



Univerzita  
Pardubice  
Fakulta  
restaurování

**UNIVERZITA PARDUBICE**

UNIVERSITY OF PARDUBICE

**FAKULTA RESTAUROVÁNÍ**

FACULTY OF RESTORATION

**MODIFIKOVANÉ VÁPENNÉ OMÍTKY SE ZVÝŠENOU  
POROZITOU**

MODIFIED LIME MORTARS WITH INCREASED POROSITY

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

BcA. JOSEF ČERVINKA

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Doc. JAROSLAV J. ALT ak. mal.

Litomyšl 2010

---

## ABSTRAKT

Diplomová práce studuje vápenné malty modifikované porézním kamenivem. Cílem práce je nalézt vhodnou maltu se zvýšenou porozitou a příznivými mechanickými vlastnostmi, která by byla schopna lépe odolávat poškození vodorozpustnými solemi než malty s klasickým kamenivem. Pro srovnávání vlastností byla zvolena vápenopucolánová malta s klasickým kamenivem – křemenným pískem. Zkoumána byla následující porézní kameniva: německá pemza, řecká pemza, liapor, perlit a zeolit.

Vliv porézního kameniva byl zkoušen postupnou náhradou křemenného kameniva-písku v objemových poměrech písek : porézní kamenivo = 2:1, 1:1, 1:2 a 0:1. Vápenná malta byla modifikována v hmotnostním poměru vápenného hydrátu ku metakaolínu 1:0,25. Hmotnostní poměr pojiva ke kamenivu byl 1:3.

U připravených vzorků zatvrdlých malt byly zkoumány jejich pevnosti v tlaku, v tahu za ohybu, celková nasákavost za normálního tlaku, distribuce a celkový objem pórů, REM, optická mikroskopie a propustnost pro transport kapalné vody.

## KLÍČOVÁ SLOVA

vápenná malta, vodorozpustné soli, porézní kamenivo, pemza, perlit, zeolit, liapor, obnova stavebních památek



---

## **ABSTRACT**

The thesis studies lime mortars modified with porous aggregates. This thesis aims to find suitable mortar with increased porosity and favorable mechanical qualities, which would better withstand the damage caused by water-soluble salts compared to the mortar with classic aggregate. In order to compare the properties of the mortars, lime-pozzolana mortar with classic aggregate - silica sand has been chosen. The following porous stones were examined: German and Greek pumice, liapor, perlite and zeolite.

The effect of porous aggregates was examined by gradual replacement of silica aggregate-sand, in the volume ratios sand : porous aggregates = 2:1, 1:1, 1:2 and 0:1. Lime mortar has been modified in a weight ratio 1: 0.25 of lime hydrate to metakaolin. The weight ratio of agglutinant to aggregates was 1:3.

On the pre-hardened mortar samples the compressive strength, flexural strength, the total absorption at normal pressure distribution and total pore volume, SEM, optical microscopy, permeability for liquid water transport have been examined.

## **KEYWORDS**

lime mortar, water-soluble salts, porous aggregates, pumice, perlite, zeolite, liapor, restoration of monuments

---

ČERVINKA, J.: *Modifikované vápenné omítky se zvýšenou porozitou*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Fakulta restaurování, 2010. 108 s. Vedoucí diplomové práce Prof. RNDr. Pavla Rovnaníkové, CSc.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Diplomová práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty restaurování UPce a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího diplomové práce a děkana FR UPce.

.....  
podpis diplomanta

## Poděkování:

Děkuji vedoucí diplomové práce Prof. RNDr. Pavle Rovnaníkové, CSc., Ing. Karolu Bayerovi a Ing. BcA. Evě Červinkové za cenné rady a praktické připomínky během realizace této diplomové práce.

---

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>TEORETICKÁ ČÁST</b>	<b>9</b>
<b>2.1</b>	<b>Vápenné malty</b>	<b>9</b>
2.1.1	Vápenné malty modifikované pucolány	9
2.1.2	Vápno	10
<b>2.2</b>	<b>Vodorozpustné soli</b>	<b>10</b>
2.2.1	Vlastnosti a druhy vodorozpustných solí na stavbách	11
2.2.2	Soli latentně přítomné	14
2.2.3	Soli vzniklé chemickou korozí	14
2.2.4	Soli transportované do materiálu vlhkostí	14
2.2.5	Soli biologického původu	15
2.2.6	Soli vzniklé důsledkem předchozích oprav	15
<b>2.3</b>	<b>Poškození a jeho mechanismy způsobené vlivem vodorozpustných solí</b>	<b>15</b>
2.3.1	Krystalizace vodorozpustných solí	16
2.3.2	Rekrystalizace s tvorbou hydrátů solí	17
2.3.3	Hygroskopická vlhkost	18
<b>2.4</b>	<b>Možnosti obnovy omítek na objektech poškozených vodorozpustnými solemi</b>	<b>18</b>
2.4.1	Mechanické odstranění	18
2.4.2	Extrakce vodných roztoků solí	19
2.4.3	Fyzikální a fyzikálně chemické principy odsolování	19
2.4.4	Obětované omítky a odsolovací zábaly	20
2.4.5	Odsolování za pomoci vakua	21
2.4.6	Chemická stabilizace	21
2.4.7	Bakteriální působení	22
2.4.8	Sanační omítky	22
2.4.9	Omítky blokující soli	22
2.4.10	Omítky transportující soli	23
<b>3</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b>	<b>24</b>
3.1.1	Vápno	24
3.1.2	Kamenivo	24
3.1.3	Příměsi	32
<b>3.2</b>	<b>Složení zkušebních směsí</b>	<b>33</b>
<b>3.3</b>	<b>Příprava zkušebních těles</b>	<b>35</b>
<b>3.4</b>	<b>Použité zkušební metody</b>	<b>35</b>
3.4.1	Stanovení pevnosti v tahu za ohybu	35
3.4.2	Stanovení pevnosti v tlaku	36
3.4.3	Nasákavost za normálního tlaku po 48 hodinách	37
3.4.4	Stanovení objemové hmotnosti	38
3.4.5	Rtuťová porozimetrie	38
3.4.6	Elektronová mikroskopie (REM)	39
3.4.7	Optická mikroskopie	40
3.4.8	Propustnost pro transport vody	40
3.4.9	Stanovení obsahu vodorozpustných solí, UV/VIS spektrofotometrie	40
<b>4</b>	<b>VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ</b>	<b>42</b>
<b>4.1</b>	<b>Stanovení přítomnosti vodorozpustných solí v použitém kamenivu</b>	<b>42</b>
<b>4.2</b>	<b>Malty s liaporem</b>	<b>43</b>
4.2.1	Objemová hmotnost po 90 dnech	43
4.2.2	Pevnost v tahu za ohybu	44
4.2.3	Pevnost v tlaku	45
4.2.4	Nasákavost za normálního tlaku po 48 hodinách	46

---

4.2.5	Rtuťová porozimetrie	47
4.2.6	Propustnost pro transport vody	48
<b>4.3</b>	<b>Malty s perlitem</b>	<b>49</b>
4.3.1	Objemová hmotnost po 90 dnech	49
4.3.2	Pevnost v tahu za ohybu	50
4.3.3	Pevnost v tlaku	51
4.3.4	Nasákavost za normálního tlaku po 48 hodinách	52
4.3.5	Rtuťová porozimetrie	53
4.3.6	Propustnost pro transport vody	54
<b>4.4</b>	<b>Malty s pemzou (lokality Řecko)</b>	<b>55</b>
4.4.1	Objemová hmotnost po 90 dnech	55
4.4.2	Pevnost v tahu za ohybu	56
4.4.3	Pevnost v tlaku	57
4.4.4	Nasákavost za normálního tlaku po 48 hodinách (lokality Řecko)	58
4.4.5	Rtuťová porozimetrie	59
4.4.6	Propustnost pro transport vody	60
<b>4.5</b>	<b>Malty s pemzou (lokality Německo-Porýní)</b>	<b>61</b>
4.5.1	Objemová hmotnost po 90 dnech	61
4.5.2	Pevnost v tahu za ohybu	62
4.5.3	Pevnost v tlaku	63
4.5.4	Nasákavost za normálního tlaku po 48 hodinách (lokality Německo-Porýní)	64
4.5.5	Rtuťová porozimetrie	65
4.5.6	Propustnost pro transport vody	66
<b>4.6</b>	<b>Malty se zeolitem</b>	<b>67</b>
4.6.1	Objemová hmotnost po 90 dnech	67
4.6.2	Pevnost v tahu za ohybu	68
4.6.3	Pevnost v tlaku	69
4.6.4	Nasákavost za normálního tlaku po 48 hodinách	70
4.6.5	Rtuťová porozimetrie	71
4.6.6	Propustnost pro transport vody	72
<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY A DISKUZE</b>	<b>73</b>
5.1.1	Objemová hmotnost po 90 dnech	73
5.1.2	Pevnost v tahu za ohybu	77
5.1.3	Pevnost v tlaku	81
5.1.4	Nasákavost za normálního tlaku po 48 hodinách	85
5.1.5	Rtuťová porozimetrie	89
5.1.6	Propustnost pro transport vody	90
5.1.7	REM, srovnání mikrostruktury maltovin s porézním kamenivem	91
5.1.8	Optická mikroskopie, srovnání výbrusů maltovin s porézním kamenivem	97
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>104</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>106</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ</b>	<b>108</b>

---

## 1 ÚVOD

Při dnešních požadavcích památkové péče a dle její metodiky narůstají nároky na obnovu stavebních památek. Kde dříve probíhaly řemeslné opravy, dnes podléhají tyto opravy režimu restaurování. Je kladen vysoký nárok na zachování autentické hmoty památek i za cenu, že budou zdokumentovány a zakryty ochrannou vrstvou, která na sebe převezme působení destrukčních vlivů. Jedná se především o hodnotné povrchové úpravy omítek (sgrafita, nástěnné malby či jiné uměleckořemeslné pojednání povrchů historických objektů). U výše popsaných objektů, pokud je jedním ze zdrojů destrukce kontaminace vodorozpustnými solemi, se používají kroky vedoucí ke snížení vlhkosti v objektu nebo přímo odsolení. Tyto kroky jsou často účinné, mají mnoho podob, ale nelze je použít u velké části objektů, které nelze izolovat od vzlínající vlhkosti, neboť svou velikostí a mírou zasolení nesplňují podmínky pro odsolování. Hraje zde roli i často neúměrná finanční náročnost zmíněných metod. V současnosti je tento problém často řešen sanačními omítkami, jejichž použití není vždy vhodné vzhledem k pevnosti, barvě a pod.

Novým řešením těchto problémů by mohly být modifikované vápenné omítky se zvýšenou odolností vůči působení vodorozpustných solí.

---

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Vápenné malty

Malty obecně jsou tradičním stavebním materiálem sloužícím ke spojování stavebních prvků, k ochraně povrchů staveb, k těsnění dutin a spár. Maltu tvoří uměle připravená plastická, lehce tvarovatelná směs pojiva, kameniva (plniva), vody a přísad. Tato směs je schopna za určitých podmínek vytvořit pevnou kompaktní hmotu. Obsah a typ pojiv, plniv, přísad a množství záměsové vody ovlivňují výslednou kvalitu a vlastnosti směsi. Výroba a používání malt se ve stavebnictví řídí ČSN EN 998-2 Specifikace malt pro zdivo, část 2: Malty pro zdění a ČSN EN 998-1, část 1: Malty pro vnitřní a vnější omítky.

Mezi nejstarší stavební pojiva malt patří vápno [1], které tvoří základní složku vápenné malty. Tradiční vápenná malta je již po staletí tvořena vzdušným hašeným vápnem, pískem a vodou. Taková malta tuhne ztrátou vody, tvrdne především karbonatací, což je reakce  $\text{CO}_2$  za vzniku  $\text{CaCO}_3$ . Hydraulická vápna tvrdnou vedle karbonatace i reakcí s vodou – hydratací. Vlastnosti vápenných malt jsou ovlivněny typem a kvalitou použitého pojiva.

Vápenné malty tvoří tradiční stavební materiál, který nalezneme téměř na všech stavebních památkách.

#### 2.1.1 Vápenné malty modifikované pucolány

Přidávání pucolánu do vápenných omítek je známo již od starověku. Obecně jsou pucolány látky schopné díky svým vlastnostem reagovat s hydroxidem vápenatým za běžných teplot a vytvářet sloučeniny odolné vodě. Pucolán je křemičitý nebo křemičito-hlinitý materiál obsahující amorfni oxid křemičitý, reaktivní formy oxidu hlinitého a bezvodé hlinitokřemičitany. Pucolány se přidávají do vápenných malt za účelem dosažení jejich hydraulických vlastností. [2]

Samostatně nejsou pucolány schopny hydraulické reakce. Jejich reaktivita s hydroxidem vápenatým závisí na velikosti zrn a druhu pucolánu, tedy na velikosti jeho reaktivního povrchu. Mezi faktory ovlivňující vlastnosti vápenopucolánové malty patří kvalita použitého vápna, reaktivita pucolánu a vnější podmínky jako jsou teplota, relativní vzdušná vlhkost, množství přítomného  $\text{CO}_2$ . Vápenopucolánové omítky mají obecně vyšší pevnost, a tím zvýšenou odolnost vůči povětrnostním podmínkám.

---

Pucolány lze rozdělit dle původu na přírodní a umělé. Mezi přírodní můžeme obecně zařadit zeminy vulkanického původu: pemzy, trasy, tufy, tufity a další. Mezi umělé patří především tepelně upravené jíly, břidlice a rychle ochlazené hutnické strusky, dále pak metakaolin, cihelná moučka, popel ze dřeva, slámy, uhlí a další přírodní i umělé materiály .

Název pro pucolány je přejat z názvu jedné z lokalit jejich výskytu v okolí města Puzzoli nedaleko Neapole. Použití pucolánových malt odolávajících dokonce i mořské vodě popisuje Vitruvius. První použití těchto malt je přisuzováno Féničanům. Pucolánové malty známe i z antického Řecka a zejména od starověkých Římanů, kteří tento materiál zdokonalili a používali jej pod názvem „římský beton“ neboli Opus cementitium.

### 2.1.2 Vápno

Vápnem obecně nazýváme některou z forem či modifikací hydroxidu nebo oxidu vápenatého. Z chemického hlediska jsou stavební vápna sloučeniny s majoritní složkou oxidu nebo hydroxidu vápenatého ( $\text{CaO}$ ,  $\text{Ca(OH)}_2$ ) a menším podílem dalších sloučenin jako jsou oxidy hořčíku ( $\text{MgO}$ ), křemíku ( $\text{SiO}_2$ ), železa ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) a hliníku ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

Podle následujících platných evropských norem v České republice ČSN EN 459-1 a 2 jsou definovány jednotlivé druhy vápen, vápenických výrobků, jejich jakostní ukazatele a metody zkoušení.

## 2.2 Vodorozpustné soli

Soli jsou po chemické stránce většinou pevné krystalické látky tvořené sloučeninami iontového charakteru. Obsahují kation a anion, takže celá sloučenina je neutrální. Jednotlivé složky mohou být organické i anorganické, jedno i víceatomové. V roztoku vedou elektrický proud. Soli lze rozdělit podle rozpustnosti do dvou skupin. První skupinu představují vodorozpustné soli a druhou soli nerozpustné. [3] Při obnově památkových objektů tvoří reálné nebezpečí pouze určitá skupina solí. Při poškozování porézních anorganických materiálů solemi je důležitým faktorem krystalizační tlak solí. Pouze ty soli, které jsou ve vodě rozpustné, jsou schopny krystalizovat, resp. rekrystalizovat, a tím poškozovat kámen, omítky nebo cihly. Mezi rozpustné typy solí vyskytujících se na stavbách patří chloridy, sírany a dusičnany. Negativní vliv nerozpustných nebo téměř nerozpustných solí je z hlediska korozních

procesů zanedbatelný. Příkladem je uhličitán vápenatý, který po chemické stránce patří mezi soli. [4]

Mezi soli, které se nejčastěji podílí na poškozování porézních anorganických materiálů, patří především sírany, chloridy a dusičnany; v menší míře se můžeme setkat s vodorozpustnými uhličitany vnesenými na stavbu lidskou činností. [5]

Výskyt jednotlivých druhů solí a jejich koncentrace závisí na typu porézního materiálu, vlhkosti, transportních vlastnostech pro kapalnou vodu, na způsobu kontaminace a na dalších faktorech situování objektu. Různé materiály mají i různou odolnost vůči krystalizačním tlakům vodorozpustných solí. V České republice existuje norma ČSN 730610, která udává míru nebezpečí v závislosti na koncentraci solí. [6] Při restaurování památek se nejčastěji vychází z Önorm B 3355-1.

Tabulka 2.1: Mezní hodnoty obsahu solí ve stavebních materiálech  
dle Önorm B 3355-1

druh soli	optimální	zvýšené	nutné odsolení
sírany	<0,10	0,10-0,25	>0,25
chloridy	<0,03	0,03-0,10	>0,10
dusičnany	<0,05	0,05-0,15	>0,15

## 2.2.1 Vlastnosti a druhy vodorozpustných solí na stavbách

### 2.2.1.1 Sírany

Sírany jsou obecně z chemického hlediska soli odvozené od kyseliny sírové, které vznikly náhradou obou jejích kyselých vodíků. V případě náhrady pouze jednoho vodíku vznikají hydrogensírany. [7] V porézních anorganických materiálech nejčastěji vznikají reakcí uhličitanu s oxidy síry obsaženými v atmosféře, dalším zdrojem může být sůl obsažená ve vzlínající vodě, případně atmosférický depozit. [8] Síran vápenatý se vylučuje v půdách ze spodní vody s obsahem síranů a s vysokou tvrdostí. Kromě toho vzniká také v půdách působením síranů na sloučeniny vápenaté. Často bývá síran vápenatý v zeminách doprovázen síranem hořečnatým. Síran vápenatý je hůře rozpustný a projevuje se bílými výkvěty. Vyskytuje se v zeminách velmi často, převážně jako sádrovec, tj. dihydrát síranu vápenatého. Kromě toho se vyskytuje též síran vápenatý bezvodý, zvaný anhydrit. Síran sodný, hořečnatý a železitý mají dobrou rozpustnost ve vodě a tvoří bílé výkvěty. Síran železitý tvoří výkvěty zelené, zelenohnědé i špinavě bílé. [2]



Tabulka 2.2: Nejdůležitější škodlivé vodorozpustné sírany vyskytující se ve stavebních materiálech

Funkční vzorec	Sloučenina	Rozpustnost při 20 °C [g/l roztoku]
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	síran vápenatý dihydrát, sádrovec	2,4
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	síran hořečnatý heptahydrát,	1172
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	síran sodný dekahydrát, thenardit	583
$\text{Na}_2\text{SO}_4$	síran sodný bezvodý, mirabilit	481 (při 40 °C)
$\text{K}_2\text{SO}_4$	síran draselný	111
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$	ettringit, Candlotova sůl	–

### 2.2.1.2 Chloridy

Chloridy jsou po chemické stránce soli kyseliny chlorovodíkové a řada z nich patří mezi velmi dobře rozpustné soli. Chloridy se dostávají do stavebních materiálů především vlivem solných posypů komunikací v zimních měsících. [6] Nejnámější chlorid sodný se projevuje bílými výkvěty, chlorid železitý rezavými výkvěty. Na stavbách lze nalézt výkvěty obsahující velmi dobře rozpustný chlorid vápenatý. Tento výkvět vzniká obvykle jako následek omývání vápenatých výkvětů na zdivu kyselinou solnou. [2]

Tabulka 2.3: Nejdůležitější škodlivé vodorozpustné sírany vyskytující se ve stavebních materiálech

Funkční vzorec	Sloučenina	Rozpustnost při 20 °C [g/litr roztoku]
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	chlorid vápenatý hexahydrát, antarkticit	5359
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	chlorid vápenatý dihydrát	1281
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	chlorid hořečnatý, bischofit	3051
$\text{NaCl}$	chlorid sodný, halit, sůl kamenná	360
$\text{KCl}$	chlorid draselný, sylvit	340

### 2.2.1.3 Dusičnany

Dusičnany vznikají reakcí kyseliny dusičné s uhličitany, oxidy nebo hydroxidy kovů. Jsou dobře ve vodě rozpustné, zahříváním se rozkládají. [7] Mají lepší rozpustnost ve vodě než chloridy. Vzhledem k tomu, že dusičnan sodný a vápenatý byly

v minulosti hojně používanými hnojivy, lze se s nimi setkat na objektech souvisejících se zemědělskou výrobou nebo stojících v blízkosti těchto objektů. Výskyt dusičnanů lze rovněž předpokládat v místech, kde se používá v zimě k posypu močovina. V neposlední řadě mohou kontaminaci způsobovat živočišné zbytky v objektech či jejich blízkosti, které prošly působením nitrifikačních bakterií.

Tabulka 2.4: Nejdůležitější škodlivé vodorozpustné dusičnany vyskytující se ve stavebních materiálech

Funkční vzorec	Sloučenina	Rozpustnost při 20 °C [g/litr roztoku]
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	dusičnan hořečnatý hexahydrát, nitromagnesit	2805
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	dusičnan vápenatý tetrahydrát, nitrokalcit	4305
$\text{NaNO}_3$	dusičnan sodný	880
$\text{KNO}_3$	dusičnan draselný	316
$\text{NH}_4\text{NO}_3$	dusičnan amonný	1920

#### 2.2.1.4 Uhličitany

Uhličitany jsou soli kyseliny uhličitě. S výjimkou uhličitanu sodného, draselného a amonného se téměř nerozpouštějí ve vodě. Všechny se však rozkládají působením kyselin silnějších než je kyselina uhličitá a zahříváním. K chemické přeměně v důsledku působení silnějších kyselin dochází i na památkových objektech – účinkem srážek v podmínkách silně znečištěné atmosféry může docházet k chemické přeměně uhličitanů na sírany, resp. dusičnany. [7] Zdrojem uhličitanů mohou být i předchozí restaurátorské zásahy. [6]

Tabulka 2.5: Nejdůležitější škodlivé vodorozpustné uhličitany vyskytující se ve stavebních materiálech

Funkční vzorec	Sloučenina	Rozpustnost při 20 °C [g/litr roztoku]
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	uhličitan sodný dekahydrát, soda	217
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	uhličitan sodný heptahydrát, soda	489 (při 40 °C)
$\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	uhličitan draselný, potaš	110

### 2.2.2 Soli latentně přítomné

Stavební materiály jako je písek, některé horniny, cihlářské výrobky, pojiva nebo i nátěrové systémy, mohou přímo obsahovat vodorozpustné soli. Například portlandský cement obsahuje sádrovec a alkálie. V cihlách mohou být různé soli dle kvality jílu použitého při jejich výrobě. U některých typů nátěrových systémů především pojených vodními skly, zejména sodným, může být nebezpečný obsah alkálií. Písek může být potenciálním zdrojem solí buď primárně obsažených před těžbou v horninách, nebo sekundárně nesprávným skladováním či jinou kontaminací. [2]

### 2.2.3 Soli vzniklé chemickou korozí

Chemická koroze je výrazně ovlivňována přítomností vody ve stavebních hmotách. Většina reakcí probíhá jen ve vlhkém prostředí, bez vody se zastavuje nebo výrazně zpomaluje. Nejvíce jsou chemickou korozí napadány karbonátové sloučeniny jako například uhličitan vápenatý –  $\text{CaCO}_3$ , který je podstatnou součástí malt a omítek na bázi vápna, hydraulického vápna, cementu, dále pak vápenných nátěrů. Uhličitan vápenatý je obsažen i v některých horninách. Malou stabilitou vůči kyselému prostředí a následnými souvisejícími reakcemi se projevuje –  $\text{MgCO}_3$ , který je obsažen v dolomitických vápencích a vápnech. U obou uhličitanů vznikají při reakci s kyselinou sírovou z uhličitanů téměř nerozpustných poměrně dobře nebo aspoň lépe rozpustné sírany. Doprovodným jevem této přeměny je zvětšení objemu, jak je uvedeno v následující tabulce. [2] To může být dalším významným degradačním vlivem porézních anorganických materiálů.

Tabulka 2.6: Zvětšení objemu uhličitanů s kyselinou sírovou

Reakce	Zvětšení objemu [%]	Zvýšení rozpustnosti
$\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	100	160x
$\text{MgCO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 + 7\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	430	7500x

### 2.2.4 Soli transportované do materiálu vlhkostí

Značná část solí se do zdiva dostává spolu se vztlínající vlhkostí z okolního terénu nebo pronikáním vlhkosti z jiných částí budovy. Voda pronikající do stavebních konstrukcí a materiálů kapilárními silami obsahuje větší či menší množství rozpuštěných solí. Po odpaření vody se soli hromadí v různých částech zdiva, největší množství se koncentruje v jeho povrchových vrstvách, v omítkách, pod

---

nátěry nebo i v nich. Důležitou roli při transportu a ukládání solí v určitých místech budov hraje i rozpustnost solí a pohyblivost jednotlivých iontů. Dobře rozpustné soli, jako většina chloridů a dusičnanů, s poměrně malými ionty se pohybují rychleji a do větších vzdáleností než většina síranů. Proto lze často na budovách poškozených vztlínající vlhkostí najít vyšší koncentraci síranů ve spodních částech budovy a zvýšený obsah dusičnanů a chloridů o něco výše. Zvýšený obsah solí ve zdivu se vztlínající vlhkostí brzdí vysychání zdiva a ovlivňuje tedy výšku jeho zavlhčení tak, že může postupně docházet k vzestupu úrovně zavlhčení zdiva.

### **2.2.5 Soli biologického původu**

Především jsou to soli vzniklé přeměnou močoviny v dusičnany. Chemická koroze a vznik solí mohou být v určitých případech vyvolány činností některých organismů, například vznik dusičnanů činností nitrifikačních bakterií, případně síranů, působením sirných bakterií nebo i solí některých organických kyselin, činností celé řady dalších organismů (plísni, řas, lišejníků, mechů atd.). [9]

### **2.2.6 Soli vzniklé důsledkem předchozích oprav**

Některé sanační zásahy na stavebních objektech mohou být také zdrojem značného množství solí. V minulosti to bylo použití rozličných čistících prostředků obsahujících silné kyseliny nebo louhy, které byly často používány hlavně pro jejich velký čistící efekt. Pozdější následky byly často katastrofální, přičemž jedním z důsledků je právě zasolení objektu. Některé fasádní čistící prostředky na podobné bázi jsou až dodnes na trhu nabízeny – například louhové pasty k odstraňování starých nátěrů, čistící roztoky na kámen obsahující kyselinu chlorovodíkovou apod. Zvýšení obsahu solí může být vyvoláno i použitím některých injektážních nebo konzervačních prostředků obsahujících například vodní sklo nebo silikony. Tyto skutečnosti je proto nutné při každém zásahu brát v úvahu a nepoužívat materiály, které by mohly být potenciálním zdrojem vodorozpustných solí.

## **2.3 Poškození a jeho mechanismy způsobené vlivem vodorozpustných solí**

Poškození vzniká v důsledku vysoké koncentrace vodorozpustných solí se na památkách projevuje v několika formách. Z tohoto hlediska je velmi důležité, jestli ke krystalizaci dochází na povrchu porézního materiálu a nebo pod povrchem - uvnitř porézního materiálu. V prvním případě se tak děje obvykle při pomalém odpařování

---

vody a transportu roztoku solí až na povrch. Výsledkem je hlavně tvorba výkvětů solí, tzv. eflorescence na povrchu porézního materiálu. K výraznějšímu poškozování dochází spíše při tvorbě krystalů uvnitř porézního materiálu, kdy při rychlejším odpaření vody vznikají tzv. subflorescence a v pórech probíhají výše popsané destruktivní pochody. Krystalizace na povrchu i pod povrchem může v praxi často probíhat současně. Krystalizace a hydratace solí v pórech, dutinách, v prasklinách nebo pod nátěry je hlavním destruktivním mechanismem, kterým se soli podílejí na poškozování porézních materiálů. V praxi lze následky pozorovat jako odpadávání vrstev nátěrů, rozpad omítkových vrstev, oddělování omítkových vrstev, ztrátu soudržnosti povrchu spárových malt, cihlářských výrobků, kamene až po rozsáhlejší destrukce celého zdiva. Významnou roli při poškozování hraje i hygroskopicitá solí. Jednak může přispívat k celkovému zavlhčení materiálu, často až do té míry, že ani po efektivních, někdy i radikálních opatřeních proti vzlínající vlhkosti, nedojde k vyschnutí objektu. Dále pak v závislosti na klimatických podmínkách dochází na povrchu ke vzniku vlhkých map a po jejich vyschnutí (při poklesu relativní vzdušné vlhkosti pod úroveň rovnovážné vlhkosti zasoleného materiálu) obvykle k tvorbě výkvětů. S častou změnou relativní vzdušné vlhkosti a teploty tak dochází i k častým krystalizačním cyklům, protože „samozředěním“ procházejí soli do roztoku a po vyschnutí zase do krystalické formy. V případě konstrukcí obsahujících kovovou výztuž mohou soli významným způsobem urychlit korozi kovů. Například chloridy značně urychlují korozi ocelové výztuže v železobetonu. Část poruch stavby, připisovaných vlhkosti, by v případě zatížení čistou vodou nevzniklo. Voda je totiž velmi často transportním médiem pro další škodliviny, které se pak rozličným způsobem i mírou podílejí na poškozování povrchu stavebního materiálu. Transport vody do porézních materiálů umožňuje transport nebo i vznik solí v těchto hmotách. Zvýšený obsah solí je potom velmi často důvodem jejich destrukce. [10]

### **2.3.1 Krystalizace vodorozpustných solí**

Destruktivní vliv vodorozpustných solí je zapříčiněn hlavně dvěma procesy – krystalizací a rekrystalizací spojenou s tvorbou hydrátů. Při pronikání roztoku solí do pórů, trhlin nebo dutin dochází při odpařování vody ke zvyšování koncentrace solí v daném roztoku. Kritický okamžik nastává, když koncentrace solí překročí hodnotu rozpustnosti soli a „přebytečná“ sůl začíná krystalizovat. Krystaly mohou postupně vyplnit prostor pórů nebo prasklin a dochází ke vzniku krystalizačních tlaků na okolní

---

stěny. Velikost těchto tlaků závisí na stupni přesycení roztoků a teploty. Mohou dosahovat značně vysokých hodnot, které často vedou až k rozrušení porézního materiálu.

Z hlediska porozity jsou velmi nevýhodné ty materiály, které mají poměrně vysoký obsah menších pórů v poměru k větším. Důvodem je, že krystalizace začíná vždy ve větších pórech a nasycený roztok, z kterého rostou krystaly, je „doplňován“ roztokem soli z menších pórů. Jakmile je „zásobní roztok“ v malých pórech vyčerpán, krystaly solí dál nerostou. Při vyšším obsahu velkých pórů proto často nedojde k jejich vyplnění krystaly solí, vzhledem k nízkému podílu menších pórů a tedy i nedostatku „zásobního roztoku“ potřebného pro další růst krystalů. Vyšší porozita materiálu tedy nemusí automaticky znamenat i vyšší odolnost vůči působení solí, ale důležitou charakteristikou je distribuce velikostí pórů. Materiály s větším obsahem pórů jsou obvykle vůči působení solí odolnější.

### **2.3.2 Rekrystalizace s tvorbou hydrátů solí**

Druhý destruktivní proces vyvolaný vodorozpuštěnými solemi se vztahuje na soli, které jsou schopny vázat v krystalové mřížce určitý definovaný počet molekul vody, vytvářejí tzv. hydráty. Jako příklad lze uvést síran sodný krystalizující v závislosti na podmínkách krystalizace jako bezvodý  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  nebo jako dekahydrát  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ . Přechod z jedné hydratované formy do druhé je vždy spojený s vázáním určitého počtu molekul vody nebo naopak jejich ztrátou a je doprovázen i značnými změnami objemu soli. Hydratované molekuly jsou poměrně objemné a přechody solí v porézním systému stavebních materiálů z jedné hydratované formy do druhé jsou spojeny poměrně s velkými krystalizačními tlaky. [11]

Přechod z jedné formy do druhé je daný stabilitou hydratované formy soli v určitých klimatických podmínkách a závisí na teplotě a relativní vzdušné vlhkosti prostředí. Z hlediska poškozování fasád a stavebních konstrukcí jsou nejvíce nebezpečné ty soli, u kterých dochází k uvedeným přechodům a s nimi souvisejícím objemovým změnám při běžných teplotách jako například u síranu sodného, uhličitanu sodného nebo dusičnanu vápenatého.

---

### **2.3.3 Hygroskopická vlhkost**

K poškození v důsledku působení solí obvykle nedochází okamžitě po jediné krystalizaci nebo hydrataci solí, ale až po několika cyklech, případně po několika desítkách až stovkách cyklů.

Hygroskopické látky jsou schopny přijímat vodu ze vzdušné vlhkosti a zadržovat ji v kapalně formě. Pro stavební látky je tato vlastnost označována jako hygroskopicitata a za určitých podmínek může dosahovat značných hodnot. Nutno také ještě zdůraznit, že se v tomto případě jedná o fyzikálně vázanou vodu, ne vodu vázanou v krystalové mřížce, a tato vlastnost tedy nesouvisí s výše popsanou schopností některých solí tvořit různě hydratované formy.

Schopnost pohlcovat a vázat vodu jako kapalinu se za určitých klimatických podmínek u jednotlivých solí liší. Rozdíly jsou v množství vody, které je sůl schopna vázat, a v hodnotě tzv. rovnovážné relativní vlhkosti. Rovnovážná relativní vlhkost je vlhkost, při které je nasycený roztok soli s okolím při určité teplotě v rovnováze a vodu nepohlcuje ani neuvolňuje. Při vyšší relativní vlhkosti okolí než je hodnota rovnovážné vlhkosti soli, dochází k pohlcování vlhkosti až k dosažení rovnováhy roztoku soli s okolím v důsledku „autozředění“. Naopak při nižší vlhkosti než je rovnovážná vlhkost, roztok vodu uvolňuje do okolí. Rovnovážná vlhkost zasoleného materiálu a jeho schopnost přijímat vodu ze vzdušné vlhkosti je pak výrazně ovlivněna typem a množstvím solí, které obsahuje. Poměrně přesnou informaci poskytuje v tomto směru změření sorpční izotermy, která vyjadřuje závislost obsahu vlhkosti materiálu na relativní vzdušné vlhkosti okolí.

## **2.4 Možnosti obnovy omítek na objektech poškozených vodorozpustnými solemi**

### **2.4.1 Mechanické odstranění**

Nejméně komplikovaný způsob je mechanické odstranění solí z povrchu nebo včetně zasoleného materiálu. Tuto metodu lze aplikovat pouze při odstranění výkvětů na povrchu kontaminovaných materiálů jako jsou omítky, spárová malta, případně jiné části zdiva. Lze odstranit i kontaminovaný materiál. To ovšem není možné u historicky cenných omítek, fasád či jiných hodnotných stavebních konstrukcích.



---

## **2.4.2 Extrakce vodných roztoků solí**

Cílem extrakce je snížení koncentrace vodorozpustných solí v porézních materiálech na míru, která by omezila destrukční účinky přítomných solí. Úplné odstranění solí není reálně možné, ve skutečnosti lze pouze snížit jejich obsah. Princip odsolování pomocí zábalů spočívá v nanesení vhodného obkladu na zasolenou plochu. Obklad musí být inertní, nasákový a prosycený vodou. Principem této metody je kapilární transport a difúze mezi vodou v obkladu a roztokem v objektu. Pro odsolování se používá pitná, destilovaná či demineralizovaná voda, aby nedocházelo ke kontaminaci odsolovaného objektu nežádoucími látkami z použité vody. [12]

## **2.4.3 Fyzikální a fyzikálně chemické principy odsolování**

V průběhu odsolování dochází k redukci koncentrace solí v odsolovaném objektu. Tento proces je založen na několika fyzikálně chemických jevech souvisejících s pohybem vodorozpustných solí. Jsou to: kapilární transport, difúze, osmóza, nebo elektrokinetické jevy.

### **2.4.3.1 Difúze a osmóza**

Difúze a osmóza jsou procesy, při kterých dochází k vyrovnání koncentrací v roztoku s různou lokální koncentrací solí. Rozpuštěné ionty solí migrují z míst s vyšší koncentrací do míst s nižší koncentrací až do vyrovnání koncentrací a vyrovnání osmotického tlaku.

### **2.4.3.2 Kapilární transport**

Během kapilárního vztlínání vody v kapilárním systému porézního materiálu dochází i k transportu iontů látek rozpuštěných ve vodě.

### **2.4.3.3 Elektrokinetické jevy**

Principem je migrace elektricky nabitých iontů v elektrickém poli. Je-li roztok soli umístěn do prostředí se stejnoměrným elektrickým proudem, kladně nabitě ionty migrují ke katodě, záporně nabitě ionty k anodě. Elektrokinetické metody odsolování se poměrně často používají při obnově stavebních památek.



---

#### 2.4.4 Obětované omítky a odsolovací zábaly

Pro odsolování stavebních konstrukcí se používají odsolovací – adsorpční omítky. Obvykle se jedná o slabě pojené vápenné omítky, tzv. obětované, nebo o omítky s hydraulickým pojivem se speciálními aditivami pro úpravu porozity a distribuce velikosti pórů. Výhodnější jsou upravované omítky, jelikož vzhledem k jejich velké porositě mají větší kapacitu pro ukládání solí. Mechanismus jejich působení je obdobný jako u odsolovacích obkladů. Doba jejich účinnosti může být v závislosti na okolnostech od několika měsíců až po několik let. Po nasycení omítek solemi dojde k jejich odstranění a náhradě novými.

Podobně jako obětované omítky fungují obklady či zábaly. Aplikace mokrého obkladu se provádí na předmáčený nebo suchý materiál. Aplikace mokrého materiálu na suchý povrch je vhodná na objekty, kde byl detekován zvýšený obsah vodorozpustných solí na povrchu nebo v malé hloubce pod povrchem. Dochází tak k rozpuštění solí v povrchové zóně odsolovaného materiálu a voda (solný roztok) neproniká do hloubky materiálu. [13]

Druhou metodou je aplikace mokrého obkladu na provlhčený materiál. Tato metoda je vhodná tam, kde je dominantní obsah vodorozpustných solí ve větší hloubce kontaminovaného materiálu a ne pouze na povrchu nebo těsně pod ním. Při této metodě dochází k pronikání vody a k rozpuštění solí ve větší hloubce pod povrchem. Úspěšnost zmíněné metody určuje nasákavost materiálu a stupeň jeho zasolení. Tato metoda odsolování bývá obvykle účinná do hloubek max. kolem 10 cm od povrchu. Na rozdíl od obětovaných omítek je doba působení obkladů od několika dnů až po několik týdnů. Celé odsolování s opakováním jednotlivých zábalů může trvat i několik měsíců. Účinnost je často velmi odlišná a závisí nejen na vlastnostech obkladu, ale i na druhu, množství vodorozpustných solí, hloubce jejich výskytu.

Doposud nebyla jednoznačně zodpovězena otázka rozdílu v účinnosti vysychajících a vlhkých obkladů. Většina studií naznačuje, že trvale vlhké obklady, které jsou snímány ve vlhkém stavu, mohou mít vyšší účinnost než obklady snímané až po jejich vyschnutí. [14]

Odsolováním metodou obkladů je možné dosáhnout uspokojivého snížení obsahu solí v povrchových vrstvách až několik cm pod odsolovaným povrchem. U solí dobře rozpustných lze docílit po několika cyklech snížení jejich koncentrace až o 80-90 %. Množství solí extrahovaných kolísá od několika desítek g/m<sup>2</sup> až po

---

hodnoty nad  $1000 \text{ g/m}^2$ . Nejlepších výsledků je možné dosáhnout u solí lehce rozpustných – dusičnanů a chloridů, případně u dobře rozpustného síranu sodného nebo draselného. Velmi úspěšným odsolením lze dosáhnout pouze výrazného snížení obsahu vodorozpustných solí, a to jen do určité hloubky. Při hloubkově zasolených objektech nebo u památek, kde nelze odstranit zdroj solí jako třeba vzlínající vlhkost, je nutné počítat opět s negativními jevy vlivu působení solí.

#### **2.4.5 Odsolování za pomoci vakua**

Odsolování za pomoci vakua je velmi účinná metoda. Lze ji provádět na mobilních předmětech. Principem je rozpuštění solí v lázni, do které je odsolovaný předmět ponořen tak, aby jeho některá část vyčnívala těsně nad hladinu. Povrch předmětu nad hladinou je utěsněn fólií, ve které je umístěno sání do vývěvy, která odčerpává kontaminovanou vodu z objektu. Nebezpečím je důkladné vyčištění porézního systému předmětu, který může ovlivnit jeho mechanické vlastnosti.

#### **2.4.6 Chemická stabilizace**

Z běžných solí je možné úspěšně stabilizovat pouze sírany a chloridy. Dusičnany jsou obecně dobře rozpustné ve vodě a s tím je spojeno jejich nereálné převedení do stabilní formy.

Principem této metody je chemická přeměna vodorozpustných solí na nerozpustné, případně jejich méně rozpustné formy. Obvykle se používá roztok hexafluorokřemičitanu olovnatého ( $\text{PbSiF}_6$ ). Ten je schopen s většinou vodorozpustných solí, vyjma dusičnanů, vytvořit nerozpustné nebo málo rozpustné soli. Tato metoda je v praxi málo užívaná pro svou vysokou toxicitu a obtížné definování koncentrace roztoku  $\text{PbSiF}_6$ , který by byl v optimálním poměru k vodorozpustným solím v objektu. Při obnově stavebních památek se nejčastěji pro ošetření zdiva pod sanační omítky používají fluorokřemičitany.

V restaurování byl nejčastěji používán roztok hydroxidu barnatého ( $\text{Ba(OH)}_2$ ) ke stabilizaci síranů. Zvláště ke stabilizaci síranu amonného následně po odstraňování sádrovcových depozitů pomocí uhličitanu amonného. [15]

---

#### **2.4.7 Bakteriální působení**

Aplikací speciálních kmenů bakterií lze jejich působením docílit přeměny síranu vápenatého zpět na uhličitán vápenatý, redukovat dusičnany a dusitany nebo přeměnit amoniakální dusík na elementární dusík. [16]

#### **2.4.8 Sanační omítky**

Sanační omítky jsou dle DIN 18 557 suché maltové směsi s vysokou pórovitostí, propustností vodních par a pokud možno minimální kapilární nasákavostí. Vzhledem k dodržení přesné receptury, která zajišťuje dostatečnou funkci zmíněných malt, nejsou dle WTA staveništní malty byt' s upravenými vlastnostmi považovány za sanační. Na rozdíl od omítek absorpčních lze u sanačních omítek na vlhkém zdivu docílit suchý povrch. [17]

Při aplikaci sanačního systému omítek je aplikováno jejich nahození na vlhké a zasolené zdivo. Soli poškozující zdivo jsou ukládány v kapilárně neaktivních pórech a voda se odpařuje povrchem omítky. Přes tento jev nelze vlhké zdivo vysušit pouze sanačními omítkami.

Vzhledem k požadovaným pevnostním vlastnostem a rychlosti tvrdnutí malty po nanesení jsou téměř výlučně v sanačních omítkách používána hydraulická pojiva. Sanační omítky se obvykle aplikují ve skladbě podhoz, podkladní omítka a sanační omítky, kdy každá vrstva má své specifické vlastnosti zajišťující úspěšné fungování celého omítkového systému. Podkladní zatvrdlá omítka by měla mít pevnost v tlaku vyšší než vrchní sanační omítka, pórovitost vyšší než 45 %. U finální vrstvy zatvrdlé sanační omítky jsou požadovány následující vlastnosti: pevnost v tlaku 1,5-5 MPa, pórovitost vyšší než 40 %. [18]

#### **2.4.9 Omítky blokující soli**

Jsou omítky udržující roztoky solí v podkladovém zdivu. Tyto omítky jsou většinou plně hydrofobizované. Ty sice odstraňují negativní estetické vady na povrchu omítky, ale výrazně zpomalují vysušování zdiva, a mohou způsobit posun hranice zavlhčení do dalších částí stavby. Existuje modifikace těchto omítek, aby byly schopny propouštět velké množství vodní páry. Tím, že je schopna odcházet voda vodním skupenství, dochází ke krystalizaci solí na styčné ploše mezi zdivem a omítkou. Krystalizace pak poškozují omítku a způsobuje její odlučování od podkladu. [17]

---

#### **2.4.10 Omítky transportující soli**

Jsou to omítky složené tak, aby byly schopny transportovat roztok solí ze zdiva a nechat jej migrovat k povrchu, kde mohou soli krystalizovat. Tento transport může probíhat pomalu nebo rychle. Průtoková rychlost omítky je ovlivněna porozitou. Jemná porozita snižuje průtokovou rychlost. Většina novodobých cementových omítek má malou porozitu, a tím i pomalý transport roztoku solí. Tyto vlastnosti lze ovlivnit přidavkem aditiv nebo lehčených kameniv. [17]

---

## 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část je zaměřena na přípravu různých typů omítek se zvýšenou porozitou kameniva a stanovení jejich vlastností jako jsou: objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku, distribuce a celkový objem pórů, REM, optická mikroskopie, propustnost pro transport vody a celková nasákavost.

### 3.1 Vápno

Pod pojmem vápno se v omítkářské terminologii skrývá několik významů, které lze strukturovat dle pohledu stavaře, historika, chemika nebo řemeslníka, případně dle diskutované fáze některé z jeho forem. Dělení vápna jako stavebního pojiva je definováno dle ČSN EN 459-1 Stavební vápno – Část 1: Definice a kritéria shody. Podle této normy se vápenické výrobky dělí na: vápna bílá, dolomitická, hydraulická a přirozeně hydraulická.

Použitým pojivem pro přípravu testovaných směsí byl vápenný hydrát CL 90 z lokality Mokrá, vyráběný firmou Carmeuse Mokrá, a.s. Mezi přední vlastnosti tohoto vápna patří velmi jemné mletí a čistě bílá barva. Je vhodný pro výrobu suchých maltových a omítkových směsí i pro přípravu stavebních malt. Vápenný hydrát odpovídá požadavkům normy pro vápna ČSN EN 459-1.

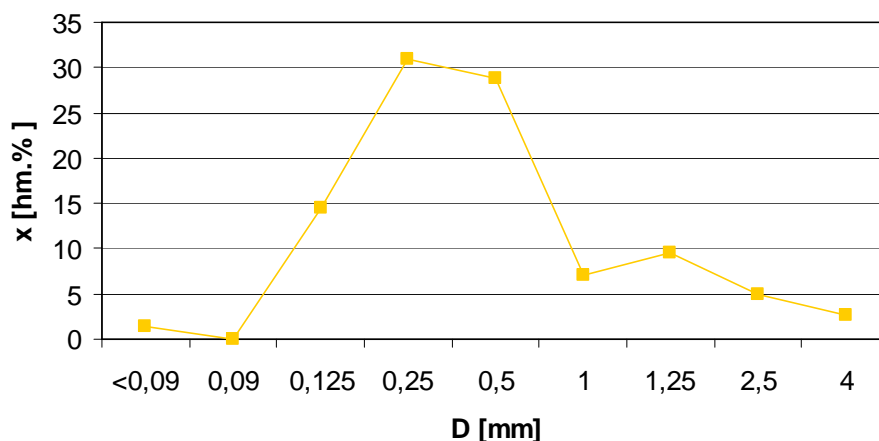
#### 3.1.1 Kamenivo

Obecně kamenivem označujeme anorganický zrnitý materiál umělého či přírodního původu používaný pro stavební účely. Kamenivo je plnivem, které v kombinaci s vhodnými pojivy vytváří malty a betony. Hlavní funkcí kameniva je tvorba relativně pevné tlakově odolné kostry vzniklé vzájemným opřením a zaklíněním zrn.

Pórovité kamenivo je dle ČSN EN 13055-1 charakterizováno jako lehké kamenivo s pórovitou strukturou a sypanou hmotností do  $1200 \text{ kg.m}^{-3}$ .

##### 3.1.1.1 Písek

Písek byl použit přírodní kopaný z lokality Hulín provozované firmou Českomoravský štěrk, a.s. Heidelbergcement Group. Písky z této lokality odpovídají požadavkům evropských norem EN 12620, 13043, 13139, 13242 a 13450, které definují požadavky na kamenivo z hlediska jeho použitelnosti ve stavebnictví.



Obr. 3.1: Granulometrie přírodního kopaného písku z lokality Hulín



Obr. 3.2: Přírodní kopaný písek z lokality Hulín

### 3.1.1.2 Liapor

Je pórovité kamenivo z přírodních zdrojů vyráběné žháním granulí jílových nebo hlinitopísčitých hornin (jílů, písčitých jílů, břidlic, argilitu, siltu), hornin obsahujících šungit, tripolity, popelostruskové směsi nebo popílký, které při žhání kolem 1150 °C společně expandují. Liapor tvoří granulát obých zrn, který je tříděn dle velikosti těchto zrn nebo upravován drcením. Základními vlastnostmi je hnědočerná barva na

lomu s dobře patrnou pórovitostí. Liapor je málo nasákavý, stálý, zdravotně nezávadný. Má nízkou hmotnost, je pevný, tepelně a zvukově izolující, odolný vůči kyselinám a zásadám. Samotné zrno liaporu nemá kapilární strukturu.

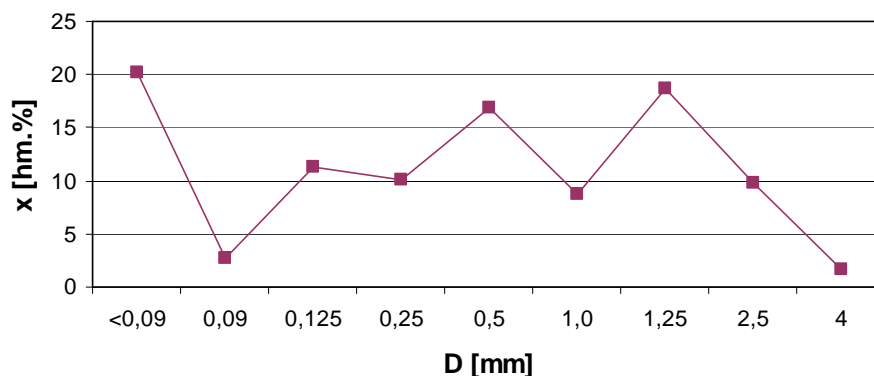
Výrobce použitého liaporu je Lias Vintířov, lehký stavební materiál, k.s. Po tepelném zpracování vstupní suroviny je výsledné mineralogické složení liaporu následující, viz. tabulka 3.1.

Tabulka 3.1: Chemické složení liaporu udávané výrobcem

složka	[hm% ± 5 %]
SiO <sub>2</sub>	52
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10
CaO	5
K <sub>2</sub> O	2
MgO	2
TiO <sub>2</sub>	2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2
ostatní složky	2

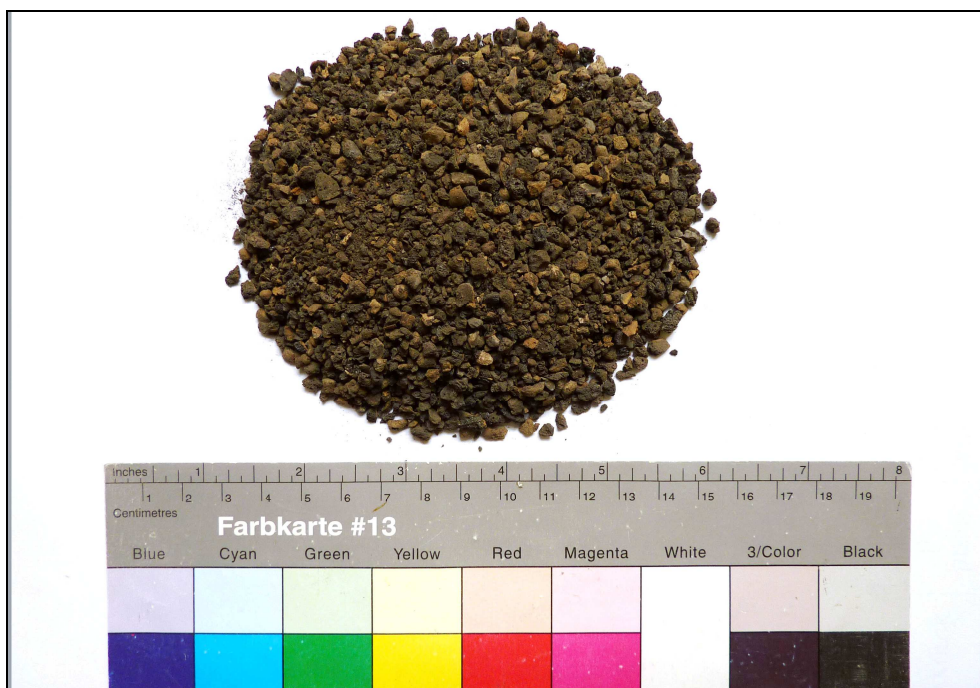
Složky jsou pevně navázány a ve stavebních aplikacích se z liaporu neuvolňují žádné škodlivé emise.

Celkový obsah síry je 0,2 až 0,5 hm.%, obsah sulfidů je 0,02 až 0,05 hm.% a obsah chloridů 0,005 až 0,01 hm.%, takže liapor velmi dobře vyhovuje při použití pro vyztužený i předpjatý beton. [19]



Obr. 3.3: Granulometrie liaporu





Obr. 3.4: Vzorek liaporu

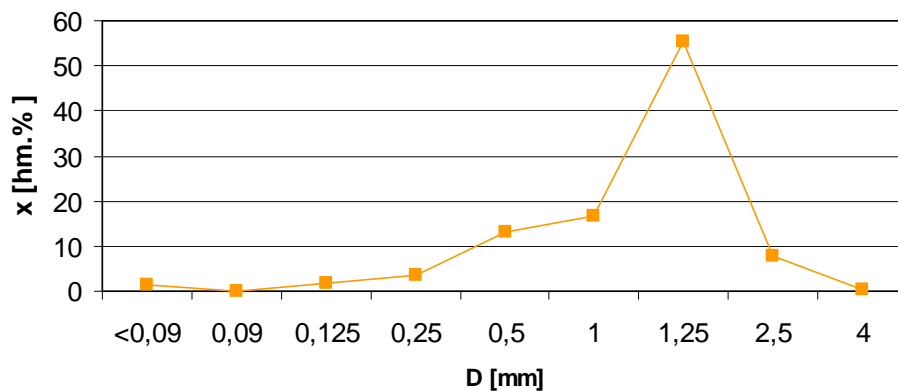
### 3.1.1.3 Perlit

Expandovaný perlit je pórovité kamenivo vyrobené žiháním vodného vulkanického skla - perlitu. Perlit je amorfni křemičitan hlinitý sopečného původu. Má vysoký obsah oxidu železa a titanu. Chemickým složením je podobný sklu a patří do skupiny kyselých vulkanických skel jako obsidián nebo pemza. Vzniká žiháním při teplotách 900 – 1300 °C, kdy hornina expanduje na drobné duté kuličky o velikosti do 4 mm. Při expandaci se jeho objem zvětšuje 5 – 10 krát. Expandovaný perlit je zdravotně nezávadný, chemicky stálý, nehořlavý a mrazu odolný. Je dobrým tepelným a zvukovým izolantem. Použitý perlit byl vyroben v PERLIT, spol. s r.o., Šenov u Nového Jičína. Chemické složení ukazuje tabulka 3.2.

Tabulka 3.2: Informativní chemické složky perlitu uvedené výrobcem

složka	[hm.% ± 5 %]
SiO <sub>2</sub>	66
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3
CaO	5
K <sub>2</sub> O a Na <sub>2</sub> O	max 8





Obr. 3.5: Granulometrie perlitu



Obr. 3.6: Vzorek perlitu

### 3.1.1.4 Pemza

Pemza je vyvřelá hornina pórovité textury buď zcela, nebo převážně sklovitá, patřící k přirozeným sklům. Vyskytuje se v třetihorních vrstvách a čerstvých vulkanických vyvřelinách s povahou křemitých trachytů. Přírodní pemza vzniká během sopečných erupcí, kdy plyny  $H_2O$ ,  $HCl$  apod. uvolňované z magmatu způsobují napěnění vyvřelých částic. Pemza je složena částečně z hydratované

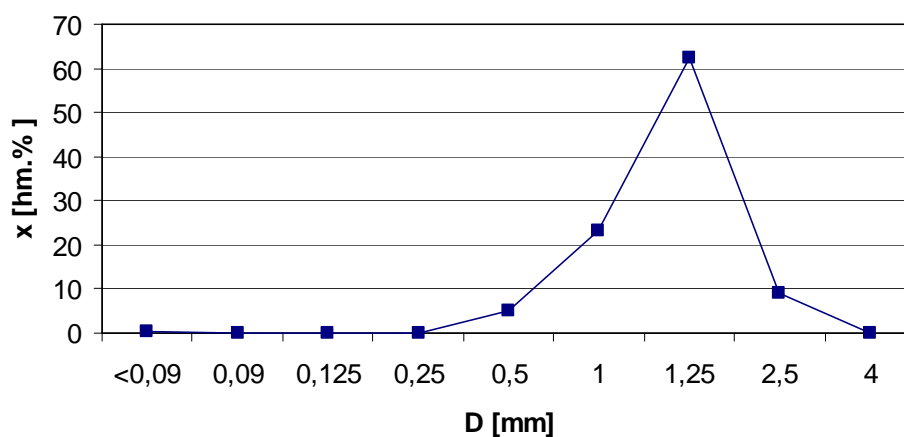
trachytické skloviny. Ložiska pemzy mají charakter nezpevněné vrstevnaté usazeniny štěrkopískového charakteru. Tvar zrn je zakulacený až mírně hranatý. Barva je bělavá, šedavá nebo žlutavá. Pemza je silně nasákavá a zároveň rychle vysychá. Na rozdíl od tufů vykazuje pemza jen nepatrné objemové změny při vysychání. Hlavní chemické složky pemzy jsou uvedeny v tabulce 3.3.

Ložiska pro těžbu pemzy jsou v Porýní, Řecku, Arménii, na Liparských ostrovech, Slovensku, Galapágách, v Dominikánské republice a Turecku. U nás se v netěžitelném množství vykytuje v Českém Středohoří.

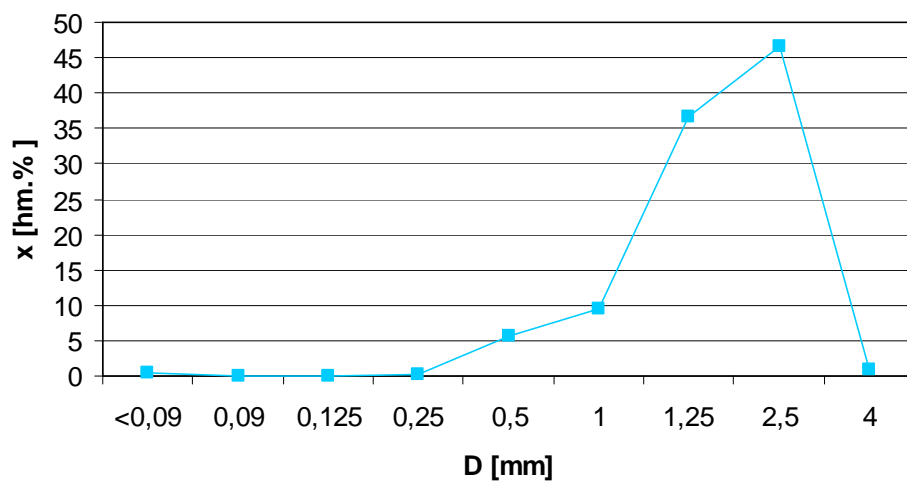
Pro práci byla použita německá pemza označená PEM R a řecká označená PEM G dodávaná firmou Vulkatec Riebensahm GmbH, Kertz/Andernach, Spolková republika Německo.

Tabulka 3.3: Hlavní chemické složky pemzy

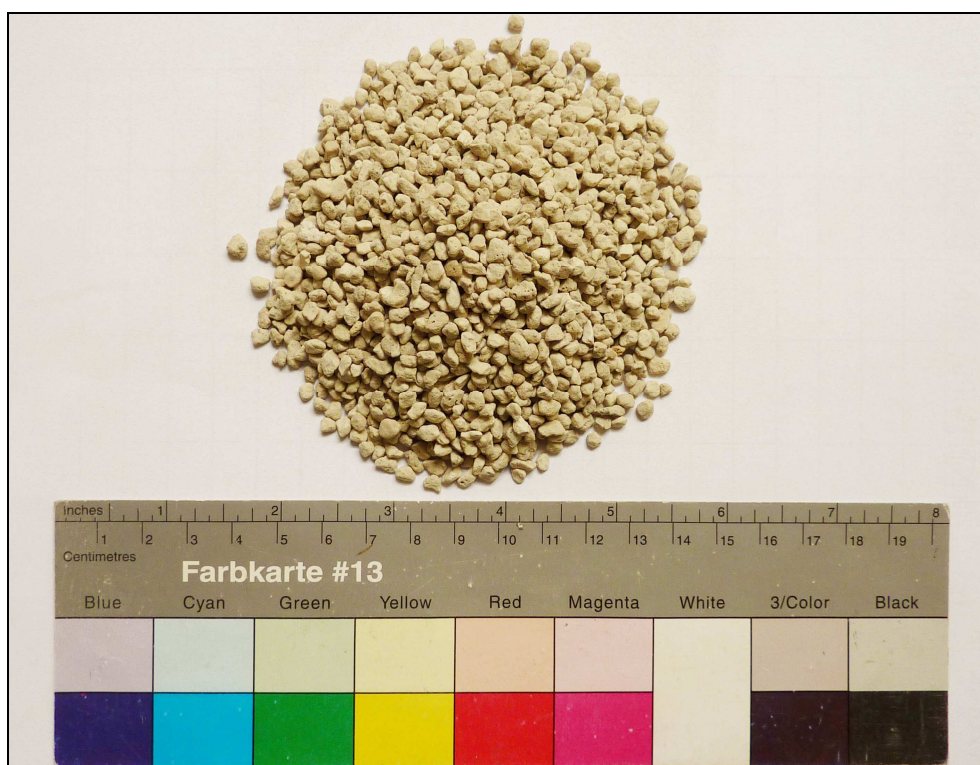
složka	[hm.%]
SiO <sub>2</sub>	60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20
alkálie	11
H <sub>2</sub> O	4



Obr. 3.7: Granulometrie pemzy (lokality Řecko)



Obr. 3.8: Granulometrie pemzy (lokalita Německo-Porýní)



Obr. 3.9: Vzorek pemzy (lokalita Německo-Porýní)



Obr. 3.10: Vzorek pemzy (lokalita Řecko)

### 3.1.1.5 Zeolit

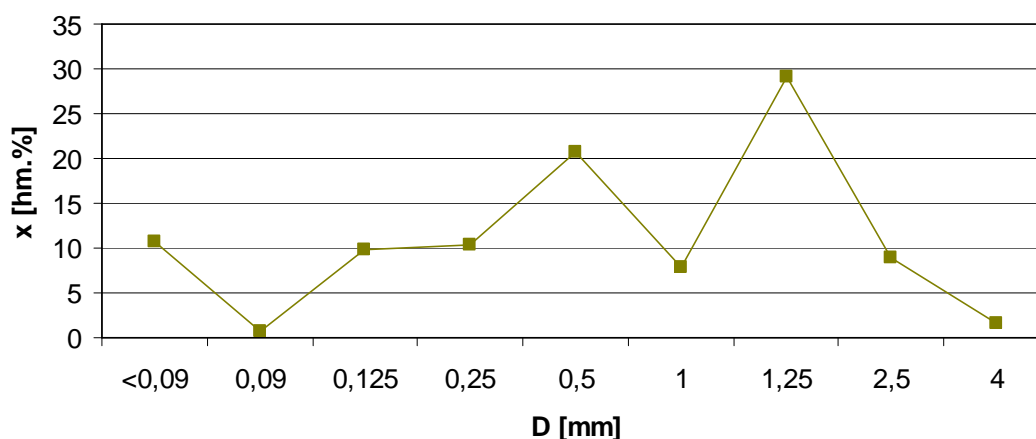
Zeolit je krystalický hydratovaný aluminosilikát alkalických kovů a kovů alkalických zemin. Vznikl působením vysokých teplot a tlaku během milionů let na usazenou vrstvu sopečného popela. Následnou chemickou a fyzikální přeměnou vznikla skupina zeolitů, do které patří například klinoptiolit či heulandit. Obecně je zeolit přírodní tetragonální hlinitokřemičitan sodný s čistotou alespoň 80 %. Nečistoty v něm obsažené pak tvoří uhličitan vápenatý a oxidy železa. Prostorové uspořádání atomů vytváří trojrozměrnou mřížku s porézní strukturou konstantních rozměrů. Skládá se z křemičitanových tetraedrů navzájem spojených přes atom kyslíku, přičemž část atomů křemíku je nahrazena atomy hliníku. V těchto pórech jsou uloženy kationy kovů nebo molekuly vody. Je v nich možná retence látek tuhého, kapalného a plynného skupenství. Celkový objem pórů je 24–32 %. Tento mikroporézní materiál ve svých pórech zadržuje od dob svého vzniku ionty sodíku a chloru. Některé ionty nejsou ve struktuře zeolitu pevně vázány a mohou být za určitých podmínek vyměňovány za jiné. Zeolit je proto hojně využíván v iontové výměnných procesech.

Ve stavebnictví se používá pro výrobu betonových výrobků se zvýšenou odolností v síranovém prostředí. Dalším jeho využitím jsou pucolánové malty a betony. [20]

Použitý zeolit dodává firma Zeocem, a.s. Bystré, Slovensko. Hlavní chemické složky uvedené výrobcem zeolitu jsou uvedeny v tabulce 3.4.

Tabulka 3.4: Informativní chemické složky zeolitu

složka	[hm.% ± 5 %]
SiO <sub>2</sub>	65 - 71
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,5 - 13,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,7 - 1,9
CaO	2,7 - 5,2
K <sub>2</sub> O	2,2 - 3,4
Na <sub>2</sub> O	0,2 - 1,3
MgO	0,6 - 1,2
TiO <sub>2</sub>	0,1 - 0,3



Obr. 3.11: Granulometrie zeolitu

### 3.1.2 Příměsi

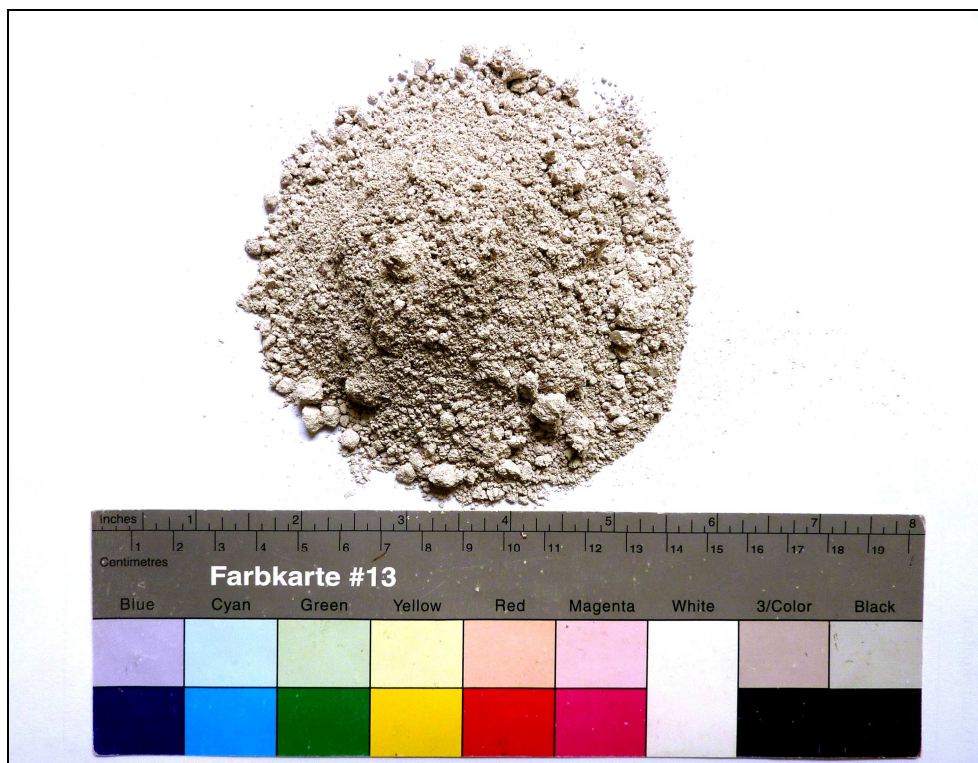
#### 3.1.2.1 Metalupek L05

Metalupek je vysoce reaktivní metastabilní jíla. Chemicky se jedná o vysoce reaktivní bezvodý hlinitan získaný tepelnou úpravou (kalcinací) lupku v rozmezí teplot 650 – 800 °C. Reaktivita metalupku je závislá na optimální kalcinační teplotě, která se pohybuje okolo hodnoty 700 °C. Jedná se o materiál, který se díky své všeobecné dostupnosti nejčastěji využívá pro přípravu vápenopucolánových malt nebo do geopolymerních systémů. Použitý metalupek vyrábí České lupkové závody, a.s. Nové Strašecí.



Tabulka 3.5: Informativní chemické složky metalupku L05

složka	[hm.% ± 5 %]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	43,67
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,04
K <sub>2</sub> O	0,52
TiO <sub>2</sub>	1,68



Obr. 3.12: Vzorek metalupku L05

### 3.2 Složení zkušebních směsí

Zkušební směsi byly komponovány podle tradičního poměru pojiva ke kamenivu s přidavkem pucolánu. Vodní součinitel byl nastaven tak, aby rozliv čerstvé malty na střešacím stolku tvořil koláč o průměru 150 mm. Tento poměr byl použit pro vzorky REF, u kterých je kamenivo tvořeno pouze omítkovým pískem z lokality Hulín. U ostatních vzorků byl zachován objemový poměr pojivo : kamenivo. V kamenivu o stejném objemu jako u referenční směsi byly použity čtyři poměry klasického kameniva k poréznímu 2:1, 1:1, 1:2 a pouze porézní kamenivo. Složení směsí je uvedeno v tabulkách 3.6 až 3.11. Míchání a zrání probíhalo v laboratorních podmínkách při teplotě  $t = 21 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  a relativní vzdušné vlhkosti  $R.H. = 60 \pm 5 \%$ .

Tabulka 3.6: Složení referenční malty

REF	hmotnost [g]
Písek H	2960
Ca(OH) <sub>2</sub>	740
ML 05	247
H <sub>2</sub> O	1344

Tabulka 3.7: Složení směsí s liaporem

označení	LIA 1	LIA 2	LIA 3	LIA 4
písek : liapor [dm <sup>3</sup> ]	2 : 1	1 : 1	1 : 2	0 : 1
liapor 0,5-4 [g]	306	459	612	918
písek H [g]	1980	1485	990	0
Ca(OH) <sub>2</sub> [g]	740	740	740	740
ML 05 [g]	247	247	247	247
H <sub>2</sub> O [g]	1400	1100	1200	1250

Tabulka 3.8: Složení směsí s perlitem

označení	PER 1	PER 2	PER 3	PER 4
písek : perlit [dm <sup>3</sup> ]	2 : 1	1 : 1	1 : 2	0 : 1
perlit 180 [g]	90	106	167	213
písek H [g]	1980	1485	990	0
Ca(OH) <sub>2</sub> [g]	740	740	740	740
ML 05 [g]	247	247	247	247
H <sub>2</sub> O [g]	1220	1025	954	1150

Tabulka 3.9: Složení směsí s pemzou (lokalita Řecko)

označení	PEM G11	PEM G12	PEM G13	PEM G14
písek : pemza [dm <sup>3</sup> ]	2 : 1	1 : 1	1 : 2	0 : 1
pemza G [g]	392	590	753	1180
písek H [g]	1976	1482	906	118
Ca(OH) <sub>2</sub> [g]	740	740	740	740
ML 05 [g]	247	247	247	247
H <sub>2</sub> O [g]	973	1012	1029	1110

Tabulka 3.10: Složení směsí s pemzou (lokalita Německo-Porýní)

označení	PEM R15	PEM R16	PEM R17	PEM R18
písek : pemza [dm <sup>3</sup> ]	2 : 1	1 : 1	1 : 2	0 : 1
pemza R [g]	245	410	505	810
písek H [g]	1482	1037	850	0
Ca(OH) <sub>2</sub> [g]	740	740	740	740
ML 05 [g]	247	247	247	247
H <sub>2</sub> O [g]	860	985	1034	1110

Tabulka 3.11: Složení směsí se zeolitem

označení	ZE 1	ZE 2	ZE 3	ZE 4
písek : zeolit [dm <sup>3</sup> ]	2 : 1	1 : 1	1 : 2	0 : 1
zeolit 0-5 [g]	685	1025	1370	2050
písek H [g]	1980	985	665	0
Ca(OH) <sub>2</sub> [g]	740	740	740	740
ML 05 [g]	247	247	247	247
H <sub>2</sub> O [g]	1050	1385	1160	1440

### 3.3 Příprava zkušebních těles

Jednotlivé směsi byly tvořeny postupnou náhradou křemenného kameniva-písku v objemových poměrech písek : porézní kamenivo = 2 : 1, 1 : 1, 1 : 2 a 0 : 1. Vápenná malta byla modifikována metalupkem L05, hmotnostní poměr vápenného hydrátu ku metalupku byl 1 : 0,25. Hmotnostní poměr pojiva (metakaolin + vápenný hydrát) ke kamenivu byl 1 : 3.

Množství vody bylo voleno tak, aby rozliv čerstvé malty, stanovený podle ČSN EN 1015-3, byl 160 ± 5 mm. Zhomogenizované směsi byly uloženy do forem o velikosti 40×40×160 mm a po ztvrdnutí malt byla tělesa uložena volně v laboratoři při 21 ± 3 °C a R. H. vzduchu 60 ± 5 %. Prvních 10 dnů po odformování byla tělesa denně ošetřena vodním aerosolem.

### 3.4 Použité zkušební metody

#### 3.4.1 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu byla stanovena dle EN ČSN 1015-11 Zkušební metody malt pro zdivo – Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a tlaku. Pevnost byla stanovena po 7, 28 a 90 dnech zrání při laboratorních podmínkách na zkušebních vzorcích ve tvaru hranolu o rozměrech 40×40×160 mm.

Postup:

Měření bylo provedeno na lisu, kdy se měří celkové zatížení zjištěné zvážením zátěže na střed hranolu, které vede k jeho destrukci. Zkušební vzorek se vkládá do přístroje na opěrné válce, které jsou umístěny ve stejné vzdálenosti od středu vzorku. Výsledná pevnost v tahu za ohybu byla vypočítána ze vztahu:

$$R_f = 1,5 \cdot \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2}$$



---

kde  $R_f$  [MPa] je pevnost v tahu za ohybu  
 $F$  [N] je maximální zatížení na zkušební těleso  
 $l$  [mm] je vzdálenost mezi osami podepřených válců  
 $b$  [mm] je šířka zkušebního tělesa  
 $d$  [mm] je výška zkušebního tělesa

Pevnost v tahu za ohybu byla stanovena jako aritmetický průměr vypočítaný ze tří hodnot.



Obr. 3.13: Přístroj pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu, detail.

### 3.4.2 Stanovení pevnosti v tlaku

Pevnost v tlaku byla stanovena dle EN ČSN 1015-11 Zkušební metody malt pro zdivo – Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a tlaku, po 7, 28 a 90 dnech zrání při laboratorních podmínkách na zkušebních vzorcích ve tvaru hranolu o rozměrech 40x40x160 mm.

Postup:

Zkušební hranol, u něhož byla stanovena pevnost v tahu za ohybu, byl vložen bočními plochami mezi destičky lisu. Po kontrole uložení a nastavení plošek lisu byly vzorky hranolů zatěžovány v tlaku. Měření bylo ukončeno při destrukci vzorků. Výsledná pevnost v tlaku byla vypočítána ze vztahu:

$$R_c = \frac{F \cdot 1000}{A}$$

kde  $R_c$  [Nmm<sup>-2</sup>] je pevnost v tlaku  
 $F$  [N] je síla nutná k porušení zkušební vzorku  
 $A$  [mm<sup>2</sup>] je plocha



Obr. 3.14: Přístroj pro měření pevnosti v tlaku, detail lisovací hlavy.

Hodnoty pevností v tlaku byly stanoveny aritmetickým průměrem pevnostních hodnot zjištěných na třech zkušebních hranolech.

### 3.4.3 Nasákavost za normálního tlaku po 48 hodinách

Stanovení nasákavosti se provádí pozorováním příjmu kapalin, v tomto případě vody, daným materiálem za normálního tlaku po dobu 48 hodin.

Postup:

Zkušební tělesa o rozměrech 40×40×160 mm byly vysušeny do konstantní hmotnosti a zváženy, následně postaveny do nádoby a do 1/3 výšky zality vodou. Po dvou hodinách byla voda dolita do výšky 2/3 těles. Po dalších dvou hodinách byla voda doplněna 3 cm nad horní okraj těles. Aby byly všechny stěny zkušebních těles zpřístupněny vodě, byla tělesa postavena na polyethylenovou síťku.

Po 48 hodinách od počátku namáčení byla zkušební tělesa vyjmuta z vody, mírně na povrchu osušena hadříkem a zvážena. Hodnoty nasákavosti byly vypočítány ze vztahu:

$$NV_{48} = (m_{48} - m) / m \cdot 100$$

kde  $NV_{48}$  [%] je nasákavost vodou po 48 hodinách

$m_{48}$  [g] je hmotnost vzorku omítky po 48 ponoření do vody

$m$  [g] je hmotnost suchého vzorku

Nasákavost u daného typu vzorků byla vypočítána jako aritmetický průměr ze tří měření.

---

#### 3.4.4 Stanovení objemové hmotnosti

Objemová hmotnost byla měřena na vzorcích během jejich zrání vždy před stanovováním pevností v tahu za ohybu a tlaku po 7, 28 a 90 dnech. Použita jsou pouze měření na zkušebních tělesech po 90 dnech zrání.

Postup:

Rozměry těles byly změřeny posuvným měřítkem s přesností na 0,01 mm, z hodnot byl vypočítán objem. Z hmotnosti a objemu vzorků byla vypočítána objemová hmotnost podle vztahu:

$$\rho = m_s / V$$

kde  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] je objemová hmotnost  
 $m_s$  [kg] je hmotnost zkušebního tělesa  
 $V$  [m<sup>3</sup>] je objem

Objemová hmotnost byla zjištěna u všech vzorků připravených k měření. Výsledná hodnota byla vypočítána jako aritmetický průměr ze šesti vzorků.

#### 3.4.5 Rtuťová porozimetrie

Rtuťová porozimetrie je založena na jevu kapilární deprese projevující se tím, že při ponoření pevné porézní látky do rtuti, která ji nesmáčí, může rtuť díky účinku vnějšího tlaku vniknout do jejich pórů. Tento tlak musí být o to větší, čím užší póry jsou zaplňovány. Kvantitativně lze vyjádřit tento vztah následovně:

$$g \cdot \rho \cdot h \cdot \pi \cdot r^2 = -2 \cdot \pi \cdot r \cdot \gamma \cdot \cos \Theta$$

kde  $g$  [m/s<sup>2</sup>] je zrychlení  
 $\rho$  [g/m<sup>3</sup>] je hustota rtuti  
 $h$  [m] je výška sloupce rtuti v póru  
 $r$  [m] je poloměr póru kruhového průřezu  
 $\gamma$  [N/m] je povrchové napětí rtuti v póru  
 $\cos \Theta$  je úhel smáčení stěn pórů rtutí.

Uvedený vztah lze přepsat do tvaru:

$$gph = P = -2\gamma \cdot \cos \Theta / r$$

---

kde  $P$  [ $\text{N/m}^2$ ] je celkový tlak, pod nímž rtuť vniká do póru. Poloměr zaplněného póru je tedy nepřímo úměrný hodnotě použitého tlaku, takže při nejmenších tlacích jsou rtuť zaplněny póry o největším poloměru a každý přírůstek tlaku vyvolává vniknutí rtuti do frakce pórů o příslušném menším poloměru.

Princip měření rtuťovým porozimetrem spočívá ve sledování závislosti vloženého tlaku na úbytku rtuti v nádobce, z níž je rtuť vytlačována do pórů měřeného vzorku. Úbytek rtuti, a tím zjištění tzv. intruzního objemu, se v moderních přístrojích určuje ze změny kapacity kondenzátoru, který je tvořen kovovou vrstvou nanesenou na skleněné kapiláře a rtuť, která kapiláru částečně zaplňuje. Vysokých tlaků okolo 200 MPa nebo až 400 MPa se docílí pomocí tlakových násobičů.

Stanovení je rozděleno na dvě základní části. V rámci nízkotlaké analýzy probíhá evakuace vzorku a měření v oblasti makropórů v tlakovém rozsahu od 0,003 - 0,01 MPa podle povahy vzorku do 0,13 MPa. Ve vysokotlaké části probíhá měření převážně v oblasti mezopórů od 0,13 MPa do 200 MPa. V průběhu analýzy dochází k postupnému zvyšování tlaku a zaznamenávání objemu rtuti vtlačené do pórů. Z odečtených údajů lze sestavit tzv. kumulativní distribuci pórů, která vyjadřuje závislost objemu pórů s poloměry většími než odpovídá okamžitému tlaku podle Washburnovy rovnice. Záporně vzatou derivací této závislosti se získá frekvenční křivka rozdělení pórů podle poloměru názorně ukazující, které póry přispívají k celkovému objemu pórů nejvíce.

Pracovní postup:

Zvážený vzorek byl vložen do vhodné měřicí nádoby - penetrometru. Penetrometr byl uzavřen a po zvážení umístěn do portu nízkotlaké analýzy. Následovalo vevakuování vzorku. Po dosažení požadovaného tlaku Hg sloupce byla provedena nízkotlaká a vysokotlaká rtuťovou analýza.

Měření bylo provedeno na přístroji: Micromeritics pore sizer 9310.

### **3.4.6 Elektronová mikroskopie (REM)**

Rastrovací elektronová mikroskopie umožňuje pozorování struktury různých materiálů při malých i velkých zvětšeních s velkou hloubkovou ostrostí obrazu, povrchu i vnitřní strukturu (např. na lomu), jeho stavby, koroze a korozních změn.

Rastrovací elektronová mikroskopie používá pro pozorování zaostřený paprsek elektronů ke snímání vzorků. Elektronový paprsek má velmi krátkou vlnovou délku, což umožňuje pozorování částic a struktur až do velikosti kolem 2 nm s dobrým

---

rozlišením. Pro srovnání u velmi kvalitní optických mikroskopů se uvádí zvětšení pouze do 200 nm.

Princip:

Ze vzorku snímaného paprskem elektronů jsou emitovány sekundární nebo odražené elektrony, které jsou detekovány a tvoří plošnou mapu sekundárních emisí. Intenzita této emise sekundárních vzorků odpovídá lokální morfologii vzorku. Takto snímaná mapa odpovídá zvětšenému obrazu vzorku. U rastrovací elektronové mikroskopie je velká hloubková ostrost a projevuje se trojrozměrně působícím obrazem. Velikost pozorovaného vzorku může být od drobných rozměrů až do 10 cm.

Pro pozorování vzorků byl použit elektronový mikroskop FEI Quanta™.

### 3.4.7 Optická mikroskopie

Optická polarizační mikroskopie umožňuje v polarizovaném světle studovat i ty vlastnosti, které nejsou ve viditelném spektru patrné. Používá se k pozorování výbrusových preparátů v běžném a polarizovaném světle. Vhodná je pro studium porézních systémů hornin, keramiky a omítek.

Pozorování a snímkování bylo provedeno na mikroskopu Nikon Elipse ME 600; fotonástavec s digitálním fotoaparátem Nikon D 200.

### 3.4.8 Propustnost pro transport vody

Měření se provádí improvizovanou metodou. Nejvhodněji lze metodu vyjádřit jako množství vody transportované definovanou plochou za jednotku času (podobně jako koeficient nasákavosti).

Výpočet propustnosti pro transport vody se provádí podle následujícího vztahu:

$$K_{W24} = M_{H2O} / S \cdot \sqrt{t}$$

kde  $K_{W24}$  [kg/m<sup>2</sup>h<sup>0,5</sup>] je propustnost pro transport vody

$M_{H2O}$  [kg] je množství transportované/odpařené vody za jednotku času

$S$  [m<sup>2</sup>] je odpařovací plocha (plocha vzorku)

$t$  [h] je čas

### 3.4.9 Stanovení obsahu vodorozpustných solí, UV/VIS spektrofotometrie

Obsah vodorozpustných solí byl stanoven za použití metody UV/VIS spektrofotometrie. Metoda detekuje koncentraci anionů pomocí stanovení

---

absorbance  $A$ . Ta je podle Lambert-Beerova zákona přímo úměrná koncentraci podle následujícího vztahu:

$$A = a\lambda lc$$

kde  $A$  je absorbance

$\lambda$  [ $\text{dm}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ] je absorpční koeficient daný charakteristickou vlnovou délkou

$l$  [cm] je tloušťka absorbujícího prostředí (kyveta 1 cm)

$c$  [ $\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ] je molární koncentrace atomů nebo molekul

Pracovní postup:

Ze vzorků kameniva byly zhotoveny výluhy o definované hmotnosti v daném objemu destilované vody. Obvykle se luhuje v množství vody, která je desetinásobkem hmotnosti luhovaného vzorku. Výluhy byly po 24 hodinách přefiltrovány a dány do kyvet, kde k nim byla přidána indikační činidla. Takto připravené vzorky byly proměřeny ve spektrofotometru. Podmínky měření jsou definovány v tabulce 3.12.

Tabulka 3.12: Podmínky stanovení obsahu solí, UV/VIS spektrofotometrie

stanovený anion	$\lambda$ (nm)	indikační roztok	kalibrační roztok
sírany ( $\text{SO}_4^{2-}$ )	345	0,5 % $\text{BaCl}_2$	destilovaná voda
dusičnany ( $\text{NO}_3^-$ )	525	Illoswayovo činidlo (roztok kys. sulfanilové + $\alpha$ -naftylaminu v kys. octové)	destilovaná voda
chloridy ( $\text{Cl}^-$ )	456	$\text{Hg}(\text{SCN})_2 + \text{Fe}(\text{NO}_3)_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ v $\text{HNO}_3$	destilovaná voda

---

## 4 VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ

### 4.1 Stanovení přítomnosti vodorozpustných solí v použitém kamenivu

Výsledky měření koncentrace solí v jednotlivých maltách jsou uvedeny v následující tabulce 4.1.

Tabulka 4.1: Koncentrace solí ve vzorcích kameniva

soli vzorek	A (Cl <sup>-</sup> )		A (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )		A (NO <sup>3-</sup> )	
	c [hm.%]	c [mmol/kg]	c [hm.%]	c [mmol/kg]	c [hm.%]	c [mmol/kg]
LIA	0,01	3	0,22	23	0,01	2
PER	0,01	2	0,01	2	0,00	-1
PEM G	0,01	4	0,02	2	0,00	0
PEM R	0,01	3	-0,01	-1	0,05	7
ZE	0,01	3	0,01	1	0,00	0
Písek Hulín	0,01	2	0,11	11	0,00	0

U testovaných kameniv byla zjištěna zanedbatelná koncentrace vodorozpustných solí. Výjimku tvořil liapor, u kterého je zvýšena koncentrace síranových iontů.

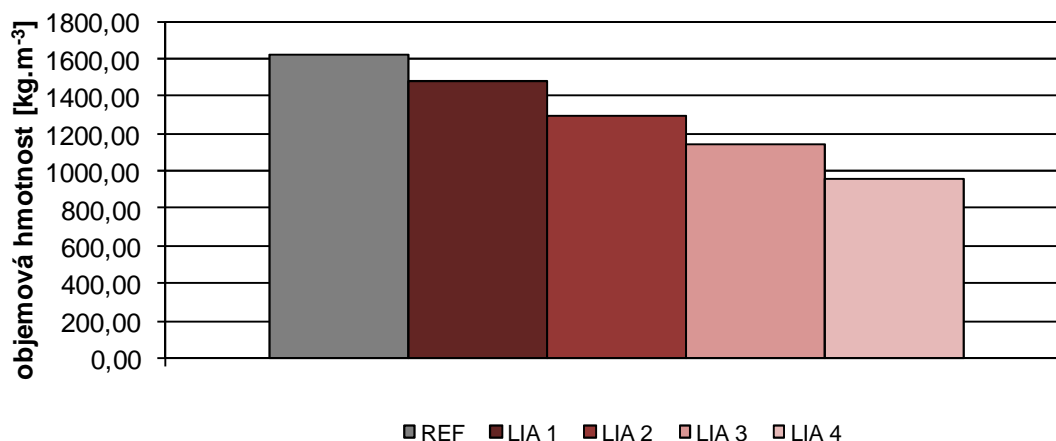
## 4.2 Malty s liaporem

### 4.2.1 Objemová hmotnost po 90 dnech

Vypočítané hodnoty objemové hmotnosti jsou uvedeny v tabulce 4.2. Porovnání jejich hodnot je zakresleno v grafu 4.1.

Tabulka 4.2 : Objemová hmotnost

označení vzorku	objemová hmotnost [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
REF	1626,47
LIA 1	1477,84
LIA 2	1291,12
LIA 3	1147,87
LIA 4	952,66



Obr. 4.1: Objemová hmotnost

Nejvyšší objemová hmotnost byla naměřena u malty LIA 1 s nejmenším obsahem porézního kameniva. Naměřené hodnoty jsou úměrné množství porézního kameniva v jednotlivých směsích. S nárůstem množství liaporu klesá objemová hmotnost malty.

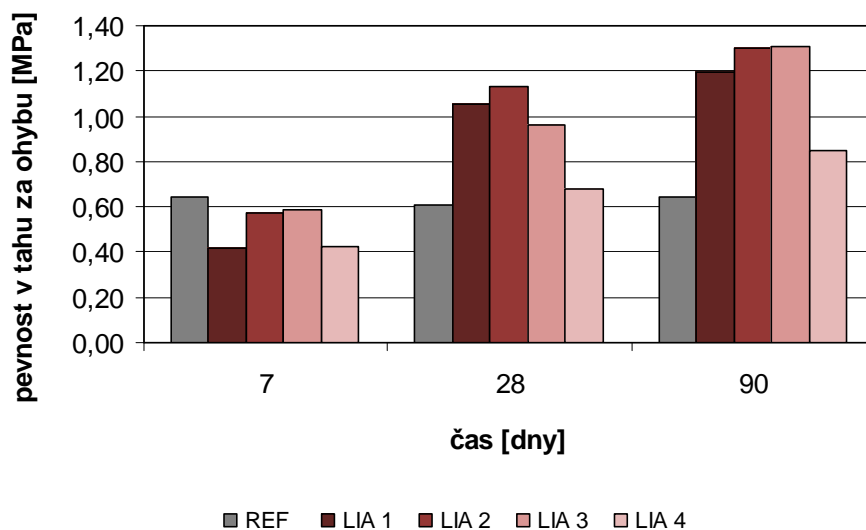


#### 4.2.2 Pevnost v tahu za ohybu

Vypočítané hodnoty pevnosti v tahu za ohybu jsou uvedeny v tabulce 4.3. Jejich grafické znázornění je vyjádřeno na obrázku 4.2.

Tabulka 4.3: Pevnost v tahu za ohybu

označení vzorku	po 7 dnech [MPa]	po 28 dnech [MPa]	po 90 dnech [MPa]
REF	0,65	0,61	0,64
LIA 1	0,42	1,05	1,20
LIA 2	0,57	1,13	1,30
LIA 3	0,59	0,96	1,31
LIA 4	0,42	0,68	0,85



Obr. 4.2: Pevnost v tahu za ohybu

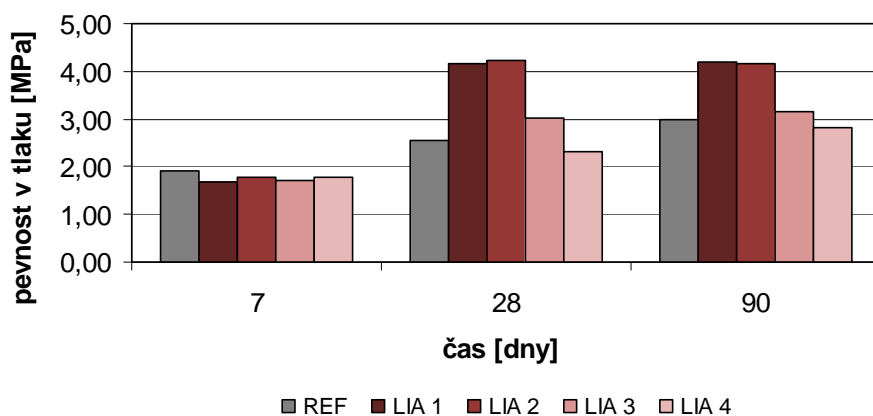
Nejnižší hodnotu pevnosti v tahu za ohybu vykazuje malta LIA 4, nejvyšší pak LIA 3. U malt s podílem liaporu v kamenivu dochází v porovnání s referenčním vzorkem k nárůstu pevnosti v závislosti na čase. Vyšších pevností dosáhly malty s kamenivem složeným z písku a liaporu. Malta plněná pouze liaporem vykazovala trvale nejnižší pevnost v tahu za ohybu.

### 4.2.3 Pevnost v tlaku

Vypočítané hodnoty pevnosti v tlaku jsou uvedeny v tabulce 4.4. Jejich grafické znázornění je vyjádřeno na obrázku 4.3.

Tabulka 4.4: Pevnost v tlaku

označení vzorku	po 7 dnech [MPa]	po 28 dnech [MPa]	po 90 dnech [MPa]
REF	1,92	2,54	2,98
LIA 1	1,69	4,15	4,21
LIA 2	1,79	4,23	4,17
LIA 3	1,70	3,01	3,14
LIA 4	1,76	2,30	2,83



Obr. 4.3: Pevnost v tlaku

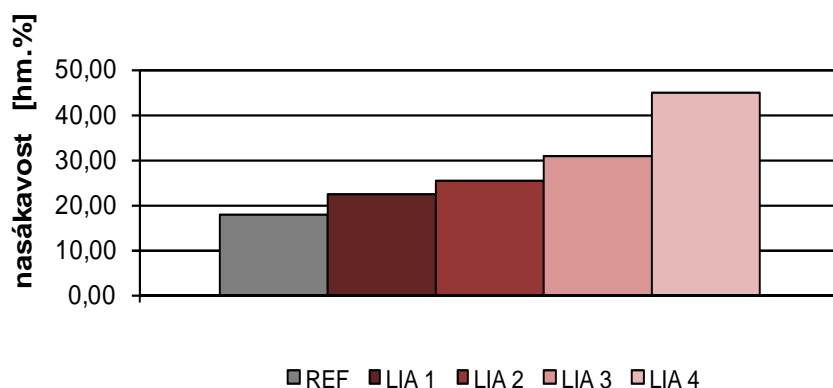
Nejvyšší hodnota pevnosti v tlaku byla zjištěna u malty LIA 2 a v těsném odstupu u LIA 1. Nejnižší pevnosti byly naměřeny u malty LIA 4 plněné pouze liaporem. Obecně lze konstatovat, že s přibývajícím množstvím porézniho kameniva klesá pevnost v tlaku. S přibývajícím časem narůstá pevnost malt.

#### 4.2.4 Nasákavost za normálního tlaku po 48 hodinách

Nasákavost modelových vzorků je mírou kapilární aktivity omítky. Byla zjištěna po 48 hodinách. Její hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.5. Porovnání výsledných hodnot je graficky znázorněno na obrázku 4.4.

Tabulka 4.5 : Nasákavost po 48 hodinách

označení vzorku	nasákavost [hm.%]
REF	17,81
LIA 1	22,28
LIA 2	25,73
LIA 3	30,87
LIA 4	44,78

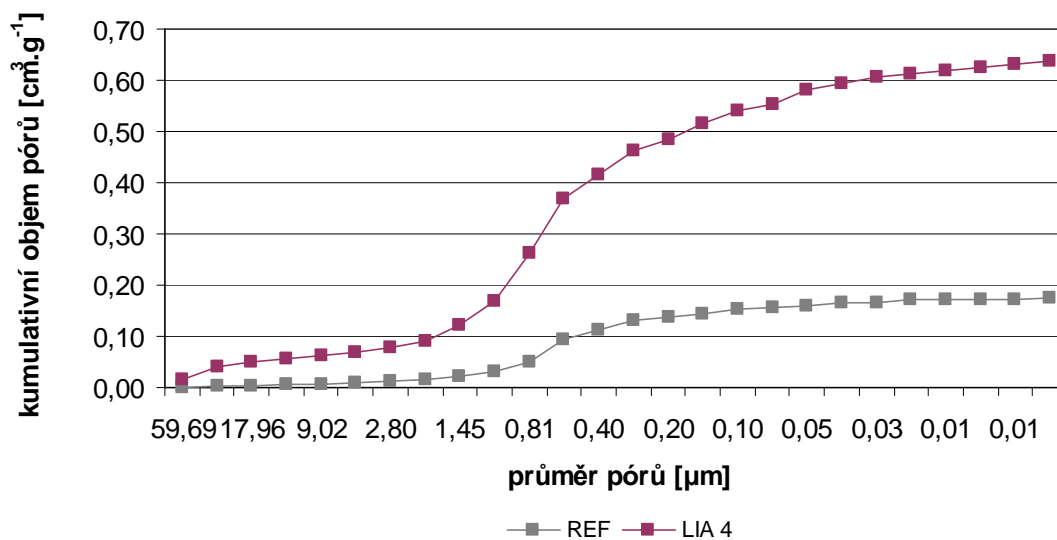


Obr. 4.4 : Nasákavost po 48 hodinách

Nejvyšší nasákavost byla naměřena u malty s nejvyšším podílem liaporu v kamenivu. S ubývajícím porézním kamenivem klesala i nasákavost malt. Nejnižší nasákavost vykazovala malta LIA 1, která byla vyšší než referenční malta.

#### 4.2.5 Rtuťová porozimetrie

Naměřené hodnoty průměrů pórů jsou vyjádřeny graficky na obrázku 4.5.



Obr. 4.5: Rtuťová porozimetrie

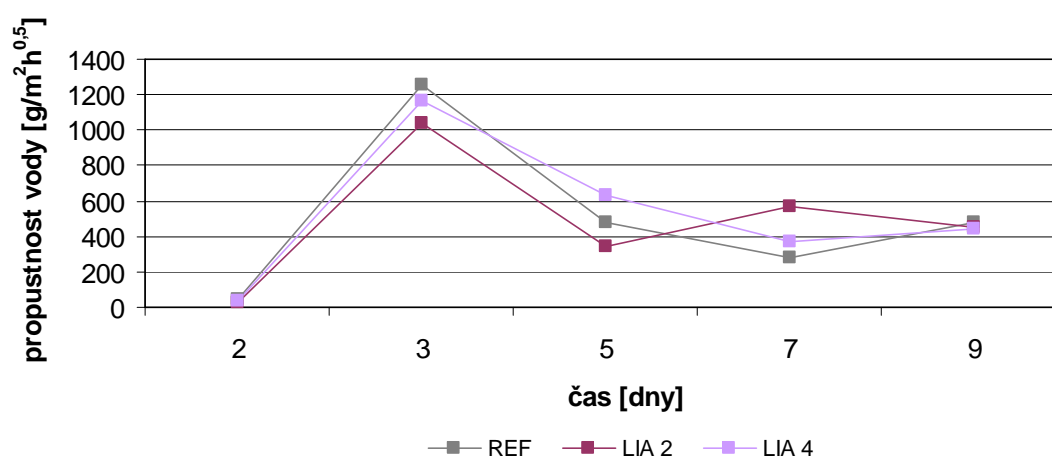
Malta plněná liaporem vykazuje větší rtuťovou porozitu než referenční malta. Dominantní zastoupení mají póry o velikosti 0,01 – 0,05 μm.

#### 4.2.6 Propustnost pro transport vody

Vypočítané hodnoty propustnosti pro transport vody jsou uvedeny v tabulce 4.6. Jejich grafické znázornění je vyjádřeno na obrázku 4.6.

Tabulka 4.6: Propustnost pro transport vody

označení vzorku	propustnost pro transport vody [ $\text{g}/\text{m}^2\text{h}^{0,5}$ ]				
REF	45,4	1258,9	477,3	281,0	474,6
LIA 2	22,9	1037,7	344,0	571,7	450,4
LIA 4	37,8	1166,3	635,9	374,6	440,1
čas [dny]	2	3	5	7	9



Obr. 4.6.: Propustnost pro transport vody

Hodnoty propustnosti pro vodu u malt s liaporem mají podobné chování jako referenční malta. Prudký vzestup propustnosti vrcholící po 3 dnech měření by mohl pravděpodobně signalizovat prosycení vzorku malty roztokem a odpařování vody volným porézním systémem. Následný pokles propustnosti vody by mohl signalizovat postupné zaplňování porézního systému krystaly síranu sodného. Mírné zvýšení propustnosti vody po 7 dnech může souviset s počátečními destrukcemi omítky a snadnější prostupností vody trhlinami. Do 3 dnů měření vykazovaly malty s liaporem menší propustnost vody než referenční malta.

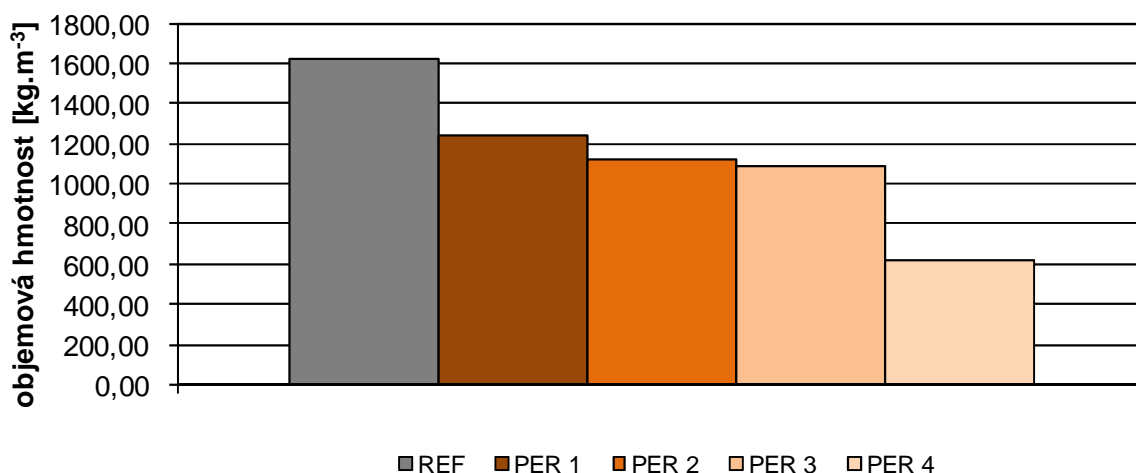
## 4.3 Malty s perlitem

### 4.3.1 Objemová hmotnost po 90 dnech

Vypočítané hodnoty objemové hmotnosti jsou uvedeny v tabulce 4.7. Porovnání jejich hodnot je zakresleno v grafu 4.7.

Tabulka 4.7: Objemová hmotnost

označení vzorku	objemová hmotnost [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
REF	1626,47
PER 1	1237,49
PER 2	1121,34
PER 3	1089,93
PER 4	618,89



Obr. 4.7: Objemová hmotnost

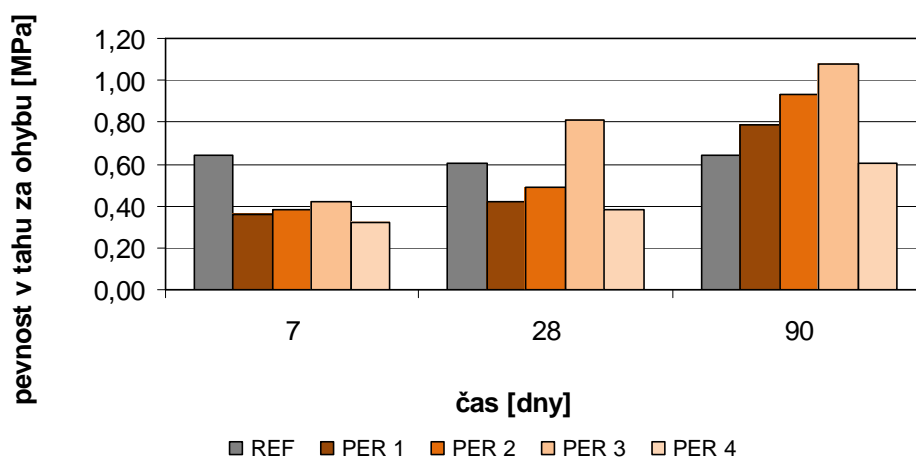
Nejvyšší objemová hmotnost byla naměřena u malty PER 1 s nejmenším obsahem porézního kameniva. Naměřené hodnoty jsou úměrné množství porézního kameniva v jednotlivých maltách. S nárůstem množství perlitu klesá objemová hmotnost malty.

### 4.3.2 Pevnost v tahu za ohybu

Vypočítané hodnoty pevnosti v tahu za ohybu jsou uvedeny v tabulce 4.8. Jejich grafické znázornění je vyjádřeno na obrázku 4.8.

Tabulka 4.8: Pevnost v tahu za ohybu

označení vzorku	po 7 dnech [MPa]	po 28 dnech [MPa]	po 90 dnech [MPa]
REF	0,65	0,61	0,64
PER 1	0,36	0,42	0,79
PER 2	0,38	0,49	0,93
PER 3	0,42	0,81	1,08
PER 4	0,32	0,38	0,61



Obr. 4.8: Pevnost v tahu za ohybu

Nejvyšší hodnota pevnosti v tahu za ohybu byla zjištěna u malty PER 3. Nejnižší pevnost v tahu za ohybu vykazuje malta PER 4 plněná výhradně perlitem. U malt plněných pískem a perlitem roste s množstvím perlitu v maltě i pevnost v tahu za ohybu.

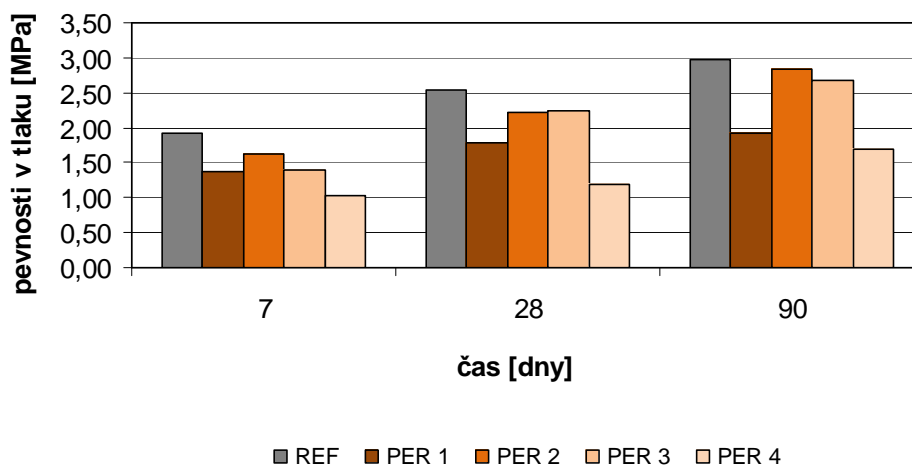


### 4.3.3 Pevnost v tlaku

Vypočítané hodnoty pevnosti v tlaku jsou uvedeny v tabulce 4.9. Jejich grafické znázornění je vyjádřeno na obrázku 4.9.

Tabulka 4.9: Pevnost v tlaku

označení vzorku	po 7 dnech [MPa]	po 28 dnech [MPa]	po 90 dnech [MPa]
REF	1,92	2,54	2,98
PER 1	1,37	1,77	1,92
PER 2	1,62	2,23	2,84
PER 3	1,40	2,25	2,69
PER 4	1,02	1,20	1,70



Obr. 4.9: Pevnost v tlaku

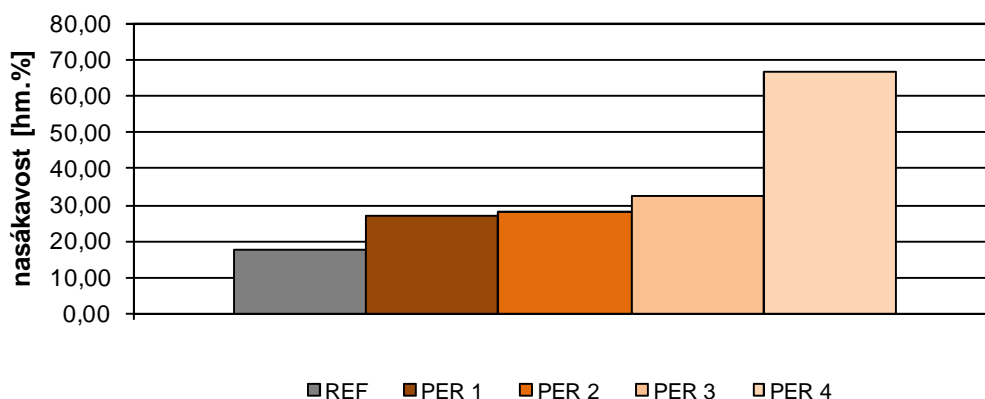
Nejvyšší hodnota pevnosti v tlaku byla zjištěna u malty PER 2, dále u PER 3 a PER 1. Nejnižší u malty PER 4, která je plněna pouze perlitem.

#### 4.3.4 Nasákavost za normálního tlaku po 48 hodinách

Nasákavost modelových těles je mírou kapilární aktivity omítky. Byla zjištěna po 48 hodinách. Její hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.10. Porovnání výsledných hodnot je graficky znázorněno na obrázku 4.10.

Tabulka 4.10: Nasákavost

označení vzorku	nasákavost [%]
REF	17,81
PER 1	27,03
PER 2	28,18
PER 3	32,78
PER 4	66,77

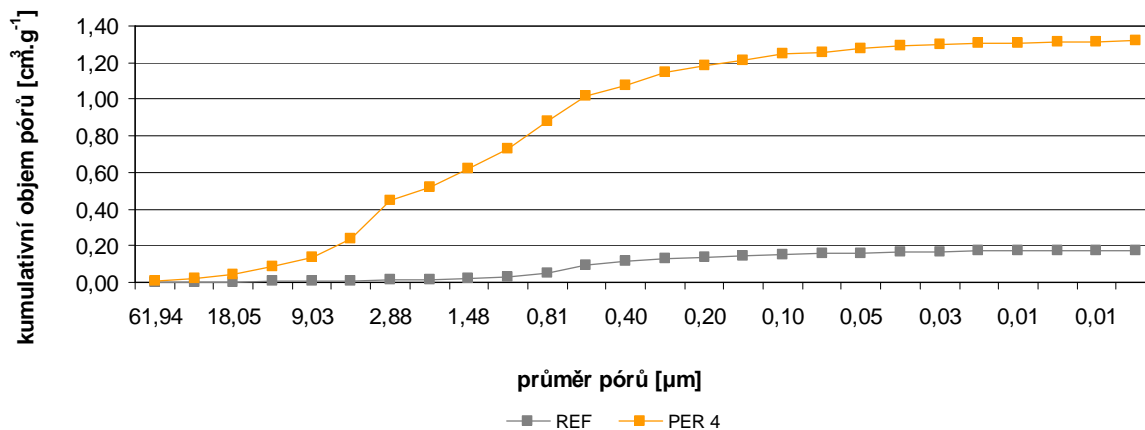


Obr. 4.10: Nasákavost

Nejvyšší nasákavost byla naměřena u malty s nejvyšším podílem perlitu v kamenivu. S ubývajícím porézním kamenivem klesala i nasákavost malt. Nejnižší nasákavost vykazovala malta PER 1, která byla vyšší než referenční malta. Nasákavost malty PER 4 plněné pouze perlitem byla několikrát vyšší než nasákavost referenčního vzorku.

### 4.3.5 Rtuťová porozimetrie

Naměřené hodnoty průměrů pórů jsou vyjádřeny graficky na obrázku 4.11.



Obr. 4.11: Rtuťová porozimetrie

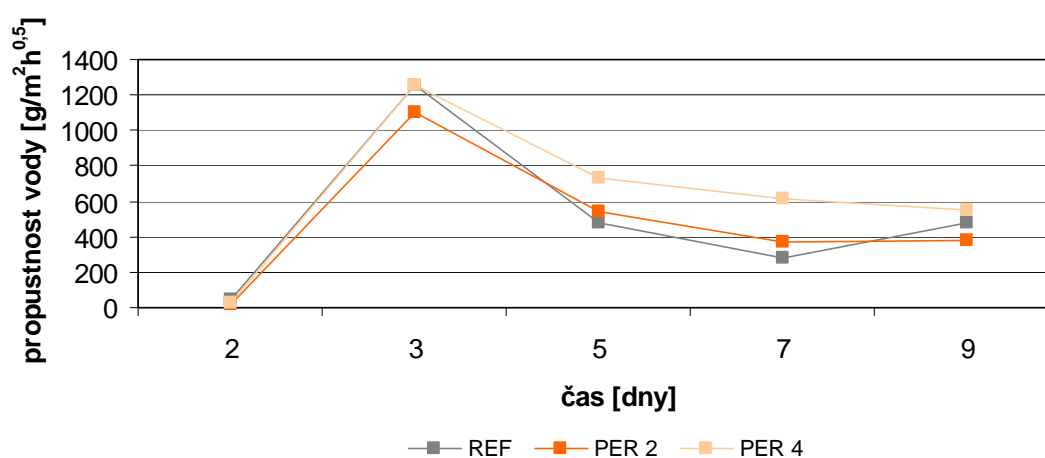
Malta plněná perlitem vykazuje výrazně větší porozitu než referenční malta. Dominantní zastoupení mají póry o velikosti 0,01 – 0,05 μm. Největší objem pórů je zastoupen póry o velikosti 0,01 – 0,1 μm.

#### 4.3.6 Propustnost pro transport vody

Vypočítané hodnoty propustnosti pro transport vody jsou uvedeny v tabulce 4.11. Jejich grafické znázornění je vyjádřeno na obrázku 4.12.

Tabulka 4.11: Propustnost pro transport vody

označení vzorku	propustnost pro transport vody [ $\text{g}/\text{m}^2\text{h}^{0,5}$ ]				
REF	45,4	1258,9	477,3	281,0	474,6
PER 2	15,3	1104,3	543,5	371,9	378,0
PER 4	28,1	1257,9	729,1	614,1	547,4
čas [dny]	2	3	5	7	9



Obr. 4.12: Propustnost pro transport vody

Hodnoty propustnosti pro vodu u malt s perlitem mají podobné chování jako referenční malta. Prudký vzestup propustnosti vrcholící po 3 dnech měření by mohl pravděpodobně signalizovat prosycení vzorku malty roztokem a odpařování vody volným porézním systémem. Malta plněná výhradně perlitem má po celou dobu měření vyšší propustnost vody než malta s kamenivem z perlitu s pískem a referenční malta.

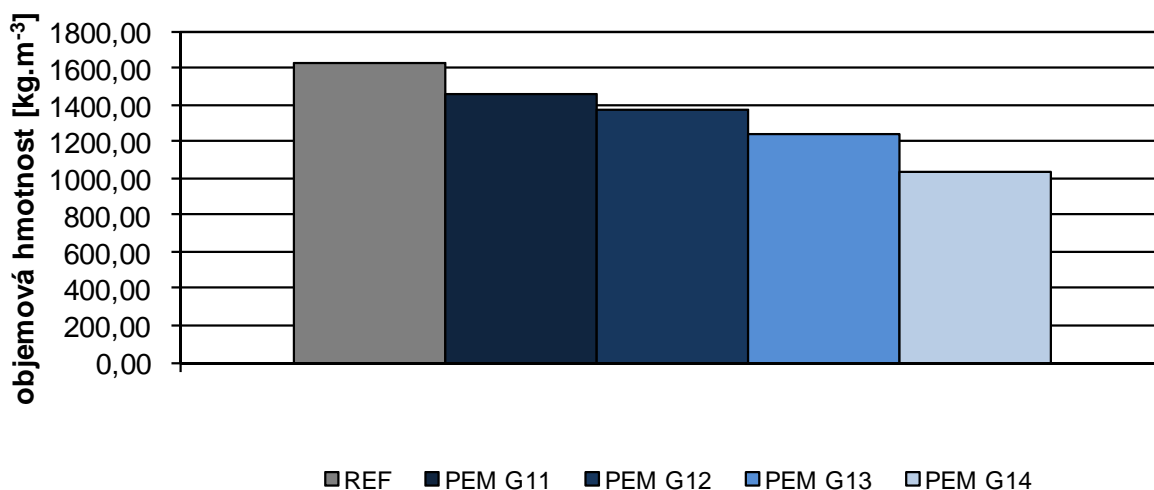
## 4.4 Malty s pemzou (lokalita Řecko)

### 4.4.1 Objemová hmotnost po 90 dnech

Vypočítané hodnoty objemové hmotnosti jsou uvedeny v tabulce 4.12. Porovnání jejich hodnot je zakresleno v grafu 4.13.

Tabulka 4.12: Objemová hmotnost

označení vzorku	objemová hmotnost [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
REF	1626,47
PEM G11	1458,23
PEM G12	1367,27
PEM G13	1236,39
PEM G14	1034,29



Obr. 4.13: Objemová hmotnost

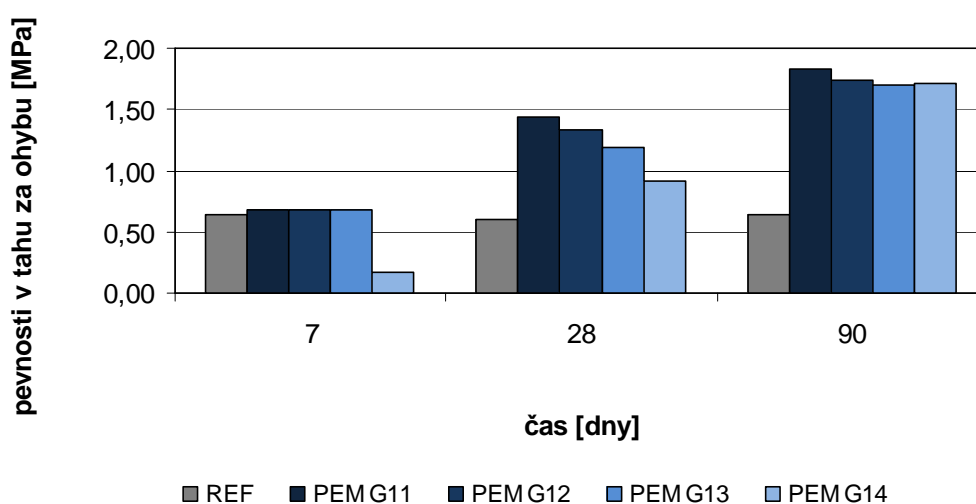
Nejvyšší objemová hmotnost byla naměřena u malty PEM 11 s nejmenším obsahem porézního kameniva. Naměřené hodnoty jsou úměrné množství porézního kameniva v jednotlivých maltách. S nárůstem množství pemzy klesá objemová hmotnost malty.

#### 4.4.2 Pevnost v tahu za ohybu

Vypočítané hodnoty pevnosti v tahu za ohybu jsou uvedeny v tabulce 4.13. Jejich grafické znázornění je vyjádřeno na obrázku 4.14.

Tabulka 4.13: Pevnost v tahu za ohybu

označení vzorku	po 7 dnech [MPa]	po 28 dnech [MPa]	po 90 dnech [MPa]
REF	0,65	0,61	0,64
PEM G11	0,68	1,44	1,82
PEM G12	0,68	1,33	1,74
PEM G13	0,68	1,20	1,69
PEM G14	0,16	0,91	1,71



Obr. 4.14: Pevnost v tahu za ohybu

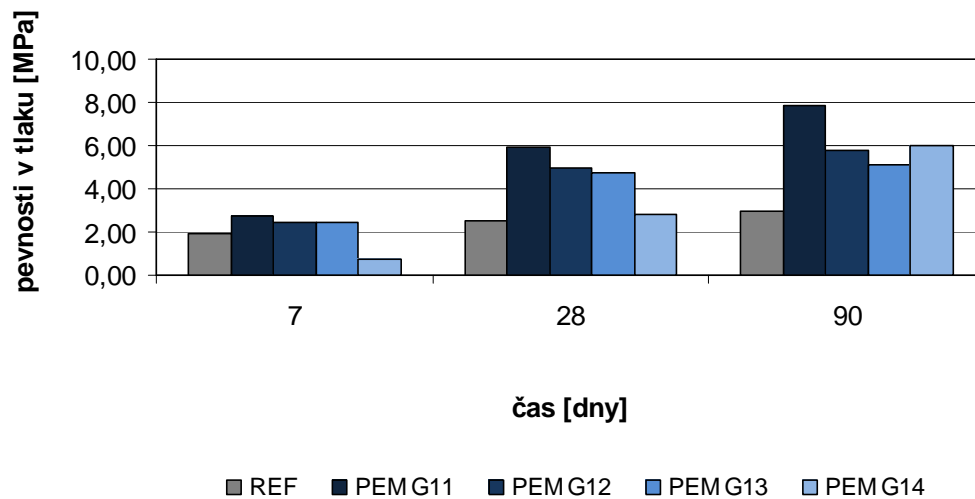
Nejvyšší hodnota pevnosti v tahu za ohybu byla zjištěna u malty PEM G11. Nejnižší pevnost v tahu za ohybu vykazuje malta PEM G14 plněná výhradně řeckou pemzou. U malt plněných pískem a řeckou pemzou klesá s množstvím pemzy v maltě i pevnost v tahu za ohybu. Naměřené hodnoty s výjimkou malty PEM G14 po 7 dnech vykazují vždy vyšší pevnosti než referenční malta.

#### 4.4.3 Pevnost v tlaku

Vypočítané hodnoty pevnosti v tlaku jsou uvedeny v tabulce 4.14. Jejich grafické znázornění je vyjádřeno na obrázku 4.15.

Tabulka 4.14: Pevnost v tlaku

označení vzorku	po 7 dnech [MPa]	po 28 dnech [MPa]	po 90 dnech [MPa]
REF	1,92	2,54	2,98
PEM G11	2,76	5,89	7,82
PEM G12	2,42	4,94	5,76
PEM G13	2,42	4,76	5,15
PEM G14	0,71	2,81	6,03



Obr. 4.15: Pevnost v tlaku

Nejvyšší hodnota pevnosti v tlaku byla zjištěna u malty PEM 11, dále u PEM 12. V průměru nejnižší pevnost v tlaku vykazovala malta PEM 14. Po 90 dnech nejnižší pevnost vykazovala malta PEM 13.

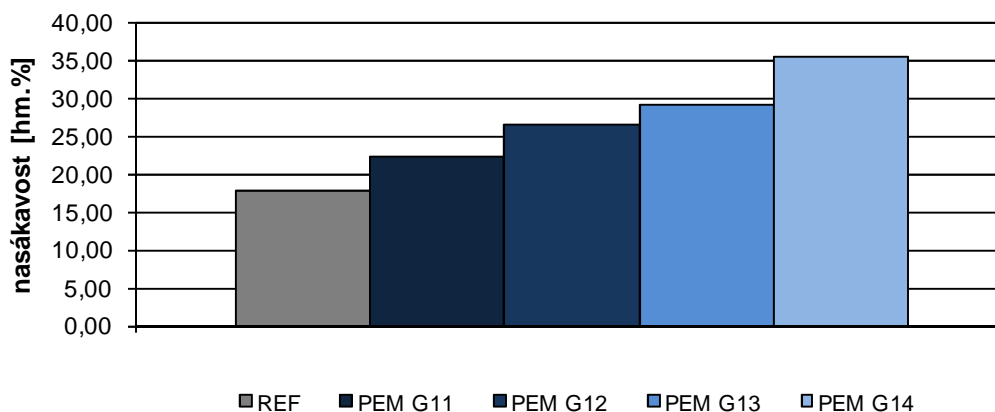


#### 4.4.4 Nasákavost za normálního tlaku po 48 hodinách (lokality Řecko)

Nasákavost modelových těles je mírou kapilární aktivity omítky. Byla zjištěna po 48 hodinách. Její hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.15. Porovnání výsledných hodnot je graficky znázorněno na obrázku 4.16.

Tabulka 4.15: Nasákavost

označení vzorku	nasákavost [%]
REF	17,81
PEM G11	22,45
PEM G12	26,56
PEM G13	29,14
PEM G14	35,55

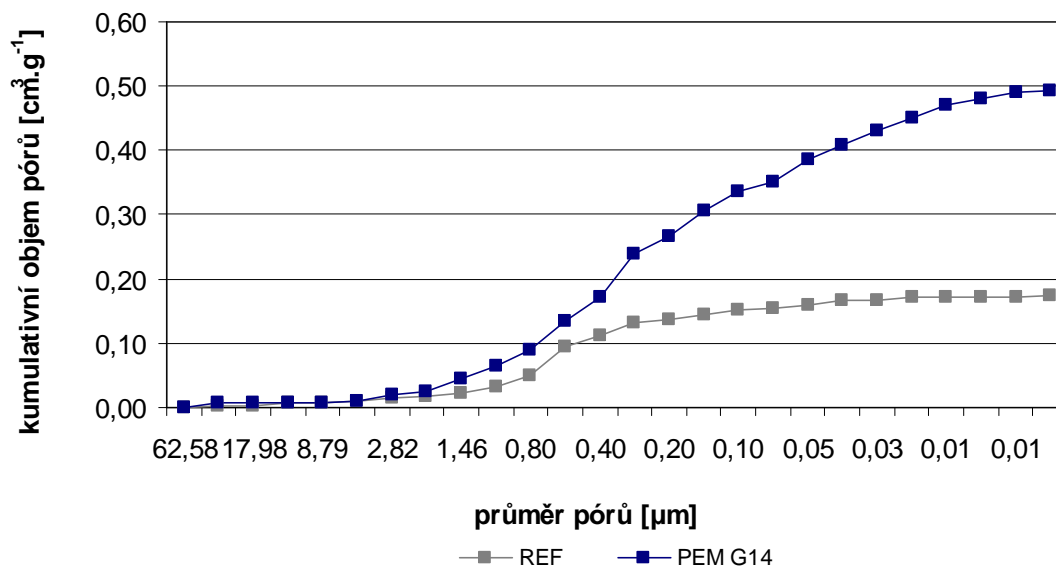


Obr. 4.16: Nasákavost

Nejvyšší nasákavost byla naměřena u malty s nejvyšším podílem pemzy v kamenivu. S ubývajícím porézním kamenivem klesala i nasákavost malt. Nejnižší nasákavost vykazovala malta PEM G11, která byla vyšší než referenční malta. Nasákavost malt roste přímou úměrou k podílu pemzy v kamenivu.

#### 4.4.5 Rtuťová porozimetrie

Naměřené hodnoty průměrů pórů jsou vyjádřeny graficky na obrázku 4.17.



Obr. 4.17: Rtuťová porozimetrie

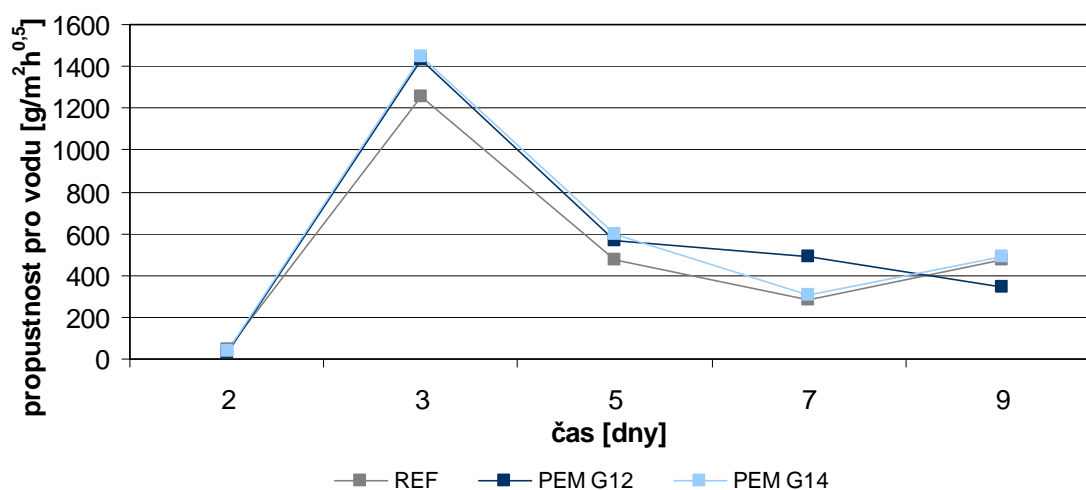
Malta plněná řeckou pemzou vykazuje větší porozitu než referenční malta. Dominantní zastoupení mají póry o velikosti 0,01 – 0,05 μm. U této malty téměř plynule stoupá objem pórů s jejich zmenšujícím se průměrem. Objem pórů o velikosti 2,82 μm je téměř totožný s objemem pórů stejné velikosti u referenční malty.

#### 4.4.6 Propustnost pro transport vody

Vypočítané hodnoty propustnosti pro transport vody jsou uvedeny v tabulce 4.16. Jejich grafické znázornění je vyjádřeno na obrázku 4.18.

Tabulka 4.16: Propustnost pro transport vody

označení vzorku	propustnost pro transport vody [ $\text{g}/\text{m}^2\text{h}^{0,5}$ ]				
REF	45,4	1258,9	477,3	281,0	474,6
PEM G12	30,5	1428,1	566,8	487,1	340,8
PEM G14	39,5	1446,1	598,4	304,2	487,9
čas [dny]	2	3	5	7	9



Obr. 4.18: Propustnost pro transport vody

Hodnoty propustnosti pro vodu u obou malt s řeckou pemzou mají podobné chování jako referenční malta, ale jejich propustnost je větší. Prudký vzestup propustnosti vrcholící po 3 dnech měření by mohl pravděpodobně signalizovat prosycení vzorku malty roztokem a odpařování vody volným porézním systémem. Následný pokles propustnosti vody by mohl signalizovat postupné zaplňování porézního systému krystaly síranu sodného.

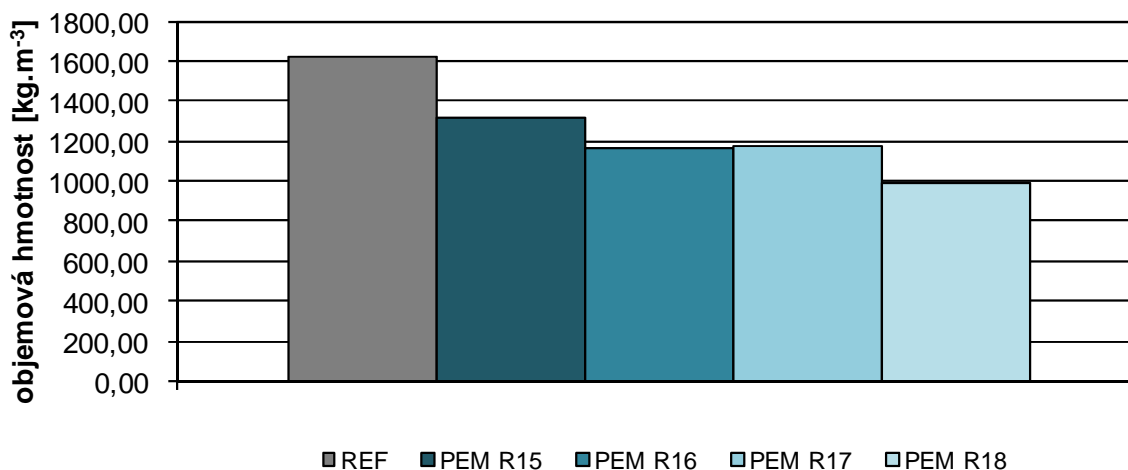
## 4.5 Malty s pemzou (lokalita Německo-Porýní)

### 4.5.1 Objemová hmotnost po 90 dnech

Vypočítané hodnoty objemové hmotnosti jsou uvedeny v tabulce 4.17. Porovnání jejich hodnot je zakresleno na obrázku 4.19.

Tabulka 4.17: Objemová hmotnost

označení vzorku	objemová hmotnost [kg.m <sup>-3</sup> ]
REF	1626,47
PEM R15	1313,57
PEM R16	1159,88
PEM R17	1172,04
PEM R18	994,37



Obr. 4.19: Objemová hmotnost

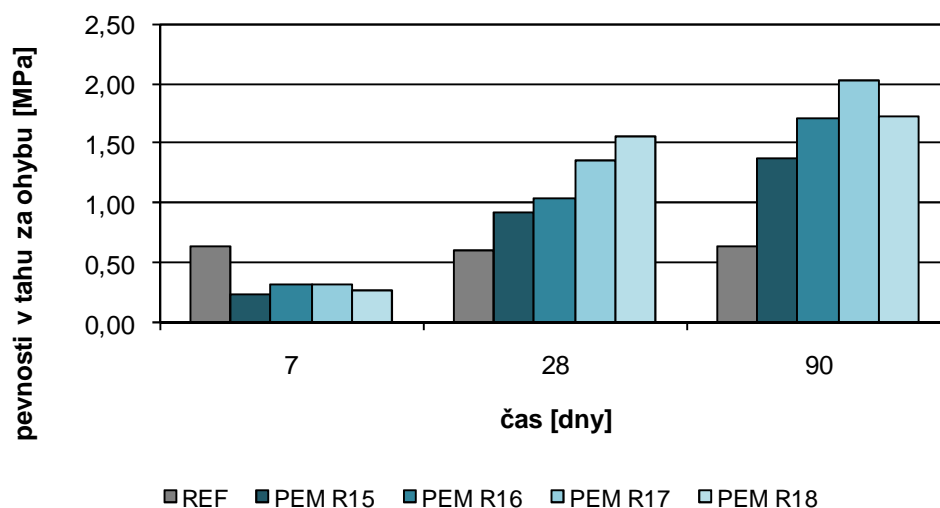
Nejvyšší objemová hmotnost byla naměřena u malty PEM 15 s nejmenším obsahem porézního kameniva. Naměřené hodnoty jsou úměrné množství porézního kameniva v jednotlivých maltách. S nárůstem množství pemzy klesá objemová hmotnost malty. Anomální hodnoty byly naměřeny u malty PEM 17, která má vyšší objemovou hmotnost než malta PEM 16 s menším podílem porézního kameniva a porušuje tím plynule sestupnou tendenci naměřených hodnot.

#### 4.5.2 Pevnost v tahu za ohybu

Vypočítané hodnoty pevnosti v tahu za ohybu jsou uvedeny v tabulce 4.18. Jejich grafické znázornění je vyjádřeno na obrázku 4.20.

Tabulka 4.18 : Pevnost v tahu za ohybu

označení vzorku	po 7 dnech [MPa]	po 28 dnech [MPa]	po 90 dnech [MPa]
REF	0,65	0,61	0,64
PEM R15	0,24	0,93	1,38
PEM R16	0,33	1,05	1,71
PEM R17	0,33	1,36	2,03
PEM R18	0,27	1,55	1,73



Obr. 4.20: Pevnost v tahu za ohybu

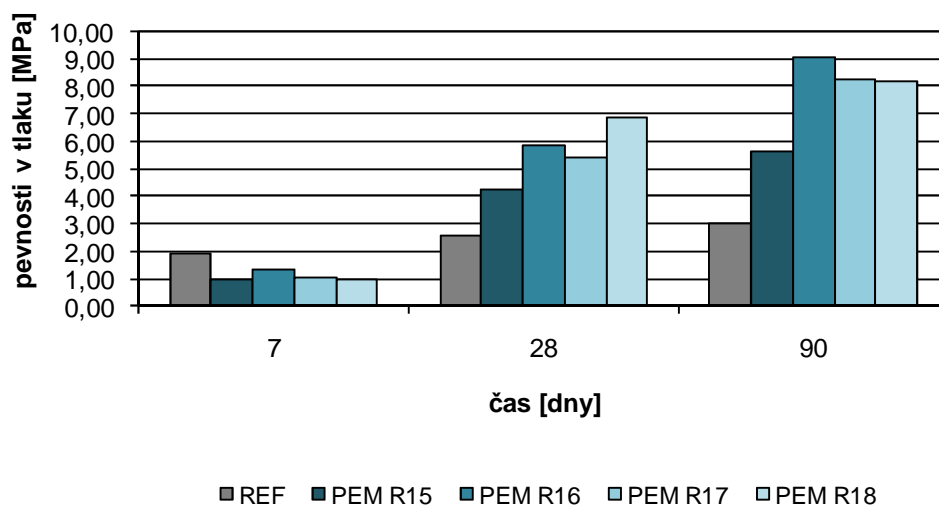
Nejvyšší hodnota pevnosti v tahu za ohybu byla zjištěna u malty PEM R17. Nejnižší pevnost v tahu za ohybu vykazuje malta PEM R15 s nejmenším podílem pemzy v maltě. U malt plněných pískem a řeckou pemzou klesá spolu s klesajícím množstvím pemzy v maltě i pevnost v tahu za ohybu. Naměřené hodnoty, s výjimkou měření po 7 dnech, vykazují vždy vyšší pevnosti než referenční malta.

### 4.5.3 Pevnost v tlaku

Vypočítané hodnoty pevnosti v tlaku jsou uvedeny v tabulce 4.19. Jejich grafické znázornění je vyjádřeno na obrázku 4.21.

Tabulka 4.19: Pevnost v tlaku

označení vzorku	po 7 dnech [MPa]	po 28 dnech [MPa]	po 90 dnech [MPa]
REF	1,92	2,54	2,98
PEM R15	0,95	4,22	5,63
PEM R16	1,31	5,84	9,07
PEM R17	1,05	5,38	8,24
PEM R18	0,97	6,86	8,16



Obr. 4.21: Pevnost v tlaku

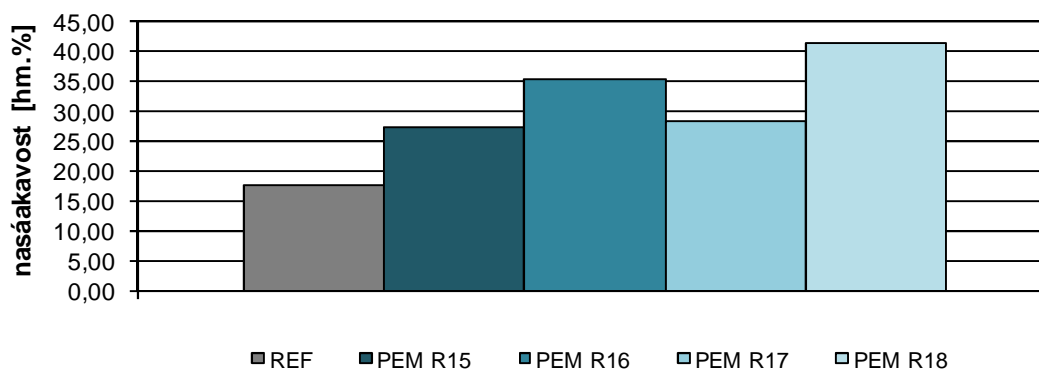
Nejvyšší hodnota pevnosti v tlaku byla v průměru zjištěna u malty PEM 16, nejnižší u malty PEM 15. Pevnost v tlaku narůstá s dobou zrání malty. Pevnosti malt podílem pemzy v kamenivu mají v tlaku až několikrát vyšší hodnoty ve srovnání s referenční maltou.

#### 4.5.4 Nasákavost za normálního tlaku po 48 hodinách (lokality Německo-Porýní)

Nasákavost modelových těles je mírou kapilární aktivity omítky. Byla zjištěna po 48 hodinách. Její hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.20. Porovnání výsledných hodnot je graficky znázorněno na obrázku 4.22.

Tabulka 4.20: Nasákavost

označení vzorku	nasákavost [%]
REF	17,81
PEM R15	27,48
PEM R16	35,22
PEM R17	28,41
PEM R18	41,31

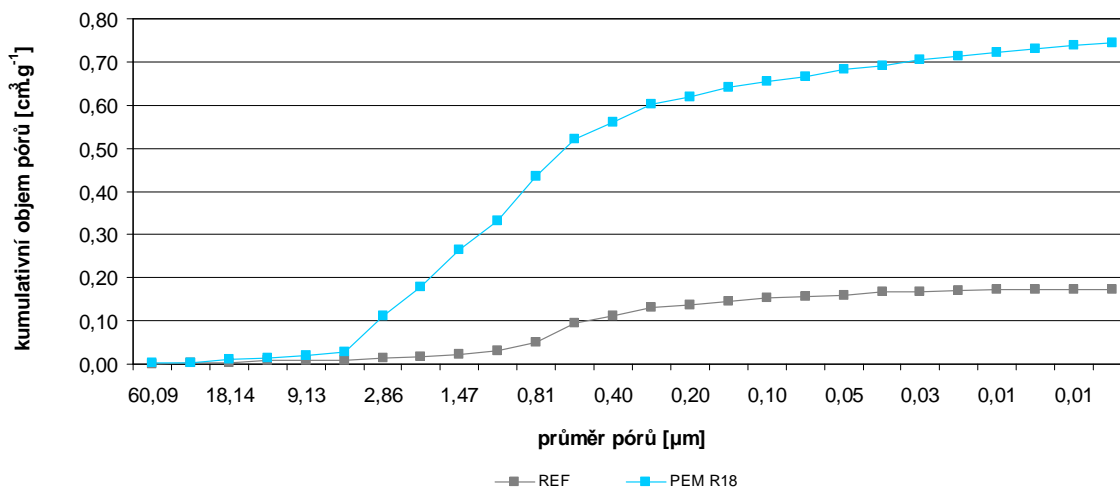


Obr. 4.22: Nasákavost

Nejvyšší nasákavost byla naměřena u malty s nejvyšším podílem pemzy v kamenivu. S ubývajícím porézním kamenivem klesala i nasákavost malt. Nejnižší nasákavost vykazovala malta PEM R15, která byla vyšší než referenční malta. Nasákavost malt roste přímou úměrou k podílu pemzy v kamenivu. Anomální hodnoty byly naměřeny u malty PEM R17, která porušuje předchozí tvrzení.

#### 4.5.5 Rtuťová porozimetrie

Naměřené hodnoty průměrů pórů jsou vyjádřeny graficky na obrázku 4.23.



Obr. 4.23: Rtuťová porozimetrie

Malta plněná německou pemzou vykazuje výrazně větší porozitu než referenční malta. Dominantní zastoupení mají póry o velikosti 0,01 – 0,20  $\mu\text{m}$ . U této malty stoupá objem pórů s jejich zmenšujícím se průměrem. Objem pórů o velikosti 9,13  $\mu\text{m}$  je téměř totožný s objemem pórů stejné velikosti u referenční malty.

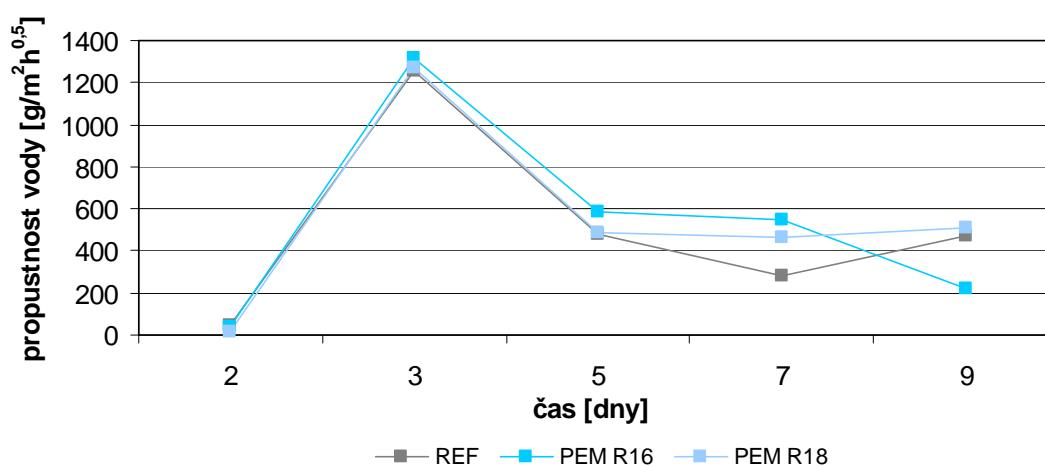


#### 4.5.6 Propustnost pro transport vody

Vypočítané hodnoty propustnosti pro transport vody jsou uvedeny v tabulce 4.21. Jejich grafické znázornění je vyjádřeno na obrázku 4.24.

Tabulka 4.21: Propustnost pro transport vody

označení vzorku	propustnost pro transport vody [ $\text{g}/\text{m}^2\text{h}^{0,5}$ ]				
REF 2	45,4	1258,9	477,3	281,0	474,6
PEM R16	36,8	1316,1	585,4	546,5	223,8
PEM R18	18,4	1272,8	485,2	460,7	507,5
čas [dny]	2	3	5	7	9



Obr. 4.24: Propustnost pro transport vody

Hodnoty propustnosti pro vodu u malt s německou pemzou mají podobné chování jako referenční malta. Prudký vzestup propustnosti vrcholící po 3 dnech měření by mohl pravděpodobně signalizovat prosycení vzorku malty roztokem a odpařování vody volným porézním systémem. Následný pokles propustnosti vody by mohl signalizovat postupné zaplňování porézního systému krystaly síranu sodného. Mírné zvýšení propustnosti vody po 7 dnech může souviset s počátečními destrukcemi omítky a snadnější prostupností vody trhlinami.

## 4.6 Malty se zeolitem

### 4.6.1 Objemová hmotnost po 90 dnech

Vypočítané hodnoty objemové hmotnosti jsou uvedeny v tabulce 4.22. Porovnání jejich hodnot je zakresleno na obrázku 4.25.

Tabulka 4.22: Objemová hmotnost

označení vzorku	objemová hmotnost [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
REF	1626,47
ZE 1	1618,20
ZE 2	1419,33
ZE 3	1466,50
ZE 4	1375,20



Obr. 4.25: Objemová hmotnost

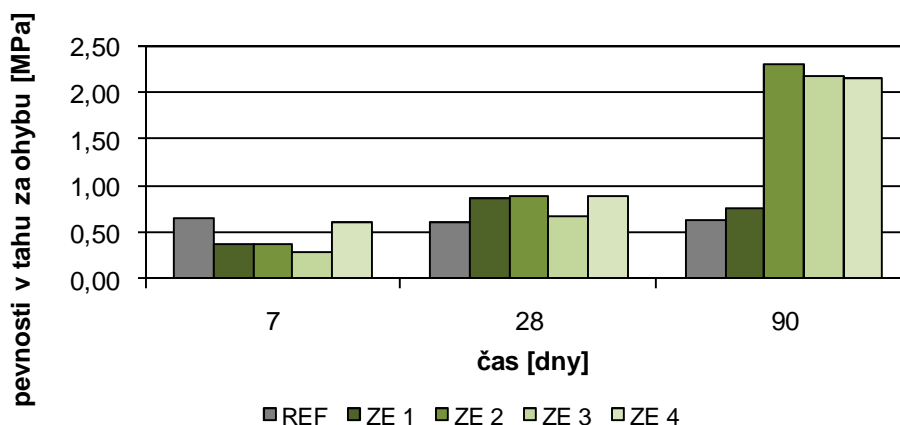
Nejvyšší objemová hmotnost byla naměřena u malty ZE 1 s nejmenším obsahem porézního kameniva, která vykazuje jen o málo nižší hodnotu než referenční malta bez porézního kameniva. Naměřené hodnoty jsou úměrné množství porézního kameniva v jednotlivých maltách. S nárůstem množství pemzy klesá objemová hmotnost malty. Výjimkou je malta ZE 2, u které byla zjištěna nižší objemová hmotnost než u malty ZE 3 s vyšším obsahem zeolitu v kamenivu.

#### 4.6.2 Pevnost v tahu za ohybu

Vypočítané hodnoty pevnosti v tlaku jsou uvedeny v tabulce 4.23. Jejich grafické znázornění je vyjádřeno na obrázku 4.26.

Tabulka 4.23: Pevnost v tahu za ohybu

označení vzorku	po 7 dnech [MPa]	po 28 dnech [MPa]	po 90 dnech [MPa]
REF	0,65	0,61	0,64
ZE 1	0,38	0,87	0,75
ZE 2	0,36	0,90	2,30
ZE 3	0,29	0,68	2,18
ZE 4	0,61	0,88	2,15



Obr. 4.26: Pevnost v tahu za ohybu

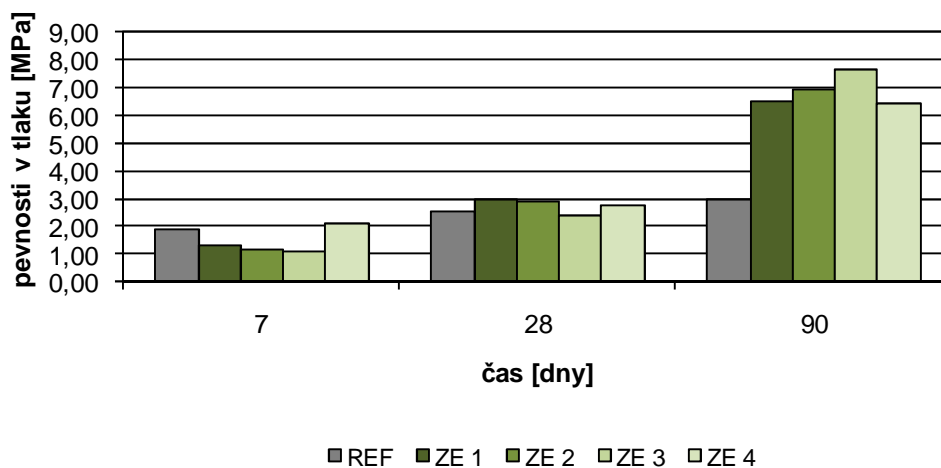
Nejvyšší průměrná hodnota pevnosti v tahu za ohybu byla zjištěna u malty ZE 4, která je plněna pouze zeolitem. Nejnižší pak u ZE 1, kde je podíl zeolitu v kamenivu nejmenší. Po 7 dnech vykazovaly malty se zeolitem v kamenivu nižší pevnosti než referenční malta. Po 28 dnech pevnosti v tahu za ohybu mírně přesáhly pevnosti referenčního vzorku, kdežto po 90 dnech byly pevnosti malt se zeolitem až na maltu ZE 1 několikanásobně vyšší než referenční malta.

### 4.6.3 Pevnost v tlaku

Vypočítané hodnoty pevnosti v tlaku jsou uvedeny v tabulce 4.24. Jejich grafické znázornění je vyjádřeno na obrázku 4.27.

Tabulka 4.24: Pevnosti v tlaku

označení vzorku	po 7 dnech [MPa]	po 28 dnech [MPa]	po 90 dnech [MPa]
REF	1,92	2,54	2,98
ZE 1	1,31	2,99	6,49
ZE 2	1,18	2,91	6,94
ZE 3	1,08	2,41	7,64
ZE 4	2,11	2,75	6,42



Obr. 4.27: Pevnost v tlaku

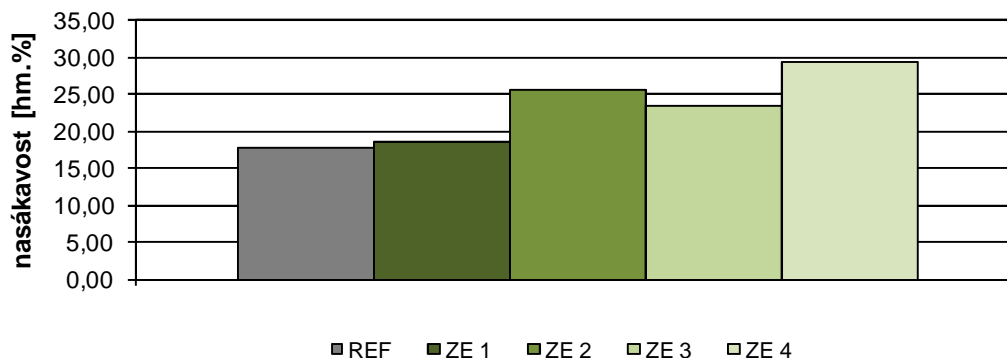
Nejvyšší hodnota pevnosti v tlaku byla zjištěna u malt ZE 3 a ZE 2. Nejnižší byla naměřena u malty ZE 4 po 90 dnech. Ta však po 7 dnech vykazovala nejvyšší pevnost, která byla na rozdíl od ostatních malt se zeolitem vyšší než pevnost referenční malty.

#### 4.6.4 Nasákavost za normálního tlaku po 48 hodinách

Nasákavost modelových těles je mírou kapilární aktivity omítky. Byla zjištěna po 48 hodinách. Její hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.25. Porovnání výsledných hodnot je graficky znázorněno na obrázku 4.28.

Tabulka 4.25: Nasákavost

označení vzorku	nasákavost [%]
REF	17,81
ZE 1	18,50
ZE 2	25,65
ZE 3	23,49
ZE 4	29,32

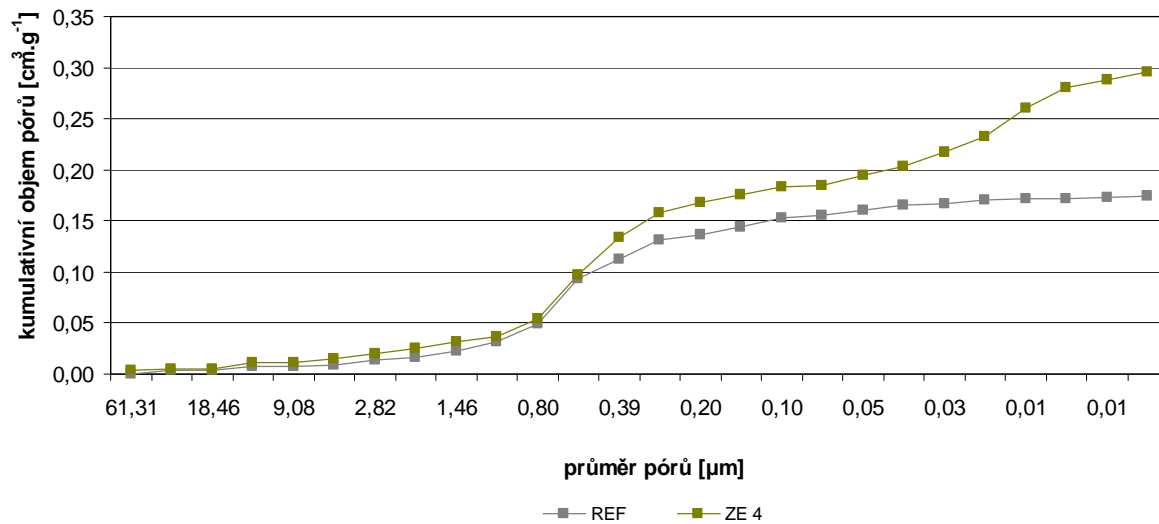


Obr. 4.28: Nasákavost

Nejvyšší nasákavost byla naměřena u malty s nejvyšším podílem zeolitu v kamenivu. S ubývajícím porézním kamenivem klesala i nasákavost malt. Nejnižší nasákavost vykazovala malta ZE 1, která byla o málo vyšší než referenční malta. Nasákavost malt roste přímou úměrou k podílu pemzy v kamenivu. Anomální hodnoty byly naměřeny u malty ZE 3, která porušuje předchozí zjištění.

#### 4.6.5 Rtuťová porozimetrie

Naměřené hodnoty průměrů pórů jsou vyjádřeny graficky na obrázku 4.29.



Obr. 4.29: Rtuťová porozimetrie

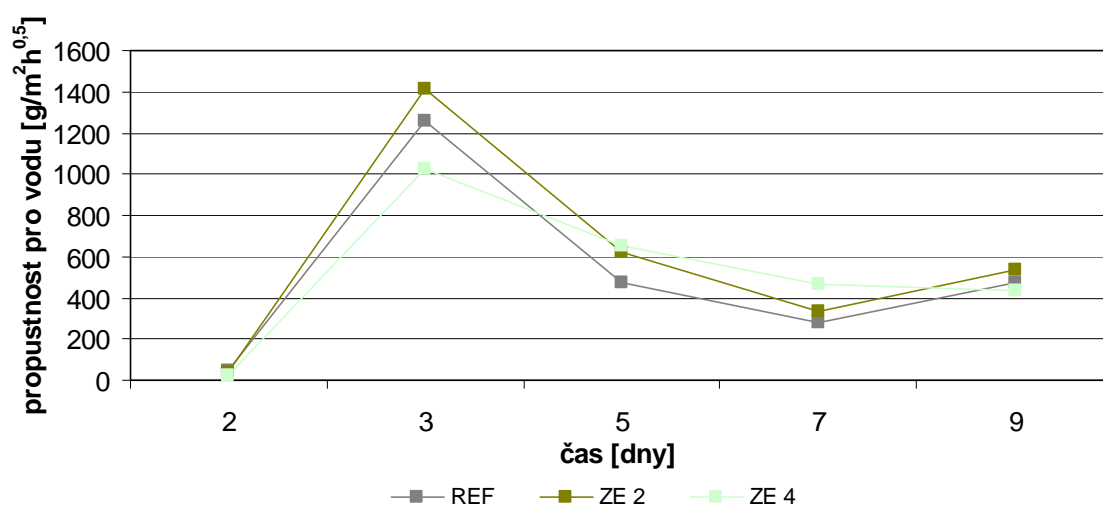
Malta plněná zeolitem vykazuje větší porozitu než referenční malta. Objem pórů cca od 0,80 - 61,31  $\mu\text{m}$  je u obou malt téměř shodný.

#### 4.6.6 Propustnost pro transport vody

Vypočítané hodnoty propustnosti pro transport vody jsou uvedeny v tabulce 4.26. Jejich grafické znázornění je vyjádřeno na obrázku 4.30.

Tabulka 4.26: Propustnost pro transport vody

označení vzorku	propustnost pro transport vody [ $\text{g}/\text{m}^2\text{h}^{0,5}$ ]				
REF	45,4	1258,9	477,3	281,0	474,6
ZE 2	40,6	1409,7	624,4	336,6	537,4
ZE 4	313,4	226,4	194,9	208,14	259,4
čas [dny]	2	3	5	7	9



Obr. 4.30: Propustnost pro transport vody

Hodnoty propustnosti pro transport vody u malt se zeolitem mají podobné chování jako referenční malta. U malty s kamenivem tvořeným zeolitem a pískem byla zjištěna lepší propustnost vody než u malty pouze s kamenivem tvořeným zeolitem. Prudký vzestup propustnosti vrcholící po 3 dnech měření by mohl pravděpodobně signalizovat prosycení vzorku malty roztokem a odpařování vody volným porézním systémem. Následný pokles propustnosti vody by mohl signalizovat postupné zaplňování porézního systému krystaly síranu sodného. Mírné zvýšení propustnosti vody po 7 dnech může souviset s počátečními destrukcemi omítky a snadnější prostupností trhlinami.

## 5 VÝSLEDKY A DISKUZE

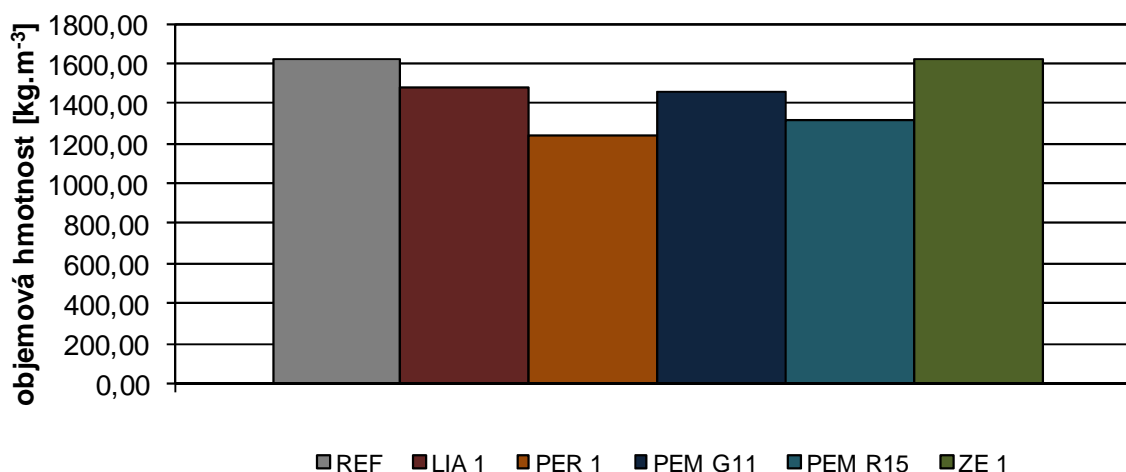
Výsledky stanovení objemové hmotnosti, pevnosti v tahu za ohybu, pevnosti v tlaku, nasákavosti, rtuťové porozimetre a propustnosti pro transport vody byly porovnány mezi maltami s různými druhy porézního plniva a maltou referenční.

### 5.1.1 Objemová hmotnost po 90 dnech

Vypočítané hodnoty objemové hmotnosti po 90 dnech jsou uvedeny v tabulkách 5.1 až 5.4. Porovnání výsledků mezi maltami s různými druhy kameniva je znázorněno na obrázcích 5.1 až 5.4.

Tabulka 5.1: Objemová hmotnost

označení vzorku	objemová hmotnost [kg.m <sup>-3</sup> ]
REF	1626,47
LIA 1	1477,84
PER 1	1237,49
PEM G11	1458,23
PEM R15	1313,57
ZE 1	1618,20



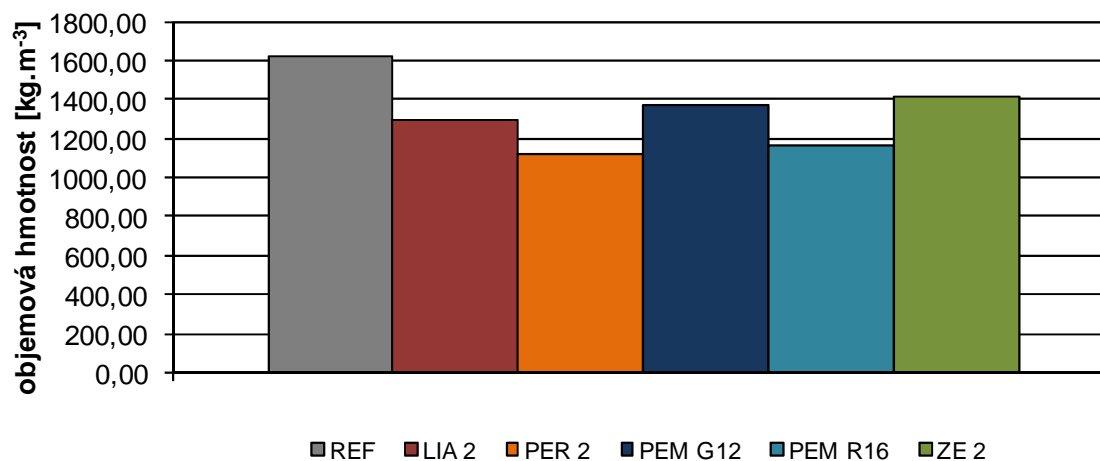
Obr. 5.1: Objemová hmotnost

Z testovaných malt, u kterých tvoří porézní kamenivo jednu třetinu kameniva v maltě, má nejvyšší objemovou hmotnost malta se zeolitem, která má srovnatelnou hodnotu s referenční maltou bez porézního kameniva. Nejmenší objemovou hmotnost vykazuje malta s podílem perlitu v kamenivu.



Tabulka 5.2: Objemová hmotnost

označení vzorku	objemová hmotnost [kg.m <sup>-3</sup> ]
REF	1626,47
LIA 2	1291,12
PER 2	1121,34
PEM G12	1367,27
PEM R16	1159,88
ZE 2	1419,33

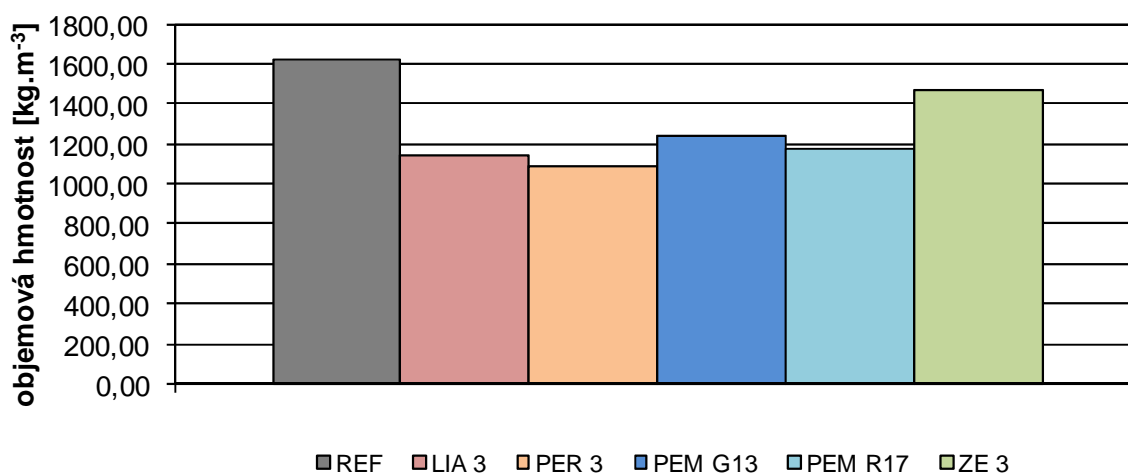


Obr. 5.2: Objemová hmotnost

Z testovaných malt, u kterých tvoří porézní kamenivo jednu polovinu kameniva směsi, má nejvyšší objemovou hmotnost malta se zeolitem a řeckou pemzou. Nejmenší objemovou hmotnost vykazuje malta s podílem perlitu v kamenivu. V těsném závěsu za objemovou hmotností malty s perlitem je malta s německou pemzou.

Tabulka 5.3: Objemová hmotnost

označení vzorku	objemová hmotnost [kg.m <sup>-3</sup> ]
REF	1626,47
LIA 3	1147,87
PER 3	1089,93
PEM G13	1236,39
PEM R17	1172,04
ZE 3	1466,50

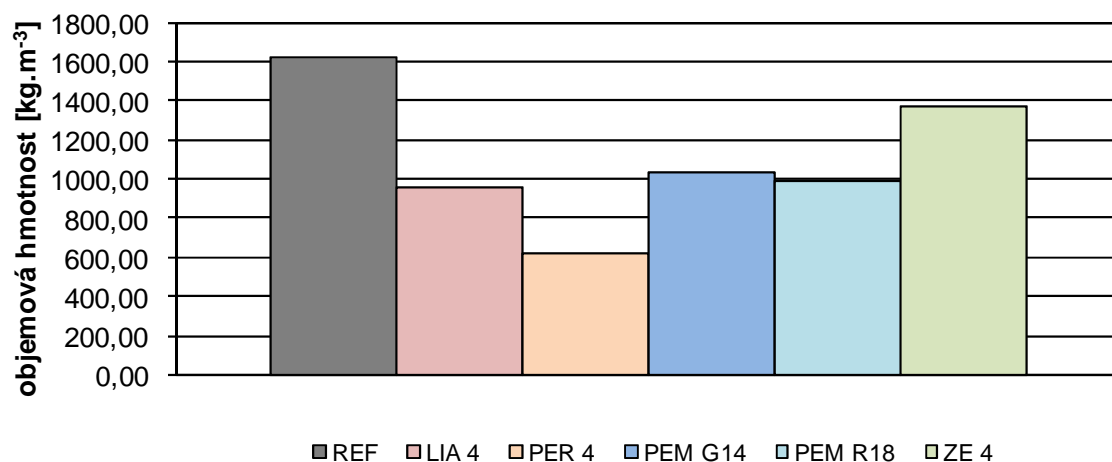


Obr. 5.3: Objemová hmotnost

Z testovaných malt, u kterých tvoří porézní kamenivo dvě třetiny kameniva v maltě, má nejvyšší objemovou hmotnost malta se zeolitem, která se nejvíce blíží hodnotě referenční maltě bez porézního kameniva. Nejmenší objemovou hmotnost vykazuje malta s podílem perlitu v kamenivu.

Tabulka 5.4: Objemová hmotnost

označení vzorku	objemová hmotnost [kg.m <sup>-3</sup> ]
REF	1626,47
LIA 4	952,66
PER 4	618,89
PEM G14	1034,29
PEM R18	994,37
ZE 4	1375,20



Obr. 5.4: Objemová hmotnost

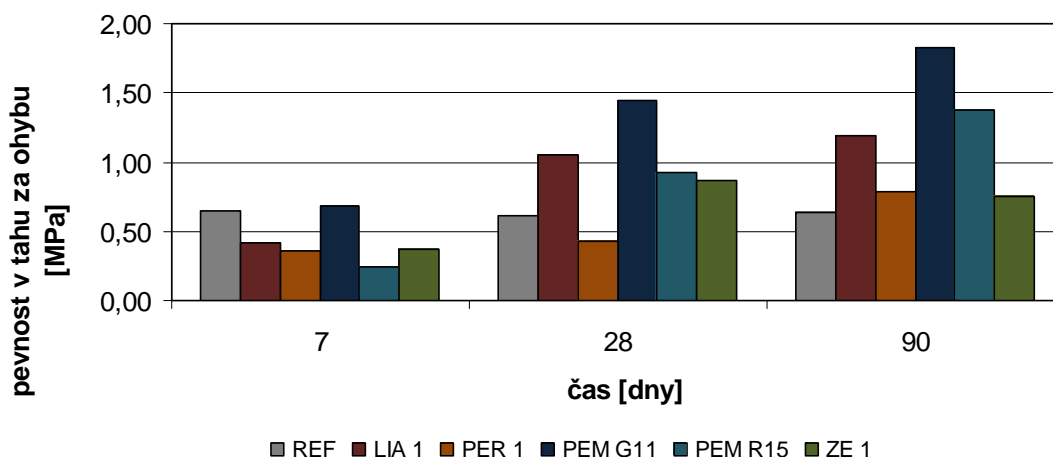
Z testovaných malt s použitím výhradně porézního kameniva má nejvyšší objemovou hmotnost malta plněná zeolitem. Nejmenší objemovou hmotnost vykazuje malta s kamenivem tvořeným perlitem. Malta ZE 4 má více než jednonásobně vyšší objemovou hmotnost než malta PER 4.

### 5.1.2 Pevnost v tahu za ohybu

Vypočítané hodnoty pevností v tahu za ohybu a jejich vzájemné porovnání je uvedeno v tabulkách 5.5 až 5.8. Jejich grafické znázornění je vyjádřeno na obrázcích 5.5 až 5.8.

Tabulka 5.5: Pevnost v tahu za ohybu

označení vzorku	po 7 dnech [MPa]	po 28 dnech [MPa]	po 90 dnech [MPa]
REF	0,65	0,61	0,64
LIA 1	0,42	1,05	1,20
PER 1	0,36	0,42	0,79
PEM G11	0,68	1,44	1,82
PEM R15	0,24	0,93	1,38
ZE 1	0,38	0,87	0,75

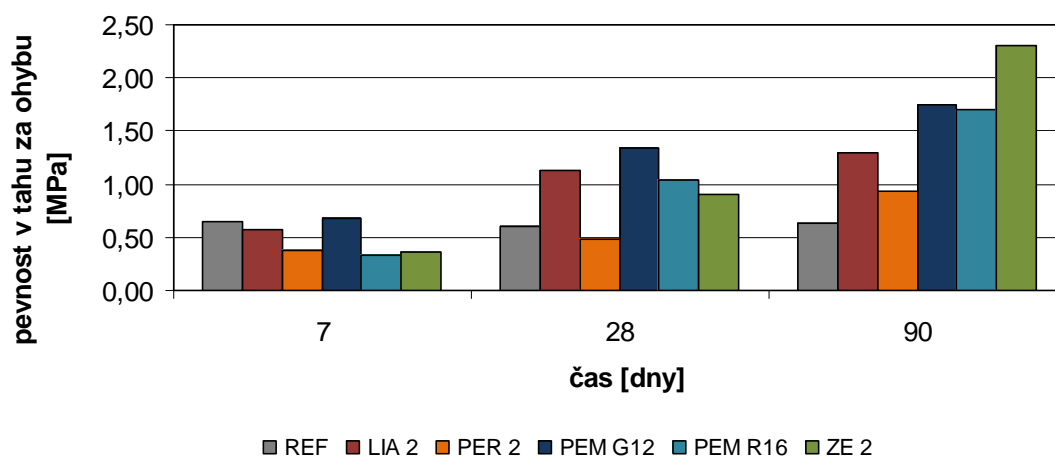


Obr. 5.5: Pevnost v tahu za ohybu

U malt, kde je jedna třetina kameniva malty tvořena porézním kamenivem, byly po 7 dnech naměřeny nižší pevnosti tahu za ohybu než u referenční malty. Výjimku tvoří pouze malta s řeckou pemzou, která vykazovala po 7 dnech nejvyšší pevnost z testovaných směsí. Nejnižší pevnost v tahu za ohybu byla naměřena u malty s řeckou pemzou. Při měření po 28 dnech vykazovaly všechny malty vyšší hodnoty než referenční malta. Kromě malty s perlitem, která vykazovala nejnižší pevnost v tahu za ohybu. Nejvyšší hodnota byla zjištěna u malty s řeckou pemzou. Po 90 dnech byly nejvyšší hodnoty naměřeny tradičně u malty s řeckou pemzou, nejnižší pak u malty se zeolitem. Po 90 dnech měly všechny malty s přidavkem porézního kameniva vyšší pevnost v tahu za ohybu než referenční malta.

Tabulka 5.6: Pevnost v tahu za ohybu

označení vzorku	po 7 dnech [MPa]	po 28 dnech [MPa]	po 90 dnech [MPa]
REF	0,65	0,61	0,64
LIA 2	0,57	1,13	1,30
PER 2	0,38	0,49	0,93
PEM G12	0,68	1,33	1,74
PEM R16	0,33	1,05	1,71
ZE 2	0,36	0,90	2,30

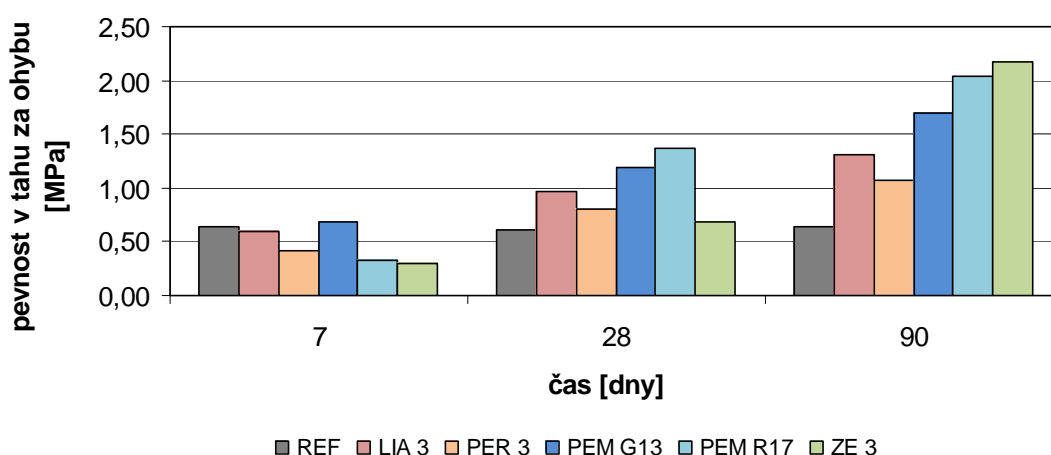


Obr. 5.6: Pevnost v tahu za ohybu

U malt, kde je polovina kameniva malty tvořena porézním kamenivem, byly po 7 dnech naměřeny nižší pevnosti v tahu za ohybu než u referenční malty. Výjimku tvoří pouze malta s řeckou pemzou, která vykazovala po 7 dnech nejvyšší pevnost z testovaných malt. Nejnižší pevnost v tahu za ohybu byla naměřena u malty s řeckou pemzou. Při měření po 28 dnech vykazovaly všechny malty vyšší hodnoty než referenční malta. Kromě malty s perlitem, která vykazovala nejnižší pevnost v tahu za ohybu. Nejvyšší hodnota byla zjištěna u malty s řeckou pemzou. Po 90 dnech byly nejvyšší hodnoty naměřeny u malty se zeolitem, nejnižší pak u malty s perlitem. Po 90 dnech měly všechny malty s přídavkem porézního kameniva vyšší pevnost v tahu za ohybu než referenční malta.

Tabulka 5.7: Pevnost v tahu za ohybu

označení vzorku	po 7 dnech [MPa]	po 28 dnech [MPa]	po 90 dnech [MPa]
REF	0,65	0,61	0,64
LIA 3	0,59	0,96	1,31
PER 3	0,42	0,81	1,08
PEM G13	0,68	1,20	1,69
PEM R17	0,33	1,36	2,03
ZE 3	0,29	0,68	2,18

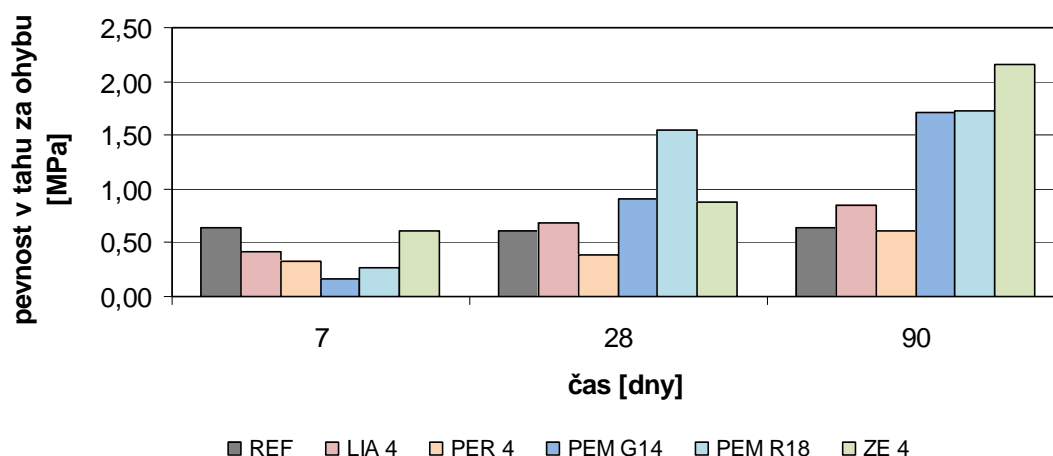


Obr. 5.7: Pevnost v tahu za ohybu

U malt, kde jsou dvě třetiny kameniva malty tvořeny porézním kamenivem, byly po 7 dnech naměřeny nižší pevnosti v tahu za ohybu než u referenční malty. Výjimku tvoří pouze malta s řeckou pemzou, která vykazovala po 7 dnech nejvyšší pevnost z testovaných malt. Nejnižší pevnost v tahu za ohybu byla naměřena u malty se zeolitem. Při měření po 28 dnech vykazovaly všechny malty vyšší hodnoty než referenční malta. Nejnižší pevnost v tahu za ohybu byla naměřena u malty s perlitem. Nejvyšší hodnota byla zjištěna u malty s německou pemzou. Po 90 dnech byly nejvyšší hodnoty naměřeny u malty se zeolitem, nejnižší pak u malty s perlitem. Po 90 dnech měly všechny malty s přidavkem porézního kameniva vyšší pevnost v tahu za ohybu než referenční malta.

Tabulka 5.8: Pevnost v tahu za ohybu

označení vzorku	po 7 dnech [MPa]	po 28 dnech [MPa]	po 90 dnech [MPa]
REF	0,65	0,61	0,64
LIA 4	0,42	0,68	0,85
PER 4	0,32	0,38	0,61
PEM G14	0,16	0,91	1,71
PEM R18	0,27	1,55	1,73
ZE 4	0,61	0,88	2,15



Obr. 5.8: Pevnost v tahu za ohybu

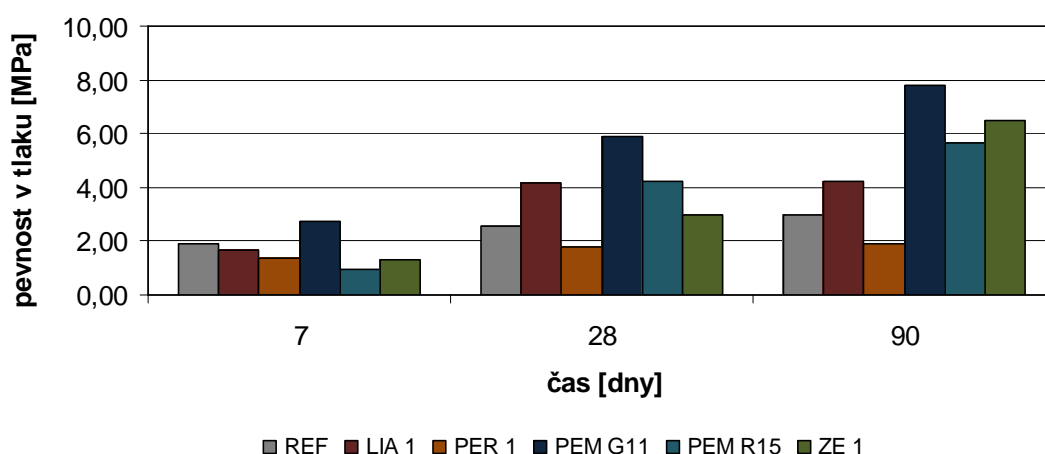
U malt pouze s porézním kamenivem byly po 7 dnech naměřeny nižší pevnosti tahu za ohybu než u referenční malty. Nejvyšší pevnost v tahu za ohybu vykazovala po 7 dnech malta plněná zeolitem. Nejnižší pevnost v tahu za ohybu byla naměřena u malty s řeckou pemzou. Při měření po 28 dnech vykazovaly všechny malty vyšší hodnoty než referenční malta. Kromě malty s perlitem, která vykazovala nejnižší pevnost v tahu za ohybu. Nejvyšší hodnota byla zjištěna u malty s německou pemzou. Po 90 dnech byly nejvyšší hodnoty naměřeny u malty se zeolitem, nejnižší pak u malty s perlitem. Po 90 dnech měly všechny malty s přidavkem porézního kameniva vyšší pevnost v tahu za ohybu než referenční malta. Pouze malta s perlitem nedosáhla po 90 dnech zrání vyšší pevnosti v tahu za ohybu než referenční vzorek.

### 5.1.3 Pevnost v tlaku

Vypočítané hodnoty pevností v tlaku a jejich vzájemné porovnání je uvedeno v tabulkách 5.9 až 5.12. Jejich grafické znázornění je vyjádřeno na obrázcích 5.9 až 5.12.

Tabulka 5.9: Pevnost v tlaku

označení vzorku	po 7 dnech [MPa]	po 28 dnech [MPa]	po 90 dnech [MPa]
REF	1,92	2,54	2,98
LIA 1	1,69	4,15	4,21
PER 1	1,37	1,77	1,92
PEM G11	2,76	5,89	7,82
PEM R15	0,95	4,22	5,63
ZE 1	1,31	2,99	6,49



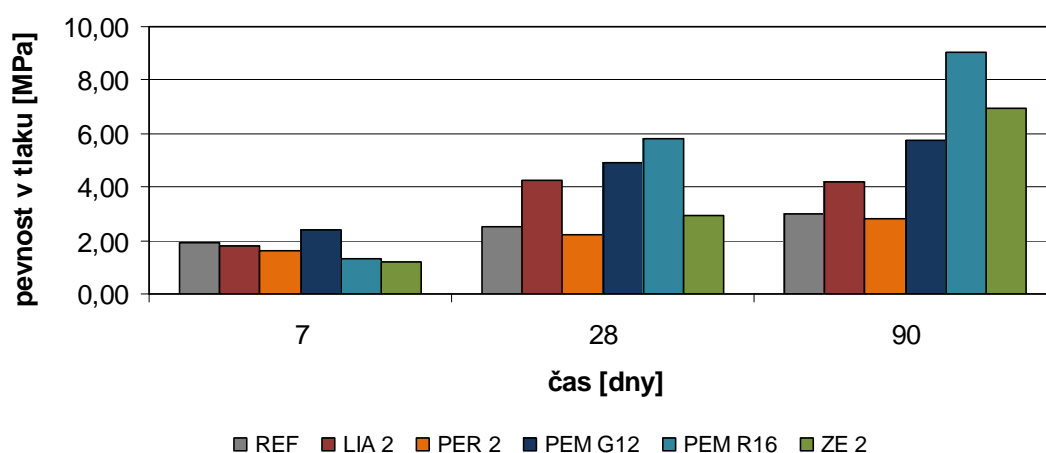
Obr. 5.9: Pevnost v tlaku

U malt, kde je jedna třetina kameniva malty tvořena porézním kamenivem, byly po 7 dnech naměřeny nižší pevnosti tlaku než u referenční malty. Výjimku tvoří pouze malta s řeckou pemzou, která vykazovala po 7 dnech nejvyšší pevnost z testovaných malt. Nejnižší pevnost v tlaku byla naměřena u malty s řeckou pemzou. Při měření po 28 dnech vykazovaly všechny malty vyšší hodnoty než referenční malta. Kromě malty s perlitem, která vykazovala nejnižší pevnost v tlaku. Nejvyšší hodnota byla zjištěna u malty s řeckou pemzou. Po 90 dnech byly nejvyšší hodnoty naměřeny u malty s řeckou pemzou, nejnižší pak u malty s perlitem, která nepřekonalala hodnoty referenční malty.



Tabulka 5.10: Pevnost v tlaku

označení vzorku	po 7 dnech [MPa]	po 28 dnech [MPa]	po 90 dnech [MPa]
REF	1,92	2,54	2,98
LIA 2	1,79	4,23	4,17
PER 2	1,62	2,23	2,84
PEM G12	2,42	4,94	5,76
PEM R16	1,31	5,84	9,07
ZE 2	1,18	2,91	6,94

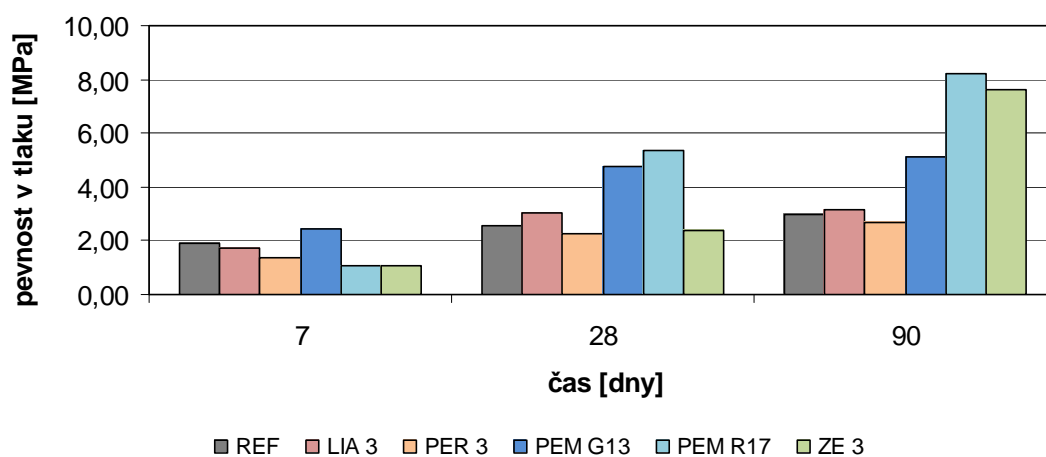


Obr. 5.10: Pevnost v tlaku

U malt, kde je jedna polovina kameniva malty tvořena porézním kamenivem, byly po 7 dnech naměřeny nižší pevnosti tlaku než u referenční malty. Výjimku tvoří pouze malta s řeckou pemzou, která vykazovala po 7 dnech nejvyšší pevnost z testovaných malt. Nejnižší pevnost v tlaku byla naměřena u malty se zeolitem. Při měření po 28 dnech vykazovaly všechny malty vyšší hodnoty než referenční malta, kromě malty s perlitem, která vykazovala nejnižší pevnost v tlaku. Nejvyšší hodnota byla zjištěna u malty s německou pemzou. Po 90 dnech byly nejvyšší hodnoty naměřeny u malty s německou pemzou, nejnižší pak u malty s perlitem, která nepřekonalala hodnoty referenční malty.

Tabulka 5.11: Pevnost v tlaku

označení vzorku	po 7 dnech [MPa]	po 28 dnech [MPa]	po 90 dnech [MPa]
REF	1,92	2,54	2,98
LIA 3	1,70	3,01	3,14
PER 3	1,40	2,25	2,69
PEM G13	2,42	4,76	5,15
PEM R17	1,05	5,38	8,24
ZE 3	1,08	2,41	7,64

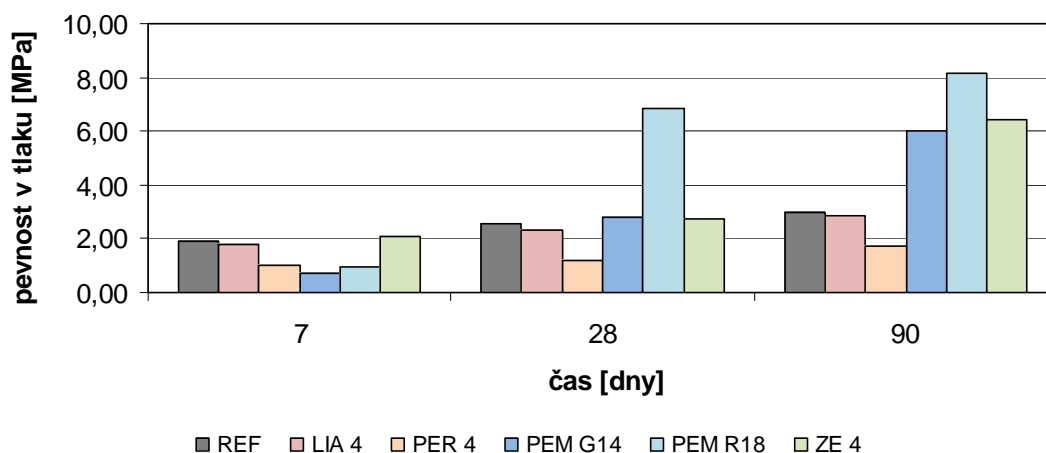


Obr. 5.11: Pevnost v tlaku

U malt, kde jsou dvě třetiny kameniva malty tvořeny porézním kamenivem, byly po 7 dnech naměřeny nižší pevnosti tlaku než u referenční malty. Výjimku tvoří pouze malta s řeckou pemzou, která vykazovala po 7 dnech nejvyšší pevnost z testovaných malt. Nejnižší pevnost v tlaku byla naměřena u malty s řeckou pemzou a zeolitem. Při měření po 28 dnech vykazovaly všechny malty vyšší hodnoty než referenční malta. Kromě malt s perlitem a zeolitem, které vykazovaly nejnižší pevnost v tlaku. Nejvyšší hodnota byla zjištěna u malty s německou pemzou. Po 90 dnech byly nejvyšší hodnoty naměřeny tradičně u malty s německou pemzou, nejnižší pak u malty s perlitem, která nepřekonalala hodnoty referenční malty.

Tabulka 5.12: Pevnost v tlaku

označení vzorku	po 7 dnech [MPa]	po 28 dnech [MPa]	po 90 dnech [MPa]
REF	1,92	2,54	2,98
LIA 4	1,76	2,30	2,83
PER 4	1,02	1,20	1,70
PEM G14	0,71	2,81	6,03
PEM R18	0,97	6,86	8,16
ZE 4	2,11	2,75	6,42



Obr. 5.12: Pevnost v tlaku

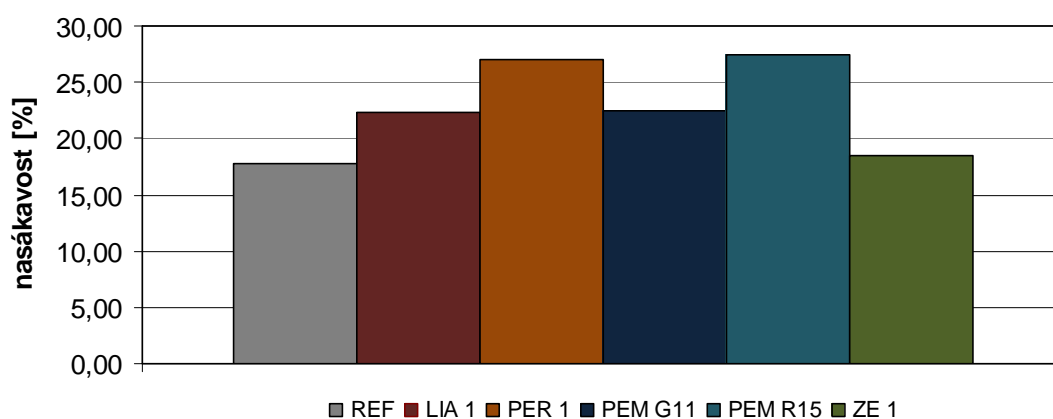
U malt plněných pouze porézním kamenivem byly po 7 dnech naměřeny nižší pevnosti tlaku než u referenční malty. Výjimku tvoří pouze malta se zeolitem, která vykazovala po 7 dnech nejvyšší pevnost z testovaných malt. Nejnižší pevnost v tlaku byla naměřena u malt s řeckou pemzou. Při měření po 28 dnech vykazovaly malty vyšší hodnoty než referenční malty, kromě malty s perlitem a liaporem. Malta s perlitem vykazovala nejnižší pevnost v tlaku. Nejvyšší hodnota byla zjištěna u malty s německou pemzou. Po 90 dnech byly nejvyšší hodnoty naměřeny u malty s německou pemzou, nejnižší pak u malty s perlitem. Malty s liaporem a perlitem nepřesáhly pevnost referenčního vzorku.

#### 5.1.4 Nasákavost za normálního tlaku po 48 hodinách

Vzájemné porovnání hodnoty nasákavosti za normálního tlaku po 48 hodinách je uvedeno v tabulkách 5.13 až 5.16. Porovnání výsledků nasákavosti mezi maltami s různými druhy kameniva je znázorněno na obrázcích 5.13 až 5.16.

Tabulka 5.13: Nasákavost

označení vzorku	nasákavost [%]
REF	17,81
LIA 1	22,28
PER 1	27,03
PEM G11	22,45
PEM R15	27,48
ZE 1	18,50

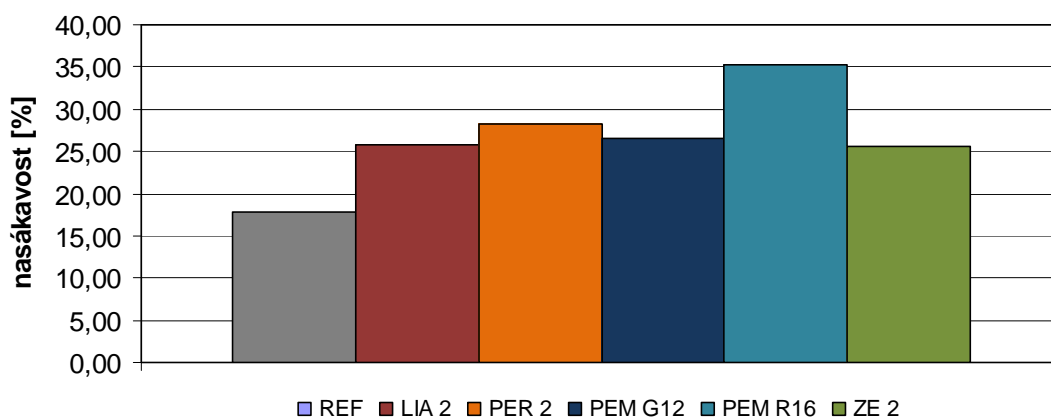


Obr. 5.13: Nasákavost

U malt s porézním kamenivem byla naměřena vyšší nasákavost než u referenční malty. Nejvyšší nasákavost má malta plněná německou pemzou a malta plněná perlitem. Podobné hodnoty nasákavosti byly naměřeny u malty s řeckou pemzou a u malty s liaporem. Nejnižší nasákavost vykazovala malta plněná zeolitem.

Tabulka 5.14: Nasákavost

označení vzorku	nasákavost [%]
REF	17,81
LIA 2	25,73
PER 2	28,18
PEM G12	26,56
PEM R16	35,22
ZE 2	25,65

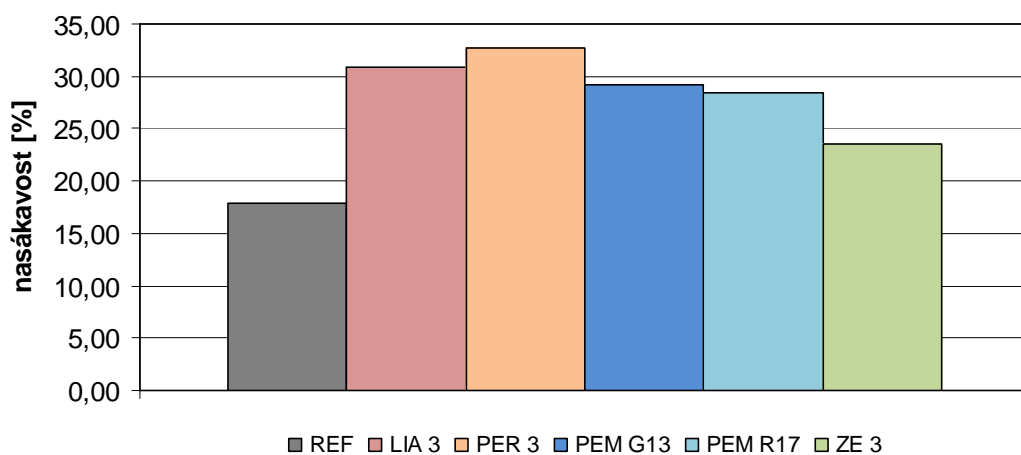


Obr. 5.14: Nasákavost

U malt s podílem porézního kameniva ke křemennému v poměru 1:1 byly nejvyšší hodnoty nasákavosti naměřeny u malty s německou pemzou, dále u malty s řeckou pemzou a u malty s liaporem. Nejnižší nasákavost byla naměřena u malty se zeolitem.

Tabulka 5.15: Nasákavost

označení vzorku	nasákavost [%]
REF	17,81
LIA 3	30,87
PER 3	32,78
PEM G13	29,14
PEM R17	28,41
ZE 3	23,49

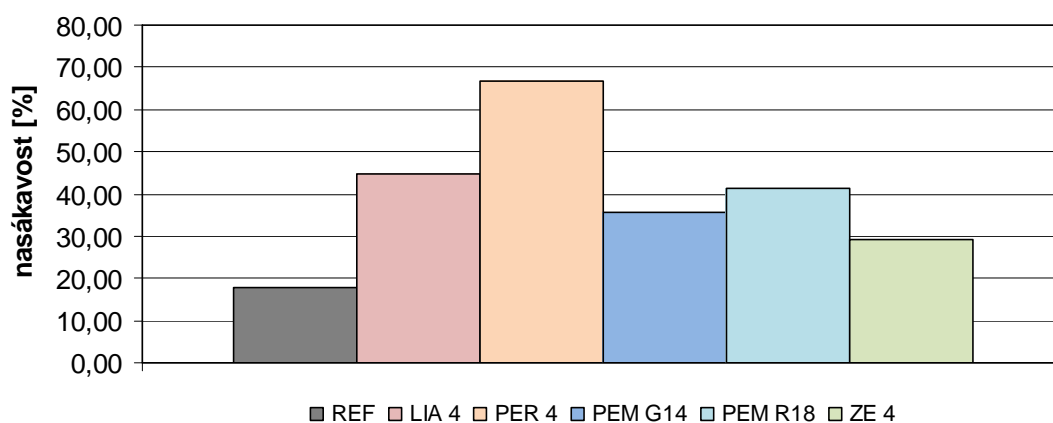


Obr. 5.15: Nasákavost

U všech malt s porézním kamenivem byla naměřena vyšší nasákavost než u referenční malty. Nejvyšší nasákavost byla naměřena u malty s perlitem. Dále byla nejvyšší nasákavost stanovena u malty s liaporem a u malty s pemzami. Nejmenší nasákavost byla naměřena u malty se zeolitem.

Tabulka 5.16: Nasákavost

označení vzorku	nasákavost [%]
REF	17,81
LIA 4	44,78
PER 4	66,77
PEM G14	35,55
PEM R18	41,31
ZE 4	29,32

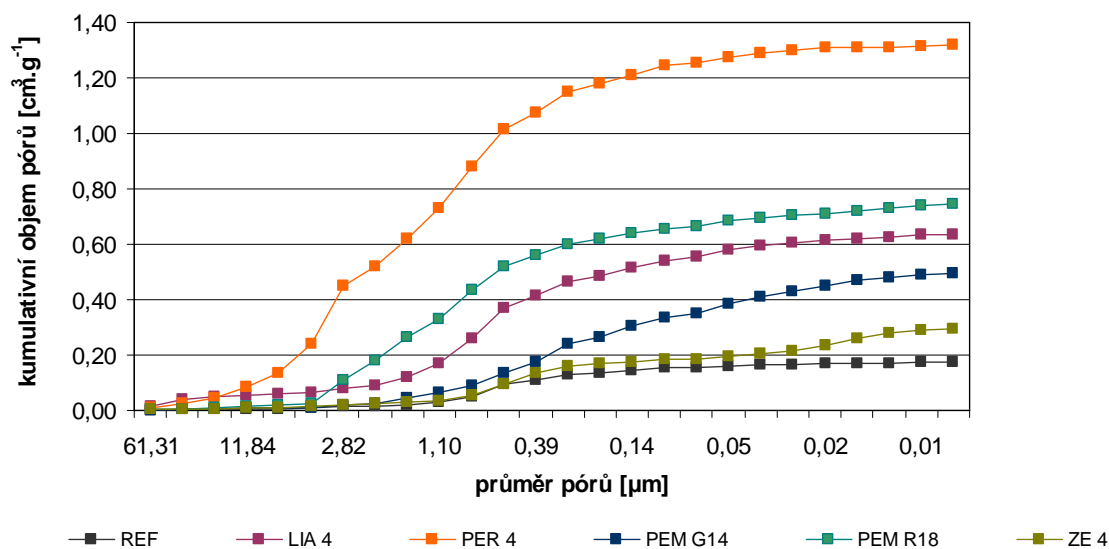


Obr. 5.16: Nasákavost

Nasákavost malt s porézním kamenivem byla vždy vyšší než u referenční malty. Nejvyšší nasákavost vykazovala malta plněná perlitem. Druhou nejvyšší nasákavost vykazovala malta s liaporem. Nejnižší nasákavost byla naměřena u malty se zeolitem.

### 5.1.5 Rtuťová porozimetrie

Srovnání naměřených hodnot průměrů pórů u jednotlivých malt s různými typy kameniva jsou vyjádřeny graficky na obrázku 5.17.



Obr. 5.17: Porozimetrie

Největší objem pórů byl naměřen u malty plněné perlitem. Podstatnou část těchto pórů tvoří póry o velikosti 0,01 - 0,39 μm. Další největší objem pórů byl naměřen u malty s německou pemzou a u malty s liaporem. Nejmenší objem pórů byl stanoven u malty plněné zeolitem, která vykazuje i obdobnou distribuci velikosti pórů jako referenční malta.

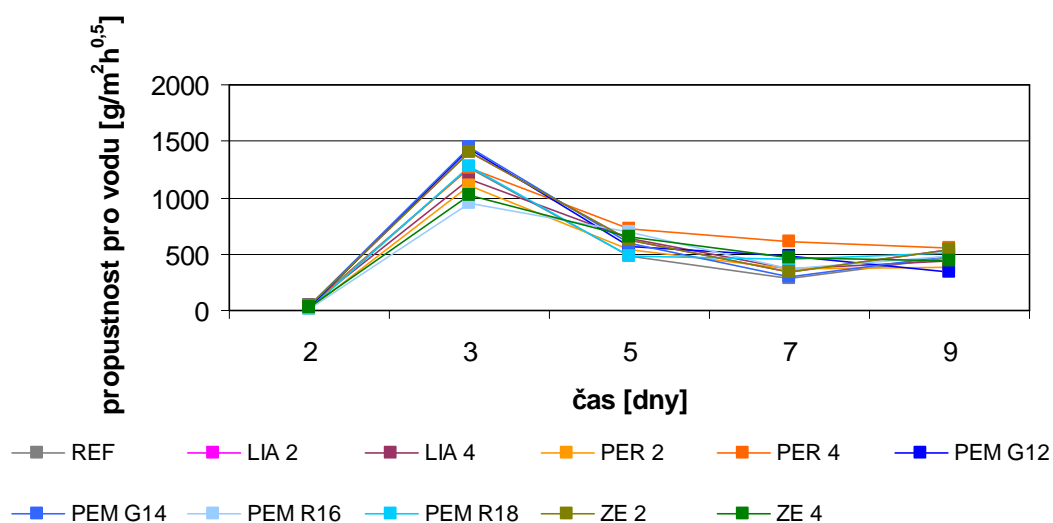


### 5.1.6 Propustnost pro transport vody

Srovnání vypočítaných hodnot propustnosti pro transport vody je uvedeno v tabulce 5.17. Jejich grafické znázornění je vyjádřeno na obrázku 5.18.

Tabulka 5.17: Propustnost pro transport vody

	propustnost pro transportu [ $\text{g}/\text{m}^2\text{h}^{0,5}$ ]				
REF	45,4	1258,9	477,3	281,0	474,6
LIA 2	40,6	1409,7	624,4	336,6	537,4
LIA 4	37,8	1166,3	635,9	374,6	440,1
PER 2	15,3	1104,3	543,5	371,9	378,0
PER 4	28,1	1257,9	729,1	614,1	547,4
PEM G12	30,5	1428,1	566,8	487,1	340,8
PEM G14	39,5	1446,1	598,4	304,2	487,9
PEM R16	18,4	946,5	693,1	369,5	486,4
PEM R18	18,4	1272,8	485,2	460,7	507,5
ZE 2	40,6	1409,7	624,4	336,6	537,4
ZE4	313,4	226,4	194,9	208,14	259,4
čas [dny]	2	3	5	7	9



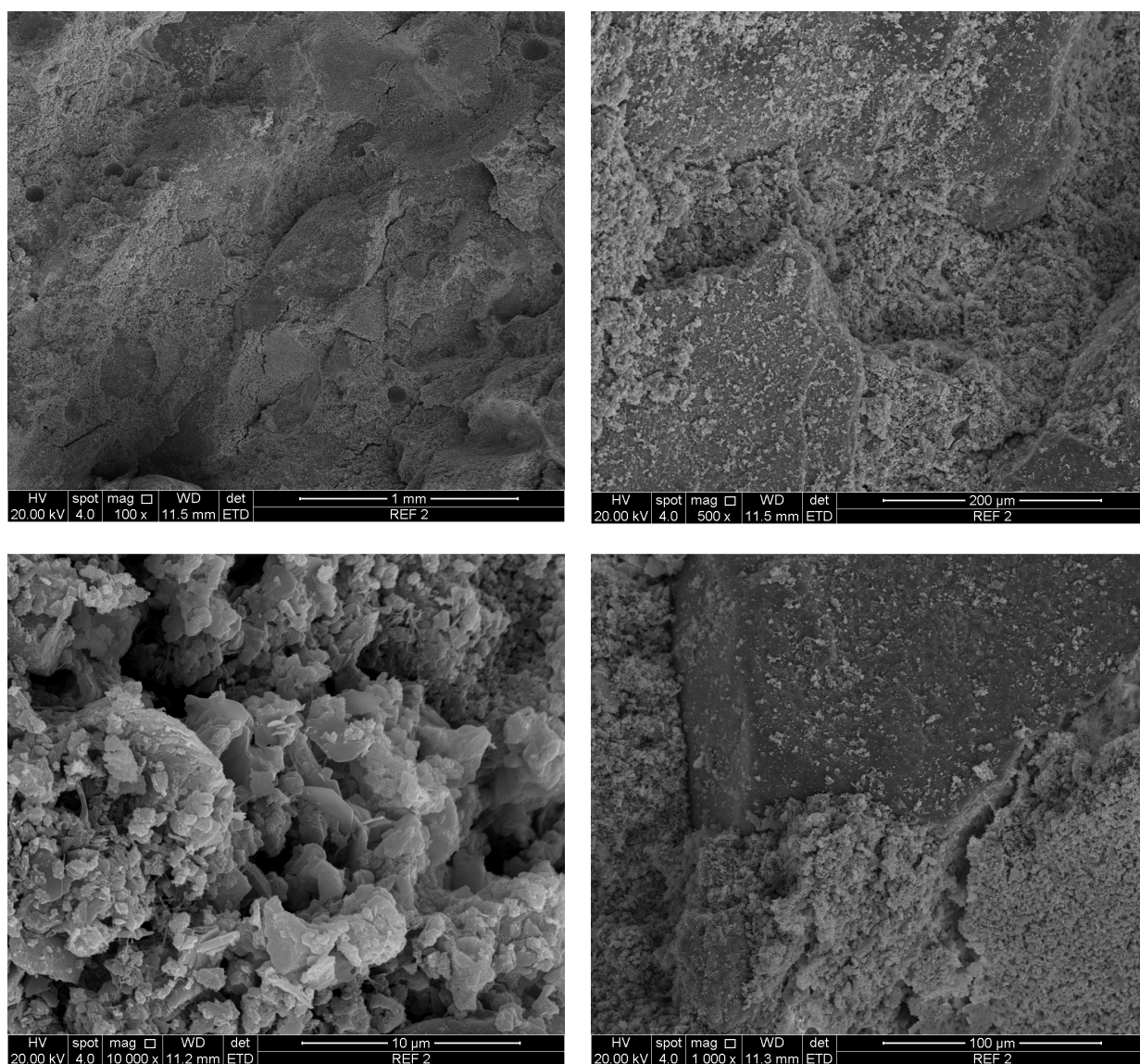
Obr. 5.18: Propustnost pro transport vody

Naměřené hodnoty propustnosti pro transport vody jsou s výjimkou malty plněné výhradně zeolitem velmi podobné. Lze konstatovat, že všechny testované malty umožňují transport vody z podkladu na povrch omítky.

### 5.1.7 REM, srovnání mikrostruktury maltovin s porézním kamenivem

Vzorek REF

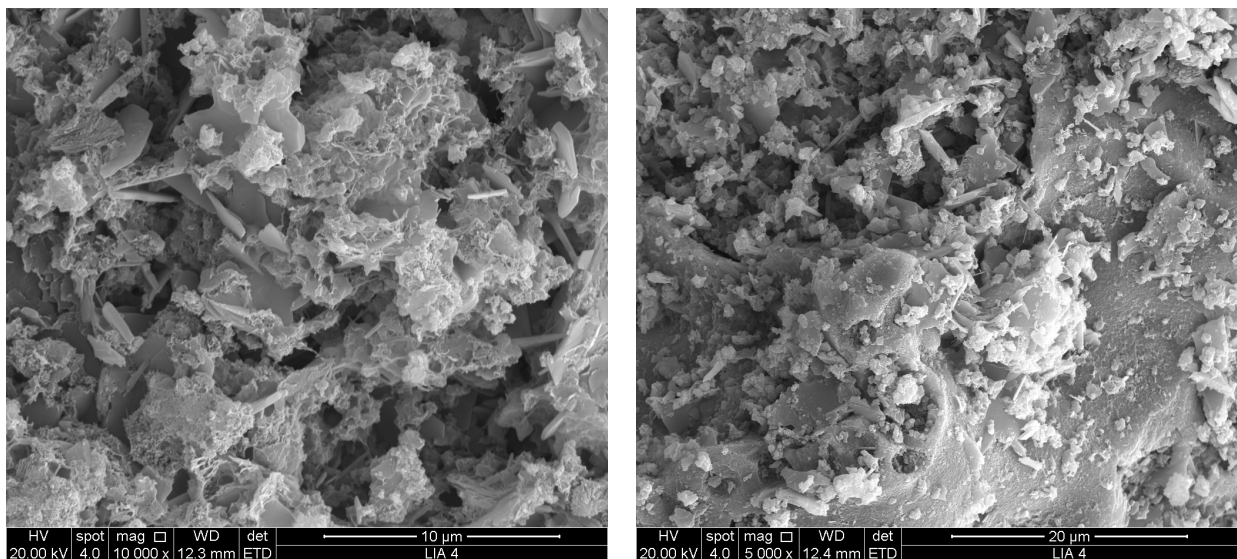
Zrna kameniva jsou na povrchu neporézní, uzavřená. Mikrostruktura základní hmoty je podobná jako u ostatních vzorků, matrix má vysokou porozitu, většina pórů má velikost 0,5-5  $\mu\text{m}$ . V matrix jsou viditelné fragmenty destičkovitých částic, některé jsou šestiúhelníkového tvaru. S největší pravděpodobností se jedná o částice hydroxidu vápenatého – portlanditu. Póry jsou pouze v základní hmotě – matrix.



Obr. 5.19: Mikroskopické snímky mikrostruktury vzorku REF

## Vzorek LIA 4

Povrch zrn kameniva je poměrně kompaktní. K propojení porézního systému částic kameniva s porézním systémem základní hmoty dochází pouze omezeně. Hlavní součástí základní hmoty je pojivo. Základní hmota má vysokou porozitu, většina pórů v matrix má velikosti 1-5  $\mu\text{m}$ . V matrix jsou viditelné fragmenty destičkovitých částic, některé částečně šestiúhelníkového tvaru. Pravděpodobně se jedná o zbytky částic hydroxidu vápenatého – portlanditu, což znamená, že karbonatace maltoviny ještě není ukončená.

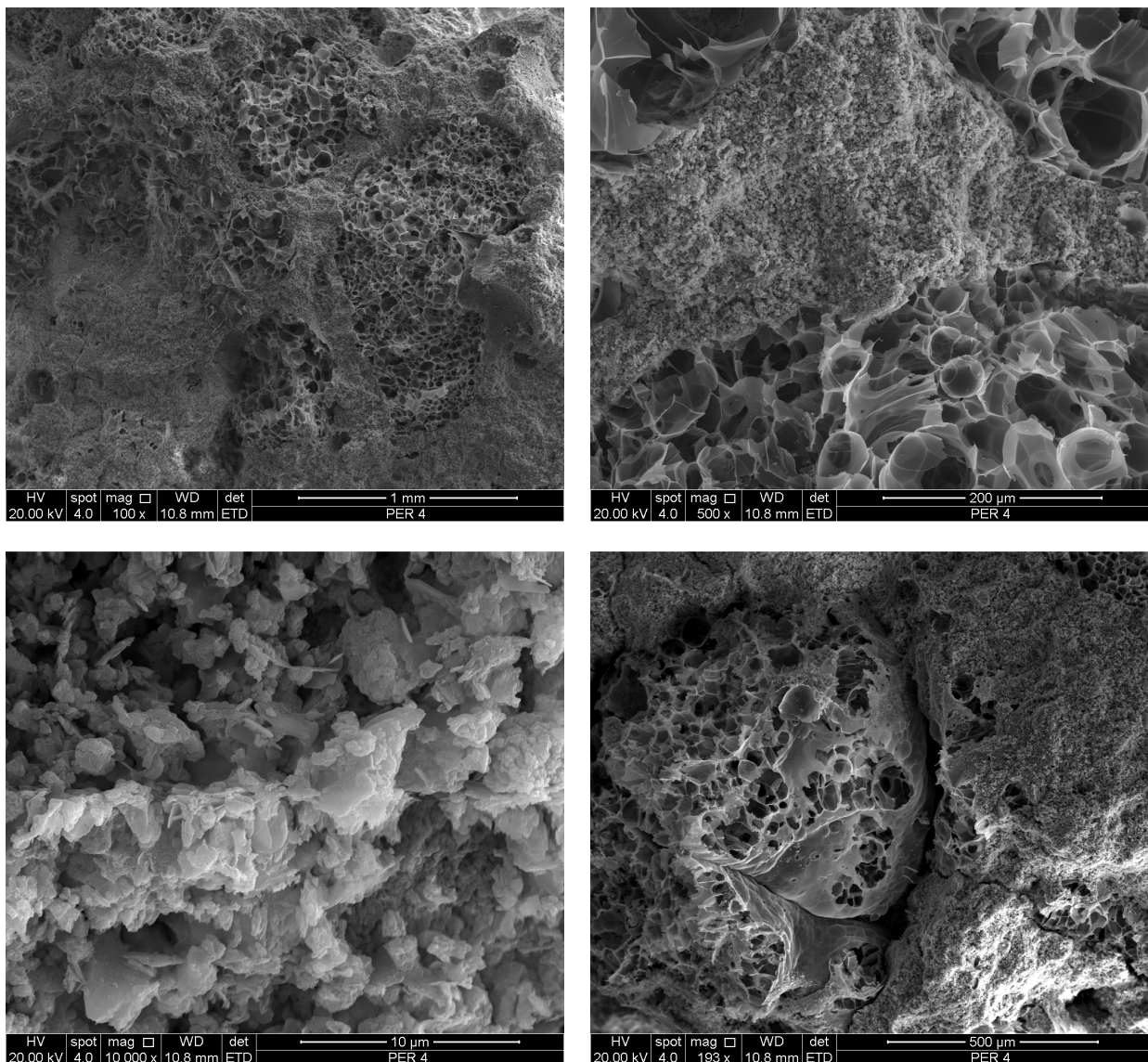


Obr. 5.20: Mikroskopické snímky mikrostruktury vzorku LIA 4



## Vzorek PER 4

Zrna kameniva jsou vysoce porézní s tenkostěnnou „voštinovou“ strukturou. Póry jsou oválné, často vzájemně propojené a mají velikost převážně 10-50  $\mu\text{m}$ , ojediněle až do 100  $\mu\text{m}$ . Povrch zrn kameniva je místy uzavřený tenkou stěnou. S okolní matrix jsou zrna kameniva dobře propojená, zejména v místech defektů na povrchu zrn kameniva. Základní hmota má vysokou porozitu, většina pórů v matrix má velikost 0,5-5  $\mu\text{m}$ . Fragmentsy destičkovitých částic hydroxidu vápenatého – portlanditu jsou v matrix méně početné než-li ve vzorcích ostatních malt.

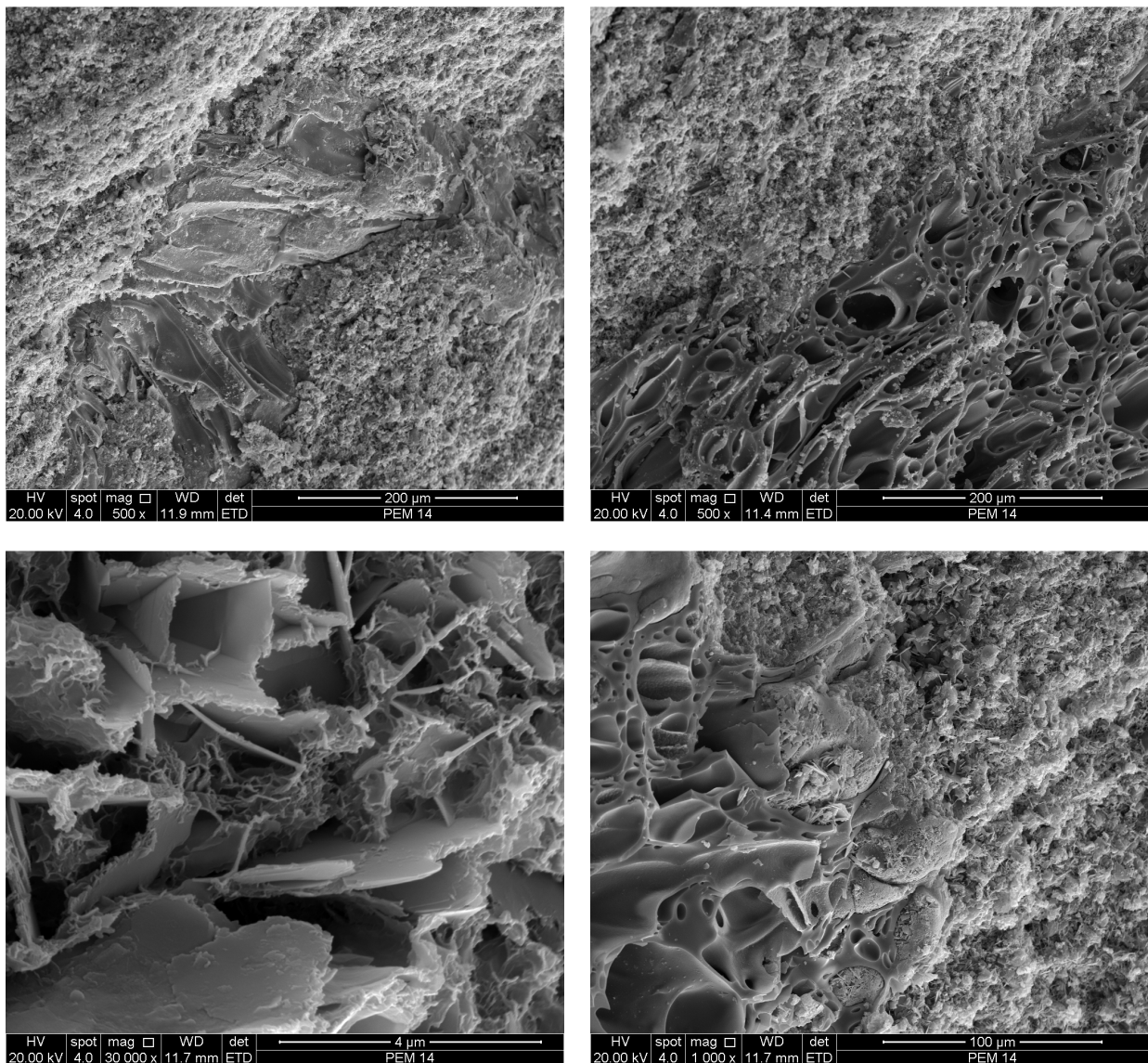


Obr. 5.21: Mikroskopické snímky mikrostruktury vzorku PER 4



## Vzorek PEM 14

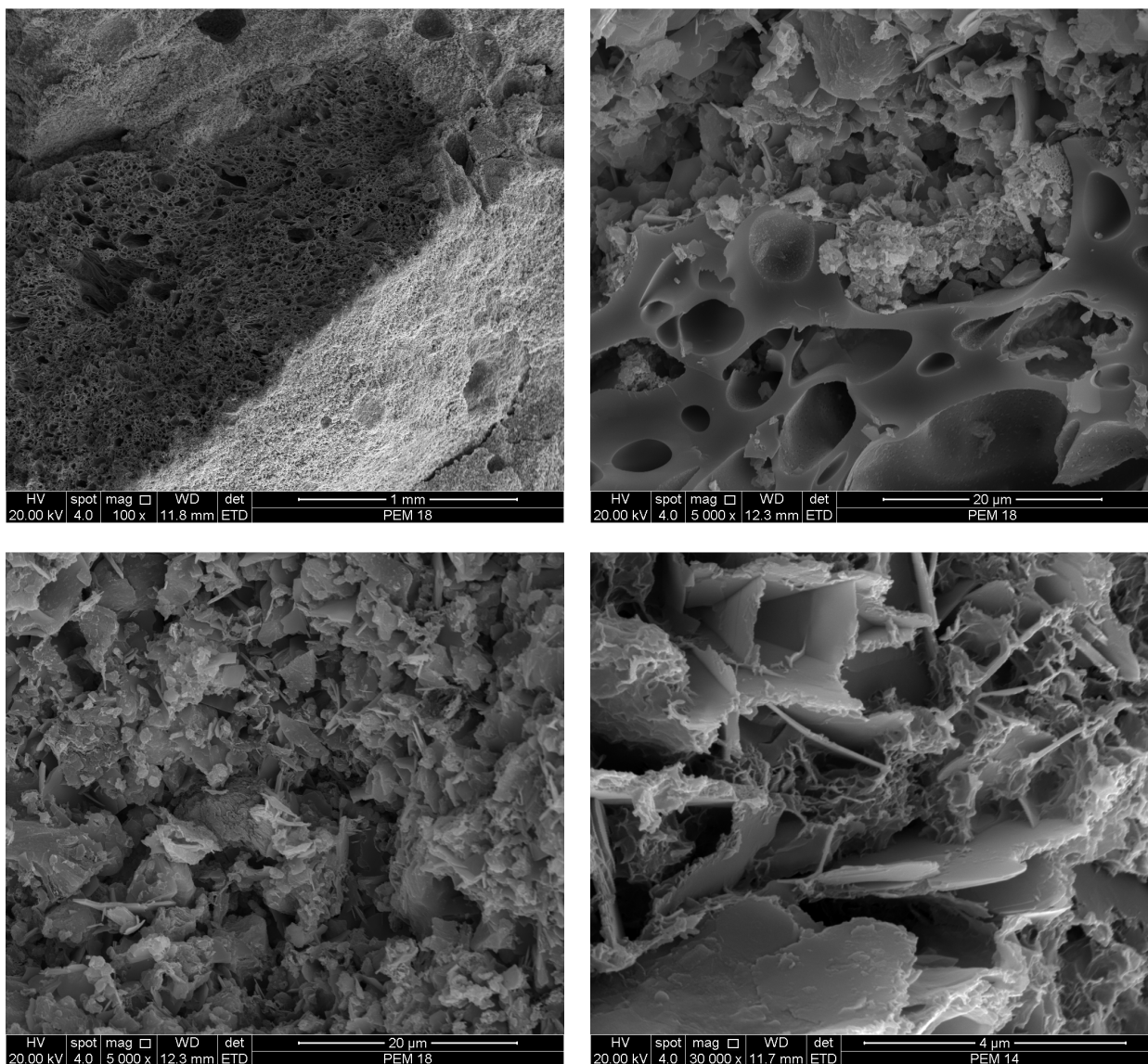
Povrch zrn kameniva je variabilní od relativně uzavřeného až po velmi otevřený povrch s oválnými podlouhlými póry. V místech otevřeného povrchu zrn kameniva lze předpokládat propojení porézního systému částic kameniva s porézním systémem základní hmoty. Základní hmota má vysokou porozitu, většina pórů v matrix má velikost 0,5-3  $\mu\text{m}$ . V matrix jsou viditelné fragmenty destičkovitých částic, některé částečně šestiúhelníkového tvaru. Jedná se pravděpodobně o zbytky částic hydroxidu vápenatého – portlanditu, což znamená, že karbonatace maltoviny ještě není ukončená. Zrna kameniva jsou dobře propojena s okolní matrix. Částice kameniva jsou sklovitého charakteru s oválnými protaženými póry. Průměr těchto dutinek je cca 5-50  $\mu\text{m}$ .



Obr. 5.22: Mikroskopické snímky mikrostruktury vzorku PEM 14

## Vzorek PEM 18

Povrch zrn kameniva je u většiny zrn otevřený póry oválného průřezu. V místech otevřeného povrchu zrn kameniva lze očekávat propojení porézního systému částic kameniva s porézním systémem základní hmoty. Základní hmota má vysokou porozitu. Většina pórů v matrix má velikost 0,5-5  $\mu\text{m}$ . V matrix jsou dobře viditelné fragmenty destičkovitých částic šestiúhelníkového tvaru náležící hydroxidu vápenatému – portlanditu. To znamená, že karbonatace maltoviny ještě není ukončená. Zrna kameniva jsou dobře propojena s okolní matrix. Částice kameniva jsou sklovitého charakteru s oválnými, často vzájemně propojenými póry. Průměr pórů je cca 5-30  $\mu\text{m}$ , v malé míře se v kamenivu vyskytují póry do velikosti 100  $\mu\text{m}$ .

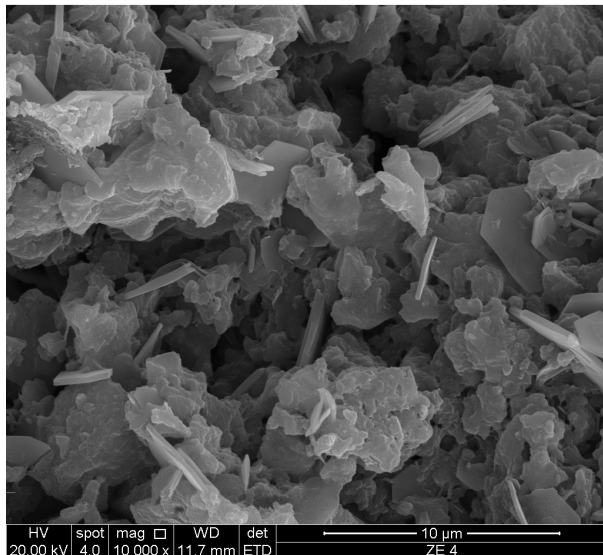
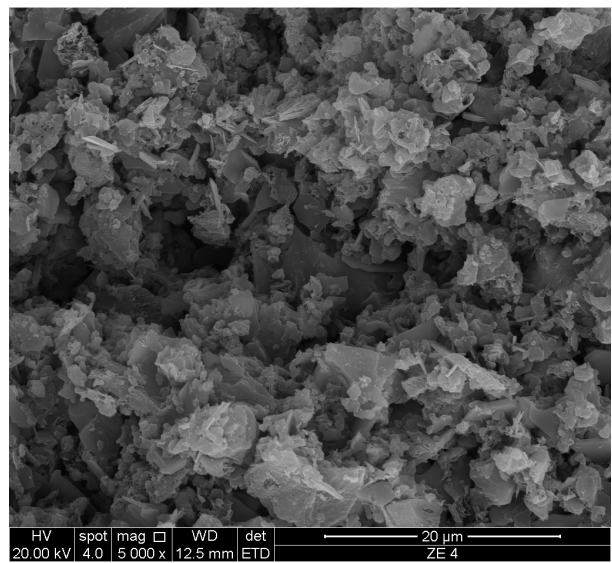
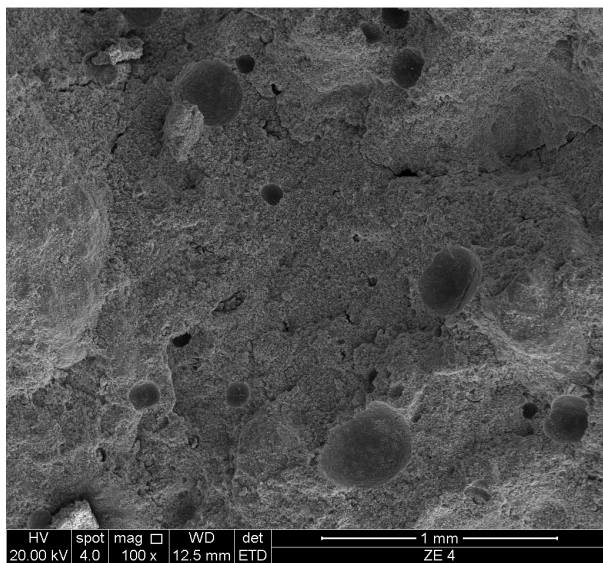


Obr. 5.23: Mikroskopické snímky mikrostruktury vzorku PEM 18



## Vzorek ZE 4

Zrna kameniva jsou na povrchu neporézní, uzavřená. Mikrostruktura základní hmoty je podobná ostatním vzorkům. Matrix má vysokou porozitu, většina pórů dosahuje velikosti 0,5-5  $\mu\text{m}$ . V matrix jsou viditelné fragmenty destičkovitých částic. Některé jsou šestiúhelníkového tvaru. Pravděpodobně se jedná o částice hydroxidu vápenatého – portlanditu. Otevřené, kapilárně aktivní póry, jsou pravděpodobně pouze v základní hmotě – matrix.



Obr. 5.24: Mikroskopické snímky mikrostruktury vzorku PEM 18

### 5.1.8 Optická mikroskopie, srovnání výbrusů maltovin s porézním kamenivem

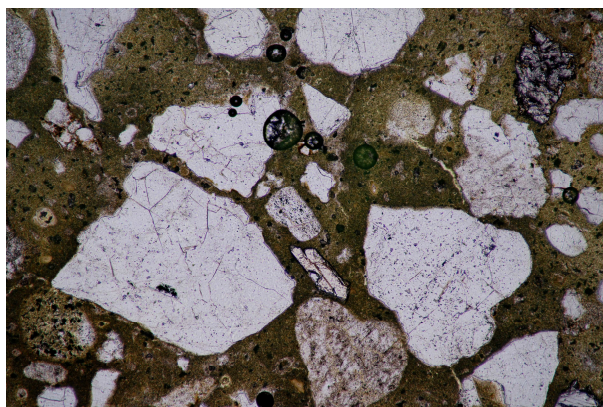
Pro pozorování výbrusů maltovin s porézním kamenivem byl použit mikroskop Nikon Elipse ME 600; fotonástavec s digitálním fotoaparátem Nikon D 200.

Vzorek REF 2

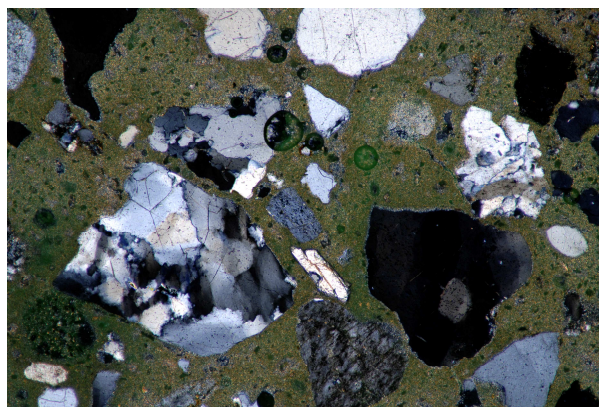
V maltě byl identifikován jeden typ kameniva. Jedná se o neporézní kamenivo tvořené převážně suboválnými až angulárními částicemi křemene a dalších silikátových částic jako jsou živce a drobné horninové úlomky. Většina částic křemene je síťovitě popraskaná, ojediněle i porézní. Lze předpokládat, že ke kapilárnímu transportu kapalin do většiny zrn kameniva nedochází. Výjimkou jsou ojedinělé poréznější částice a lokálně i mechanicky poškozená zrna kameniva s prasklinami. K penetraci impregnační pryskyřice došlo pouze do těchto prasklin. Základní hmota je mikroporézní nasycená impregnační pryskyřicí. Částice kameniva jsou dobře propojeny se základní hmotou. Základní hmota vyplňuje prostor mezi zrny kameniva. Porézní strukturu malty vytváří hlavně mikroporézní základní hmota, ve velmi malé míře ojedinělá porézní zrna kameniva a okrajové i kontrakční trhliny. V základní hmotě jsou viditelné pouze občasné kontrakční trhliny. Na vnějším okraji zrna kameniva je pozorovatelná mírná kumulace, resp. zhutnění pojiva.

Tabulka 5.18: Mikrofoto – definice podmínek

pořadí	zvětšení	osvětlení
1	50x	PS/ II
2	50x	PS/ X + DS-UV
3	50x	DS-UV
4	50x	PS/ II

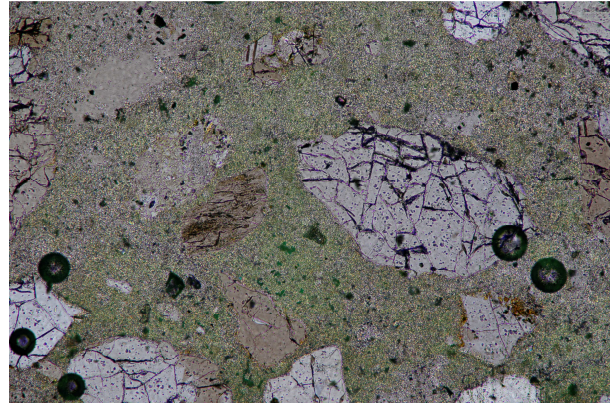
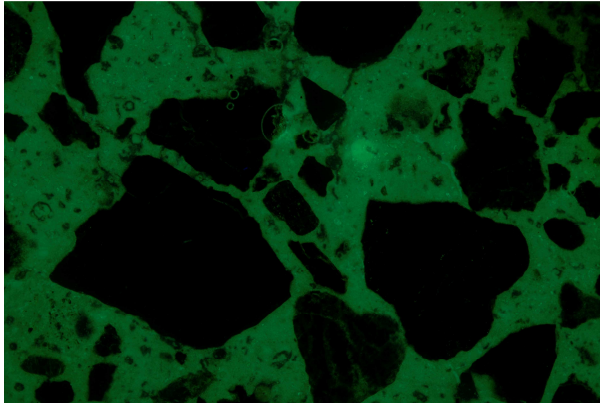


1.



2.





3.

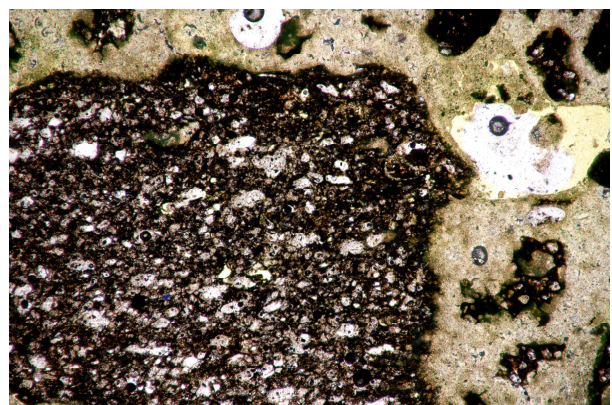
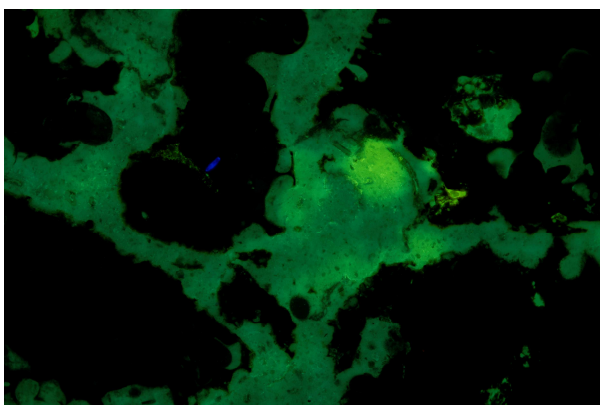
4.

Vzorek LIA 4

Omítku tvoří jeden typ kameniva. Porézní součásti kameniva, ve kterých došlo k prosycení impregnační pryskyřicí, jsou pouze poměrně velké póry. Prosycení pryskyřicí v kamenivu je pouze lokální a je frekventovanější na okrajích zrn. Lze předpokládat, že kapilární transport kapalin mezi základní hmotou a kamenivem se odehrává většinou pouze v povrchové zóně částic kameniva. K penetraci kapalin do celého objemu zrn kameniva zřejmě nedochází a pokud ano, tak pouze lokálně. Základní hmota je mikroporézní, nasycená impregnační pryskyřicí. V základní hmotě jsou viditelné menší kontrakční trhliny. Na vnějším okraji zrna kameniva dochází k mírnému zhutnění pojiva.

Tabulka 5.19: Mikrofoto – definice podmínek

pořadí	zvětšení	osvětlení
1	50x	PS/ II
2	50x	PS/ X + DS-UV
3	50x	DS-UV
4	50x	PS/ II



1.

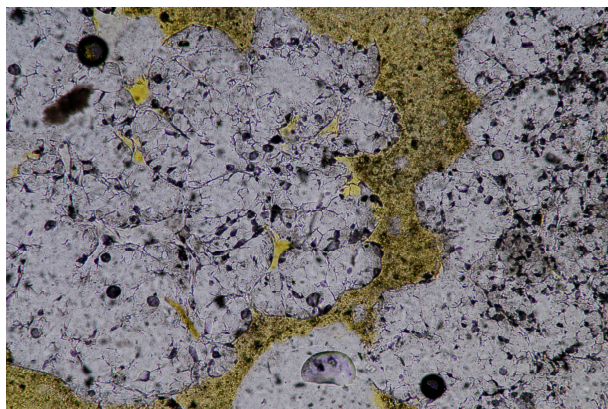
2.

## Vzorek PER 4

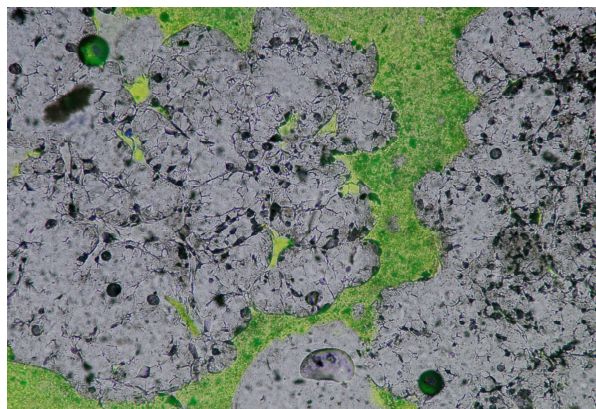
Omítka obsahuje jeden typ kameniva. Kamenivo je sice porézní, ale impregnační pryskyřice penetrovala do částic kameniva pouze částečně. Póry kameniva nejsou přístupné impregnační kapalině a lze tedy předpokládat, že ani jiným kapalinám. Otevřená porozita zrn kameniva a jejich kapilární aktivita je podle výsledků mikroskopického studia výbrusu značně omezená. Základní hmota je mikroporézní, prosycená impregnační pryskyřicí. Obsah pojiva v omítce je poměrně vysoký, základní hmota vyplňuje prakticky celý prostor mezi zrny kameniva. Částice kameniva jsou dobře propojené se základní hmotou. V základní hmotě jsou viditelné kontrakční trhliny. Porézní strukturu malty vytváří hlavně mikroporozita základní hmoty a pravděpodobně velmi omezeně i porozita zrn kameniva. V malé míře se na tvorbě porézního systému podílí i kontrakční trhliny v základní hmotě. Na vnějším okraji zrn kameniva dochází k mírnému zhutnění pojiva odehrávající se pouze v tenké vrstvě.

Tabulka 5.20: Mikrofoto – definice podmínek

pořadí	zvětšení	osvětlení
1	100x	PS/ II
2	100x	PS/ X + DS-UV
3	100x	DS-UV
4	50x	PS/ X + DS-UV

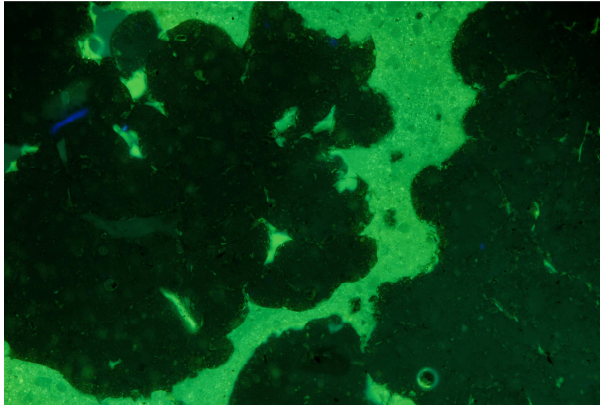


1.

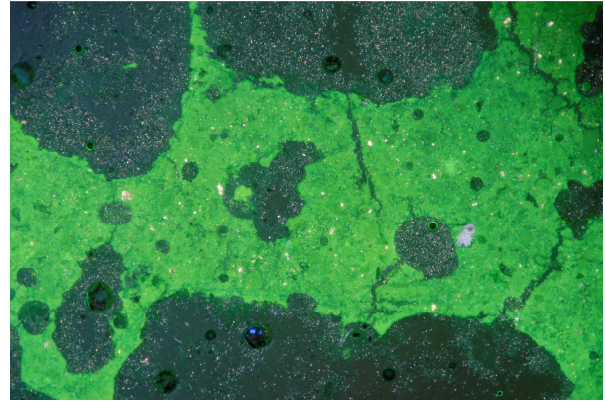


2.





3.



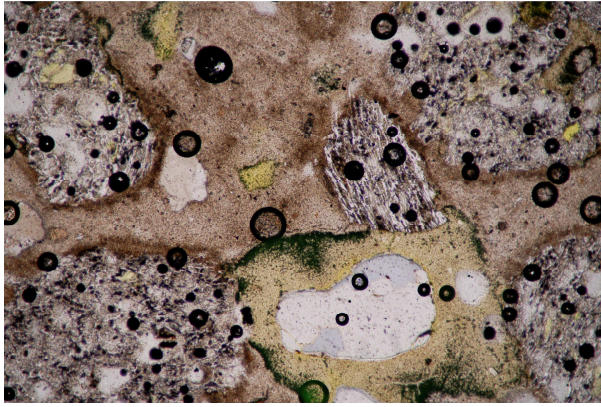
4.

#### Vzorek PEM 14

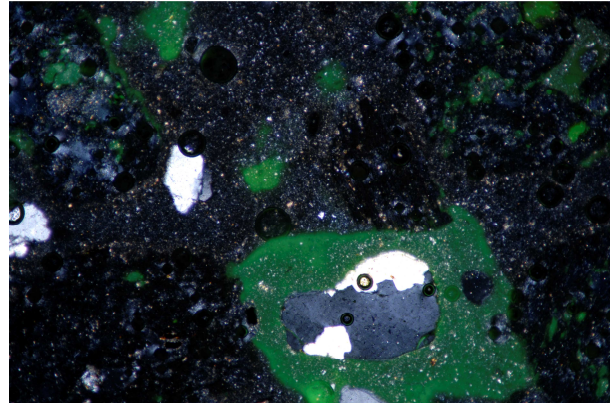
Omítka obsahuje jeden typ kameniva, které je porézní. V části zrn kameniva s většími póry došlo k penetraci impregnační pryskyřice do hloubky větších pórů. Prosycení zrn kameniva impregnační pryskyřicí není homogenní, ale pouze lokální. Lze předpokládat, že k transportu, resp. penetraci kapalin, může docházet částečně i do hloubky zrn kameniva, ale póry kameniva jsou zřejmě kapalinám přístupné pouze částečně. Zrna kameniva jsou z hlediska porozity heterogenní. V zrnech jsou dobře viditelné větší, oválné i jemnější póry vyplněné zabarvenou impregnační pryskyřicí a současně i kompaktnější, méně porézní zóny jednotlivých zrn nebo celá zrna. Otevřená porozita zrn kameniva je nižší než u ostatních typů pemzy. Základní hmota je mikroporézní, prosycená impregnační pryskyřicí. Obsah pojiva je poměrně vysoký, základní hmota vyplňuje prakticky celý prostor mezi zrny kameniva. Částice kameniva jsou dobře propojené se základní hmotou. V základní hmotě jsou viditelné občasné kontrakční trhliny. Porézní strukturu malty vytváří mikroporozita základní hmoty, v menší míře i porozita zrn kameniva a ojediněle i kontrakční trhliny v základní hmotě. Na vnějším okraji zrn kameniva dochází ke zhutnění pojiva.

Tabulka 5.21: Mikrofoto – definice podmínek

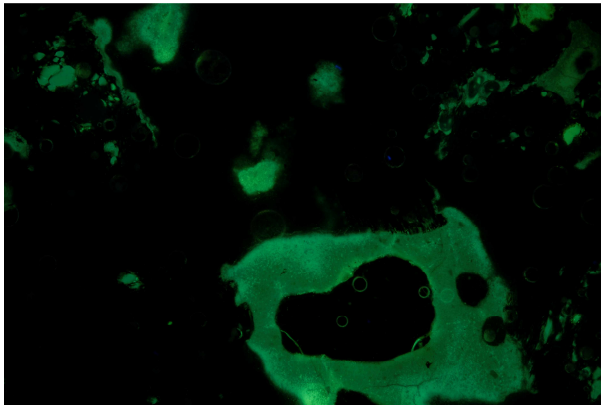
pořadí	zvětšení	osvětlení
1	50x	PS/ II
2	50x	PS/ X + DS-UV
3	50x	DS-UV
4	100x	PS/ X + DS-UV



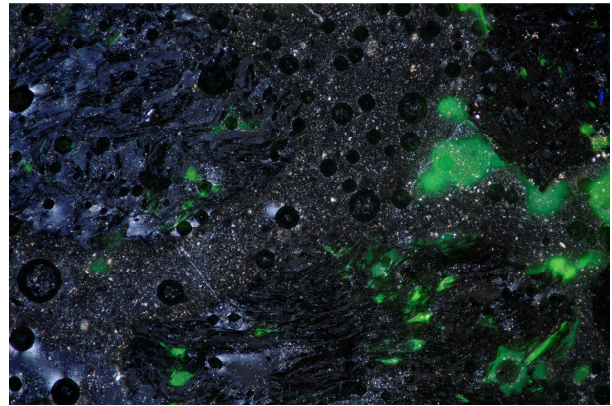
1.



2.



3.



4.

### Vzorek PEM 18

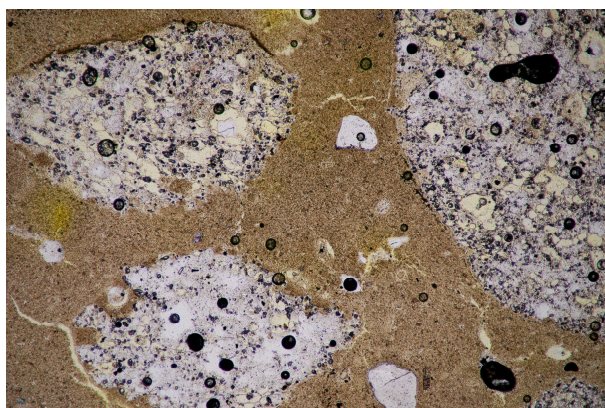
Omítku tvoří jeden typ kameniva. Kamenivo je porézní s ojedinělým výskytem neporézních částic křemene. Ve většině zrn kameniva došlo k penetraci impregnační pryskyřice do celého objemu zrn. Částice mají poměrně vysokou otevřenou porozitu. Lze předpokládat, že k transportu, resp. penetraci kapalin, může docházet do celého objemu zrn kameniva. Některá zrna kameniva jsou přístupná kapalinám pouze částečně. Mezi ně patří ta, co nejsou prosycena impregnační pryskyřicí. Zrna kameniva mají vláknitou strukturu s podlouhlým tvarem pórů. Z hlediska porozity je kamenivo heterogenní. V zrnech jsou dobře viditelné hrubší i jemnější póry vyplněné zabarvenou impregnační pryskyřicí a současně i kompaktnější, méně porézní zóny. Základní hmota je mikroporézní, prosycená impregnační pryskyřicí. Obsah pojiva v omítce je poměrně vysoký, základní hmota vyplňuje prakticky celý prostor mezi zrny kameniva. Částice kameniva jsou dobře propojené se základní hmotou. V základní hmotě jsou viditelné občasné kontrakční trhliny. Porézní strukturu malty vytváří mikroporozita základní hmoty, porozita zrn kameniva a v malé míře i



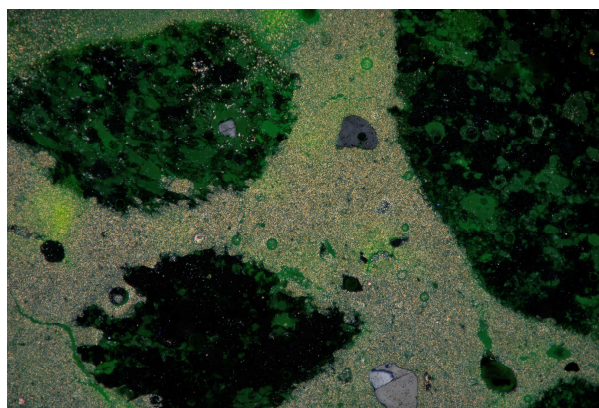
kontrakční trhliny v základní hmotě. Na vnějším okraji zrn kameniva dochází ke zhutnění pojiva.

Tabulka 5.22: Mikrofoto – definice podmínek

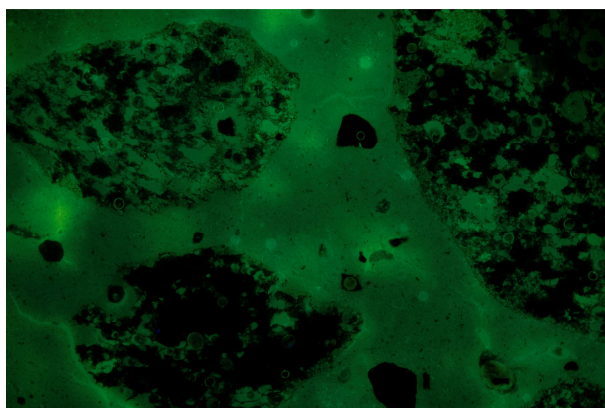
pořadí	zvětšení	osvětlení
1	50x	PS/ II
2	50x	PS/ X + DS-UV
3	50x	DS-UV
4	50x	PS/ X



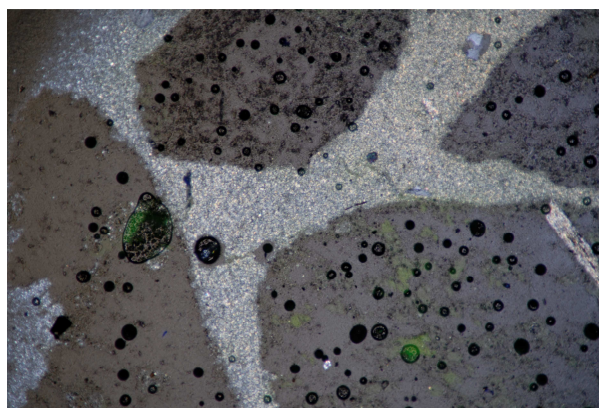
1.



2.



3.



4.

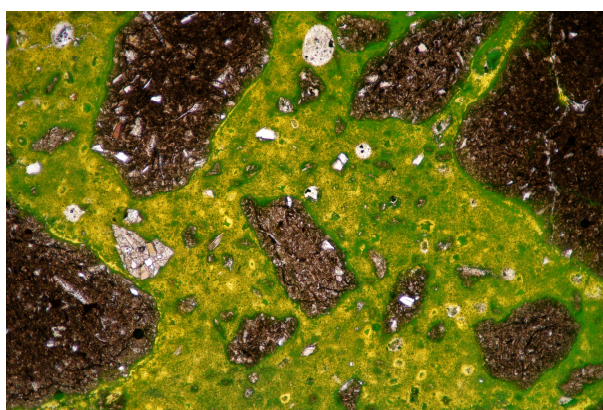
Vzorek ZE 4

Omítka obsahuje pravděpodobně jeden typ kameniva tvořený většinou angulárními, nehomogenními částicemi. Impregnační pryskyřice penetrovala pouze do okrajových částí zrn kameniva a případně do prasklin v kamenivu. Lze předpokládat, že ke kapilárnímu transportu do hloubky zrn kameniva nedochází. Základní hmota je mikroporézní, nasycená impregnační pryskyřicí. Částice kameniva jsou dobře propojené se základní hmotou. Základní hmota vyplňuje prostor mezi zrny

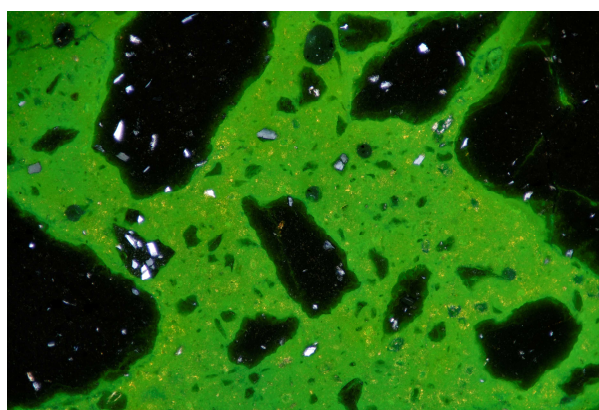
kameniva. Porézní strukturu malty vytváří hlavně mikroporézní základní hmota, v níž jsou ojediněle viditelné kontrakční trhliny. Na vnějším okraji zrn kameniva je lokálně pozorovatelná mírná kumulace pojiva.

Tabulka 5.23: Mikrofoto – definice podmínek

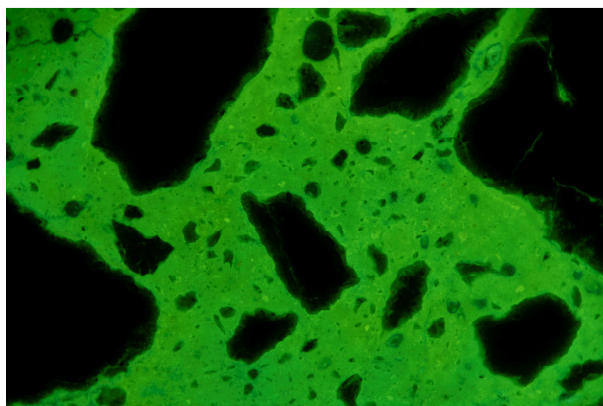
pořadí	zvětšení	osvětlení
1	50x	PS/ II
2	50x	PS/ II + DS-UV
3	50x	PS/ X + DS-UV
4	50x	DS-UV



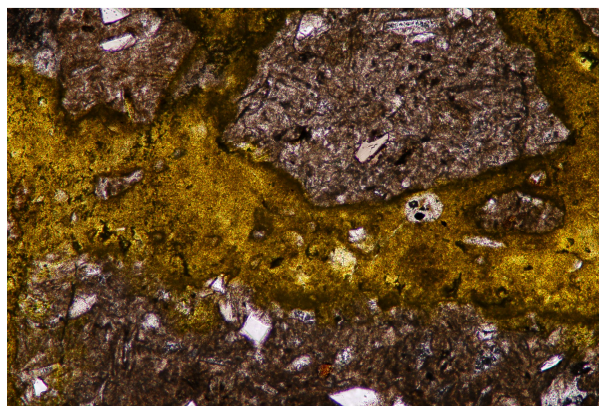
1.



2.



3.



4.



---

## 6 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo odzkoušet některé vlastnosti vápenopucolánových malt s přidavkem porézního kameniva. Zvýšená porozita byla sledována s ohledem na případné využití při obnově stavebních památek poškozených zvýšenou vlhkostí zdiva a salinitou. Pucolán použitý do malt byl metalupek L05 a spolu s vápenným hydrátem a kopaným pískem z lokality Hulín tvořil srovnávací maltu. Z porézních kameniv byly použity: liapor, perlit, zeolit, řecká a německá pemza. Podíl porézního kameniva v maltě byl od každého typu kameniva zvyšován v objemových podílech 1:2, 1:1, 2:1 a 1:0, porézní kamenivo k písku.

Na základě provedeného studia lze konstatovat, že po 28 a 90 dnech měla většina malt vyšší pevnost v tlaku a tahu za ohybu než referenční malta. To může být způsobeno pucolánovou aktivitou kameniv nebo tvarem a granulometrií kameniv. Obecně nejvyšší pevnosti byly zjištěny u malt se zeolitem a u malt s pemzami. Tato pevnost se s dobou zrání zvyšovala. Objemové hmotnosti malt s porézním kamenivem byly vždy nižší než objemová hmotnost referenční malty. Nejnižší objemovou hmotnost mají malty s perlitem. Naopak nejvyšší byly zjištěny u malt se zeolitem. S přibývajícím podílem porézního kameniva klesala i objemová hmotnost malt. V přímé souvislosti s tímto konstatováním jsou výsledky měření kumulativního objemu pórů, kdy největší objem vykazují malty s perlitem. U těchto malt byl naměřen i značný podíl velkých pórů. Nejvyšší porozitu malt s perlitem dokládá i nejvyšší nasákavost vodou a mikroskopická pozorování. Výrazná nasákavost vodou byla zjištěna u malt s liaporem a nižší u malt s německou pemzou. Proti tomuto zjištění stojí hodnoty objemu pórů a elektronové mikroskopie, kde nejvyšší porozitu po perlitových maltách vykazují malty s německou pemzou. Elektronovou mikroskopií nebyly u malt plněných liaporem prokázány téměř žádné otevřené póry. Orientační improvizovaná zkouška propustnosti malt pro transport vody prokázala u všech malt velmi podobné hodnoty, na základě kterých lze konstatovat, že všechny testované malty mají schopnost transportovat kapalnou vodu z podkladu.

Pro další zkoušení malt potenciálně vhodných na opravy historických objektů poškozovaných vlhkostí a vodorozpustnými solemi lze doporučit malty s perlitem a pemzami. Navzdory některým dobrým vlastnostem z hlediska porozity nelze doporučit kamenivo tvořené liaporem díky jeho zvýšenému obsahu síranů. Malty se zeolitem při zkoumání neprokázaly velkou porozitu, ale za pozornost stojí jejich

---

nárůst pevnosti s dobou zrání oproti referenční maltě. K vlastnostem zasluhujícím si další výzkum zeolitových malt patří jejich schopnost iontové výměny.

Již po tomto primárním výzkumu zmíněných malt, který je třeba dále rozvíjet, je možné konstatovat, že některé z nich najdou uplatnění v péči o stavební památky.



---

## 7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Kolektiv autorů, *Vápno*. Praha 2001. s.16.
2. Cabrera, J., Rojas, M. F., *Mechanism of hydration of the metakaolin-lime-water system*. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, 2001. p. 177-182.
3. Matějka J., *Výkvěty v keramice a na stavbách*. Brno 1948.
4. Heidingsfeld V. a kol., *Nátěry fasád*. Grada 2002. s. 12 -36.
5. Jursík F., *Anorganická chemie kovů*. Praha 2002. s. 152, ISBN 80-7080-504-8.
6. Kotlík P. a kolektiv, *Stavební materiály historických objektů, materiály, koroze, sanace*. Vydavatelství VŠCHT Praha 1999. s. 63.
7. Vacík J. a kol., *Přehled středoškolské chemie*. Praha, 1993. s. 186, 365 s. ISBN 80-04- 26388-7.
8. Zelinger J., Heidingsfeld V., Kotlík P., Šimůnková E., *Chemie v práci konzervátora a restaurátora*. Academia Praha 1987. s. 203.
9. Wasserbauer R., *Biologické znehodnocení staveb*. ABF 2000 ISBN 80-86165-30-2, s. 39-42.
10. Charola AE., *Salts in the deterioration of porous materials*. Indy Konserv 2000. s. 327-343.
11. Torraca G., *Porous building materials – materials science for architectural conservation*. *International center For The Preservation And The Restoration Of Cultural Property*. 1981. s 105-107.
12. Bayer K., *Metody odsolování při restaurování porézních materiálů, Odsolování památkově chráněných staveb*. Seminář STOP, Praha 1999, s. 23-24.
13. *Tagungsbeiträge, Hochschule für Bildende Kunst Dresden 2002. Mauersalze und Architekturoberflächen*. s.125.
14. Bayer K., *Nepublikovaný učební text k předmětu Technologie restaurování na Fakultě restaurování Univerzity Pardubice*.
15. Bayer K., *Metody odsolování při restaurování porézních materiálů*. nepublikovaný text.
16. Wasserbauer R., *Biologické znehodnocení staveb*. ABF 2000. ISBN 80-86165-30-2.
17. Groot G., Hees R., Wijffels T., *Selection of plaster and tendere for salt laden masonry substrates*. *Construction and Building Materials* 2009. s. 1743-1750.
18. WTA směrnice 2-2-91 *Sanační omítkové systémy včetně doplňku 2-6-99/D*

- 
19. Svoboda L. a kolektiv, *Stavební hmoty*. Jaga, Bratislava 2007. s. 105-110.
  20. Mertens G., Senllings R., Balen K., *Pozzolanic reactions of common natural zeolites with lime and parameters affecting their reactivity*. *Cement and Concrete Research* 2009. s. 233-240.

---

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<b>PS</b>	procházející světlo
<b>II</b>	paralelní nikoly
<b>X</b>	zkřížené nikoly
<b>DS-UV</b>	dopadající světlo, excitace UV světlem
<b>REM</b>	rastrovací elektronová mikroskopie