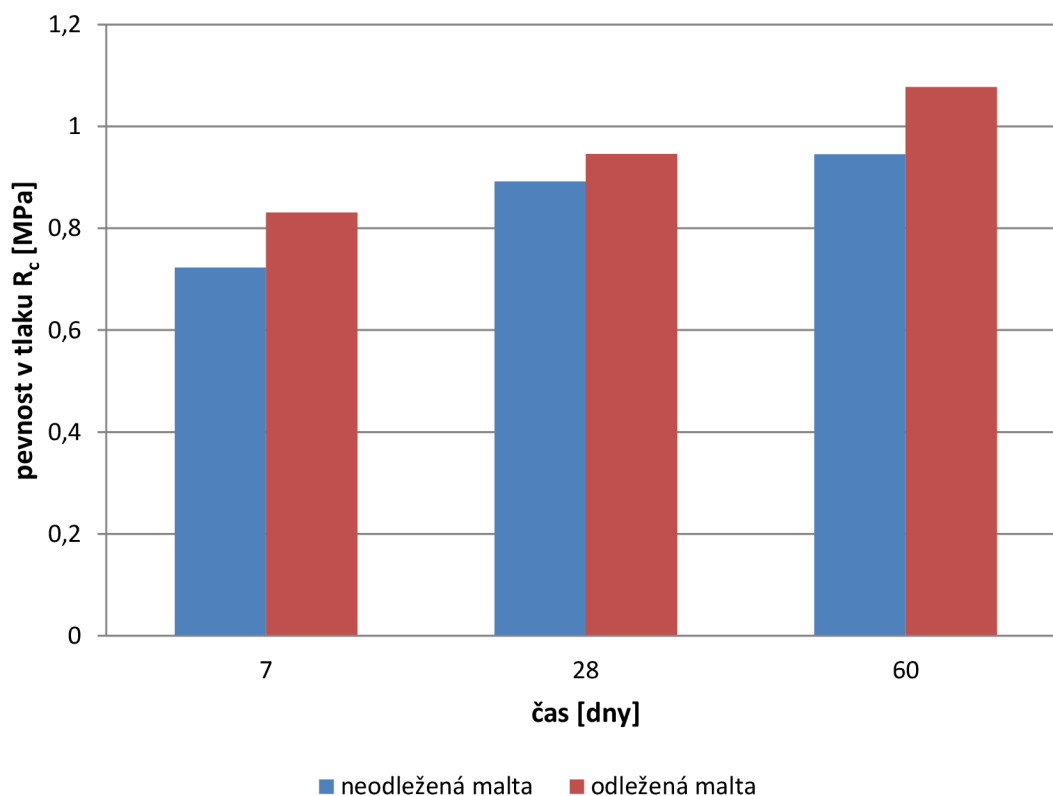
Čas [dny]	Ozn. vzorku	m [g]	$F_f$ [kN]	$R_f$ [MPa]	$R_f$ prům. [MPa]	$F_c$ [kN]	$R_c$ [MPa]	$R_c$ prům. [MPa]		
7	HN1	481,4	0,096	0,223	0,22	1,11	1,14	0,688	0,707	0,72
	HN2	479,6	0,094	0,221		1,13	1,14	0,705	0,712	
	HN3	476,9	0,096	0,220		1,24	1,23	0,767	0,761	
28	HN4	474,7	0,133	0,313	0,30	1,44	1,45	0,898	0,905	0,89
	HN5	469,1	0,122	0,290		1,47	1,43	0,920	0,895	
	HN6	475,6	0,129	0,301		1,38	1,40	0,859	0,872	
60	HN7	429,2	0,152	0,357	0,37	1,49	1,53	0,931	0,956	0,95
	HN8	436,1	0,162	0,384		1,52	1,49	0,948	0,930	
	HN9	433,2	0,153	0,359		1,55	1,51	0,967	0,942	

**Tab 23. Pevnost v tahu za ohybu  $R_f$  a pevnost v tlaku  $R_c$  odležené malty připravené z vápenného hydrátu a normového písku**

Čas [dny]	Ozn. vzorku	m [g]	$F_f$ [kN]	$R_f$ [MPa]	$R_f$ prům. [MPa]	$F_c$ [kN]		$R_c$ [MPa]		$R_c$ prům. [MPa]
7	HNO1	472,6	0,095	0,229	0,22	1,35	1,35	0,852	0,852	0,83
	HNO2	474,7	0,089	0,209		1,33	1,28	0,831	0,800	
	HNO3	468,5	0,094	0,222		1,31	1,30	0,829	0,822	
28	HNO4	434,6	0,112	0,273	0,29	1,47	1,54	0,924	0,968	0,95
	HNO5	436,9	0,127	0,305		1,47	1,57	0,914	0,976	
	HNO6	434,3	0,119	0,294		1,52	1,47	0,963	0,932	
60	HNO7	432,8	0,132	0,322	0,33	1,68	1,73	1,065	1,097	1,08
	HNO8	433,5	0,143	0,346		1,66	1,70	1,047	1,073	
	HNO9	437,9	0,129	0,306		1,78	1,69	1,117	1,061	



*Obr. 28 - Vývoj pevnosti v tahu za ohybu  $R_f$  odležené a neodležené malty připravené z vápenného hydrátu a normového písku*



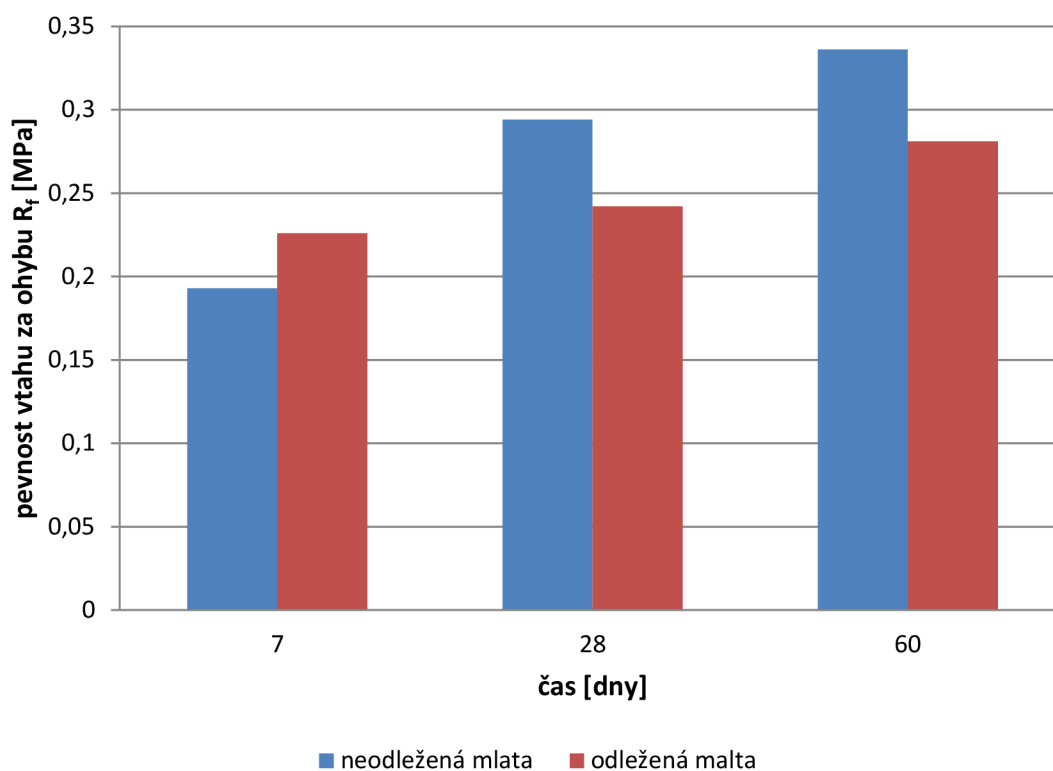
Obr. 29 - Vývoj pevnosti v tlaku  $R_c$  odležené a neodležené malty připravené z vápenného hydrátu a normového písku

Tab 24. Pevnost v tahu za ohybu  $R_f$  a pevnost v tlaku  $R_c$  neodležené malty připravené z aktivovaného vápenného hydrátu a normového písku

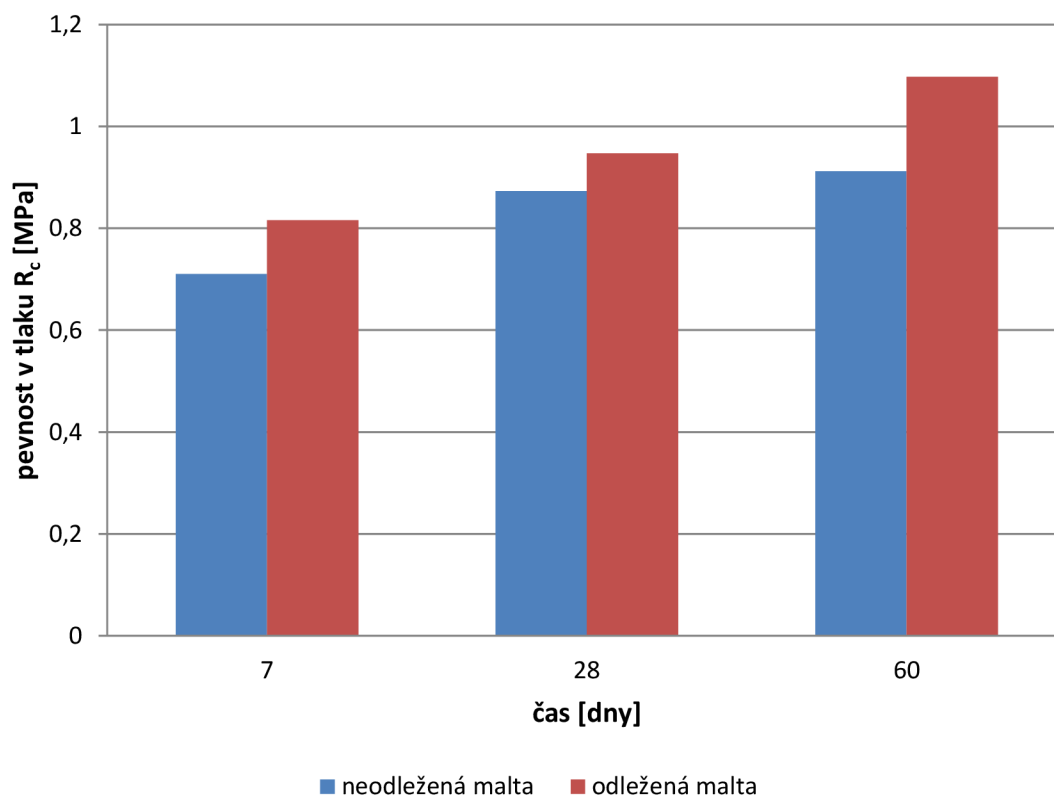
Čas [dny]	Ozn. vzorku	m [g]	$F_f$ [kN]	$R_f$ [MPa]	$R_f$ prům. [MPa]	$F_c$ [kN]	$R_c$ [MPa]	$R_c$ prům. [MPa]		
7	MN1	471,8	0,091	0,218	0,19	1,21	1,17	0,758	0,71	
	MN2	482,1	0,074	0,174		1,09	1,13	0,680		0,705
	MN3	480,5	0,079	0,187		1,15	1,07	0,716		0,666
28	MN4	430,6	0,128	0,308	0,29	1,41	1,44	0,882	0,87	
	MN5	428,2	0,115	0,271		1,39	1,38	0,869		0,863
	MN6	428,1	0,125	0,303		1,37	1,37	0,862		0,862
60	MN7	429,0	0,142	0,350	0,34	1,43	1,42	0,899	0,91	
	MN8	427,8	0,131	0,328		1,47	1,47	0,922		0,922
	MN9	431,4	0,132	0,330		1,53	1,40	0,959		0,878

**Tab 25. Pevnost v tahu za ohybu  $R_f$  a pevnost v tlaku  $R_c$  odležené malty připravené z aktivovaného vápenného hydrátu a normového písku**

	Ozn.	m [g]	$F_f$ [kN]	$R_f$ [MPa]	$R_f$ prům. [MPa]	$F_c$ [kN]		$R_c$ [MPa]		$R_c$ prům. [MPa]
7	MNO1	467,6	0,091	0,227	0,23	1,26	1,28	0,807	0,820	0,82
	MNO2	470,1	0,093	0,231		1,34	1,30	0,850	0,824	
	MNO3	468,1	0,089	0,221		1,23	1,29	0,778	0,816	
28	MNO4	444,5	0,097	0,242	0,24	1,49	1,47	0,932	0,919	0,95
	MNO5	450,1	0,098	0,237		1,44	1,49	0,927	0,959	
	MNO6	444,2	0,098	0,245		1,50	1,49	0,975	0,968	
60	MNO7	408,6	0,109	0,273	0,28	1,66	1,73	1,057	1,101	1,10
	MNO8	420,6	0,117	0,285		1,65	1,77	1,050	1,126	
	MNO9	418,5	0,114	0,283		1,75	1,80	1,108	1,140	



*Obr. 30 - Vývoj pevnosti v tahu za ohybu  $R_f$  odležené a neodležené malty připravené z aktivovaného vápenného hydrátu a normového písku*



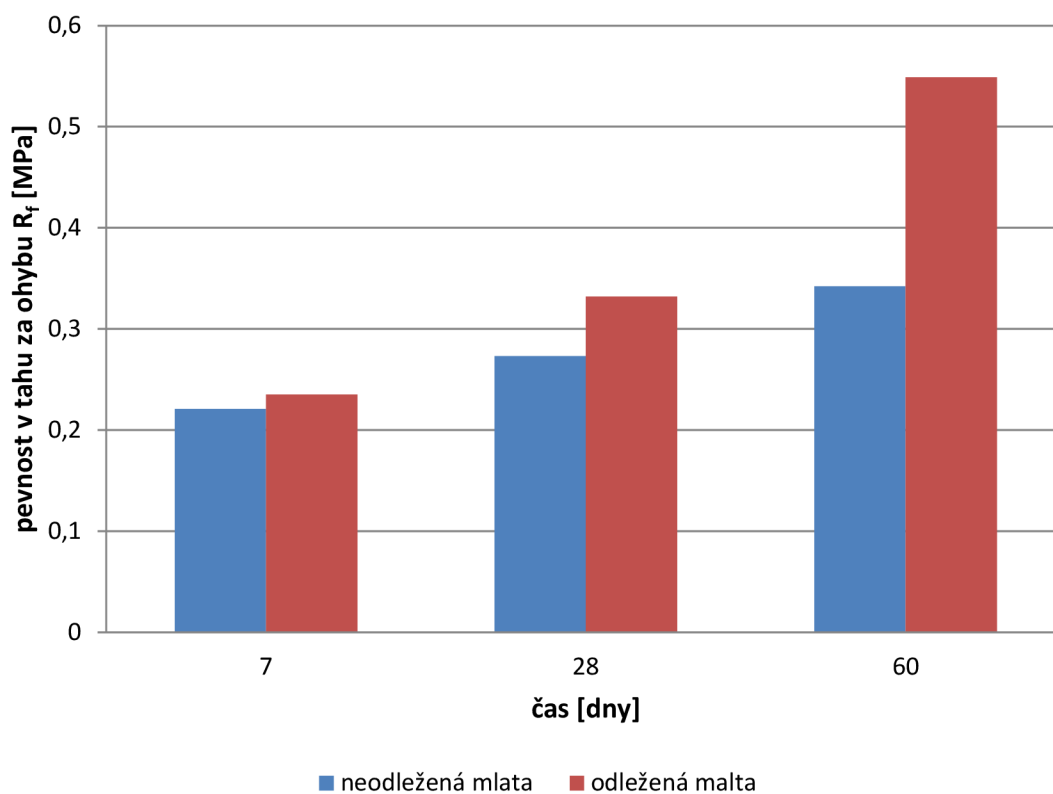
Obr. 31 - Vývoj pevnosti v tlaku  $R_c$  odležené a neodležené malty připravené z aktivovaného vápenného hydrátu a normového písku

Tab 26. Pevnost v tahu za ohybu  $R_f$  a pevnost v tlaku  $R_c$  neodležené malty připravené z vápenné kaše a normového písku

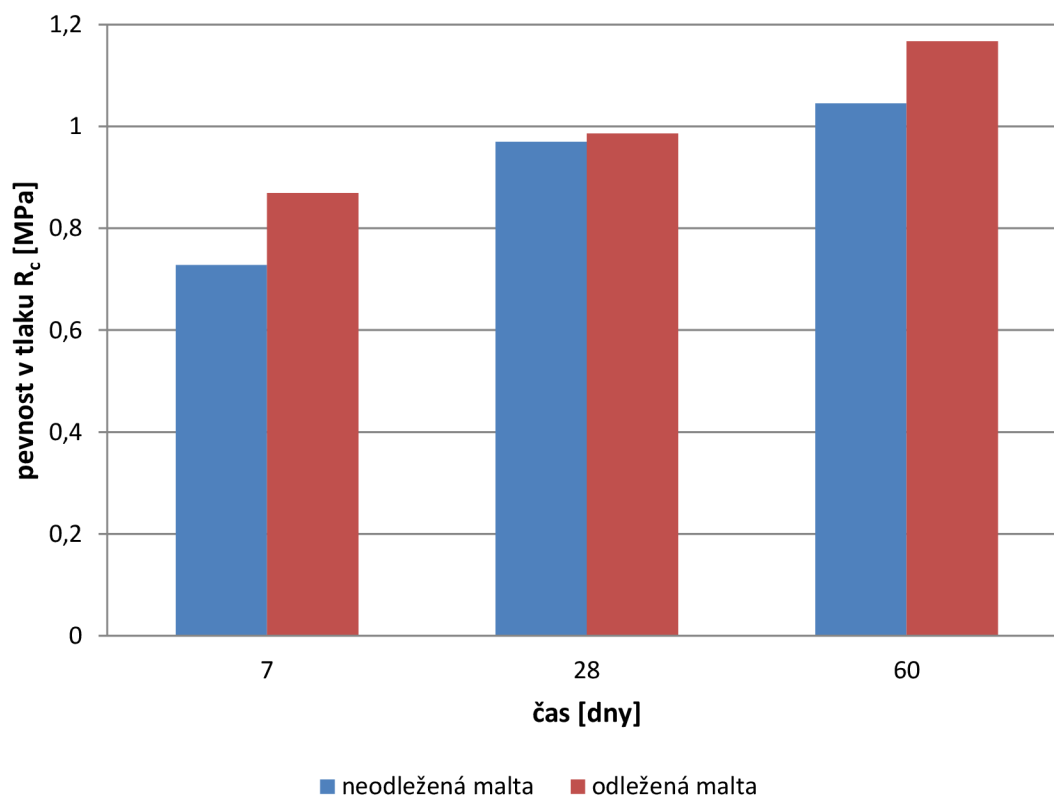
Čas [dny]	Ozn. vzorku	m [g]	$F_f$ [kN]	$R_f$ [MPa]	$R_f$ prům. [MPa]	$F_c$ [kN]	$R_c$ [MPa]	$R_c$ prům. [MPa]		
7	KN1	470,3	0,087	0,208	0,22	1,09	1,15	0,682	0,73	
	KN2	466,2	0,096	0,232		1,20	1,22	0,752		0,764
	KN3	463,4	0,093	0,224		1,16	1,15	0,730		0,724
28	KN4	455,8	0,109	0,264	0,27	1,42	1,46	0,977	0,97	
	KN5	454,4	0,111	0,270		1,47	1,43	0,962		0,976
	KN6	449,9	0,116	0,284		1,45	1,41	0,958		0,978
60	KN7	448,2	0,139	0,333	0,34	1,64	1,69	1,037	1,05	
	KN8	450,7	0,144	0,344		1,65	1,73	1,040		1,091
	KN9	444,1	0,141	0,348		1,59	1,62	1,006		1,025

**Tab 27. Pevnost v tahu za ohybu  $R_f$  a pevnost v tlaku  $R_c$  odležené malty připravené z vápenné kaše a normového písku**

Čas [dny]	Ozn. vzorku	m [g]	$F_f$ [kN]	$R_f$ [MPa]	$R_f$ prům. [MPa]	$F_c$ [kN]		$R_c$ [MPa]		$R_c$ prům. [MPa]
7	KNO1	464,9	0,102	0,244	0,24	1,44	1,38	0,898	0,861	0,87
	KNO2	468,5	0,095	0,227		1,39	1,34	0,872	0,841	
	KNO3	466,8	0,098	0,235		1,39	1,38	0,873	0,867	
28	KNO4	434,0	0,147	0,361	0,33	1,56	1,58	0,982	0,995	0,99
	KNO5	440,5	0,127	0,302		1,57	1,51	0,981	0,943	
	KNO6	437,9	0,138	0,332		1,67	1,54	1,047	0,966	
60	KNO7	419,2	0,227	0,566	0,55	1,82	1,73	1,158	1,101	1,17
	KNO8	412,6	0,208	0,520		1,87	1,94	1,196	1,240	
	KNO9	427,0	0,225	0,560		1,85	1,77	1,178	1,127	



*Obr. 32 - Vývoj pevnosti v tahu za ohybu  $R_f$  odležené a neodležené malty připravené z vápenné kaše a normového písku*

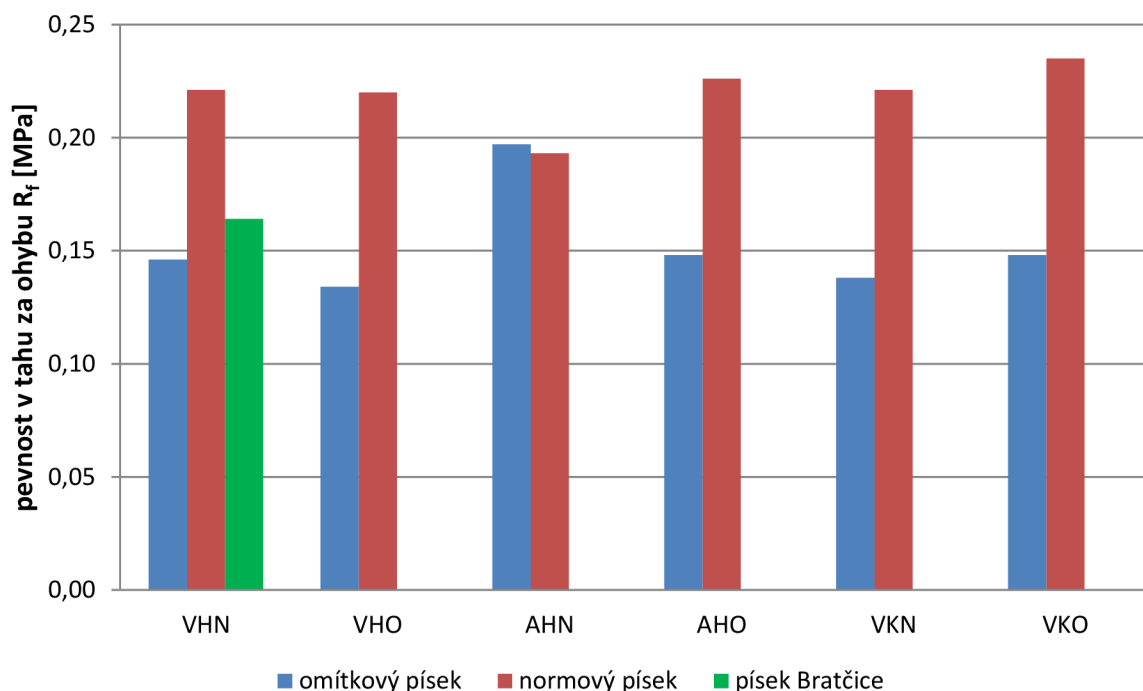


Obr. 33 - Vývoj pevnosti v tlaku  $R_c$  odležené a neodležené malty připravené z vápenné kaše a normového písku

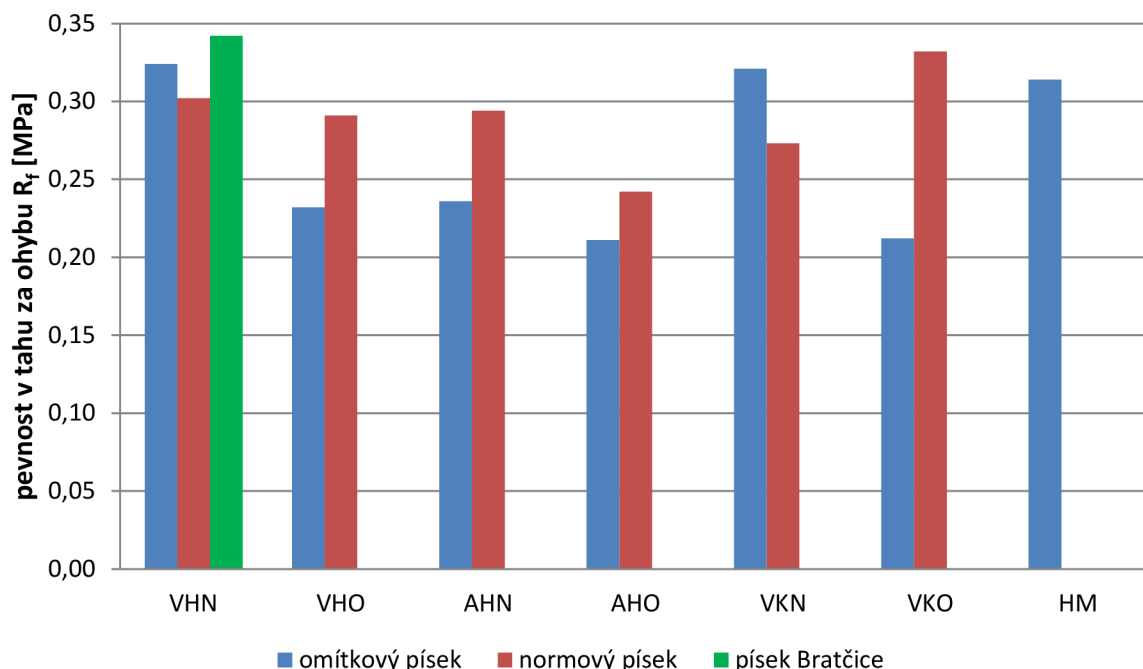
Tab 28. Pevnost v tahu za ohybu  $R_f$  a pevnost v tlaku  $R_c$  neodležené malty připravené z vápenného hydrátu a písku Bratčice

Čas [dny]	Ozn. vzorku	m [g]	Ff [kN]	Rf [MPa]	Rf prům. [MPa]	Fc [kN]		Rc [MPa]		Rc prům. [MPa]
7	HB1	470,4	0,071	0,165	0,16	1,42	1,40	0,885	0,872	0,84
	HB2	468,9	0,072	0,170		1,26	1,37	0,786	0,855	
	HB3	472,9	0,068	0,158		1,29	1,32	0,797	0,816	
28	HB4	445,7	0,157	0,381	0,34	1,56	1,58	0,987	1,000	1,06
	HB5	445,8	0,127	0,300		1,84	1,73	1,149	1,081	
	HB6	445,2	0,146	0,344		1,69	1,70	1,054	1,060	

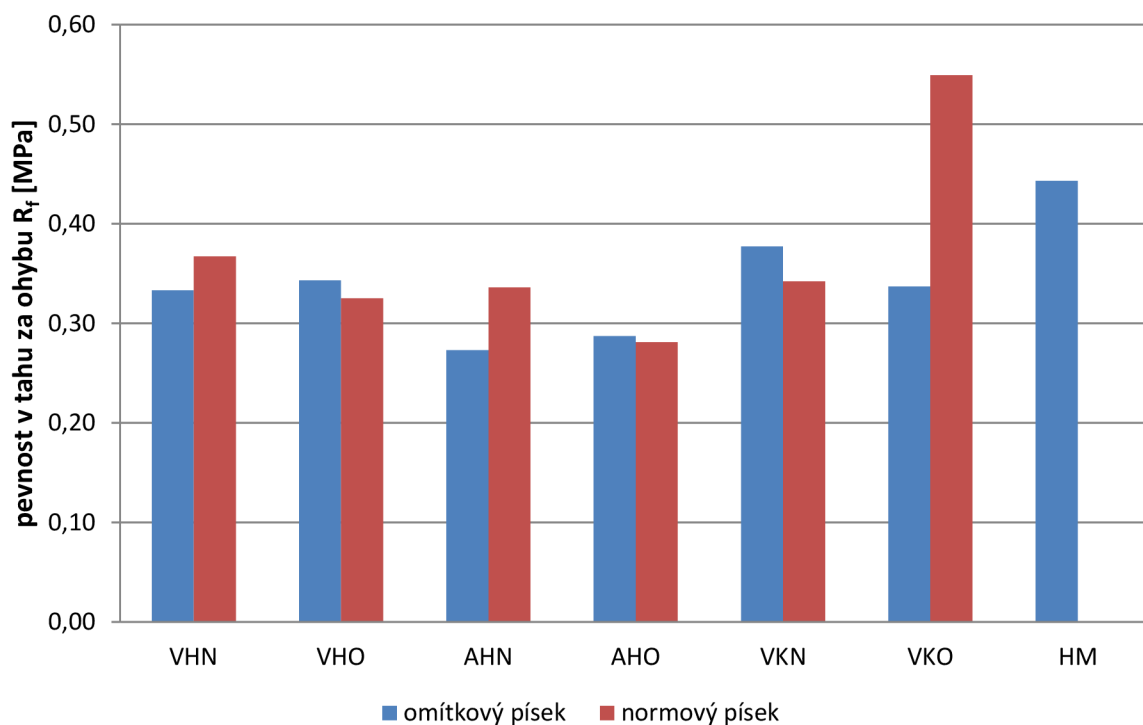




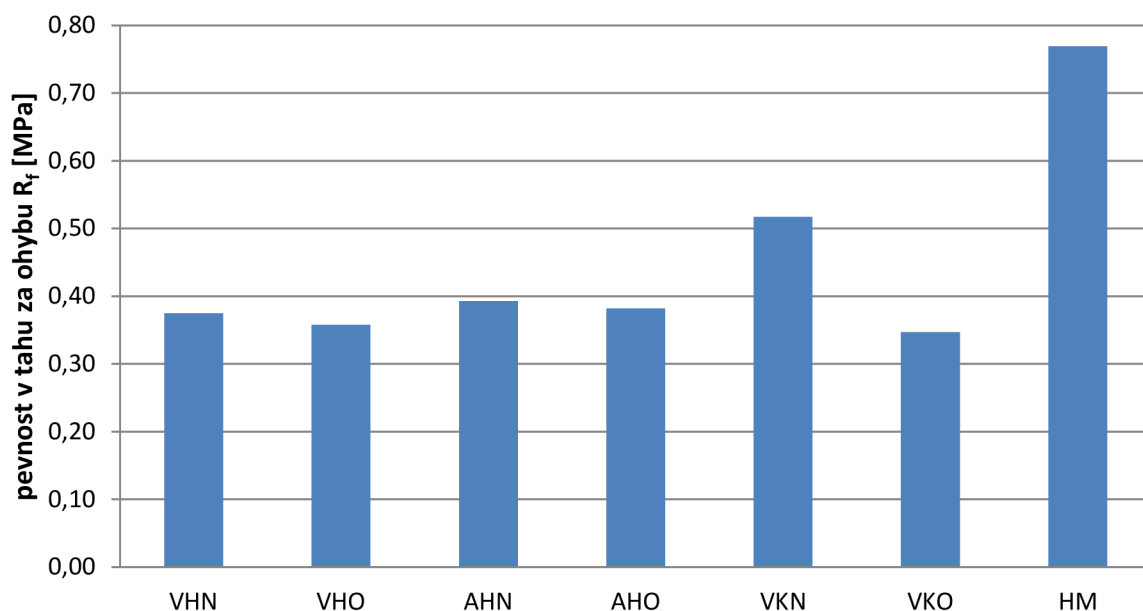
Obr. 34 - Srovnání pevnosti v tahu za ohybu  $R_f$  po 7 dnech zrání pro různé druhy vápenné malty (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše)



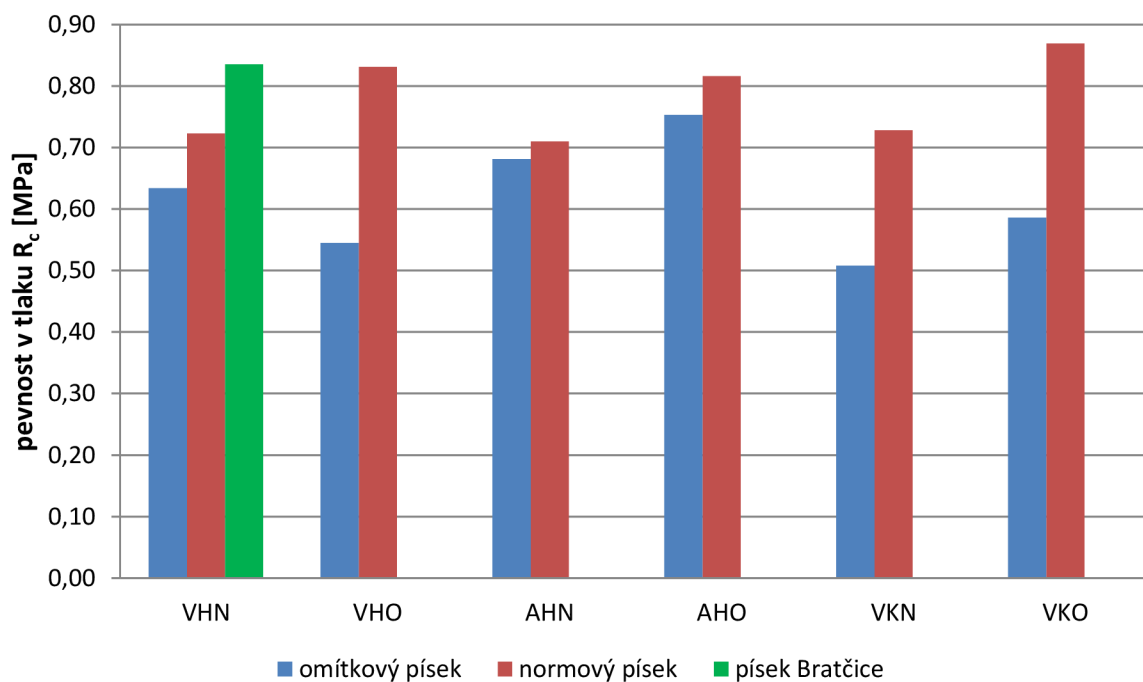
Obr. 35 - Srovnání pevnosti v tahu za ohybu  $R_f$  po 28 dnech zrání pro různé druhy vápenné malty (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM - horká malta)



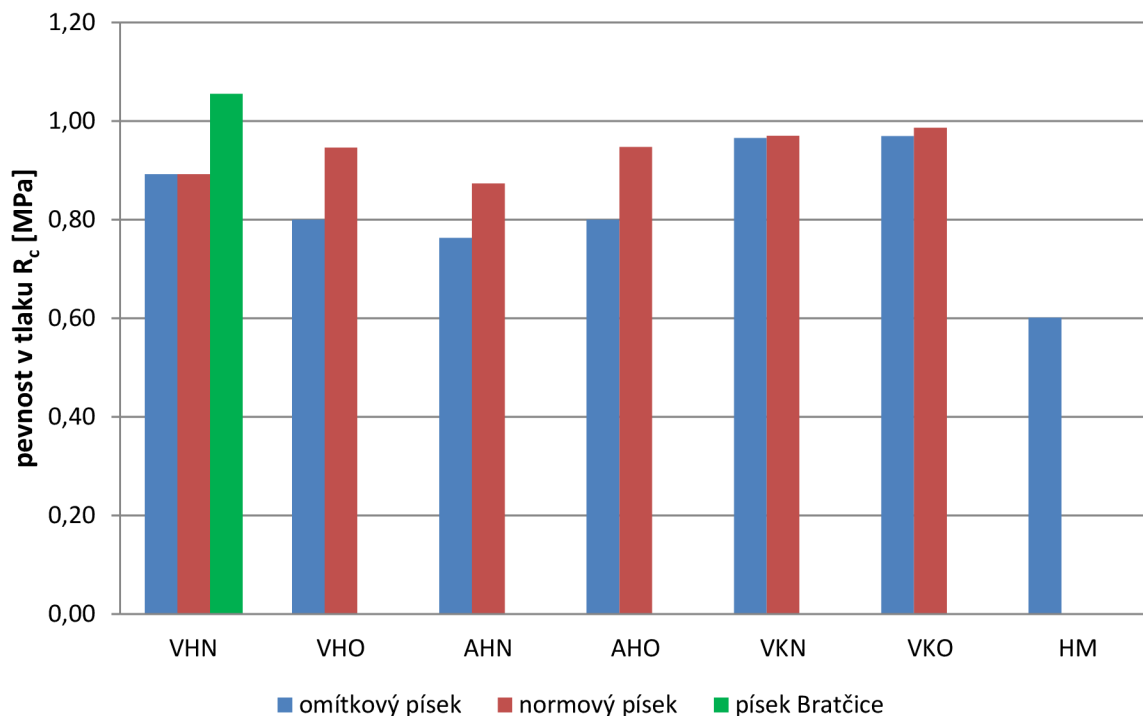
Obr. 36 - Srovnání pevnosti v tahu za ohybu  $R_f$  po 60 dnech zrání pro různé druhy vápenné malty (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM - horká malta)



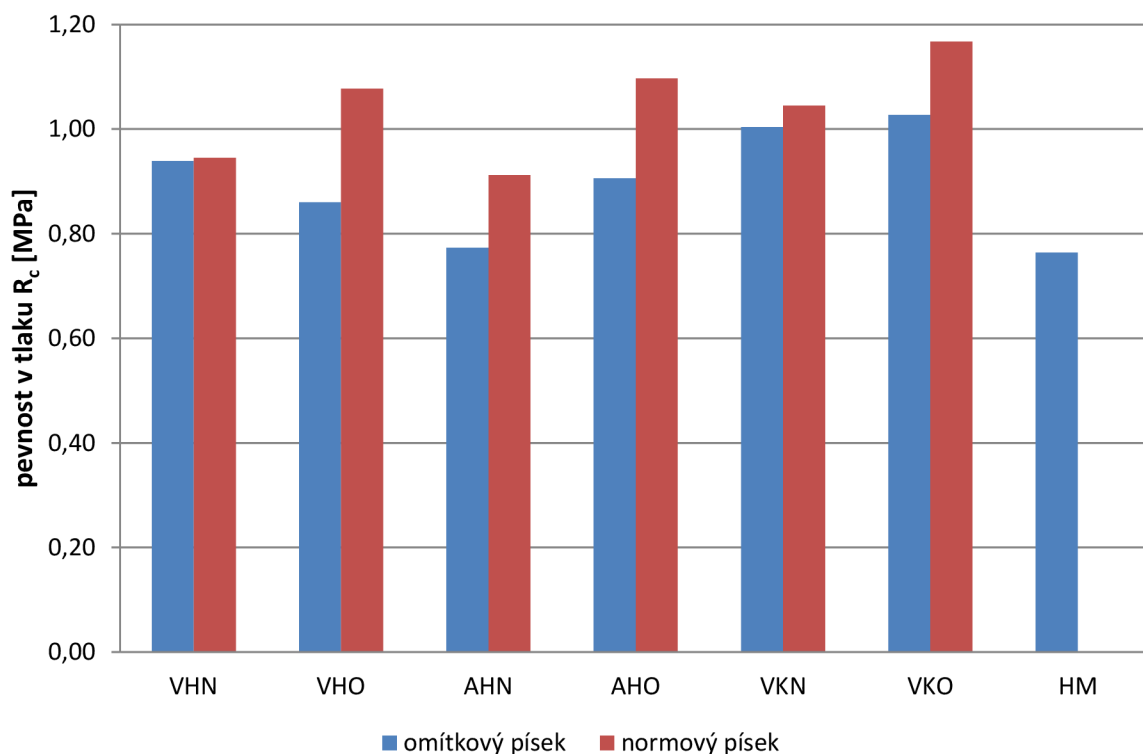
Obr. 37 - Srovnání pevnosti v tahu za ohybu  $R_f$  po 90 dnech zrání pro různé druhy vápenné malty (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM - horká malta)



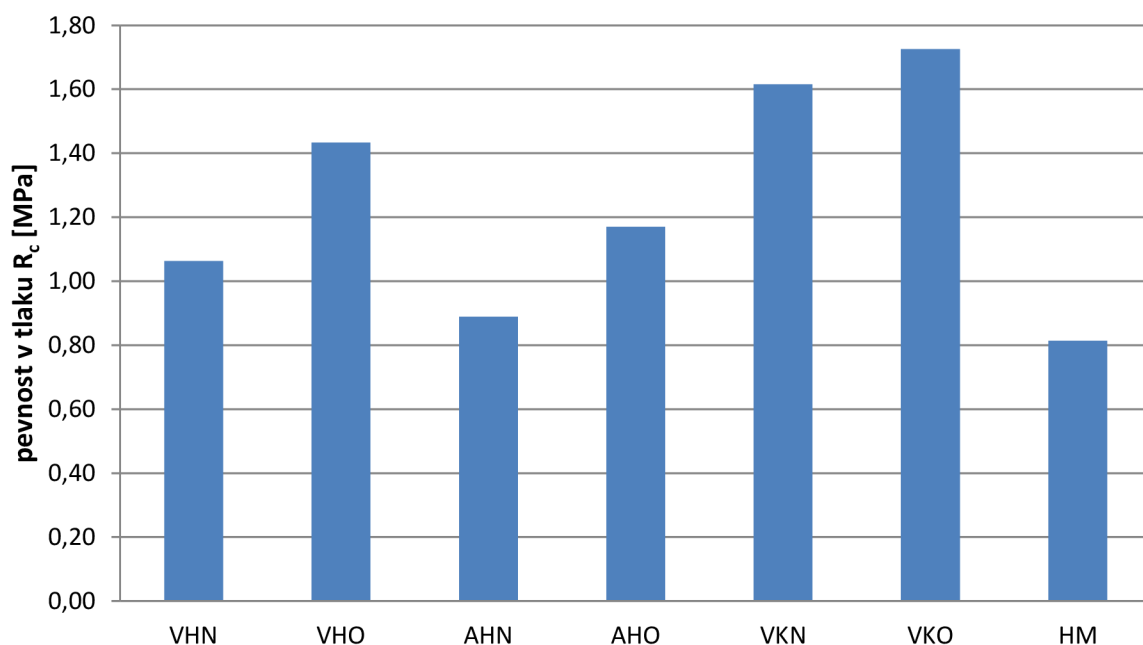
Obr. 38 - Srovnání pevnosti v tlaku  $R_c$  po 7 dnech zrání pro různé druhy vápenné malty (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše)



Obr. 39 - Srovnání pevnosti v tlaku  $R_c$  po 28 dnech zrání pro různé druhy vápenné malty (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM - horká malta)



Obr. 40 - Srovnání pevnosti v tlaku  $R_c$  po 60 dnech zrání pro různé druhy vápenné malty (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM - horká malta)



Obr. 41 - Srovnání pevnosti v tlaku  $R_c$  po 90 dnech zrání pro různé druhy vápenné malty (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM - horká malta)

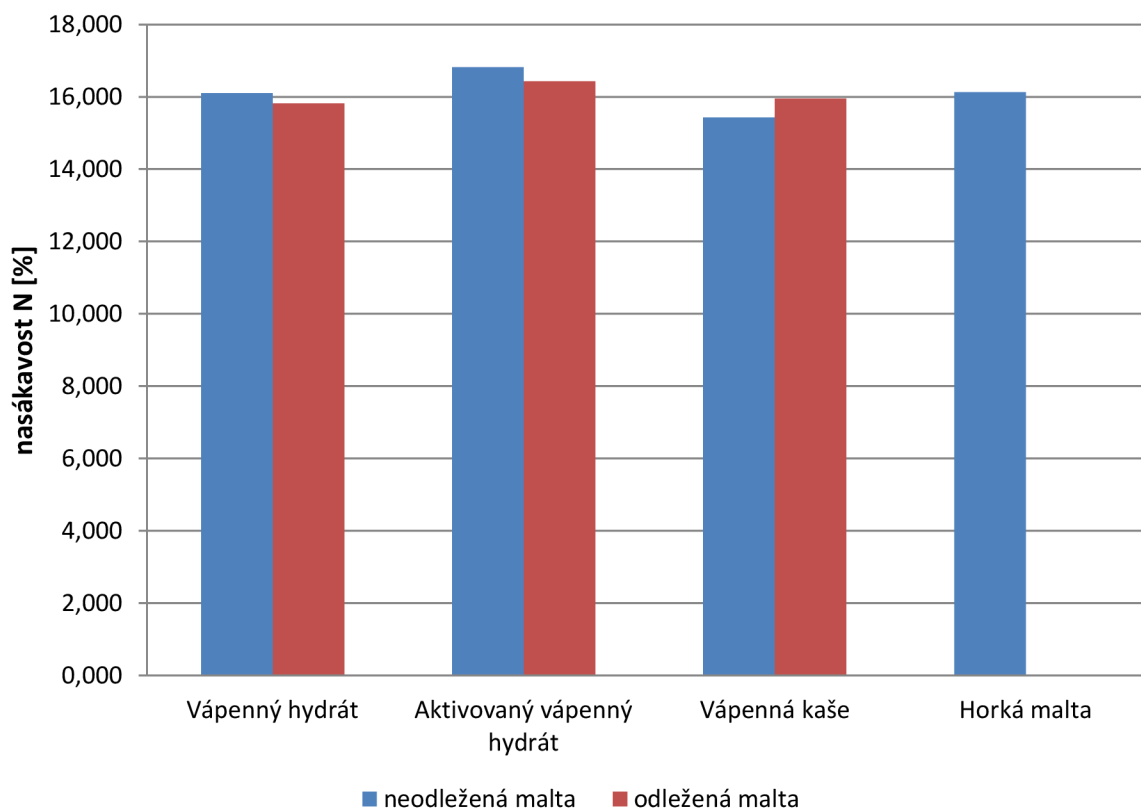
## 9.2.2 Nasákavost

Nasákavost N [%] byla stanovována po 28 dnech zrání na sadě 3 zkušebních těles a vypočtena podle vztahu (12). Výsledky zkoušky nasákavosti jsou uvedeny v tab. 29 a jejich grafické srovnání pro různé druhy vápenné malty představuje graf na obr. 42.

Pro všechny druhy zkoušené vápenné malty se hodnota nasákavosti pohybovala okolo 15 až 17 %, žádné výkyvy nebyly zaznamenány. Lze tedy konstatovat, že forma stavebního vápna ani odležení čerstvé malty nemá výrazný vliv na nasákavost vápenné malty.

**Tab 29. Stanovení nasákavosti zkoušených druhů vápenné malty**

Pojivo	Malta	Ozn. vzorku	$m_m$ [g]	$m_s$ [g]	N [%]	N prům. [%]
Vápenný hydrát	Neodležená	H22	477,3	411,2	16,075	16,10
		H23	480,5	414,2	16,007	
		H24	496,5	427,2	16,222	
	Odležená	HO3	474,1	410,3	15,550	15,82
		HO2	464,9	401,2	15,877	
		HO1	465,7	401,4	16,019	
Aktivovaný vápenný hydrát	Neodležená	MH13	479,1	406,4	17,889	16,82
		MH14	472,0	407,7	15,771	
		MH23	475,0	406,7	16,794	
	Odležená	MHO23	468,9	400,5	17,079	16,43
		MHO30	467,0	401,7	16,256	
		MHO31	464,2	400,3	15,963	
Vápenná kaše	Neodležená	VK21	463,7	400,5	15,780	15,43
		VK31	472,3	410,3	15,111	
		VK32	469,2	406,6	15,396	
	Odležená	VKO28	460,4	393,8	16,912	15,95
		VKO29	456,3	398,6	14,476	
		VKO30	457,1	392,5	16,459	
Horká malta	Neodležená	HM28	463,7	399,6	16,041	16,13
		HM29	458,3	392,5	16,764	
		HM30	455,3	393,9	15,588	



Obr. 42 - Srovnání nasákavosti N pro různé druhy vápenné malty

### 9.2.3 Smrštění délkové a objemové, objemová hmotnost

Smrštění délkové a objemové bylo sledováno v čase vždy po 7, 28, 60 a 90 dnech zrání každého druhu vápenné malty. Hodnoty smrštění byly vypočteny podle vztahů (13) a (14). Ze změřených rozměrů zkušebních těles byla výpočtem stanovena velikost smrštění délkového a objemového, a také objemová hmotnost ztvrdlé malty podle vztahu (14) a sledován její vývoj v čase. Výsledné stanovení smrštění a objemové hmotnosti pro jednotlivé druhy vápenné malty je uvedeno v tab. 30 až 37. Záporné hodnoty smrštění u některých malt po 7 dnech zrání jsou přičítány nepřesnosti při výrobě zkušebních těles.

Obr. 43 a 44 ukazují srovnání vývoje délkového a objemového smrštění pro různé druhy vápenné malty. Grafy na obr. 45 až 52 představují srovnání délkového a objemového smrštění pro různé druhy vápenné malty v daném čase. Na obr. 53 až 56 jsou uvedeny grafy srovnávající objemovou hmotnost různých druhů malty v daném čase.

Změny objemové hmotnosti zatvrdlé malty a smrštění (objemového i délkového) v průběhu zrání reflektují postupný průběh karbonatace vápenné malty. Malta karbonátuje od povrchu do hmoty malty v závislosti na rychlosti difuze CO<sub>2</sub>. Objemová hmotnost s postupným odpařením vody v čase klesá, zatímco smrštění narůstá. Výrazně menší délkové smrštění bylo zaznamenáno u horké malty, což je způsobeno pravděpodobně nižším podílem pojiva v této maltě. Ve většině případu bylo pozorováno vyšší smrštění u vzorků vápenných malt připravených z normového písku. Vyšší hodnoty smrštění byly zaznamenány u odležených malt.

**Tab 30. Vývoj objemové hmotnosti ztvrdlé malty  $\rho$ , délkového smrštění  $S_d$  a objemového smrštění  $S_o$  v čase pro maltu odleženou a neodleženou připravenou z vápenného hydrátu a omítkového písku**

Malta	Čas [dny]	Ozn. vzorku	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho$ prům. [kg/m <sup>3</sup> ]	$S_d$ [%]	$S_d$ prům. [%]	$S_o$ [%]	$S_o$ prům. [%]
Neodležená	7	H1	1702,91	1730	0,594	0,870	-1,389	-0,28
		H2	1735,14		1,141		-0,834	
		H3	1762,07		0,875		1,372	
	28	H4	1679,42	1670	0,703	1,057	3,241	3,01
		H5	1659,53		1,141		2,434	
		H6	1674,54		1,328		3,355	
	60	H27	1686,78	1685	1,328	1,052	2,435	2,45
		H28	1695,97		1,156		2,941	
		H29	1678,43		0,672		1,973	
	90	H16	1667,54	1675	1,812	1,70	0,583	0,51
		H17	1682,14		1,703		0,540	
		H18	1678,91		1,578		0,419	
180	H19	1683,58	1705	2,141	1,85	3,178	3,63	
	H20	1711,07		1,875		2,793		
	H21	1717,87		1,547		4,906		
Odležená	7	HO34	1851,42	1870	0,609	0,65	0,056	1,23
		HO35	1893,45		0,563		2,418	
		HO36	1858,98		0,781		1,218	
	28	HO31	1666,98	1650	1,328	1,47	4,205	3,88
		HO32	1650,03		1,547		4,358	
		HO33	1633,73		1,531		3,069	
	60	HO4	1653,36	1635	1,703	1,43	1,952	1,95
		HO5	1614,88		1,578		1,333	
		HO6	1633,16		1,016		2,557	

Malta	Čas [dny]	Ozn. vzorku	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho$ prům. [kg/m <sup>3</sup> ]	$S_d$ [%]	$S_d$ prům. [%]	$S_o$ [%]	$S_o$ prům. [%]
Odležená	90	HO27	1633,99	1670	1,951	1,92	1,363	2,46
		HO28	1678,44		1,891		3,254	
		HO29	1701,72		1,906		2,764	
	180	HO13	1721,18	1725	2,375	2,31	4,680	4,42
		HO18	1741,71		2,391		4,638	
		HO23	1705,83		2,172		3,937	

**Tab 31. Vývoj objemové hmotnosti ztvrdlé malty  $\rho$ , délkového smrštění  $S_d$  a objemového smrštění  $S_o$  v čase pro maltu odleženou a neodleženou připravenou z aktivovaného vápenného hydrátu a omítkového písku**

Malta	Čas [dny]	Ozn. vzorku	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho$ prům. [kg/m <sup>3</sup> ]	$S_d$ [%]	$S_d$ prům. [%]	$S_o$ [%]	$S_o$ prům. [%]
Neodležená	7	MH16	1826,97	1860	0,703	0,61	1,327	2,19
		MH17	1916,50		0,656		3,755	
		MH18	1833,19		0,484		1,491	
	28	MH27	1629,66	1640	1,625	1,56	2,060	2,44
		MH25	1668,73		1,187		3,276	
		MH24	1626,50		1,859		1,990	
	60	MH19	1657,28	1660	2,031	1,84	3,315	3,43
		MH20	1663,43		1,563		3,038	
		MH21	1659,04		1,922		3,935	
	90	MH15	1674,91	1670	-0,125	1,01	3,656	3,20
		MH22	1682,84		1,891		4,389	
		MH26	1650,33		1,250		1,558	
Odležená	7	MHO27	1773,49	1800	0,594	0,87	-0,041	0,74
		MHO26	1815,42		1,141		1,452	
		MHO25	1808,23		0,875		0,822	
	28	MHO29	1659,75	1670	0,844	0,91	1,341	1,92
		MHO32	1659,96		1,016		1,635	
		MHO33	1695,68		0,875		2,786	
	60	MHO6	1662,01	1660	1,906	1,77	2,885	3,03
		MHO7	1653,47		1,609		2,714	
		MHO8	1657,50		1,781		3,493	
	90	MHO28	1662,89	1670	1,281	1,64	2,819	2,90
		MHO21	1661,63		1,750		2,486	
		MHO22	1689,92		1,875		3,402	



**Tab 32. Vývoj objemové hmotnosti ztvrdlé malty  $\rho$ , délkového smrštění  $S_d$  a objemového smrštění  $S_o$  v čase pro maltu odleženou a neodleženou připravenou z vápenné kaše a omítkového písku**

Malta	Čas [dny]	Ozn. vzorku	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho$ prům. [kg/m <sup>3</sup> ]	$S_d$ [%]	$S_d$ prům. [%]	$S_o$ [%]	$S_o$ prům. [%]
Neodležená	7	VK30	1838,12	1860	1,078	1,39	1,394	1,86
		VK29	1866,19		1,578		1,517	
		VK28	1879,31		1,516		2,682	
	28	VK19	1767,15	1775	1,797	1,72	2,717	2,66
		VK20	1751,15		1,625		2,118	
		VK26	1804,46		1,734		3,148	
	60	VK13	1671,06	1670	0,562	1,27	2,733	3,44
		VK15	1664,42		1,656		3,870	
		VK18	1677,66		1,578		3,721	
	90	VK7	1667,65	1675	0,453	0,46	3,002	3,29
		VK8	1670,29		0,406		3,647	
		VK9	1687,77		0,531		3,210	
Odležená	7	VKO22	1811,57	1805	0,984	0,80	2,407	2,16
		VKO23	1791,87		0,734		1,356	
		VKO24	1815,95		0,688		2,728	
	28	VKO19	1810,83	1785	2,141	2,19	4,934	3,61
		VKO20	1773,94		2,156		3,376	
		VKO21	1774,90		2,281		2,525	
	60	VKO4	1679,76	1680	1,656	1,48	4,283	4,09
		VKO5	1661,50		1,609		3,631	
		VKO6	1695,81		1,172		4,360	
	90	VKO11	1678,39	1675	1,609	1,64	3,693	3,29
		VKO12	1661,50		1,578		2,008	
		VKO14	1679,52		1,734		4,177	

**Tab 33. Vývoj objemové hmotnosti ztvrdlé malty  $\rho$ , délkového smrštění  $S_d$  a objemového smrštění  $S_o$  v čase pro horkou připravenou z kusového vápna a omítkového písku**

Malta	Čas [dny]	Ozn. vzorku	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho$ prům. [kg/m <sup>3</sup> ]	$S_d$ [%]	$S_d$ prům. [%]	$S_o$ [%]	$S_o$ prům. [%]
Horká malta	28	HM20	1730,96	1740	0,469	0,56	0,344	0,71
		HM18	1735,35		0,641		1,632	
		HM21	1752,55		0,578		0,145	
	60	HM4	1648,62	1625	0,359	0,40	1,480	1,56
		HM24	1614,03		0,328		1,571	
		HM27	1607,64		0,500		1,617	
	90	HM5	1680,03	1635	0,422	0,39	3,694	2,76
		HM17	1603,25		0,437		2,054	
		HM26	1625,09		0,297		2,529	

**Tab 34. Vývoj objemové hmotnosti ztvrdlé malty  $\rho$ , délkového smrštění  $S_d$  a objemového smrštění  $S_o$  v čase pro maltu odleženou a neodleženou připravenou z vápenného hydrátu a normového písku**

Malta	Čas [dny]	Ozn. vzorku	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho$ prům. [kg/m <sup>3</sup> ]	$S_d$ [%]	$S_d$ prům. [%]	$S_o$ [%]	$S_o$ prům. [%]
Neodležená	7	HN1	1877,05	1870	0,687	0,64	-0,182	-0,15
		HN2	1885,81		0,594		0,656	
		HN3	1845,96		0,641		-0,917	
	28	HN4	1889,68	1880	1,687	1,58	1,873	1,80
		HN5	1877,02		1,516		2,376	
		HN6	1879,65		1,531		1,162	
	60	HN7	1707,21	1725	1,672	1,63	1,795	1,83
		HN8	1742,59		1,750		2,243	
		HN9	1717,15		1,453		1,453	
Odležená	7	HNO1	1931,87	1910	2,500	2,44	4,440	3,46
		HNO2	1903,00		2,437		2,559	
		HNO3	1893,88		2,391		3,369	
	28	HNO4	1769,18	1770	1,781	1,80	4,043	3,92
		HNO5	1754,44		1,797		2,725	
		HNO6	1785,65		1,828		4,993	
	60	HNO7	1767,65	1760	1,734	1,78	4,358	3,57
		HNO8	1758,79		1,703		3,720	
		HNO9	1756,66		1,891		2,625	

**Tab 35. Vývoj objemové hmotnosti ztvrdlé malty  $\rho$ , délkového smrštění  $S_d$  a objemového smrštění  $S_o$  v čase pro maltu odleženou a neodleženou připravenou z aktivovaného vápenného hydrátu a normového písku**

Malta	Čas [dny]	Ozn. vzorku	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho$ prům. [kg/m <sup>3</sup> ]	$S_d$ [%]	$S_d$ prům. [%]	$S_o$ [%]	$S_o$ prům. [%]
Neodležená	7	MN1	1883,03	1895	1,016	1,07	2,127	1,48
		MN2	1903,75		1,141		1,079	
		MN3	1900,41		1,047		1,234	
	28	MN4	1736,38	1725	1,781	1,77	3,130	2,95
		MN5	1705,92		1,766		1,950	
		MN6	1738,00		1,766		3,782	
	60	MN7	1758,94	1765	2,047	1,99	4,728	5,11
		MN8	1767,38		2,094		5,448	
		MN9	1776,60		1,844		5,147	
Odležená	7	MNO1	1929,39	1925	1,047	1,14	5,329	4,87
		MNO2	1926,45		1,125		4,678	
		MNO3	1916,73		1,234		4,602	
	28	MNO4	1815,57	1830	1,281	1,07	4,364	4,79
		MNO5	1831,98		1,062		4,027	
		MNO6	1845,23		0,875		5,965	
	60	MNO7	1700,17	1720	2,000	1,99	6,122	5,46
		MNO8	1724,68		1,938		4,737	
		MNO9	1730,05		2,047		5,508	

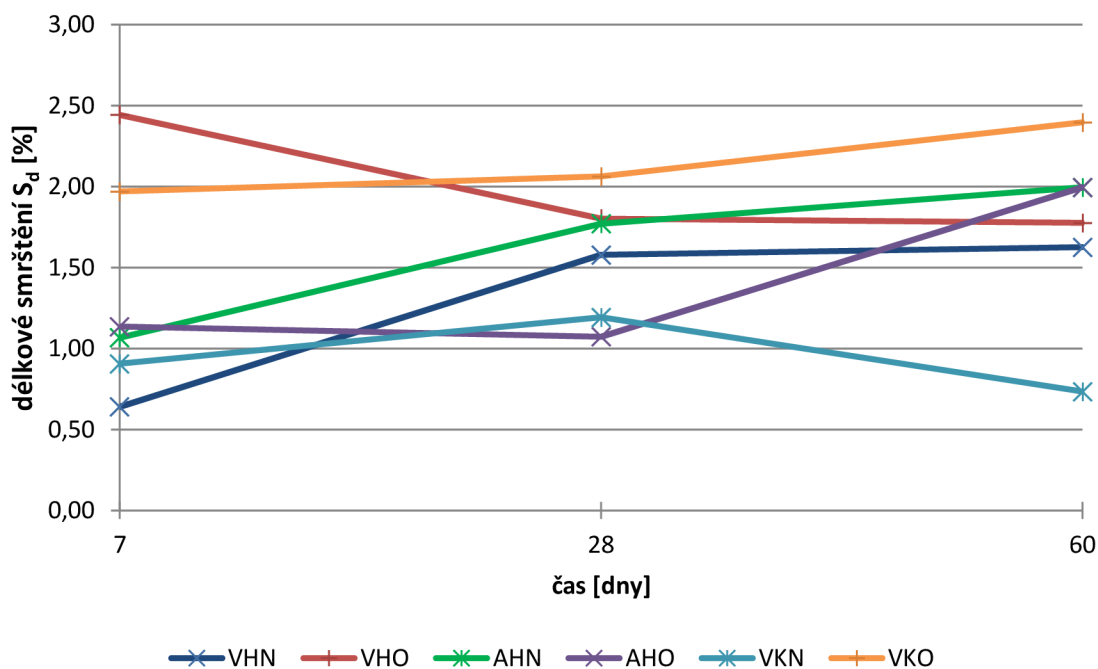
**Tab 36. Vývoj objemové hmotnosti ztvrdlé malty  $\rho$ , délkového smrštění  $S_d$  a objemového smrštění  $S_o$  v čase pro maltu odleženou a neodleženou připravenou z vápenné kaše a normového písku**

Malta	Čas [dny]	Ozn. vzorku	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho$ prům. [kg/m <sup>3</sup> ]	$S_d$ [%]	$S_d$ prům. [%]	$S_o$ [%]	$S_o$ prům. [%]
Neodležená	7	KN1	1878,25	1865	1,078	0,91	2,190	2,35
		KN2	1865,39		0,766		2,375	
		KN3	1856,18		0,875		2,479	
	28	KN4	1838,30	1835	1,422	1,19	3,146	3,51
		KN5	1845,63		1,563		3,827	
		KN6	1822,17		0,594		3,554	
	60	KN7	1800,70	1800	1,047	0,73	2,772	2,83
		KN8	1799,63		0,750		2,172	
		KN9	1798,75		0,406		3,557	

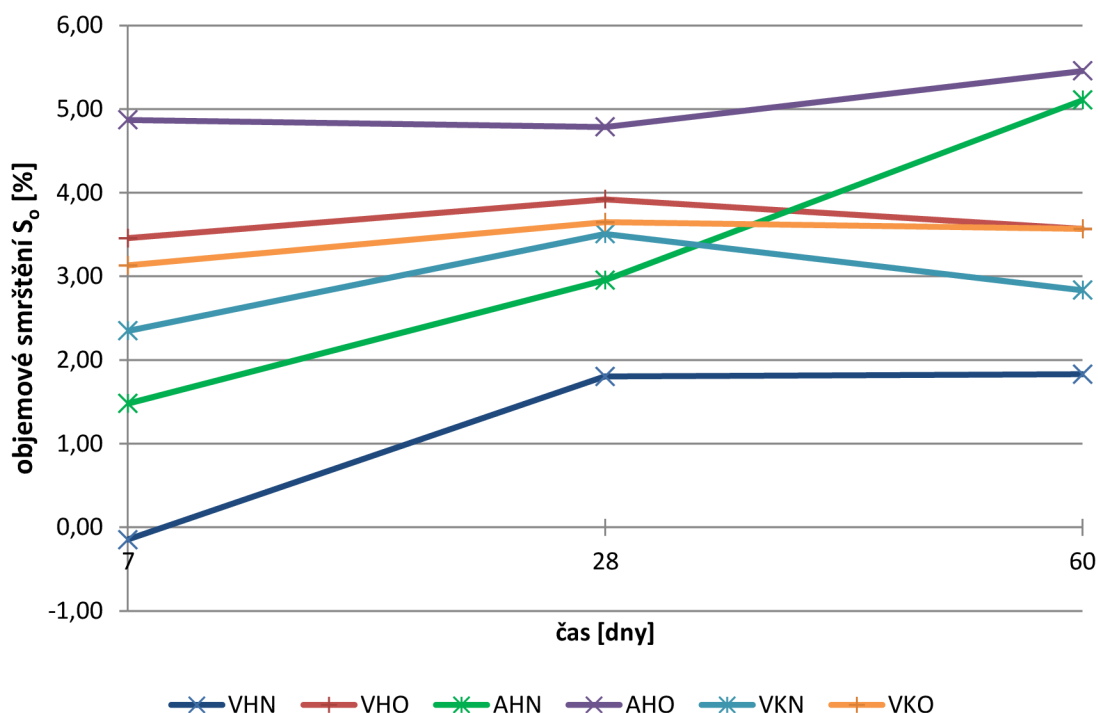
Malta	Čas [dny]	Ozn. vzorku	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho$ prům. [kg/m <sup>3</sup> ]	$S_d$ [%]	$S_d$ prům. [%]	$S_o$ [%]	$S_o$ prům. [%]
Odležená	7	KNO1	1867,69	1880	1,906	1,97	2,767	3,13
		KNO2	1892,21		2,063		3,284	
		KNO3	1886,49		1,938		3,343	
	28	KNO4	1782,26	1775	2,328	2,06	4,878	3,65
		KNO5	1767,12		1,891		2,627	
		KNO6	1771,40		1,969		3,436	
	60	KNO7	1747,34	1750	2,422	2,40	6,286	6,32
		KNO8	1725,60		2,437		6,600	
		KNO9	1775,88		2,328		6,076	

**Tab 37. Vývoj objemové hmotnosti ztvrdlé malty  $\rho$ , délkového smrštění  $S_d$  a objemového smrštění  $S_o$  v čase pro maltu odleženou a neodleženou připravenou z vápenného hydrátu a bratčického písku**

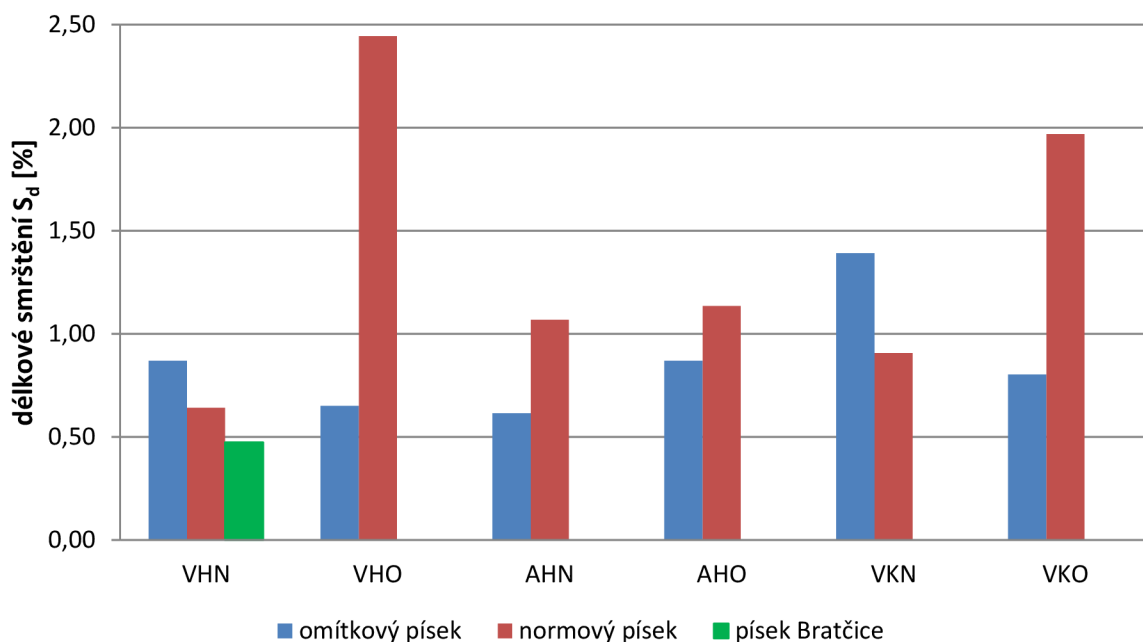
Malta	Čas [dny]	Ozn. vzorku	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho$ prům. [kg/m <sup>3</sup> ]	$S_d$ [%]	$S_d$ prům. [%]	$S_o$ [%]	$S_o$ prům. [%]
Neodležená	7	HB1	1838,40	1840	0,547	0,47	0,049	0,02
		HB2	1847,50		0,609		0,859	
		HB3	1831,58		0,266		-0,856	
	28	HB4	1811,42	1785	1,625	1,66	3,887	2,62
		HB5	1779,09		1,687		2,118	
		HB6	1771,97		1,672		1,857	



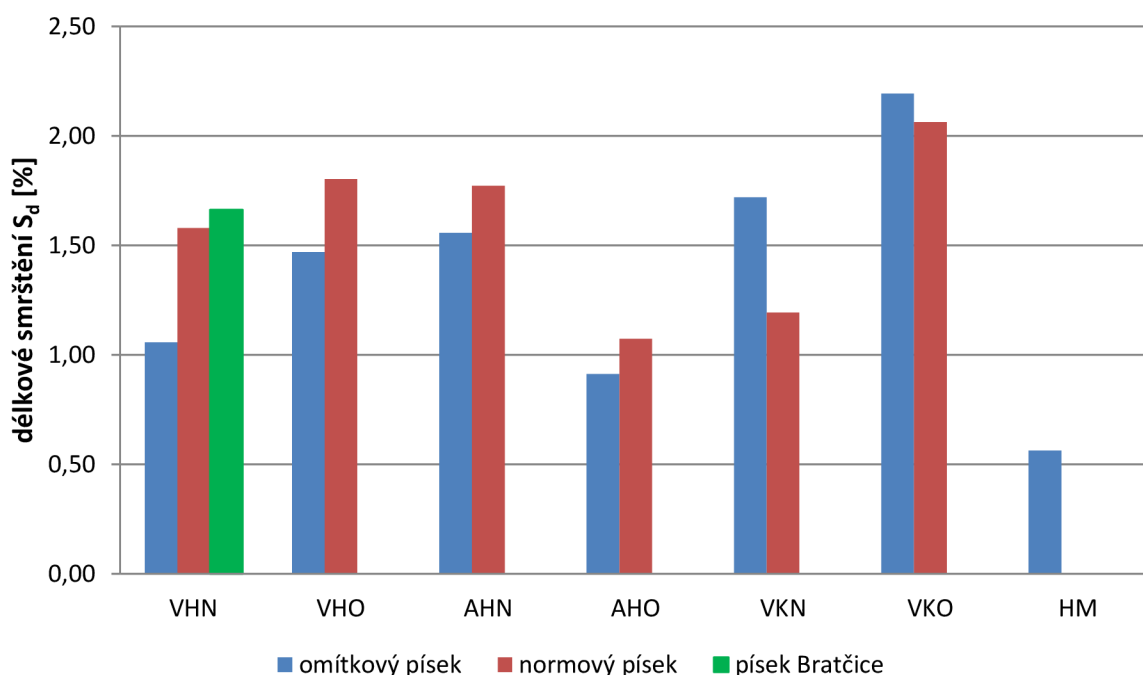
Obr. 43 - Vývoj délkového smrštění  $S_d$  v čase pro různé druhy vápenné malty připravené z normového písku (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše)



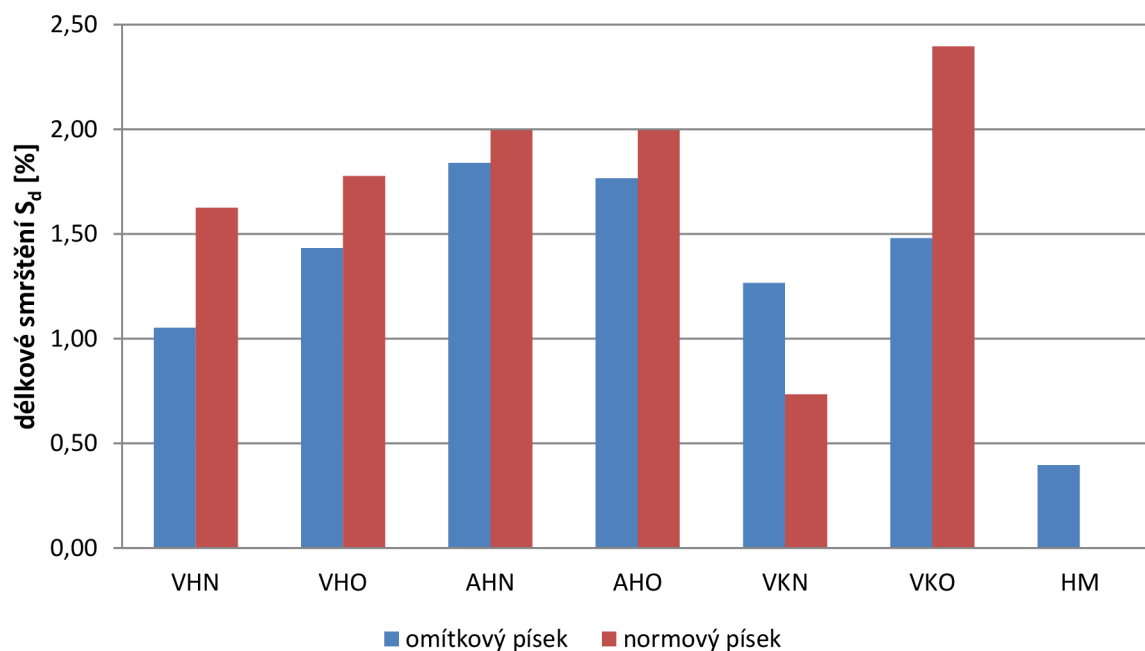
Obr. 44 - Vývoj objemového smrštění  $S_o$  v čase pro různé druhy vápenné malty připravené z normového písku (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše)



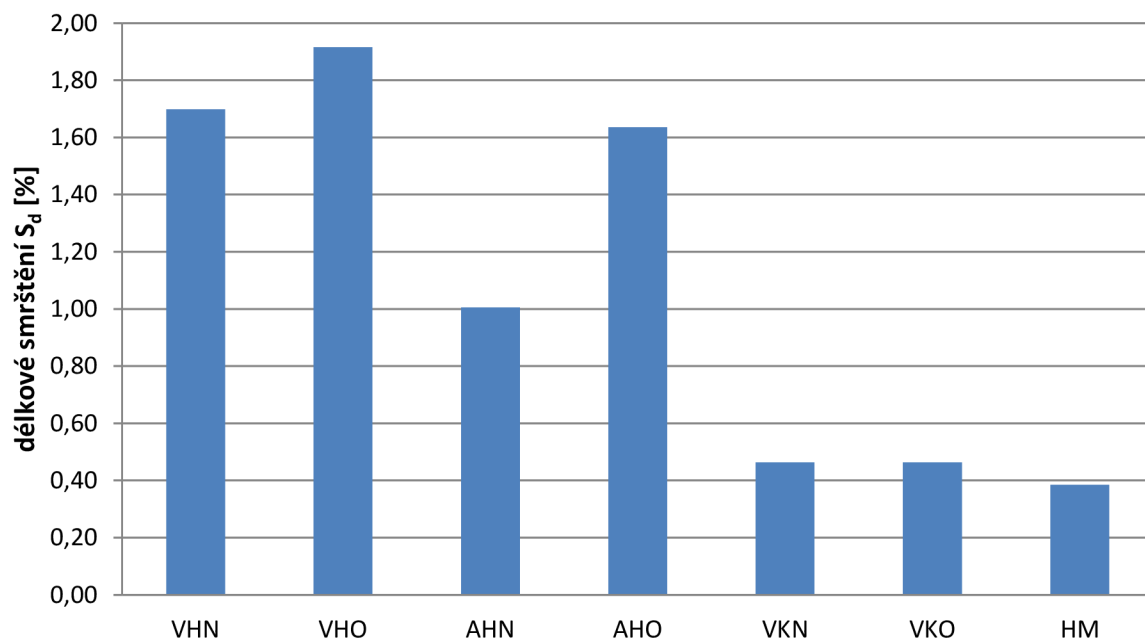
Obr. 45 - Srovnání délkového smrštění  $S_d$  po 7 dnech pro různé druhy vápenné malty s různými druhy písku (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše)



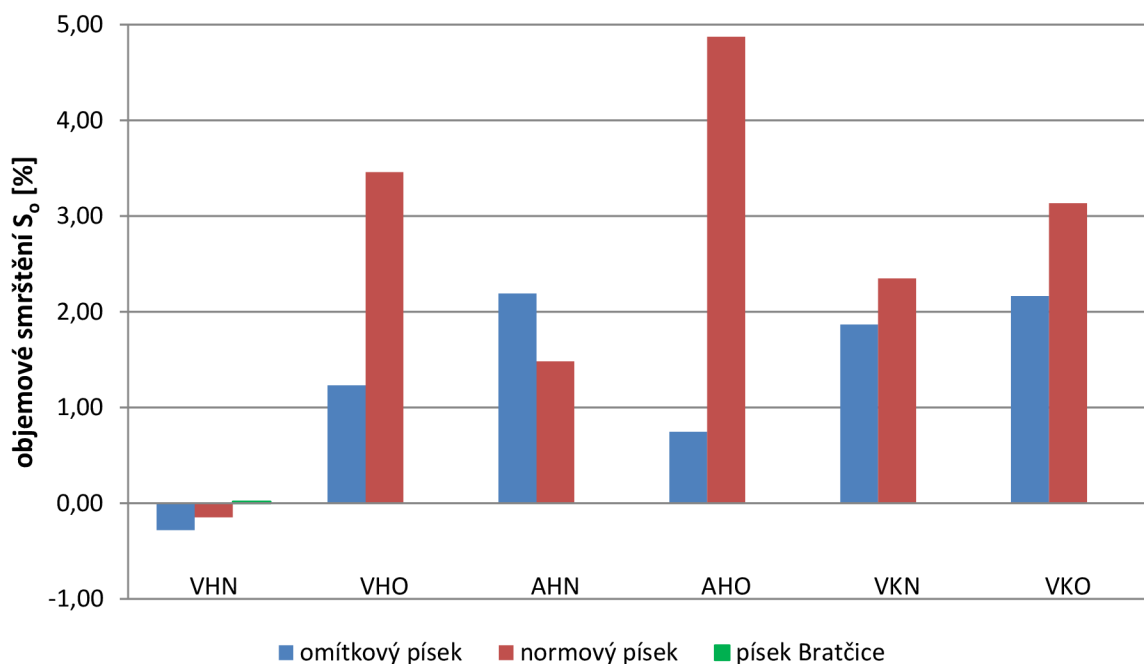
Obr. 46 - Srovnání délkového smrštění  $S_d$  po 28 dnech pro různé druhy vápenné malty s různými druhy písku (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM - horká malta)



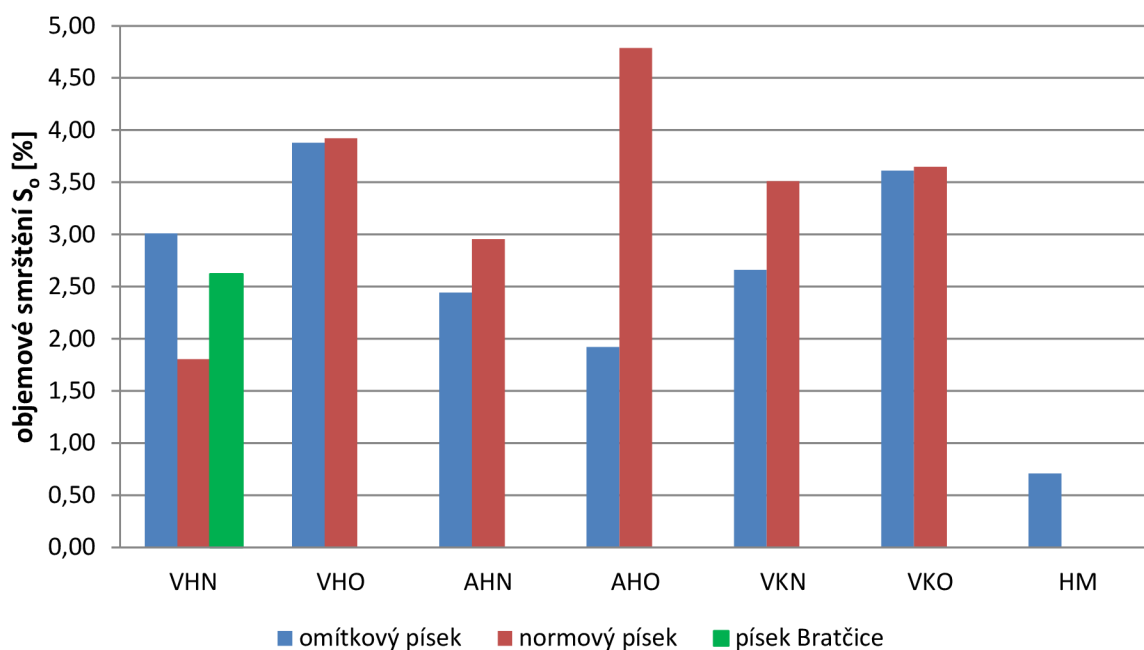
Obr. 47 - Srovnání délkového smrštění  $S_d$  po 60 dnech pro různé druhy vápenné malty s různými druhy písku (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM – horká malta)



Obr. 48 - Srovnání délkového smrštění  $S_d$  po 90 dnech pro různé druhy vápenné malty s omítkovým pískem (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM – horká malta)

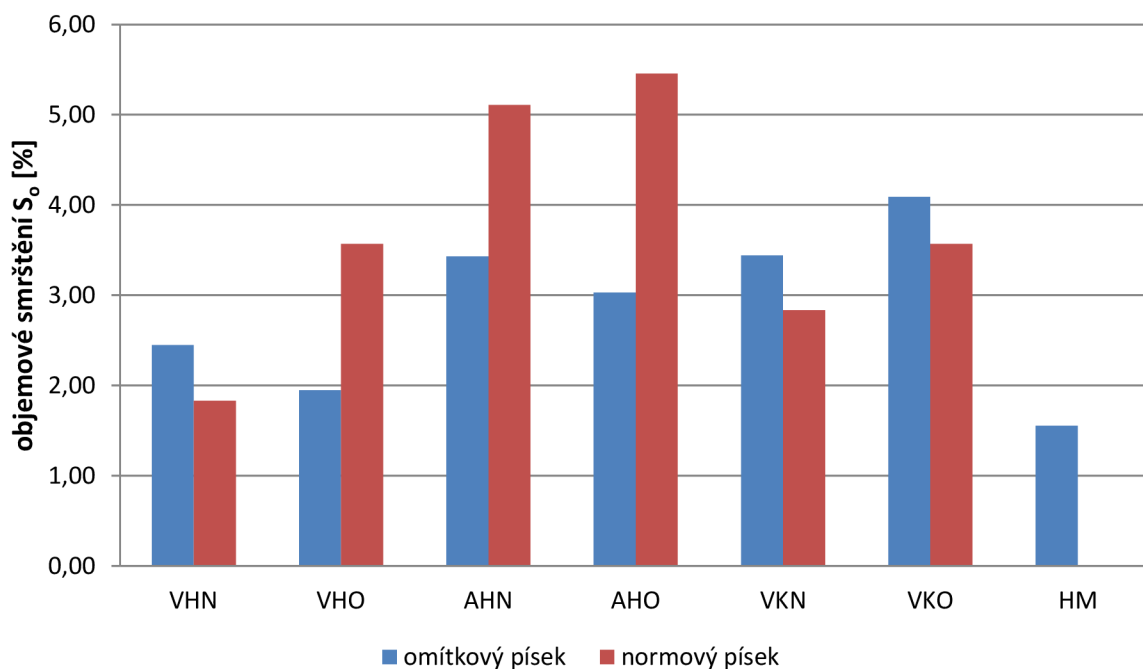


Obr. 49 - Srovnání objemového smrštění  $S_0$  po 7 dnech pro různé druhy vápenné malty s různými druhy písku (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM – horká malta)

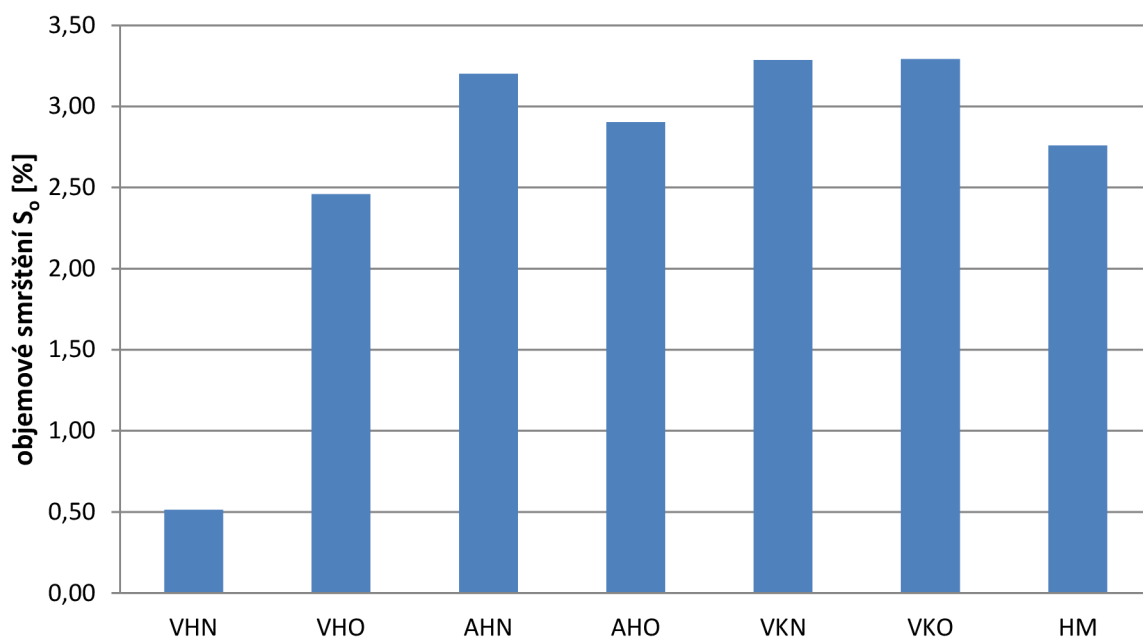


Obr. 50 - Srovnání objemového smrštění  $S_0$  po 28 dnech pro různé druhy vápenné malty s různými druhy písku (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM – horká malta)

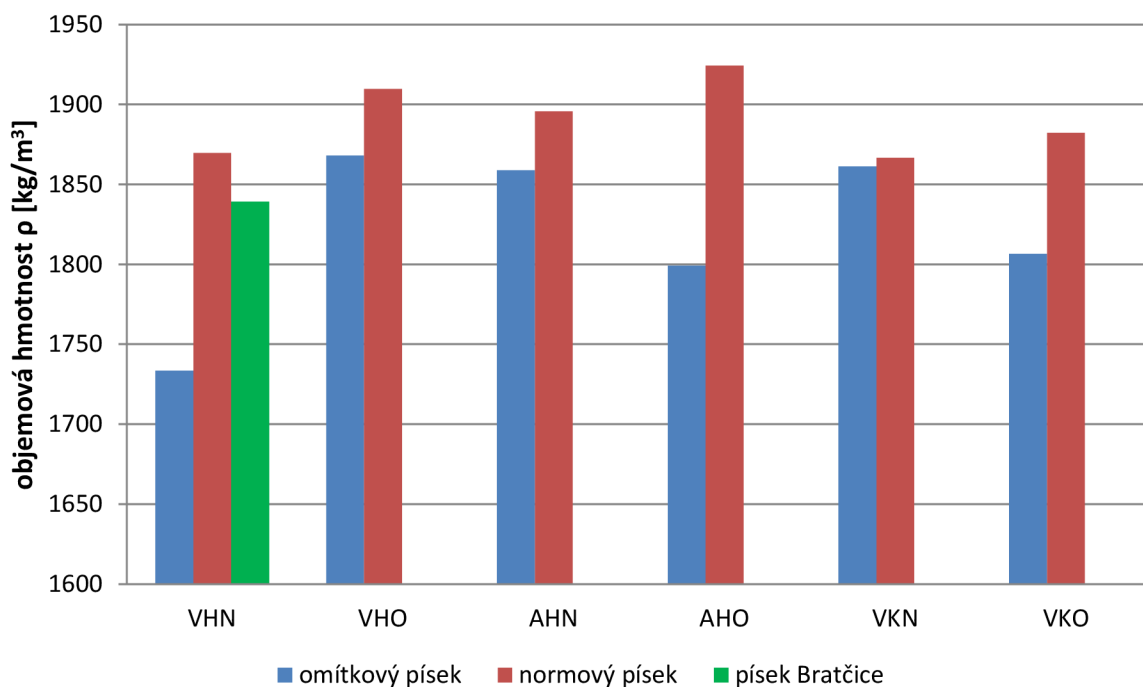




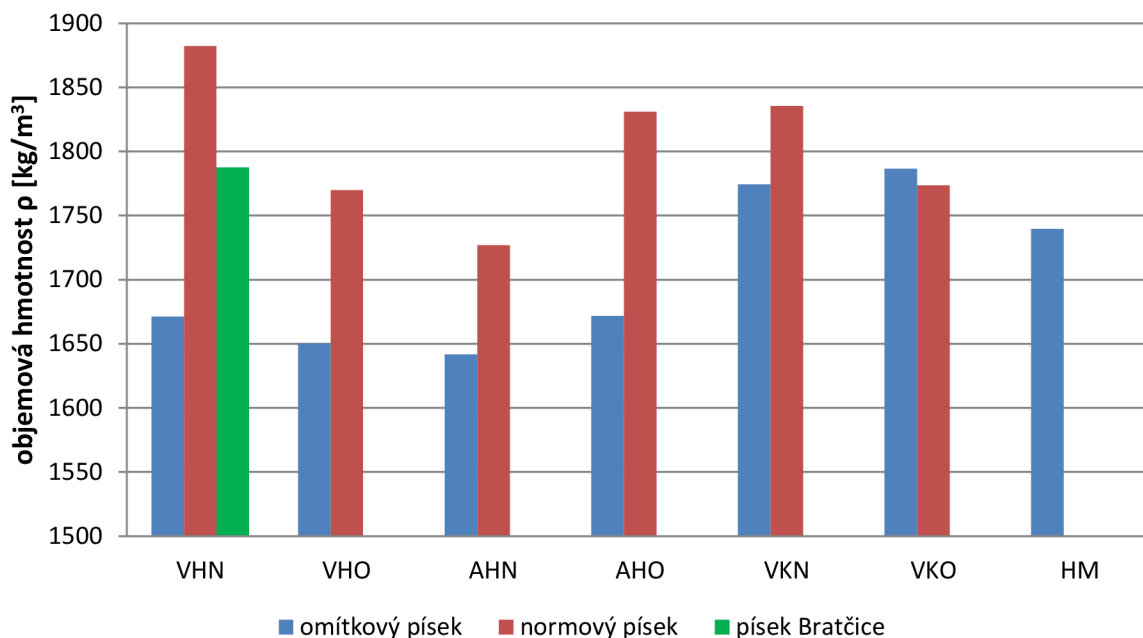
Obr. 51 - Srovnání objemového smrštění  $S_o$  po 60 dnech pro různé druhy vápenné malty s různými druhy písku (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM – horká malta)



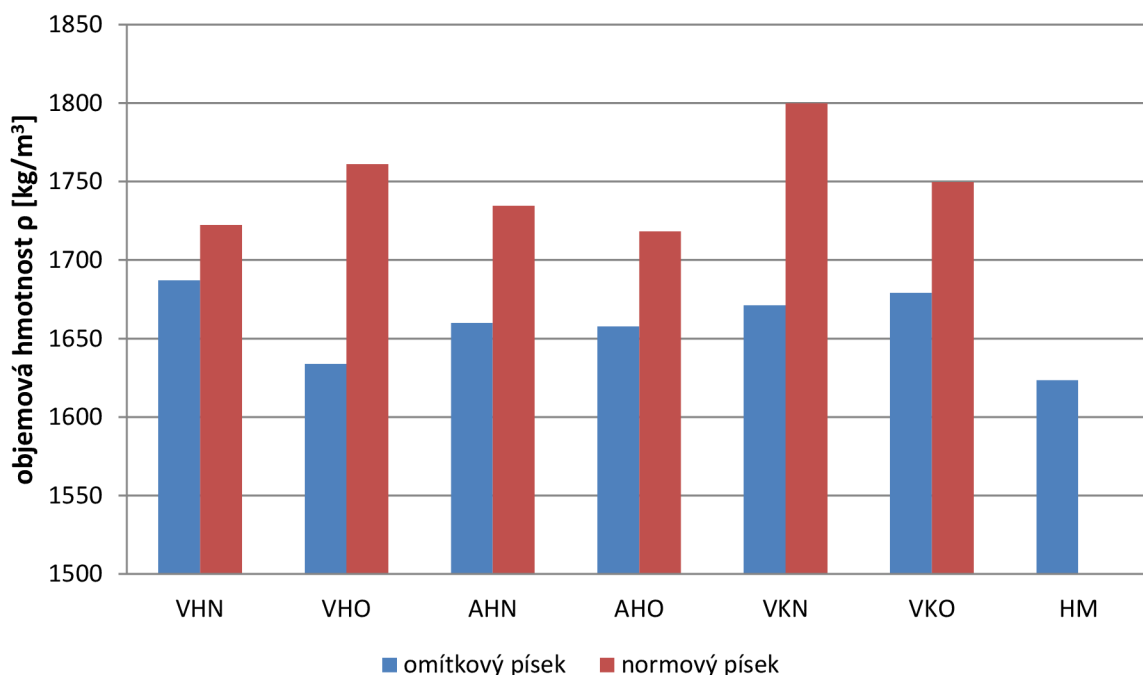
Obr. 52 - Srovnání objemového smrštění  $S_o$  po 90 dnech pro různé druhy vápenné malty s omítkovým pískem (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM – horká malta)



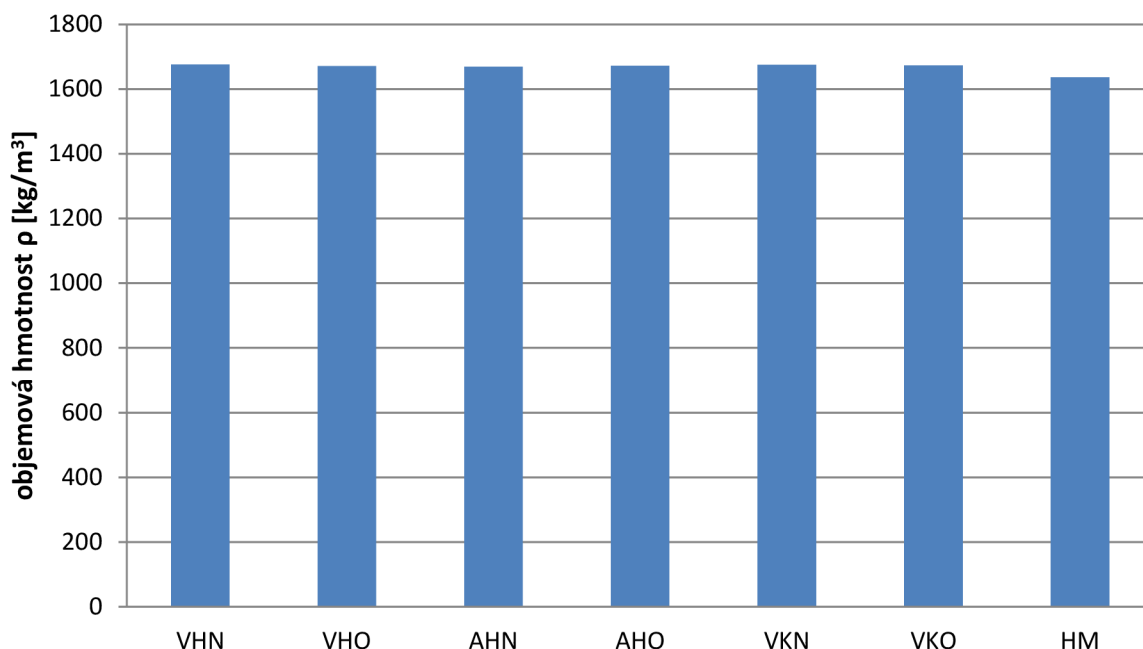
Obr. 53 - Srovnání objemové hmotnosti zatvrdlé malty  $\rho$  po 7 dnech zrání pro různé druhy vápenné malty připravené s různými druhy písku (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM – horká malta)



Obr. 54 - Srovnání objemové hmotnosti zatvrdlé malty  $\rho$  po 28 dnech zrání pro různé druhy vápenné malty připravené s různými druhy písku (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM – horká malta)



Obr. 55 - Srovnání objemové hmotnosti zatvrdlé malty  $\rho$  po 60 dnech zrání pro různé druhy vápenné malty připravené s různými druhy písku (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM – horká malta)



Obr. 56 - Srovnání objemové hmotnosti zatvrdlé malty  $\rho$  po 90 dnech zrání pro různé druhy vápenné malty (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM – horká malta)

## 9.2.4 Mrazuvzdornost

Odolnost proti působení mrazu byla stanovována po 28 dnech zrání podle normy ČSN 72 2452 [31]. Je nutno podotknout, že metoda stanovení mrazuvzdornosti podle normy ČSN 72 2452 [31] není primárně určena pro vápenné omítkové a maltové směsi, kvůli požadavku na nasycení vzorků vodou před započítáním zmrazovacích cyklů. Proto výsledky této zkoušky nevypovídají zcela pravdivě o odolnosti vůči mrazu vápenných malt a omítek, které v praxi obvykle nejsou plně nasyceny vodou.

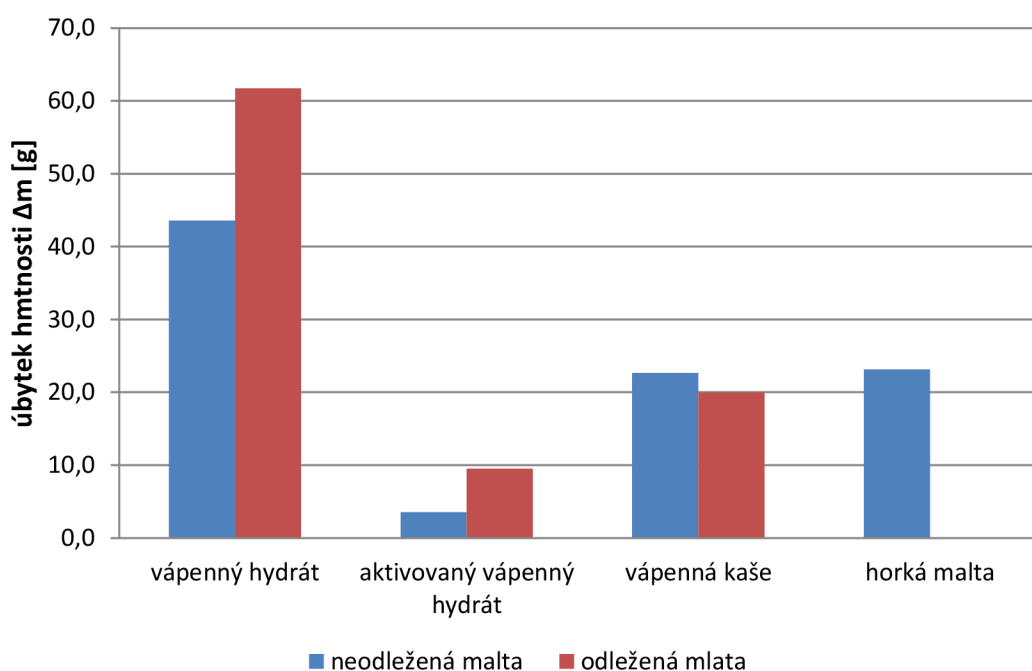
Pro účely této diplomové práce je mrazuvzdornost hodnocena pouze úbytkem hmotnosti  $\Delta m$ , neboť součinitel mrazuvzdornosti  $KM_f$  nebylo možné stanovit pro všechny zkoušené druhy vápenné malty (konkrétně šlo o odleženou maltu připravenou z vápenného hydrátu a odleženou i neodleženou maltu připravenou z vápenné kaše), z důvodu úplného rozpadu vzorků. Mrazuvzdornost byla zkoušena pouze u vzorků připravených z omítkového písku.

Výsledky zkoušky mrazuvzdornosti jsou uvedeny v tab. 38 a 39, jejich grafické zpracování pak ukazuje obr. 57. Obr. 58 až 64 zobrazují vzhled zkušebních těles po ukončení zmrazovacích cyklů.

Většina zkoušených druhů vápenné malty vydržela 1 zmrazovací cyklus, výjimkou byly neodležená malta připravená z vápenného hydrátu, která vydržela 2 cykly, a odležená malta připravená z vápenného hydrátu, jejíž vzorky se rozpadly již po 24 hodinách uložení ve vodě. Budeme-li hodnotit mrazuvzdornost podle úbytku hmotnosti  $\Delta m$ , pak nejmenšího úbytku hmotnosti dosáhla malta připravená z aktivovaného vápenného hydrátu, jak odležená, tak i neodležená, u nichž byl zjištěn  $\Delta m < 10$  g. Naopak největší úbytek hmotnosti  $\Delta m$  byl zjištěn u malty odležené i neodležené připravené z vápenného hydrátu, jehož hodnoty byly přibližně čtyřikrát až šestkrát vyšší než v případě malty připravené z mikronizovaného hydrátu. U aktivovaného vápenného hydrátu lze usuzovat na pozitivní vliv pojiva aktivovaného mixováním, kdy jsou v pojivu vytvořeny mikropóry, do nichž může expandovat vznikající led během zmrazování.

**Tab 38. Hodnocení mrazuvzdornosti úbytkem hmotnosti  $\Delta m$**

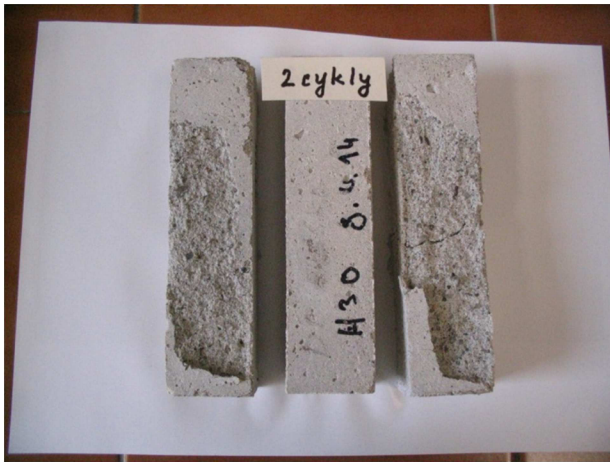
Pojivo	Malta	Ozn. vzorku	Počet cyklů	$m_0$ [g]	$m_1$ [g]	$\Delta m$ [g]	$\Delta m$ prům. [g]
Vápenný hydrát	neodležená	H24	2	452,7	426,0	26,7	43,6
		H26	2	459,7	422,3	37,4	
		H30	2	486,1	419,5	66,6	
	odležená	HO7	0	462,3	399,3	63,0	61,7
		HO8	0	453,0	406,7	46,3	
		HO9	0	464,5	388,6	75,9	
aktivovaného vápenného hydrát	neodležená	MH28	1	425,6	422,4	3,2	3,5
		MH29	1	423,8	422,2	1,6	
		MH30	1	427,0	421,2	5,8	
	odležená	MHO18	1	417,6	410,8	6,8	9,5
		MHO19	1	419,2	408,3	10,9	
		MHO20	1	420,9	410,1	10,8	
Vápenná kaše	neodležená	VK33	1	430,6	402,2	28,4	22,7
		VK22	1	424,3	407,1	17,2	
		VK27	1	430,9	408,5	22,4	
	odležená	VKO25	1	428,6	408,3	20,3	20,0
		VKO26	1	427,4	409,1	18,3	
		VKO27	1	429,2	407,9	21,3	
Horká malta	neodležená	HM13	1	430,0	392,9	37,1	23,1
		HM14	1	410,5	398,3	12,2	
		HM15	1	419,0	398,9	20,1	



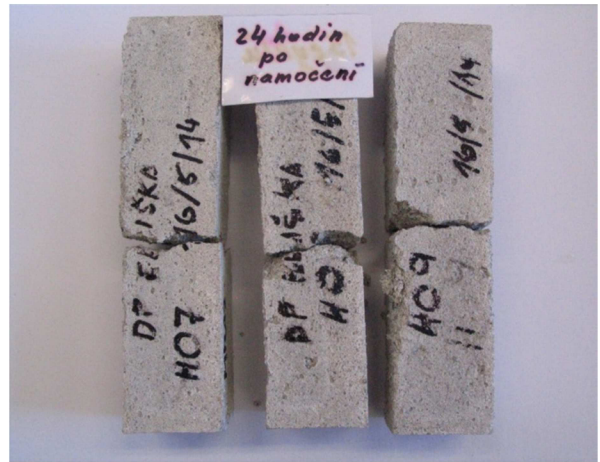
*Obr. 57 - Hodnocení mrazuvzdornosti vápenné malty úbytkem hmotnosti  $\Delta m$*

**Tab 39. Hodnocení mrazuvzdornosti součinitelem mrazuvzdornosti  $KM_f$** 

Pojivo, odležení	Sada vzorků	Ozn. vzorku	$F_f$ [kN]	$R_f$ [MPa]	$R_f$ prům. [MPa]	$KM_f$ [-]
Vápenný hydrát neodležení	Referenční	H31	0,105	0,246	0,31	0,37
		H32	0,151	0,354		
		H33	0,138	0,323		
	Zmrazovaná	H24	0,047	0,110	0,12	
		H26	0,051	0,120		
		H30	0,000	0,000		
Vápenný hydrát odležení	Referenční	HO10	0,094	0,220	0,20	0,00
		HO11	0,077	0,180		
		HO12	0,087	0,204		
	Zmrazovaná	HO7	0,000	0,000	0,00	
		HO8	0,000	0,000		
		HO9	0,000	0,000		
Mikronizovaný hydrát neodležení	Referenční	MH1	0,102	0,239	0,23	0,43
		MH2	0,086	0,202		
		MH3	0,107	0,251		
	Zmrazovaná	MH28	0,000	0,000	0,10	
		MH29	0,000	0,000		
		MH30	0,042	0,098		
Mikronizovaný hydrát odležení	Referenční	MHO10	0,106	0,248	0,23	0,77
		MHO11	0,089	0,209		
		MHO12	0,093	0,218		
	Zmrazovaná	MHO18	0,087	0,204	0,17	
		MHO19	0,060	0,141		
		MHO20	0,000	0,000		
Vápenná kaše neodležení	Referenční	VK23	0,115	0,270	0,27	0,00
		VK24	0,125	0,293		
		VK25	0,109	0,255		
	Zmrazovaná	VK33	0,000	0,000	0,00	
		VK22	0,000	0,000		
		VK27	0,000	0,000		
Vápenná kaše odležení	Referenční	VKO13	0,121	0,284	0,31	0,00
		VKO15	0,149	0,349		
		VKO16	0,125	0,293		
	Zmrazovaná	VKO25	0,000	0,000	0,00	
		VKO26	0,000	0,000		
		VKO27	0,000	0,000		
Horká malta	Referenční	HM19	0,172	0,403	0,35	0,11
		HM22	0,118	0,277		
		HM23	0,158	0,370		
	Zmrazovaná	HM13	0,017	0,040	0,04	
		HM14	0,000	0,000		
		HM15	0,000	0,000		



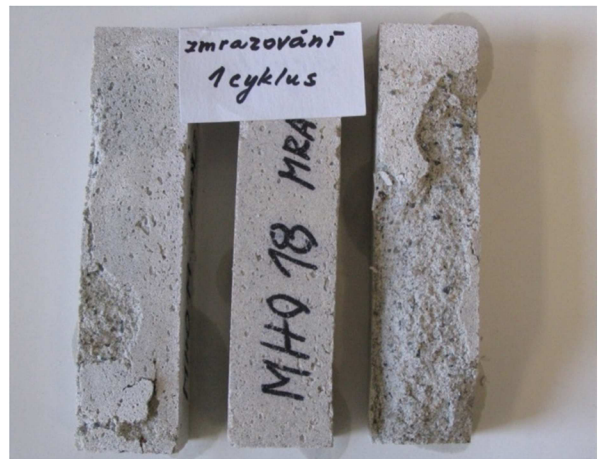
Obr. 58 - Zkušební vzorky neodležené malty připravené z vápenného hydrátu a omítkového písku po 2 zmrazovacích cyklech



Obr. 59 - Zkušební vzorky odležené malty připravené z vápenného hydrátu a omítkového písku po 24 hodinách uložení ve vodě



Obr. 60 - Zkušební vzorky neodležené malty připravené z aktivovaného vápenného hydrátu a omítkového písku po 1 zmrazovacím cyklu



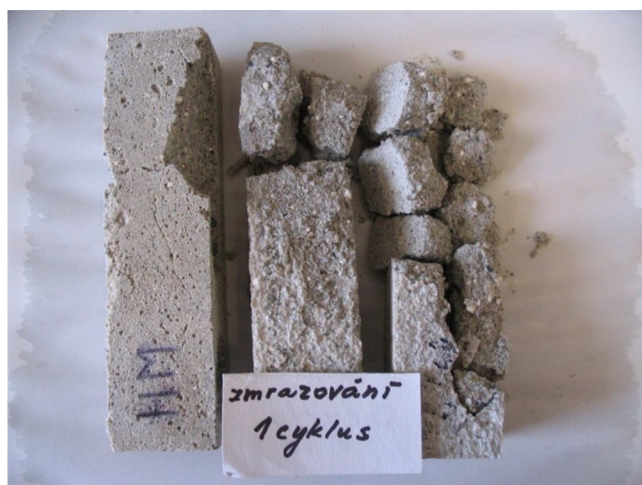
Obr. 61 - Zkušební vzorky odležené malty připravené z aktivovaného vápenného hydrátu a omítkového písku po 1 zmrazovacím cyklu



Obr. 62 - Zkušební vzorky neodležené malty připravené z vápenné kaše a omítkového písku po 1 zmrazovacím cyklu



Obr. 63 - Zkušební vzorky odležené malty připravené z vápenné kaše a omítkového písku po 1 zmrazovacím cyklu

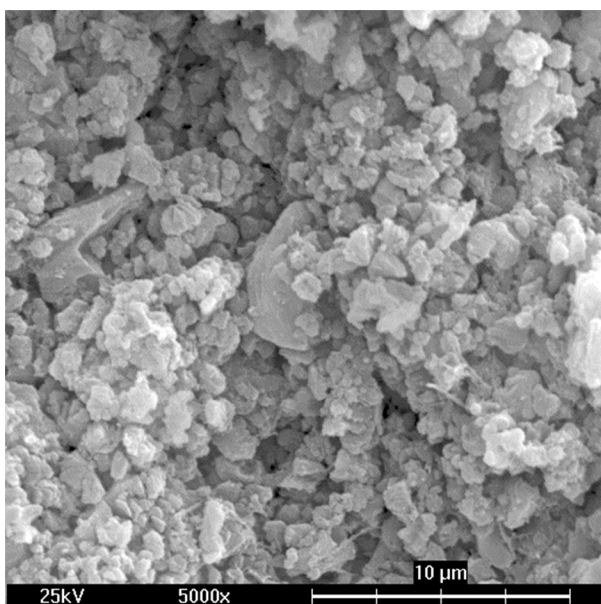


Obr. 64 - Zkušební vzorky horké malty připravené z kusového vápna a omítkového písku po 1 zmrazovacím cyklu

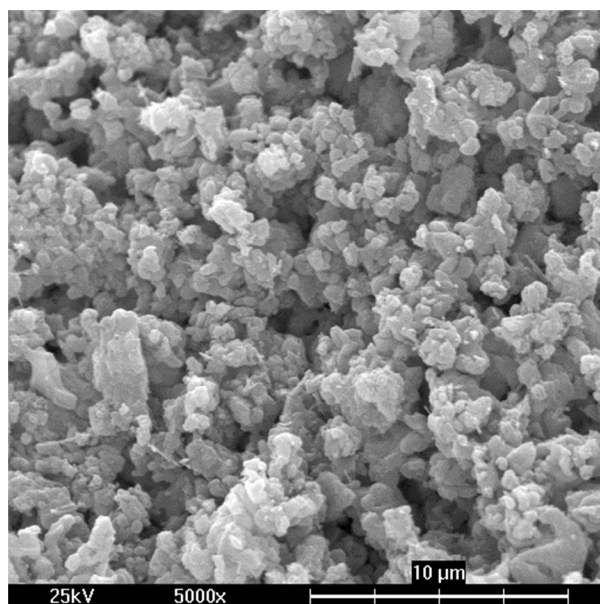
### 9.2.5 Snímkování pomocí elektronového mikroskopu

Obr. 65 až 78 představují snímky pořízené rastrovacím elektronovým mikroskopem (REM) ve zvětšení 5000x, kdy byly snímkovány vzorky po 28 dnech zrání. Na snímcích vzorků neodležených malt jsou patrné krystaly kalcitu jen ojediněle, u odležených malt jsou patrné podlouhlé krystaly kalcitu o velikosti přibližně 1  $\mu\text{m}$ . Největší množství krystalů kalcitu lze pozorovat ve vzorcích odležené malty připravené z vápenné kaše (obr. 70, 78). V případě odležené malty připravené z vápenné kaše (obr. 70 a 78, na obr. 79 pak při zvětšení 10000x) je mikrostruktura zatvrdlé malty tvořena prakticky pouze vzájemně srostlými krystaly kalcitu, což způsobuje zvýšení pevnosti vápenné malty. Důvod vyšší pevnosti odležené vápenné malty tedy leží v její mikrostrukturu, která je také dalším důkazem pozitivního vlivu odležení na vlastnosti vápenné malty.

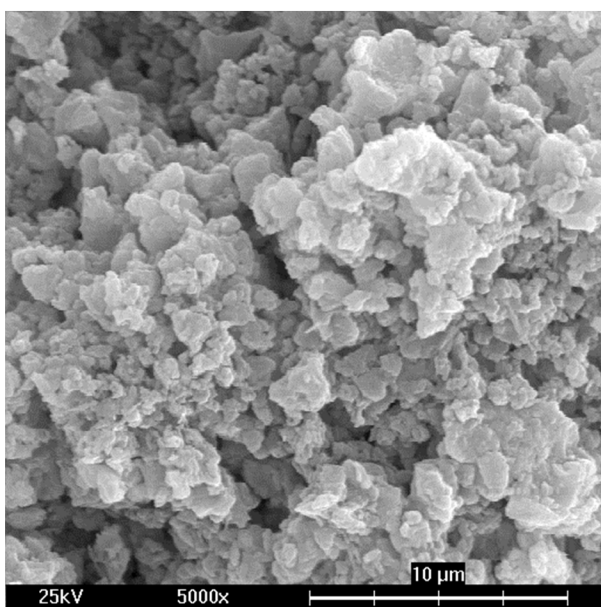




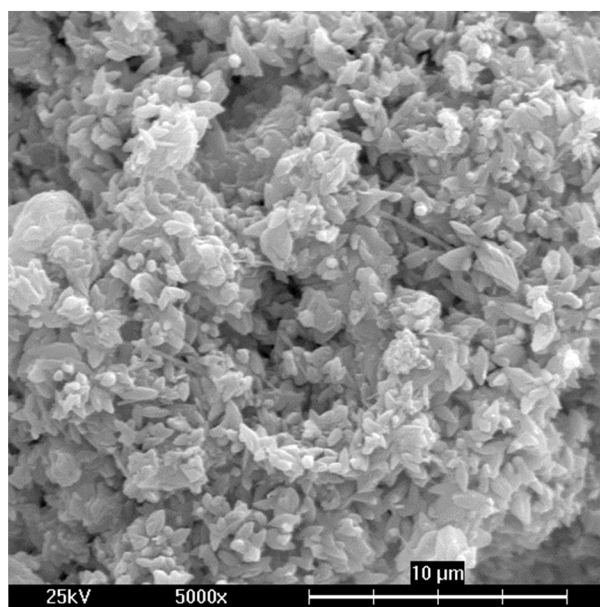
*Obr. 65 - Mikrostruktura neodležené malty připravené z vápenného hydrátu a omítkového písku při zvětšení 5000x*



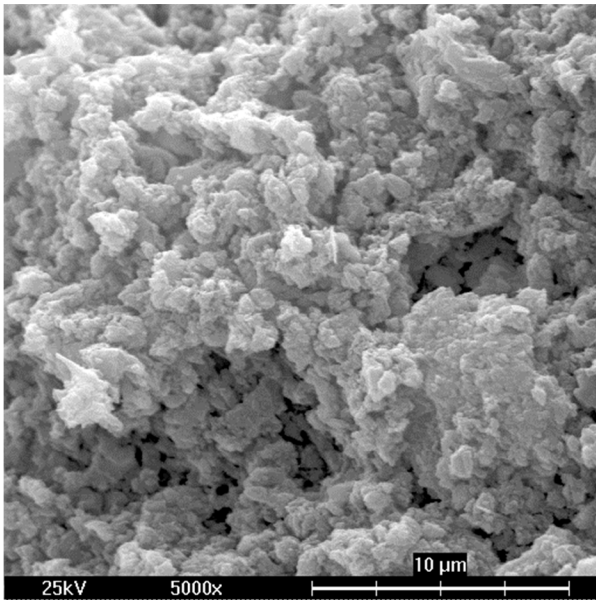
*Obr. 66 - Mikrostruktura odležené malty připravené z vápenného hydrátu a omítkového písku při zvětšení 5000x*



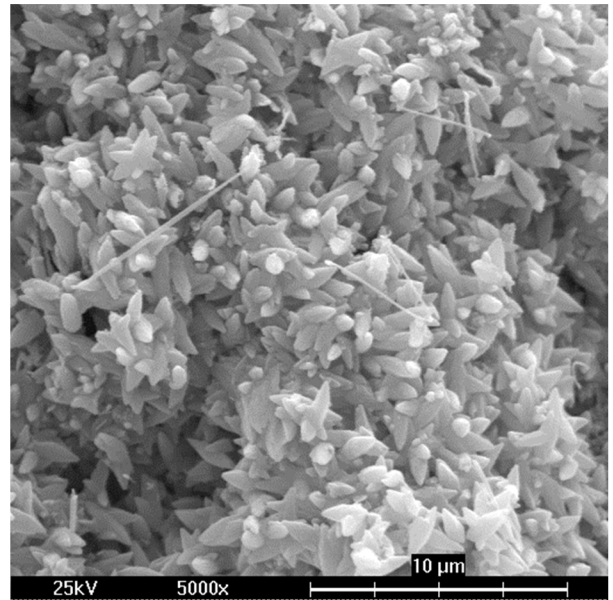
*Obr. 67 - Mikrostruktura neodležené malty připravené z aktivovaného vápenného hydrátu a omítkového písku při zvětšení 5000x*



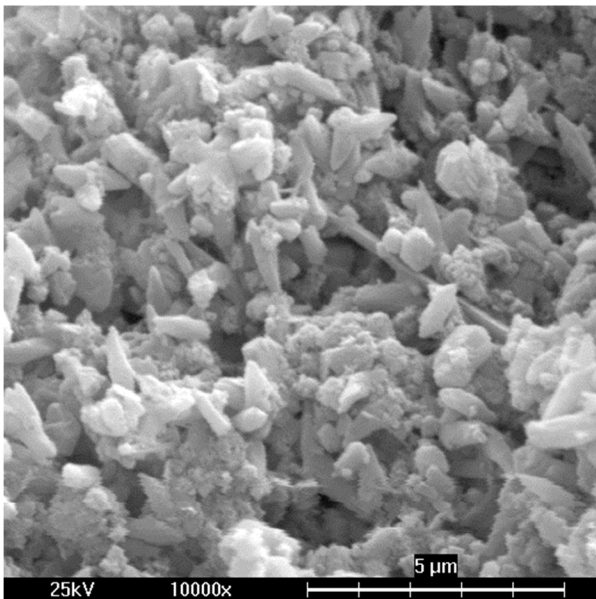
*Obr. 68 - Mikrostruktura odležené malty připravené z aktivovaného vápenného hydrátu a omítkového písku při zvětšení 5000x*



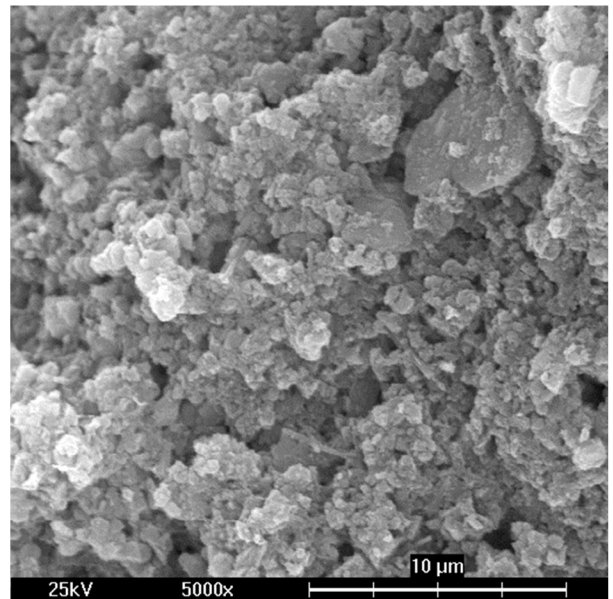
*Obr. 69 - Mikrostruktura neodležené malty připravené z vápenné kaše a omítkového písku při zvětšení 5000x*



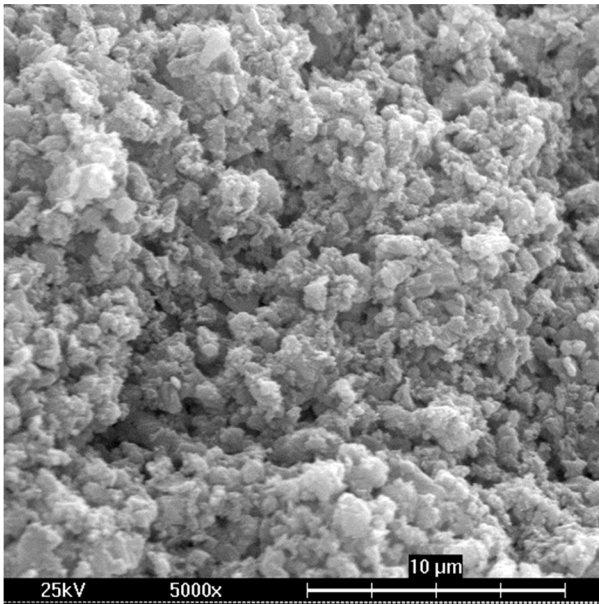
*Obr. 70 - Mikrostruktura odležené malty připravené z vápenné kaše a omítkového písku při zvětšení 5000x*



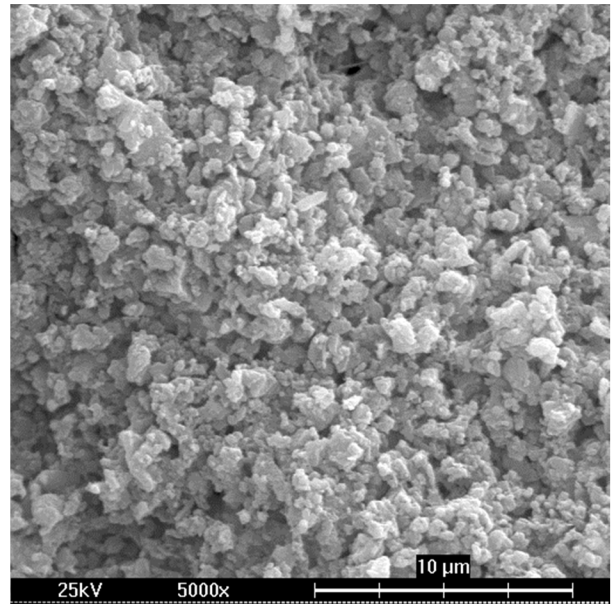
*Obr. 71 - Mikrostruktura odležené malty připravené z vápenné kaše a omítkového písku při zvětšení 10000x*



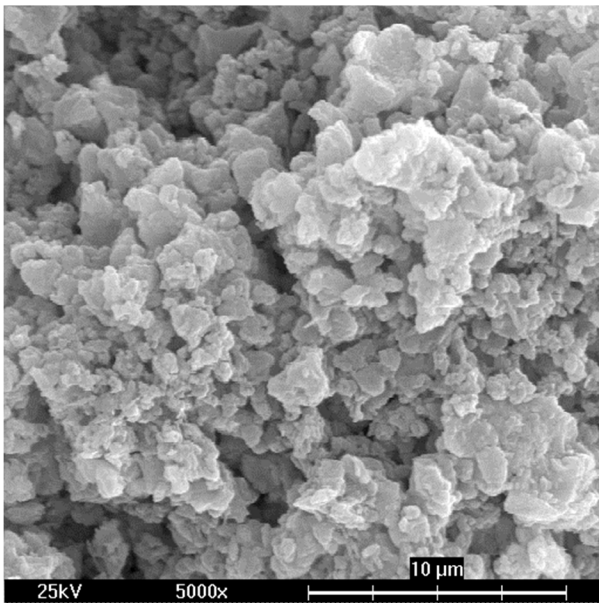
*Obr. 72 - Mikrostruktura neodležené horké malty připravené z kusového vápna a omítkového písku při zvětšení 5000x*



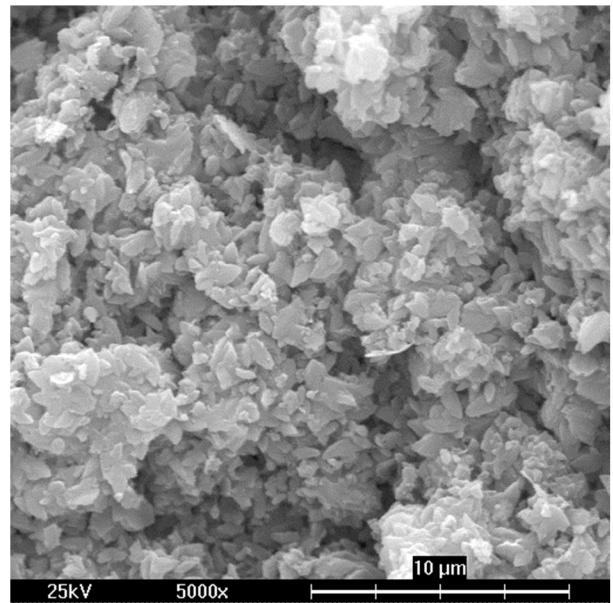
*Obr. 73 - Mikrostruktura neodležené malty připravené z vápenného hydrátu a normového písku při zvětšení 5000x*



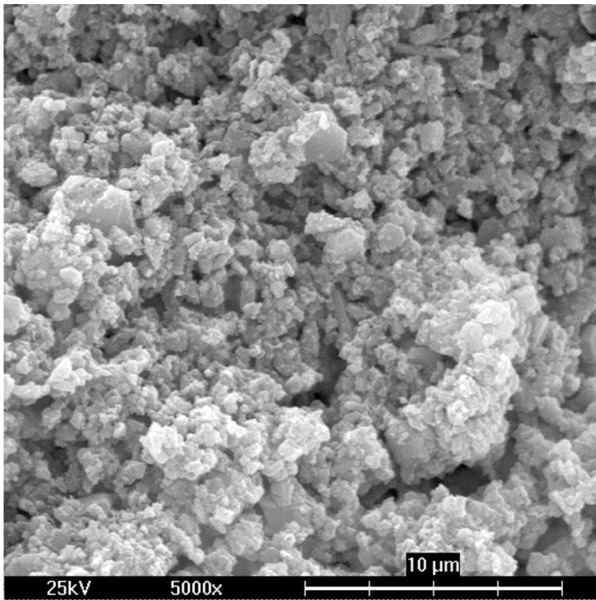
*Obr. 74 - Mikrostruktura odležené malty připravené z vápenného hydrátu a normového písku při zvětšení 5000x*



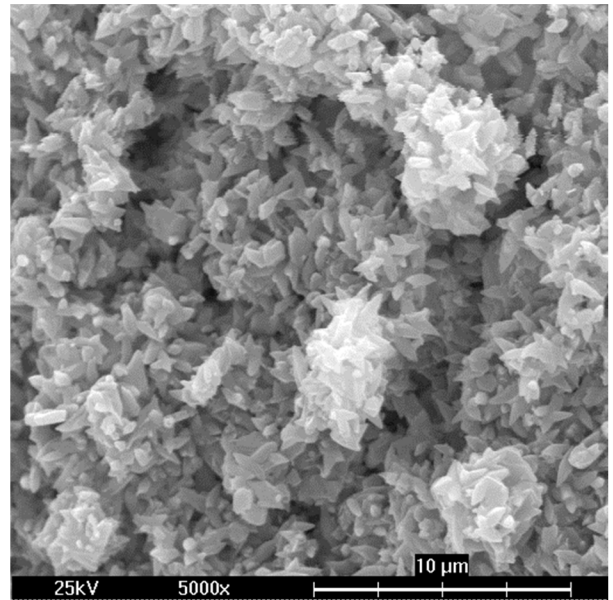
*Obr. 75 - Mikrostruktura neodležené malty připravené z aktivovaného vápenného hydrátu a normového písku při zvětšení 5000x*



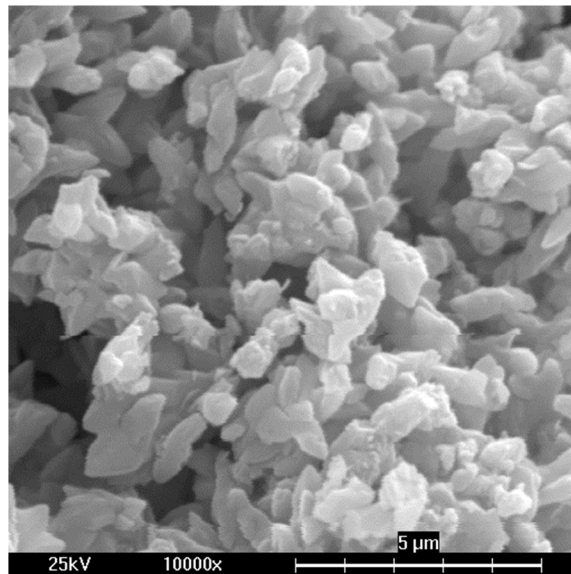
*Obr. 76 - Mikrostruktura odležené malty připravené z aktivovaného vápenného hydrátu a normového písku při zvětšení 5000x*



*Obr. 77 - Mikrostruktura neodležené malty připravené z vápenné kaše a normového písku při zvětšení 5000x*



*Obr. 78 - Mikrostruktura odležené malty připravené z vápenné kaše a normového písku při zvětšení 5000x*



*Obr. 79 - Mikrostruktura odležené malty připravené z vápenné kaše a normového písku při zvětšení 10000x*

## 10 Diskuse výsledků a závěr

Cílem této diplomové práce bylo získání exaktních dat o vlastnostech vápenných malt připravených z různých forem stavebního vápna a zejména o vlivu odležení vápenné malty na její užité vlastnosti. Zkoušky mechanických vlastností byly prováděny na zkušebních tělesech vyrobených z malt odležených a neodležených, připravených z vápenného hydrátu, odležené vápenné kaše a aktivovaného vápenného hydrátu. Navíc byla také zkoušena horká vápenná malta, připravená dalším z tradičních postupů.

**Malta připravená z vápenného hydrátu** má výhodu snadné dostupnosti pojiva a deklarované vlastnosti výrobcem, které jsou dány jednak naplněním požadavků normy ČSN EN 459-1, jednak technickým listem výrobku. Výroba malty z vápenného hydrátu je poměrně snadná a časově nenáročná. Nevýhoda malty z vápenného hydrátu spočívá v horší zpracovatelnosti, která vyplývá z přítomnosti ostrohranných krystalků portlanditu, neboť za krátkou dobu styku s vodou se nevytvoří hydrogel hydroxidu vápenatého.

**Malta připravená z aktivovaného vápenného hydrátu** se vyznačovala vyšší odolností proti mrazu, která se projevila zejména velmi nízkými úbytky hmotnosti během zmrazování. V čerstvém stavu má tato malta hutnější konzistenci a velmi dobrou zpracovatelnost. Příprava malty s pojivem z aktivovaného vápenného hydrátu je technologicky i časově náročnější, přibývá zde technologický krok aktivace vápenného hydrátu mixováním. S tímto krokem je spojena i další z nevýhod této malty, a to obtížnost zajištění konstantního poměru pojiva a plniva, z důvodu ulpívání aktivovaného vápenného hydrátu v mixéru. Její další nevýhodou jsou nižší dosažené hodnoty pevnosti v tlaku i v tahu za ohybu, které jsou s největší pravděpodobností způsobeny vyšším provzdušněním aktivovaného vápenného hydrátu.

**Malta připravená z odležené vápenné kaše** dosáhla nejvyšších pevností v tlaku ze všech zkoušených malt. Dalšími jejími výhodami je výborná zpracovatelnost v čerstvém stavu, hutnější konzistence a takřka nulová potřeba dalšího přídavku vody při samotné přípravě čerstvé malty. Z hlediska památkové péče lze považovat za jednu z hlavních výhod, že se jedná o tradiční postup přípravy vápenné malty. Nevýhody malty připravené z odležené vápenné kaše spočívají ve značném délkovém smrštění v počáteční fázi karbonatace, časové náročnosti její

přípravy, náročnosti na odbornost pracovníků stavby a nutnosti dbát na bezpečnost práce při hašení páleného vápna.

**Horká malta** dosáhla nejvyšší pevnosti v tahu za ohybu ze všech zkoušených druhů vápenné malty a nejmenšího délkového smrštění. Podobně jako u malty připravené z odležené vápenné kaše se jedná o tradiční postup přípravy vápenné malty. Nevýhodou horké malty je zejména velmi dlouhá fáze tuhnutí a pomalý nárůst počátečních pevností, náročnost na čas a odbornost pracovníků na stavbě, dále pak vyšší spotřeba vody při velmi hutné konzistenci čerstvé malty, která je způsobena nižším podílem pojiva v maltě. Poměr pojiva k písku byl zvolen podle starých receptur. Při přípravě horké malty je opět nutné dbát na bezpečnost práce při hašení kusového páleného vápna.

Všechny použité formy stavebního vápna mají své výhody i nevýhody, jak již bylo uvedeno výše. Pro obnovu historických objektů lze však doporučit tradiční pojivo, kterým je odležená vápenná kaše. Vysokoprocentní vápenný hydrát CL-90 není tradičním pojivem, lze jej však použít v případech, kdy není k dispozici vápenná kaše. Zde je však nutno počítat s horší zpracovatelností malty, nebo, použítje-li se větší množství vody, s horšími mechanickými vlastnostmi malty. Aktivovaný vápenný hydrát v maltě způsobuje vyšší odolnost proti mrazu, lze jej tedy použít při zvýšeném namáhání mrazem. Horká malta je velmi specifická svým postupem přípravy a předpokládá se, že bude použita na objektech, kde je třeba provést obnovu původní horké malty. Volba pojiva a složení závisí na podmínkách a účelu využití daného objektu a zejména složení původní malty. Při obnově památkově chráněných historických budov je vždy nutné respektovat výsledky provedených stavebně technických průzkumů a složení vápenné malty navrhovat tak, aby se její vlastnosti blížily co nejvíce současným vlastnostem původní malty.

Výsledky prováděných zkoušek jednoznačně potvrdily pozitivní vliv odležení vápenné malty na její vlastnosti. Vliv odležení je patrný zejména u pevnosti v tlaku, kde rozdíl v pevnosti mezi maltou odleženou a neodleženou připravenou se stejným pojivem činí až 0,5 MPa. Důvod vyšší pevnosti odležených malt je třeba hledat v jejich mikrostruktuře, která je z velké části tvořena klencovými srostlými krystaly kalcitu. V mikrostruktuře odležené malty připravené z odležené vápenné kaše je možno identifikovat velké množství vyvinutých krystalů kalcitu, které jsou příčinou nejvyšší pevnosti v tlaku ze všech zkoušených malt. Odležení vápenné malty má pozitivní vliv také na zpracovatelnost čerstvé vápenné malty.

Z výsledků provedených zkoušek vyplývá, že použití tradičních postupů přípravy vápenných malt je při obnově historických objektů žádoucí a požadavky pracovníků památkové péče na aplikaci vápenných technologií jsou oprávněné. Používání tradičních postupů v praxi je však náročné na čas, odbornost a zkušenosti pracovníků na stavbě. Důležité je tradiční postupy opravdu dodržet, včetně doby odležení, aby bylo dosaženo co nejlepších vlastností připravované vápenné malty.

# 11 Seznamy

## 11.1 Použitá literatura

- [1] HOŠEK, J., MUK, J. *Omítky historických staveb*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1990. 143 s. ISBN 80-04-23349-x.
- [2] ROSELL, J. R., HAURIE, L., NAVARRO, A., CANTALAPIEDRA, I. R. Influence of traditional slaking process on the lime putty characteristics. In *Construction and Building Materials*. 2014, vol. 55, p. 423 – 430.
- [3] *Vápenné omítky v památkové péči. Směrnice WTA 2-7-01/D*. Praha: WTA CZ, 2008. ISBN 978-80-01986-2. 20 s.
- [4] MICHONOVÁ, D. Tradiční postupy přípravy vápenných malt. In *Tradiční vápenné technologie. Sborník přednášek*. Ostrava: NPÚ, ú.o.p. Ostrava, 2009, s. 15 - 23. ISBN 978-80-85034-50-9.
- [5] MAXOVÁ, I., PACÁKOVÁ, M., NOVÁK, P., DĚD, J., VOJTĚCH, D., KUČEROVÁ, I., KOPECKÁ, I. *Péče o architektonické dědictví. Sborník prací II. díl*. Praha: Idea Servis, 2008, 170 s.. ISBN 978-80-85970-62-3.
- [6] KOLOUCHOVÁ, E. *Materiály pro obnovu omítek historických staveb*. Brno, 2013. 60 s., 29 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie. Vedoucí práce prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc.
- [7] ČSN EN 459-1 Stavební vápno – Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody. Platnost od 1. 4. 2011.
- [8] ČSN EN 459-2 Stavební vápno – Část 2: Zkušební metody. Platnost od 1. 4. 2011.
- [9] ROVNANÍKOVÁ, P. *Omítky*. Praha: Společnost pro technologie ochrany památek, 2002. ISBN 80-86657-00-0. 89 s.
- [10] VITRUVIUS POLLIO, M. *Deset knih o architektuře*. Praha: Arista a Baset, 2001, 438 stran. ISBN ARISTA 80-86410-23-4 a ISBN BASET 80-86223-49-3.
- [11] MICHONOVÁ, D. *Vliv přírodních vláknitých přísadků na chování a vlastnosti vápenných malt*. [online]. Brno: FAST VUT v Brně, 2003 [cit. 4. 10. 2014]. Dostupný z: <http://www.fce.vutbr.cz/veda/dk2003texty/pdf/4-2/rp/michoinova.pdf>
- [12] ČSN P 730610-2000: Hydroizolace staveb – Sanace vlhkého zdiva – Základní ustanovení. Platnost od 1. 12. 2000.
- [13] *Posuzování zdiva – diagnostika zdiva*. Směrnice WTA 4-5-99. 1. vydání. Praha: Vědeckotechnická společnost pro sanace staveb a péči o památky – WTA CZ, 2007. 20 s. ISBN 978-80-02-01986-2.
- [14] *Sanační omítkové systémy*. Směrnice WTA 2-9-04. 1. vydání. Praha: Vědeckotechnická společnost pro sanace staveb a péči o památky – WTA CZ, 2008. 20 s. ISBN 978-80-0202103-2
- [15] ROVNANÍKOVÁ, P. Vápno - historie, výroba, vlastnosti. In *Tradiční vápenné technologie. Sborník přednášek*. Ostrava: NPÚ, ú.o.p. Ostrava, 2009, s. 5 - 14. ISBN 978-80-85034-50-9.
- [16] MICHONOVÁ, D. *Příprava vápenných malt na bázi vzdušného vápna*. Památkový postup. Praha: NPÚ, ú.o.p. Praha, 2013, 10 s.



- [17] MĚŠŤAN, R. *Omítkářské a štukatérské práce*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1988. 304 s.
- [18] CAZALLA, O., RODRIGUEZ-NAVARRO, C., SEBASTIAN, E., CULTRONE, G. Aging of Lime Putty: Effects on Traditional Lime Mortar Carbonation. In *Journal of American Ceramic Society*. 2000, vol. 83, no. 5, p. 1070 - 1076.
- [19] DEI, L., SALVADORI, B. Nanotechnology in cultural heritage conservation: nanometric slaked lime saves architectonic and artistic surfaces from decay. In *Journal of Cultural Heritage*. 2006, vol. 7, p. 110 – 115.
- [20] ELERT, K., RODRIGUEZ-NAVARRO, C., PARDO, E. S., HANSEN, E., CAZALLA, O. Lime Mortar for the Conservation of Historic Buildings. In *Studies in Conservation*. 2002, vol. 47, no. 1, p. 62 - 75.
- [21] ČSN EN 1015-3 Zkušební metody malt pro zdivo – Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku). Platnost od 1. 3. 2000.
- [22] *Produkty – Vápenný hydrát* [online]. [cit. 25. 11. 2014]. Dostupný z: <http://www.carmeuse.cz/page.asp?langue=EN&id=78>
- [23] *Produkty – Kusové vápno* [online]. [cit. 25. 11. 2014]. Dostupný z: <http://www.carmeuse.cz/page.asp?langue=EN&id=81>
- [24] *Těžené kamenivo* [online]. 2012, [cit. 25. 11. 2014]. Dostupný z: [http://www.heidelbergcement.com/cz/cs/country/produkty/kamenivo/tezene\\_kamenivo.htm](http://www.heidelbergcement.com/cz/cs/country/produkty/kamenivo/tezene_kamenivo.htm)
- [25] *Písek - produkty* [online]. 2010, [cit. 25. 11. 2014]. Dostupný z: <http://www.sterkopisek.cz/pisek-produkt.html>
- [26] ČSN EN 13139 Kamenivo pro malty. Platnost od 1. 5. 2002.
- [27] ČSN EN 1008 Záměsová voda do betonu – Specifikace odběru vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu. Platnost od 1. 5. 2003.
- [28] ČSN EN 1015-2 Zkušební metody malt pro zdivo – Část 2: Odběr základních vzorků malt a příprava zkušebních malt. Platnost od 1. 10. 1999.
- [29] ČSN EN 1015-11 Zkušební metody malt pro zdivo – Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku. Platnost od 1. 6. 2000.
- [30] ČSN 72 2452 Zkouška mrazuvzdornosti malty. Platnost od 1. 1. 1970.
- [31] ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Síťový rozbor. Platnost od 1. 6. 2012.
- [32] Mezinárodní charta o zachování a restaurování památek a sídel. Benátky, 1964.
- [33] CHROUST, F., KVASNIČKA, I., KVASNIČKOVÁ, R., M. *Omítky*. Praha: SNTL, 1959, 188 stran.
- [34] FARIA, P., HENRIQUES, F., RATO, V. Comparative evaluation of lime mortars for architectural conservation. In *Journal of Cultural Heritage*. 2008, vol. 9, p. 338 - 346.
- [35] LANAS, J., ALVAREZ, J. I. Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behavior. In *Cement and Concrete Research*. 2003, vol. 33, p. 1867 - 1876.

[36] PAIVA, H., VELOSA, A., VEIGA, R., FERREIRA, V. M. Effect of maturation time on the fresh and hardened properties of an air lime mortar. In *Cement and Concrete Research*. 2010, vol. 40, p. 447 – 451.

[37] MASCOLO, G., MASCOLO, M. C., VITALE, A., MARINO, O. Microstructure evolution of lime putty upon aging. In *Journal of Crystal growth*. 2010, vol. 312, p. 2363 - 2368.

[38] MARGALLA, G., VEIGA, R., SILVA, A. S., DE BRITO, J. Traditional methods of mortar preparation: The hot lime mix method. In *Cement & Concrete Composites*. 2011, vol. 33, p. 796 - 804.

## 11.2 Seznam použitých chemických značek a vzorců

CaO	oxid vápenatý
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý
CaCO <sub>3</sub>	uhličitan vápenatý; kalcit
Ca(OH) <sub>2</sub>	hydroxid vápenatý; portlandit, hašené vápno
SiO <sub>2</sub>	oxid křemičitý
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	oxid hlinitý
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	oxid železitý
CSH	hydratované křemičitany vápenaté
CAH	hydratované hlinitany vápenaté
HCl	kyselina chlorovodíková
Ba(OH) <sub>2</sub>	hydroxid barnatý
CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	síran vápenatý dihydrát; sádrovec
BaSO <sub>4</sub>	síran barnatý
BaCO <sub>3</sub>	uhličitan barnatý
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	uhličitan amonný
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	síran amonný
CaCl <sub>2</sub>	chlorid vápenatý
NaOH	hydroxid sodný
MgO	oxid hořečnatý
SO <sub>3</sub>	oxid sírový
R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	oxidy kovů v oxidačním stupni R <sup>+III</sup>

## 11.3 Seznam použitých zkratk a značek

SOMS	suché omítkové a maltové směsi
NHL	přirozené hydraulické vápno (angl. natural hydraulic lime)

H <sub>M</sub>	hydraulický modul, [-]
PP	polypropylen
XRD	rentgenová difrakční analýza
DTA	diferenční termická analýza
DSC	diferenční kompenzační kalorimetrie (angl. differential scanning calorimetry)
FTIR	infračervená spektroskopie (angl. Fourier transform infrared spectroscopy)
RS	Ramanova spektroskopie
SEM	rastrovací elektronový mikroskop (angl. scanning electron microscope)

## 11.4 Seznam použitých fyzikálních symbolů

RH	[%]	relativní vlhkost vzduchu
w	[-]	vodní součinitel
m <sub>voda</sub>	[g]	hmotnost vody
m <sub>vápno</sub>	[g]	hmotnost vápna (pojiva)
T	[°C]	teplota
t	[s, min]	čas
R <sub>f</sub>	[MPa, N/mm <sup>2</sup> ]	pevnost v tahu za ohybu
F <sub>f</sub>	[N, kN]	lomové zatížení ve středu zkušebního vzorku
l'	[mm]	vzdálenost válcových podpěr, l' = 100 mm
b	[mm]	šířka zkušebního vzorku
h	[mm]	výška zkušebního vzorku
R <sub>c</sub>	[MPa, N/mm <sup>2</sup> ]	pevnost v tlaku
F <sub>c</sub>	[N, kN]	nejvyšší tlakové zatížení při porušení
A	[mm <sup>2</sup> ]	plocha pomocných destiček, A = 1600 mm <sup>2</sup>
m	[g]	hmotnost zkušebního vzorku
l	[mm]	délka zkušebního vzorku
N	[%]	nasákavost
m <sub>n</sub>	[g]	hmotnost vzorku nasyceného vodou
m <sub>s</sub>	[g]	hmotnost vysušeného vzorku
S <sub>d</sub>	[%]	délkové smrštění
Δl	[mm]	rozdíl délek
l <sub>0</sub>	[mm]	původní délka, l <sub>0</sub> = 160 mm
ΔV	[mm <sup>3</sup> ]	rozdíl objemu
V <sub>0</sub>	[mm <sup>3</sup> ]	původní objem, V <sub>0</sub> = 256 · 10 <sup>3</sup> mm <sup>3</sup>

V	[mm <sup>3</sup> ]	objem zkušebního vzorku
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	objemová hmotnost ztvrdlé malty
$\Delta m$	[g]	úbytek hmotnosti v průběhu zmrazovacích cyklů
$m_0$	[g]	hmotnost zkušebního vzorku před začátkem zmrazovacích cyklů
$m_1$	[g]	hmotnost zkušebního vzorku po ukončení zmrazovacích cyklů
KM <sub>f</sub>	[-]	součinitel mrazuvzdornosti

## 11.5 Seznam obrázků

Obr. 1 - Rozdělení stavebního vápna .....	9
Obr. 2 - Vápenný cyklus .....	10
Obr. 3 - Tradiční metody hašení vápna: a, b – přepouštění, c, d – Grande Acqua, e, f – namáčení [2].....	16
Obr. 4 - Schéma struktury hydrogelu.....	17
Obr. 5 - SEM Snímky vápenné kaše s různou dobou odležení: a – ihned po vyhašení, b – po 2 měsících odležení, c – po 14 měsících odležení, d – detail snímku kaše po 14 měsících odležení [20].....	18
Obr. 6 - Schematická ilustrace rozpadu šestibokého krystalu portlanditu na menší, ploché krystalky [37].....	19
Obr. 7 - Postup karbonatace: a – neodležená vápenná malta, b – odležená vápenná malta; oba vzorky byly zkoušeny fenolftaleinem [20].....	19
Obr. 8 - Srovnání omítky neošetřené (nad bílou linkou) a ošetřené disperzí nanočástic Ca(OH) <sub>2</sub> - SEM snímek [19] .....	27
Obr. 9 - Stav fresky před aplikací (vpravo od čárkované čáry) a po aplikaci disperze nanočástic Ca(OH) <sub>2</sub> [19].....	28
Obr. 10 - Křivka zrnitosti normového písku frakce PG 1 .....	35
Obr. 11 - Křivka zrnitosti normového písku frakce PG 2.....	35
Obr. 12 - Křivka zrnitosti normového písku frakce PG 3.....	36
Obr. 13 - Křivka zrnitosti omítkového písku .....	36
Obr. 14 - Křivka zrnitosti písku Bratčice.....	37
Obr. 15 - Suroviny pro přípravu horké malty: kusové pálené vápno a omítkový písek .....	40
Obr. 16 - Při přípravě horké malty se vrstvy písku střídají s vrstvami kusového vápna .....	40
Obr. 17 - Konzistence čerstvé malty připravené z omítkového písku v závislosti na typu pojiva .....	45
Obr. 18 - Konzistence čerstvé malty připravené z normového písku v závislosti na typu pojiva .....	46

Obr. 19 - Konzistence čerstvé malty v závislosti na druhu pojiva pro různé druhy písku (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, HM - horká malta) .....	46
Obr. 20 - Vývoj pevnosti v tahu za ohybu $R_f$ odležené a neodležené malty připravené z vápenného hydrátu a omítkového písku .....	49
Obr. 21 - Vývoj pevnosti v tlaku $R_c$ odležené a neodležené malty připravené z vápenného hydrátu a omítkového písku .....	49
Obr. 22 - Vývoj pevnosti v tahu za ohybu $R_f$ odležené a neodležené malty připravené z aktivovaného vápenného hydrátu a omítkového písku .....	51
Obr. 23 - Vývoj pevnosti v tlaku $R_c$ odležené a neodležené malty připravené z aktivovaného vápenného hydrátu a omítkového písku .....	51
Obr. 24 - Vývoj pevnosti v tahu za ohybu $R_f$ odležené a neodležené malty připravené z vápenné kaše a omítkového písku .....	53
Obr. 25 - Vývoj pevnosti v tlaku $R_c$ odležené a neodležené malty připravené z vápenné kaše a omítkového písku .....	53
Obr. 26 - Vývoj pevnosti v tahu za ohybu $R_f$ horké malty připravené z kusového vápna a omítkového písku .....	54
Obr. 27 - Vývoj pevnosti v tlaku $R_c$ horké malty připravené z kusového vápna a omítkového písku .....	55
Obr. 28 - Vývoj pevnosti v tahu za ohybu $R_f$ odležené a neodležené malty připravené z vápenného hydrátu a normového písku .....	56
Obr. 29 - Vývoj pevnosti v tlaku $R_c$ odležené a neodležené malty připravené z vápenného hydrátu a normového písku .....	57
Obr. 30 - Vývoj pevnosti v tahu za ohybu $R_f$ odležené a neodležené malty připravené z aktivovaného vápenného hydrátu a normového písku .....	58
Obr. 31 - Vývoj pevnosti v tlaku $R_c$ odležené a neodležené malty připravené z aktivovaného vápenného hydrátu a normového písku .....	59
Obr. 32 - Vývoj pevnosti v tahu za ohybu $R_f$ odležené a neodležené malty připravené z vápenné kaše a normového písku .....	60
Obr. 33 - Vývoj pevnosti v tlaku $R_c$ odležené a neodležené malty připravené z vápenné kaše a normového písku .....	61
Obr. 34 - Srovnání pevnosti v tahu za ohybu $R_f$ po 7 dnech zrání pro různé druhy vápenné malty (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše) .....	62
Obr. 35 - Srovnání pevnosti v tahu za ohybu $R_f$ po 28 dnech zrání pro různé druhy vápenné malty (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM - horká malta) .....	62

- Obr. 36 - Srovnání pevnosti v tahu za ohybu  $R_f$  po 60 dnech zrání pro různé druhy vápenné malty (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM - horká malta).....63
- Obr. 37 - Srovnání pevnosti v tahu za ohybu  $R_f$  po 90 dnech zrání pro různé druhy vápenné malty (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM - horká malta).....63
- Obr. 38 - Srovnání pevnosti v tlaku  $R_c$  po 7 dnech zrání pro různé druhy vápenné malty (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše) .....64
- Obr. 39 - Srovnání pevnosti v tlaku  $R_c$  po 28 dnech zrání pro různé druhy vápenné malty (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM - horká malta).....64
- Obr. 40 - Srovnání pevnosti v tlaku  $R_c$  po 60 dnech zrání pro různé druhy vápenné malty (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM - horká malta).....65
- Obr. 41 - Srovnání pevnosti v tlaku  $R_c$  po 90 dnech zrání pro různé druhy vápenné malty (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM - horká malta).....65
- Obr. 42 - Srovnání nasákavosti  $N$  pro různé druhy vápenné malty .....67
- Obr. 43 - Vývoj délkového smrštění  $S_d$  v čase pro různé druhy vápenné malty připravené z normového písku (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše).....74
- Obr. 44 - Vývoj objemového smrštění  $S_o$  v čase pro různé druhy vápenné malty připravené z normového písku (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše).....74
- Obr. 45 - Srovnání délkového smrštění  $S_d$  po 7 dnech pro různé druhy vápenné malty s různými druhy písku (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše).....75

- Obr. 46 - Srovnání délkového smrštění  $S_d$  po 28 dnech pro různé druhy vápenné malty s různými druhy písku (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM – horká malta) .....75
- Obr. 47 - Srovnání délkového smrštění  $S_d$  po 60 dnech pro různé druhy vápenné malty s různými druhy písku (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM – horká malta) .....76
- Obr. 48 - Srovnání délkového smrštění  $S_d$  po 90 dnech pro různé druhy vápenné malty s omítkovým pískem (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM – horká malta) .....76
- Obr. 49 - Srovnání objemového smrštění  $S_o$  po 7 dnech pro různé druhy vápenné malty s různými druhy písku (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM – horká malta).....77
- Obr. 50 - Srovnání objemového smrštění  $S_o$  po 28 dnech pro různé druhy vápenné malty s různými druhy písku (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM – horká malta).....77
- Obr. 51 - Srovnání objemového smrštění  $S_o$  po 60 dnech pro různé druhy vápenné malty s různými druhy písku (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM – horká malta).....78
- Obr. 52 - Srovnání objemového smrštění  $S_o$  po 90 dnech pro různé druhy vápenné malty s omítkovým pískem (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM – horká malta).....78
- Obr. 53 - Srovnání objemové hmotnosti zatvrdlé malty  $\rho$  po 7 dnech zrání pro různé druhy vápenné malty připravené s různými druhy písku (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM – horká malta).....79

Obr. 54 - Srovnání objemové hmotnosti zatvrdlé malty $\rho$ po 28 dnech zrání pro různé druhy vápenné malty připravené s různými druhy písku (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM – horká malta).....	79
Obr. 55 - Srovnání objemové hmotnosti zatvrdlé malty $\rho$ po 60 dnech zrání pro různé druhy vápenné malty připravené s různými druhy písku (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM – horká malta).....	80
Obr. 56 - Srovnání objemové hmotnosti zatvrdlé malty $\rho$ po 90 dnech zrání pro různé druhy vápenné malty (VHN - neodležená malta z vápenného hydrátu, VHO - odležená malta z vápenného hydrátu, AHN - neodležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, AHO - odležená malta z aktivovaného vápenného hydrátu, VKN - neodležená malta z vápenné kaše, VKO - odležená malta z vápenné kaše, HM – horká malta) .....	80
Obr. 57 - Hodnocení mrazuvzdornosti vápenné malty úbytkem hmotnosti $\Delta m$ .....	82
Obr. 58 - Zkušební vzorky neodležené malty připravené z vápenného hydrátu a omítkového písku po 2 zmrazovacích cyklech .....	84
Obr. 59 - Zkušební vzorky odležené malty připravené z vápenného hydrátu a omítkového písku po 24 hodinách uložení ve vodě.....	84
Obr. 60 - Zkušební vzorky neodležené malty připravené z aktivovaného vápenného hydrátu a omítkového písku po 1 zmrazovacím cyklu.....	84
Obr. 61 - Zkušební vzorky odležené malty připravené z aktivovaného vápenného hydrátu a omítkového písku po 1 zmrazovacím cyklu .....	84
Obr. 62 - Zkušební vzorky neodležené malty připravené z vápenné kaše a omítkového písku po 1 zmrazovacím cyklu .....	84
Obr. 63 - Zkušební vzorky odležené malty připravené z vápenné kaše a omítkového písku po 1 zmrazovacím cyklu .....	84
Obr. 64 - Zkušební vzorky horké malty připravené z kusového vápna a omítkového písku po 1 zmrazovacím cyklu .....	85
Obr. 65 - Mikrostruktura neodležené malty připravené z vápenného hydrátu a omítkového písku při zvětšení 5000x .....	86
Obr. 66 - Mikrostruktura odležené malty připravené z vápenného hydrátu a omítkového písku při zvětšení 5000x .....	86
Obr. 67 - Mikrostruktura neodležené malty připravené z aktivovaného vápenného hydrátu a omítkového písku při zvětšení 5000x .....	86
Obr. 68 - Mikrostruktura odležené malty připravené z aktivovaného vápenného hydrátu a omítkového písku při zvětšení 5000x .....	86
Obr. 69 - Mikrostruktura neodležené malty připravené z vápenné kaše a omítkového písku při zvětšení 5000x.....	87
Obr. 70 - Mikrostruktura odležené malty připravené z vápenné kaše a omítkového písku při zvětšení 5000x.....	87



Obr. 71 - Mikrostruktura odležené malty připravené z vápenné kaše a omítkového písku při zvětšení 10000x.....	87
Obr. 72 - Mikrostruktura neodležené horké malty připravené z kusového vápna a omítkového písku při zvětšení 5000x .....	87
Obr. 73 - Mikrostruktura neodležené malty připravené z vápenného hydrátu a normového písku při zvětšení 5000x.....	88
Obr. 74 - Mikrostruktura odležené malty připravené z vápenného hydrátu a normového písku při zvětšení 5000x.....	88
Obr. 75 - Mikrostruktura neodležené malty připravené z aktivovaného vápenného hydrátu a normového písku při zvětšení 5000x .....	88
Obr. 76 - Mikrostruktura odležené malty připravené z aktivovaného vápenného hydrátu a normového písku při zvětšení 5000x .....	88
Obr. 77 - Mikrostruktura neodležené malty připravené z vápenné kaše a normového písku při zvětšení 5000x.....	89
Obr. 78 - Mikrostruktura odležené malty připravené z vápenné kaše a normového písku při zvětšení 5000x.....	89
Obr. 79 - Mikrostruktura odležené malty připravené z vápenné kaše a normového písku při zvětšení 10000x.....	89

## 11.6 Seznam tabulek

Tab 1. Mineralogické složení vápenné kaše po různé době odležení [37].....	17
Tab 2. Technické parametry vápenného hydrátu CL 90-S z technického listu [23]31	
Tab 3. Technické parametry kusového bílého vápna CL 90-Q z technického listu [24] .....	32
Tab 4. Sítový rozbor normového písku frakce PG 1 .....	33
Tab 5. Sítový rozbor normového písku frakce PG 2 .....	33
Tab 6. Sítový rozbor normového písku frakce PG 3 .....	33
Tab 7. Sítový rozbor omítkového písku .....	34
Tab 8. Sítový rozbor písku Bratčice .....	34
Tab 9. Přehled připravovaných variant vápenné malty .....	38
Tab 10. Receptura pro přípravu jedné trojformy zkušebních těles o rozměrech 40 x 40 x 160 mm .....	39
Tab 11. Receptura pro přípravu s použitím vápenné kaše .....	39
Tab 12. Receptura pro přípravu 10 trojforem zkušebních těles o rozměrech 40 x 40 x 160 mm z horké malty .....	40
Tab 13. Konzistence vápenných malt připravených z omítkového písku.....	44
Tab 14. Konzistence vápenných malt připravených z alternativních písků (normový písek, písek Bratčice) .....	45
Tab 15. Pevnost v tahu za ohybu $R_f$ a pevnost v tlaku $R_c$ neodležené malty připravené z vápenného hydrátu a omítkového písku .....	48

Tab 16. Pevnost v tahu za ohybu $R_f$ a pevnost v tlaku $R_c$ odležené malty připravené z vápenného hydrátu a omítkového písku .....	48
Tab 17. Pevnost v tahu za ohybu $R_f$ a pevnost v tlaku $R_c$ neodležené malty připravené z aktivovaného vápenného hydrátu a omítkového písku .....	50
Tab 18. Pevnost v tahu za ohybu $R_f$ a pevnost v tlaku $R_c$ odležené malty připravené z aktivovaného vápenného hydrátu a omítkového písku .....	50
Tab 19. Pevnost v tahu za ohybu $R_f$ a pevnost v tlaku $R_c$ neodležené malty připravené z vápenné kaše a omítkového písku .....	52
Tab 20. Pevnost v tahu za ohybu $R_f$ a pevnost v tlaku $R_c$ odležené malty připravené z vápenné kaše a omítkového písku .....	52
Tab 21. Pevnost v tahu za ohybu $R_f$ a pevnost v tlaku $R_c$ horké malty připravené z kusového vápna a omítkového písku .....	54
Tab 22. Pevnost v tahu za ohybu $R_f$ a pevnost v tlaku $R_c$ neodležené malty připravené z vápenného hydrátu a normového písku.....	55
Tab 23. Pevnost v tahu za ohybu $R_f$ a pevnost v tlaku $R_c$ odležené malty připravené z vápenného hydrátu a normového písku .....	56
Tab 24. Pevnost v tahu za ohybu $R_f$ a pevnost v tlaku $R_c$ neodležené malty připravené z aktivovaného vápenného hydrátu a normového písku.....	57
Tab 25. Pevnost v tahu za ohybu $R_f$ a pevnost v tlaku $R_c$ odležené malty připravené z aktivovaného vápenného hydrátu a normového písku .....	58
Tab 26. Pevnost v tahu za ohybu $R_f$ a pevnost v tlaku $R_c$ neodležené malty připravené z vápenné kaše a normového písku .....	59
Tab 27. Pevnost v tahu za ohybu $R_f$ a pevnost v tlaku $R_c$ odležené malty připravené z vápenné kaše a normového písku.....	60
Tab 28. Pevnost v tahu za ohybu $R_f$ a pevnost v tlaku $R_c$ neodležené malty připravené z vápenného hydrátu a písku Bratčice.....	61
Tab 29. Stanovení nasákavosti zkoušených druhů vápenné malty .....	66
Tab 30. Vývoj objemové hmotnosti ztvrdlé malty $\rho$ , délkového smrštění $S_d$ a objemového smrštění $S_o$ v čase pro maltu odleženou a neodleženou připravenou z vápenného hydrátu a omítkového písku .....	68
Tab 31. Vývoj objemové hmotnosti ztvrdlé malty $\rho$ , délkového smrštění $S_d$ a objemového smrštění $S_o$ v čase pro maltu odleženou a neodleženou připravenou z aktivovaného vápenného hydrátu a omítkového písku .....	69
Tab 32. Vývoj objemové hmotnosti ztvrdlé malty $\rho$ , délkového smrštění $S_d$ a objemového smrštění $S_o$ v čase pro maltu odleženou a neodleženou připravenou z vápenné kaše a omítkového písku .....	70
Tab 33. Vývoj objemové hmotnosti ztvrdlé malty $\rho$ , délkového smrštění $S_d$ a objemového smrštění $S_o$ v čase pro horkou připravenou z kusového vápna a omítkového písku .....	71
Tab 34. Vývoj objemové hmotnosti ztvrdlé malty $\rho$ , délkového smrštění $S_d$ a objemového smrštění $S_o$ v čase pro maltu odleženou a neodleženou připravenou z vápenného hydrátu a normového písku .....	71

Tab 35. Vývoj objemové hmotnosti ztvrdlé malty $\rho$ , délkového smrštění $S_d$ a objemového smrštění $S_o$ v čase pro maltu odleženou a neodleženou připravenou z aktivovaného vápenného hydrátu a normového písku .....	72
Tab 36. Vývoj objemové hmotnosti ztvrdlé malty $\rho$ , délkového smrštění $S_d$ a objemového smrštění $S_o$ v čase pro maltu odleženou a neodleženou připravenou z vápenné kaše a normového písku.....	72
Tab 37. Vývoj objemové hmotnosti ztvrdlé malty $\rho$ , délkového smrštění $S_d$ a objemového smrštění $S_o$ v čase pro maltu odleženou a neodleženou připravenou z vápenného hydrátu a bratčického písku .....	73
Tab 38. Hodnocení mrazuvzdornosti úbytkem hmotnosti $\Delta m$ .....	82
Tab 39. Hodnocení mrazuvzdornosti součinitelem mrazuvzdornosti $KM_f$ .....	83