

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STAVEBNÍ



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2018/2019

**ŠIMON
MARUŠIAK**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení vedoucí prof. Ing. Mileny Pavlíkové, Ph.D.

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

.....

podpis

Chtěl bych poděkovat své vedoucí práce prof. Ing. Mileně Pavlíkové, Ph.D. za odborné vedení práce, metodické pokyny, rady a připomínky a zprostředkování odborné literatury. Mé poděkování za technickou pomoc a cenné rady při provádění analýz patří také Ing. Jaroslavu Pokornému, Ph.D. a Ing. Martině Záleské. Dále také Pavlu Košatovi a Ing. Janu Fořtovi, Ph.D. za pomoc při měření mechanických vlastností. V neposlední řadě děkuji katedře materiálového inženýrství za zapůjčení přístrojového vybavení potřebného k provádění analýz.

Tato práce byla řešena v rámci projektu SGS17/166/OHK1/3T/11, GAČR č. 18-07332S a s pomocí přístrojového vybavení získaného z podpory projektů MŠMT OPVVV: Obnova infrastruktury laboratoří Stavební fakulty ČVUT CZ.02.2.67/0.0/0.0./16_016/0002526 a Vytvoření infrastruktury pro inovované doktorské studijní programy Fyzikální a materiálové inženýrství (CZ/ENG) CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_017/0002623

Vlastnosti a odolnost lehčených omítek
s vybraným minerálním plnivem

Properties and durability of lightweight
mortars with chosen mineral aggregate



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Marušiak Jméno: Šimon Osobní číslo: 409999

Zadávací katedra: Materiálového inženýrství a chemie

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Materiálové inženýrství

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vlastnosti a odolnost lehčených omítek s vybraným minerálním plnivem

Název diplomové práce anglicky: Properties and durability of lightweight mortars with chosen mineral aggregate

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte rešerši se zaměřením na používané typy lehčených plniv do malt a omítek. Porovnejte jednotlivé typy a vyberte si jeden typ lehčeného kameniva. S tímto kamenivem připravte omítku na bázi vápna, hydraulického vápna a vápeno-cementovou omítku. Na vyrobených vzorcích experimentálně stanovte základní materiálové charakteristiky s důrazem na tepelné a vlhkostní vlastnosti. Získané výsledky zhodnoťte z pohledu odolnosti jednotlivých omítek.

Seznam doporučené literatury:

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

Kotlík, P.: *Stavební materiály historických objektů*, VŠCHT Praha 1999, ISBN 80-7080-347-9.

Kotlík, P. a kol.: *Vápno. Společnost pro technologie ochrany památek*, Praha, 2001. s 3-76, ISBN 80-902668-8-6.

Hošek, J. a Losos, L.: *Historické omítky*. Praha, Grada Publishing, 2007. ISBN 978-80-247-1395-3.

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

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

Datum zadání diplomové práce: 1.10.2018

Termín odevzdání diplomové práce: 6.1.2019

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

1.10.2018

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Anotace:

Na vlastnostech dnes běžně užívaných omítek ve stavebním průmyslu se příliš neodráží současné trendy vedoucí ke snížení energetické náročnosti staveb související s tepelně izolačními schopnostmi a vlhkostními parametry obvodových plášťů, zvláště pak v oblasti památkové péče.

První část práce je věnována historickému vývoji omítek, složení omítkových vrstev, charakterizaci užívaných pojiv a plniv s akcentem na přírodní a umělá lehčená kameniva s možným uplatněním při výrobě maltovin. Náplní experimentální části je provedení analýz na laboratorně zhotovených zkušebních omítkách s částečnou, resp. úplnou náhradou plniva lehčeným perlitem, kde je při vyhodnocení kladen důraz na tepelné a vlhkostní vlastnosti. Výsledky prováděných měření prohlubují poznatky o charakteristice lehčených omítek a mohou sloužit jako podklad pro potenciální využití omítek s takovýmto složením v praxi.

Klíčová slova: *Lehčené kamenivo, perlit, lehčené omítky, charakterizace kameniva, základní materiálové parametry, tepelné vlastnosti, vlhkostní vlastnosti.*

Abstract:

Contemporary trends, which lead to lower energy demands related to the thermal insulation abilities and moisture parameters of building envelopes, are not reflected on properties of usually used mortars, especially in the case of cultural heritage preservation.

The first part of this diploma thesis is focused on mortars historical development, the moisture layers composition, the characterization of binders and aggregates with accenting of natural and synthetic lightweight materials. The experimental part deals with laboratory measurements of testing samples containing different aggregates replacement of lightweight perlite. The emphasis on thermal and moisture properties was placed. The results of realized measurements deepen knowledge of lightweight moistures properties and can be used in practice.

Keywords: *Lightweight aggregates, perlite, lightweight mortars, aggregates characterization, basic material parameters, thermal properties, moisture properties.*

Obsah

Seznam použitých symbolů.....	3
1 Úvod.....	5
1.1 Cíl práce	7
2 Omítky.....	8
2.1 Historický vývoj omítek	8
2.2 Obecné dělení omítek	10
2.2.1 Omítky pro vnitřní a vnější použití	10
2.2.2 Rozdělení omítek podle způsobu výroby	11
2.2.3 Rozdělení omítek podle způsobu nanášení	11
2.2.4 Dělení omítek podle skladby	12
2.2.5 Dělení omítek podle zpracování při aplikaci.....	13
2.3 Složení omítek a materiálové dělení	16
2.3.1 Hliněné omítky	17
2.3.2 Vápenné omítky	18
2.3.3 Cementové omítky	24
2.3.4 Sádrové omítky	28
2.3.5 Ostatní pojiva omítek	30
2.4 Plniva do omítek	31
2.4.1 Obecné dělení kameniva	32
2.4.1.1 Zrnitostní dělení	32
2.4.1.2 Dělení kameniva podle původu.....	33
2.4.1.3 Dělení podle způsobu získávání	34
2.4.1.4 Dělení podle objemové hmotnosti.....	34
2.5 Lehčené kamenivo	36
2.5.1 Základní vlastnosti a způsoby stanovení	36
2.5.2 Přírodní pórovitá kameniva	42
2.5.2.1 Vulkanické tufy a tufity.....	42
2.5.2.2 Lehké lávy	43
2.5.2.3 Přírodní pemza	43
2.5.2.4 Křemelina	44
2.5.3 Umělá kameniva z průmyslových odpadů	45
2.5.3.1 Škvára.....	45
2.5.3.2 Cihelná drť a cihloporit	46
2.5.3.3 Struska	46
2.5.3.4 Agloporit	47
2.5.4 Uměle vyráběná kameniva	48
2.5.4.1 Keramzit	49
2.5.4.2 Kavtit.....	51
2.5.4.3 Expandit	52
2.5.4.4 Vermikulit	53
2.5.4.5 Perlit	53

3	Experimentální část.....	57
3.1	Popis použitých materiálů.....	57
3.1.1	Vápenný hydrát	57
3.1.2	Hydraulické vápno	57
3.1.3	Cement	58
3.1.4	Křemenný písek.....	59
3.1.5	Perlit	59
3.1.6	Laboratorně zjišťované vlastnosti	61
3.2	Přehled receptur a příprava zkušebních vzorků	62
3.2.1	Základní vlastnosti	68
3.2.1.1	Objemová hmotnost	68
3.2.1.2	Hustota matrice	69
3.2.1.3	Otevřená pórovitost	71
3.2.2	Mechanické vlastnosti	72
3.2.2.1	Pevnost v tahu za ohybu.....	73
3.2.2.2	Pevnost v tlaku	75
3.2.2.3	Dynamický modul pružnosti	76
3.2.3	Vlhkostní vlastnosti.....	78
3.2.3.1	Absorpce.....	78
3.2.4	Tepelné vlastnosti.....	82
3.3	Výsledky a diskuze	85
3.3.1	Základní fyzikální vlastnosti	85
3.3.2	Mechanické vlastnosti	88
3.3.3	Vlhkostní vlastnosti.....	91
3.3.4	Tepelné vlastnosti.....	94
4	Závěr.....	101
	Literatura	105
	Seznam obrázků.....	108
	Seznam tabulek.....	110

Seznam použitých symbolů

A	[kg.m ⁻² .s ^{-1/2}]	absorpční koeficient vody
a	[m ² .s ⁻¹]	součinitel teplotní vodivosti
a_s	[mm]	délka styčné plochy desky se vzorkem
b	[mm]	šířka vzorku
b_s	[mm]	šířka styčné plochy desky se vzorkem
c	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita
c_o	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita suchého vzorku
c_ρ	[J.m ⁻³ .K ⁻¹]	objemová tepelná kapacita
c_w	[J.m ⁻³ .K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita vody
d	[mm]	výška zkušební tělesa
E	[- ; %]	hmotnostní nasákavost
E_d	[GPa]	dynamický modul pružnosti
F	[N]	maximální zatížení na zkušební těleso
f_b	[N.mm ⁻²]	pevnost v tlaku
f_{btm}	[N.mm ⁻²]	pevnost v tahu za ohybu
h	[mm]	výška vzorku
h_t	[- ; %]	hutnost
k	[-]	součinitel rozměrnosti prostředí ($k = 1$)
κ	[m ² .s ⁻¹]	součinitel vlhkostní vodivosti
L	[mm]	délka měřicí základny
l	[mm]	délka vzorku
l_p	[mm]	vzdálenost mezi osami podpěrných válců
λ	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	součinitel tepelné vodivosti
m	[kg]	hmotnost vzorku

m_{H_2O}	[kg]	hmotnost vody
m_o	[kg]	hmotnost suchého vzorku
m_{sat}	[kg]	hmotnost vzorku plně nasyceného vodou
ρ_{mat}	[kg.m ⁻³]	hustota matrice
ρ_{syp}	[kg.m ⁻³]	sypaná hmotnost
ρ_{sypset}	[kg.m ⁻³]	sypaná hmotnost ve stavu setřeseném
ρ_{sypvol}	[kg.m ⁻³]	sypaná hmotnost ve volně loženém stavu
ρ_v	[kg.m ⁻³]	objemová hmotnost
ρ_{vo}	[kg.m ⁻³]	objemová hmotnost suchého vzorku
p	[- ; %]	pórovitost
P_{atmh}	[Pa]	atmosférický tlak okolního prostředí
P_{ch}	[Pa]	tlak v referenční komoře
P_{rh}	[Pa]	tlak v nádobě se vzorkem
T	[μm]	čas potřebný k průchodu vlny prostředím
V	[kg.m ⁻³]	objem vzorku
V_b	[m ³]	objem nádoby se vzorkem
V_L	[mm]	rychlost šíření impulzu
V_{mat}	[m ³]	objem matrice vzorku
V_{rz}	[m ³]	objem referenční komory
w	[kg.kg ⁻¹]	hmotnostní vlhkost
w_{sat}	[kg.m ⁻³]	kapilární obsah nasycené vlhkosti

1 Úvod

Přirozenou součástí téměř všech současných i v minulosti vybudovaných staveb v našich zeměpisných šířkách jsou omítky. Jejich vývoj jde ruku v ruce se stavebně technickými i estetickými požadavky kladenými na stavby dané doby. Po dlouhá staletí byly nové materiály získávány experimentálním způsobem bez jakéhokoliv vědeckého podložení. Změnu přinesla až druhá polovina 19. století a průmyslová revoluce. Vědecký pokrok této doby vnesl do stavebnictví spoustu novinek, včetně prvních pokusů o výrobu nových, resp. modifikaci dřívě užívaných, materiálů na základě aktuálních poznatků z oblasti chemie a fyziky. S průběžně se rozšiřující množinou zjištění týkajících se struktury, skladby i chemického složení a vlastností látek se zvyšovaly také možnosti uplatnit ve stavebnictví dřívě nezavedené materiály.

V současné době se nacházíme ve stadiu, kdy je věda schopna analyzovat materiály z mnoha úhlů pohledů do největších podrobností a získané poznatky posléze uplatnit při výrobě materiálů „šitých na míru“ konkrétní oblasti aplikace. Takovýmto způsobem vznikají dřívě neznámé materiály, jako například geopolymery, nejrůznější syntetické polymerní sloučeniny (plasty) nebo také lehčené látky.

S proměnami společnosti, způsobem života i snahou o zvyšování životního komfortu souvisí také neustále se měnící, nebo spíše zvyšující se nároky a požadavky na stavby. V minulosti tolik neopominutelná estetická stránka se v nynější době dostává do pozadí a u stavebních objektů se stává prvořadou jejich praktičnost a pohodlnost spojená s maximalizací snahy redukovat finanční prostředky investované za účelem jejího dosažení. Tato skutečnost se negativně promítá nejen při péči o naše kulturní dědictví, ale nejednou bývá také v rozporu se společenskou snahou zajistit trvale udržitelný rozvoj a snížit ekologickou zátěž rostoucí důsledkem způsobu našeho fungování.

Největším problémem, především u historických objektů, bývá při rekonstrukcích splnit požadavky na provoz objektů v duchu dnešní doby a zároveň nezasáhnout do historické podoby tvořené nejrůznějšími estetickými i stavebně konstrukčními detaily, jež jsou dokladem a nositelem památkových hodnot. Asi nejběžnějším příkladem střetu mezi funkčními požadavky a zachováním umělecko-estetického pojetí stavby bývá zájem snížit její energetickou náročnost, sestávající převážně z nákladů na její vytápění. Nejjednodušším a nejčastěji užívaným způsobem k dosažení cíle je pak zateplení stropů nejvyššího podlaží, či podkroví (pokud je využito jinak, než pro skladovací účely) a svislého obvodového pláště realizovaného vnějším kontaktním zateplovacím systémem. Z tepelně technického pohledu se

jedná o nejúčinnější a zároveň finančně nejpříjemnější řešení, z hlediska uchování vnějšího vzhledu fasádních plášťů však ve většině případů neakceptovatelné.

Z výše uvedeného příkladu vyplývá potřeba hledání cest vedoucích ke splnění obou (všech) požadavků. Předem jasná je nereálnost 100% uspokojení všech deklarovaných hledisek, avšak kompromisním řešením se můžeme snažit o jejich naplnění v maximální možné míře. A v tomto bodě vstupuje do hry (kromě dalších stavebních odvětví) obor materiálového inženýrství, který by měl díky svému zaměření dát jako první odpověď na otázku, jakým způsobem v takovýchto případech dojít k všestranně přijatelnému kompromisnímu konsenzu.

Úkol to není jednoduchý, na straně jedné vstupuje požadavek „kompatibilní obnovy“, která počítá s použitím tradičních stavebních materiálů a co nejautentičtější obnovy degradovaných stavebních částí, naproti tomu je ale nutné splnit také neustále se zpřísnující legislativní regulativy týkající se bezpečnosti, odolnosti a hygienické nezávadnosti staveb, v neposlední řadě nesmíme dopustit, aby se použité materiály, přesněji jejich vlastnosti, negativně podepsaly na dlouhodobém stavu všech komponentů stavby (zvláště stavebních konstrukcí). A tím se vlastně dostáváme zpátky k otázce materiálové kompatibility.

Snahou materiálového inženýrství by tedy mělo být hledání takových materiálů, které by kromě kompatibility a zachování hodnot starších konstrukcí byly schopné uspokojit i aktuální požadavky, např. lepší tepelně izolační vlastnosti obvodových plášťů. Při návrhu materiálů bychom neměli opomenout také ekologický aspekt jejich výroby svázaný s celosvětovou snahou o využití druhotných surovin a redukce energie vynaložené k jejich výrobě.

A tím už se dostávám ke konkrétnímu úkolu, jemuž se věnuje má práce, která je zpracována v rámci projektu věnovanému omítkám s náhradou přírodního kameniva s názvem „Vlastnosti, trvanlivost a chování lehkých maltových směsí s minerálními plnivými“ vedeným pod označením GAČR č. 18-07332S. Zahrnuta je též do projektu studentské grantové soutěže SGS17/166/OHK1/3T/11.

1.1 Cíl práce

Jak již bylo nastíněno v úvodu, má práce se týká modifikace běžně užívaných materiálů, konkrétně omítek, které by díky svým jedinečným vlastnostem našly uplatnění ve stavební praxi.

Cílem práce bylo shrnutí základních poznatků a vlastností běžně užívaných omítek s akcentem na lehčená plniva uplatnitelná při jejich výrobě. Dále bylo úkolem vybrat, s ohledem na mechanické, tepelné a vlhkostní vlastnosti, jedno z popisovaných lehčených kameniv a z něj připravit zkušební vzorky omítek s pojivem na bázi vápenného hydrátů, hydraulického vápna a vzorky vápenocementové s různým zastoupením lehčeného kameniva. Posledním krokem bylo experimentální zjištění základních materiálových charakteristik všech vzorků s důrazem na vlastnosti tepelné a vlhkostní a vyhodnocení s návrhem omítek, které by díky svým dobrým vlastnostem mohly být uplatnitelné v praxi.

2 Omítky

2.1 Historický vývoj omítek

Omítky jsou po staletí nedílnou součástí staveb. Jejich četné doklady můžeme pozorovat již na stavbách starověkého Řecka a Říma. První doložené použití omítek na našem území je spojováno se stavbami z přelomu 9.–10. století – rotundami sv. Klimenta na Levém Hradci, která se do dnešních dnů zachovala pouze v základech a rotundou sv. Petra a Pavla na Budči, jež je považována za nejstarší stojící stavbu v Čechách [1, 2].

V obdobích předrománského a románského slohu bylo úkolem omítek chránit konstrukce před vnějšími vlivy. U gotického slohu rovněž převažují hrubě nahozené omítky bez estetického pojednání, avšak postupně můžeme sledovat snahu omítky využít také při tvorbě architektonického výrazu, napodobením kvádrování, iluzivním pojednáním povrchů stěn, či k realizaci nástěnných maleb [1].

S příchodem renezanace se omítky začínají aktivně podílet na estetice objektů. Dochází k častému střídání tesaného kamene s omítnutými plochami, jež spoluvytváří požadovaný architektonický výraz. Charakteristická je také úprava stěn tzv. sgrafitem napodobujícím nejčastěji zdivo z velkých kvádrů, doplněným případně o další ornamentální či figurální výzdobu. Jednalo se zpravidla o dvouvrstvou omítku se vzájemně kontrastní barevností (nejčastěji bílá, černá) kde proškrabováním docházelo ke tvorbě požadovaných ornamentů [1].

S nástupem nového barokního slohu dochází ke změnám estetické citění, které se projevuje i odlišným pojednáním fasád. Ornamentální, figurální, nebo iluzivní výzdoba je potlačena na úkor velkého množství prostorových architektonických článků (pilastry, lizény, polosloupky, profilované římsy, štíty, atd.), které jen zřídka bývají ponechány bez omítnutí. Tektonický systém členění fasád vyzdvihovala kontrastní barevnost. Časté je použití červené barvy s šedou či bílou. Avšak najdeme později i příklady, kde byla použita světle žlutá, okrová, modrá, či zelená. Složitost řešení vyvolává potřebu vyšší technologické propracovanosti a nezbytné je zajištění dobré soudržnosti. Běžnými se stávají vícevrstvé omítky s hrubší jádrovou a jemnější lícovou vrstvou, která však mívá oproti dřívějším hrubým jednovrstvým omítkám nižší trvanlivost. Tektonikou definovaná barevnost si vyžádala nové technologické řešení vedoucí k vytvoření různě barevných na sebe navazujících ploch. Jako nejvhodnější se ukázaly barevné nátěry aplikované na jemnější lícovou vrstvu omítek [1, 2].

Následující období klasicismu nepřineslo výrazné změny ve ztvárnění fasád. Pouze byla užívána méně pestrá, tlumenější barevnost včetně chladnějších odstínů. Charakteristika zpracování omítek vzhledem k jejímu prudkému rozvoji v předchozím období je rovněž obdobná [1, 2].

2. polovina 19. století s historizujícími slohy se obrací opět k minulosti, projevem je střídání omítnutých a neomítnutých částí fasád. Prvky jsou ve srovnání dřívějškem jednodušší, čímž jsou také kladeny nižší nároky na provedení omítek. Barevné pojednání bývá monochromní, tvořené povrchovými nátěry. [1, 3] Koncem 19. století se začíná nově používat u složitěji profilovaných fasád tzv. kufštejnské (hydraulické) vápno, které doplňuje do té doby používané vápno vzdušné [3].

U secesní architektury převládají různobarevné světlé vícevrstvé omítky doplňované často keramickými prvky. Používané jsou materiály s polo až celo-hydraulickými vlastnostmi na bázi vápna a také cementu [3].

Nové technologie zpracování kaolinu po první světové válce přinášejí možnost využití odpadu k výrobě suchých cementových omítkových směsí, označovaných jako „břizolit“. Výhodou byla jednodušší aplikace bez nutnosti dalšího kamenického zpracování povrchů a tvorby finální povrchové barevné vrstvy. Dodávala se v několika barvách a typech zrnitosti. Pro svou jednoduchost se v meziválečném období stala hojně užívanou a vyhledávanou omítkou v běžném stavitelství [3].

Politické změny, rozvoj vědy a techniky a prudký nárůst objemu prováděných stavebních prací se po druhé světové válce promítají také do materiálové základny. Umělecko-estetická stránka výstavby přestává být důležitá a akcent je kladen na rychlost, jednoduchost a finanční rentabilitu. Otevírají se nové technologické možnosti – prefabrikace stavebních dílců nabízí zrychlení výstavby, ale klade vyšší nároky na stavební materiály. Do pozadí se dostávají po staletí pěstovaná řemesla, která jsou nahrazována strojovou výrobou. Ze stavebnictví se vytrácí jedinečnost a originalita a klesá kvalita prováděných prací. Snahou je vytvoření jednoduché, co nejuniverzálněji uplatnitelné materiálové základny s vysokou životností. Dochází ke „zprůmyslnění“ výroby. Omítky dříve připravované empiricky in-situ na základě zkušeností řemeslníka jsou nahrazovány pytlovanými směsmi s přesně definovanými parametry vyráběnými průmyslově ve velkých objemech. Četnější je využití cementu, které ve srovnání s vápennými omítkami nabízí vyšší trvanlivost, avšak při rekonstrukcích starších objektů z důvodu rozdílných vlastností nebývá vhodné [4].

Současný vědecký pokrok nabízí velké možnosti v modifikaci užívaných materiálů. S rozvojem průmyslu a vyššími životními nároky je nutné zabývat se také problematikou

udržitelného rozvoje spojeného s ekologickými problémy. Do popředí se dostávají dříve neřešené aspekty, kterými jsou snížení energetické náročnosti při vytápění (popř. chlazení) budov, ale také druhotné využití surovin – recyklace. Mění se tepelně vlhkostní požadavky kladené na omítky u nových i rekonstruovaných objektů, což vyvolává potřebu změny materiálové základny užívané pro jejich výrobu. Ke klasickým silikátovým (vápenným, sádrovým, příp. cementovým) omítkám se nově přidávají omítky syntetické, které nabízejí vyšší pevnost, odolnost vůči povětrnosti a lepší vlhkostní parametry. Pro dosažení lepších tepelně technických vlastností se jeví jako jedna z možných cest užívání druhotných surovin jako plniv do omítkových směsí. Nově jsou také ke složkám plniva a pojiva přidávány přísady a příměsi, jež mají za cíl zlepšení vlastností a zpracovatelnosti [5, 6]

2.2 Obecné dělení omítek

2.2.1 Omítky pro vnitřní a vnější použití

Rozdělení omítek podle oblastí použití na vnitřní a vnější úzce souvisí s požadovanými vlastnostmi a jejich parametry. Pestrá škála materiálů nám v současné době umožňuje užití různých typů materiálů dle oblasti aplikace.

Vnitřní prostředí je obvykle charakteristické relativně malými teplotními a vlhkostními změnami v průběhu roku. Teplota se pohybuje nad bodem mrazu, plochy nejsou vystaveny přímému slunečnímu záření ani dešti. S výjimkou konstrukcí zasažených vztlínající zemní vlhkostí, či postižených zatékáním netěsnostmi ve střešním plášti, je relativní vlhkost ploch nízká. Omítky však musí být schopny přenést zatížení od zařízení vnitřních prostor, jako jsou tapety, rohože, či mechanického kotvení vybavení stěn (obrazy, odkládací prostory, nábytek atd.). Důležitá je také zdravotní nezávadnost omítek. Tyto požadavky nejlépe splňují omítky sádrové, příp. vápenosádrové, v současné době se však ve vnitřních prostorech můžeme setkat také s aplikací omítek na bázi organických pojiv – silikonových, akrylátových nebo silikátových [5].

Požadavky kladené na vnější omítky jsou vyšší. Teploty ve venkovním prostředí se s ohledem na klimatické podmínky během roku mění v řádu několika desítek stupňů. Teplé, suché slunečné dny v letních měsících jsou na podzim a na jaře střídány větrem a deštěm. V zimním období teplota klesá pod bod mrazu a konstrukce mohou být zatěžovány sněhem, ledem a námrazou. Omítky tak musí být odolné vůči UV záření, náporu větru, hnanému dešti i změnám teplot a ve srovnání s omítkami vnitřními by měli vykazovat vyšší pevnost

a mechanickou odolnost. Otázkou jsou hydrofobizační úpravy povrchů zamezující průniku vlhkosti do konstrukcí, což zpravidla omezuje její proudění i v opačném směru. Za nejvhodnější pro aplikaci do venkovního prostředí jsou v současné době považovány omítky vápenocementové, či cementové. Na kontaktní zateplovací systémy se aplikují omítky na bázi organických pojiv. Výjimku tvoří historické objekty, na které by, z důvodu kompatibility se stavebními materiály obvodových stěn, měly být nanášeny omítky vápenné [3, 5].

2.2.2 Rozdělení omítek podle způsobu výroby

Omítky lze připravovat dvojím způsobem. Mohou být vyráběny „in-situ“ – na staveništi, nebo průmyslově v provozech specializovaných na výrobu stavebních materiálů.

Staveništní výroba omítek se řadí k tradičním zednickým dovednostem s vývojem delším než dva tisíce let, která je dosud hojně užívána, zvláště na stavbách menšího rozsahu nebo v oblasti památkové péče. Princip výroby je jednoduchý. Na stavbu je samostatně dopraven materiál jednotlivých složek – pojiva, plniva a vody a následně je zhotovena záměs v poměru komponent dle požadovaných vlastností a charakteru výsledného produktu. Nevýhodou je nemožnost dosažení zcela identických vlastností jednotlivých záměsů a také zajištění odborného dohledu nad kvalitou prováděných prací. Pro stavby malého rozsahu se však, ve srovnání s druhým způsobem výroby, jedná o ekonomičtější řešení [4, 5].

Předností průmyslově vyráběných omítek je možnost průběžné kontroly kvality při procesu výroby a tím výrazně vyšší dosažitelná přesnost požadovaných parametrů, díky čemuž jsou výrobci schopni garance vlastností výsledného produktu. Výhodou jsou také téměř nulové požadavky na zařízení stavenišť. Tímto způsobem se vyrábějí tzv. suché omítkové a maltové směsi, ale také tenkovrstvé omítky na bázi organických pojiv určené pro následné strojní zpracování omítačkami. Tento způsob zpracování je vhodný zvláště pro novostavby většího rozsahu [5].

2.2.3 Rozdělení omítek podle způsobu nanášení

Výběr vhodné metody nanášení omítky závisí na velikosti omítané plochy, charakteru, stáří a historické hodnotě objektu, finančních možnostech investora, ale také na přístupnosti ke konstrukci.

Ruční nanášení omítek patří převážně omítkám vyráběným přímo na staveništi. Nevýhodou je vysoká pracnost a potřeba kvalifikované pracovní síly. Staveništní malta je zpravidla připravována ve spádových nebo kontinuálních míchačkách, posléze je přemístěna

pomocí koleček k místu aplikace, kde je obsah přeložen do dalšího kolečka nebo zásobní nádoby, ze které je ručně nanášen na stěnu. Metoda je vhodná zvláště pro rekonstrukce starších objektů o menší rozloze omítaných ploch a také pro architektonicky pojednané fasády, kde je při sanačních pracích požadavek na dodržení původních technologických postupů [4, 7].

Ekonomické aspekty, nepotřebnost kvalifikovaných dělníků i nároky na zrychlování stavebního procesu vedou k hojnějšímu užívání strojního nanášení omítek. Omítka je v tomto případě za pomoci malého kompresoru nanášena šnekovým čerpadlem bez nutnosti rozsáhlejšího zařízení na staveništi. Na větší stavby bývá přivezeno silo se suchou omítkovou směsí, dopravovanou posléze do omítačky, která zajistí zamíchání směsi s vodou. Následuje aplikace omítky na stěnu [5]

2.2.4 Dělení omítek podle skladby

Skladba omítek je závislá na vlastnostech podkladu a na požadavcích kladených na výslednou podobu fasád. Hlavní funkcí omítky je z technického pohledu v exteriérech ochrana zdiva před působením vnějšího prostředí a ve vnitřních prostorech zajištění zdravotní nezávadnosti. U většiny staveb však hrají roli také požadavky estetické – barevnost, struktura a členitost povrchové vrstvy, jež jsou spoluvůrci výsledné podoby objektů.

Nejjednodušším typem jsou omítky jednovrstvé. Jejich složení se podobá jádrovým vrstvám omítek, avšak obvykle s jemnější strukturou. Nejčastěji jsou v dnešní době vyráběny průmyslovým způsobem z vápenocementového pojiva obohaceného zušlechťujícími přísadami. Výjimku tvoří historické objekty, u kterých nalezneme také jednovrstvé omítky hliněné, nebo čistě vápenné zhotovované přímo na staveništi dle původních technologických postupů. Vyskytují se zvláště na objektech románských a gotických, ale shledáváme se s nimi také u venkovské architektury 18. a 19. století. Aplikovány mohou být přímo na penetrované (zvlhčené) podkladní zdivo nebo na tzv. adhezní můstek zajišťující jejich lepší přilnavost [3, 4, 7].

Četněji užívané jsou omítky vícevrstvé skládající se z několika vrstev rozličných vlastností i struktury, jež dohromady vytvářejí jeden celek. Na rozdíl od omítek jednovrstvých jsou schopny plného vyrovnání podkladů a poskytují větší možnosti modelace povrchů fasád. Na našem území jsou zaznamenány již na stavbách gotických, ale jejich četnější užívání zaznamenáváme až v období renezanace, kdy se pro jejich univerzálnost stávají upřednostňovaným typem omítek [4].

Z důvodu zajištění přilnavosti bývá podklad před aplikací omítkového souvrství stejně jako u jednovrstvých omítek penetrován (zvlhčen). Za účelem zadržení vody v omítce a zdrsnění povrchu je také možné aplikovat cementový postřík, či zředěnou jádrovou omítku. Postřík se obvykle skládá z cementu a hrubšího kopaného písku, případně i s menším množstvím vyhašeného vápna. V některých případech může být vhodnější vytvoření adhezního můstku, který plní stejnou funkci jako postřík, avšak sestává z polymerních pojiv [6].

Na podklad je následně aplikována jádrová omítka určená především k jeho vyrovnání. Pro přípravu omítek in situ se nejčastěji používá vyhašené vápenné kaše, nebo vápenného hydrátu, spolu s kopaným či těženým pískem. Průmyslově vyráběné omítky jsou vyráběny ve dvou verzích, pro venkovní nebo vnitřní aplikaci, které se odlišují poměrem pojivových složek. Zatímco u venkovních omítek je převažujícím pojivem cement, u omítek určených pro interiéry je podíl cementu ve srovnání s vápenným hydrátem výrazně nižší. Výjimku tvoří jádrové omítky užívané u historických objektů s památkovou ochranou, kde se cementu jako pojiva zpravidla neužívá [4, 6].

Poslední, a tedy pohledová vrstva omítek, se nazývá štuková. Je aplikována pouze v tenkých vrstvách za účelem vytvoření hladkých jemných ploch. Finální vzhled je ovlivněn nejen frakcí kameniva, ale také technologií, jakou je vrstva nanášena. Materiálové složení se rovněž pro omítky venkovní a vnitřní liší. Staveništním způsobem jsou do interiérů připravovány omítky převážně na vápenné bázi. U omítek sádrových a vápenosádrových převládá průmyslový způsob výroby. Do venkovního prostředí jsou průmyslově nejběžněji vyráběny omítky s vápenocementovým pojivem. Na stavbách se obvykle míchají spíše omítky vápenné, ale lze se setkat také s omítkami vápenocementovými. V posledních letech se v souvislosti s nárůstem kontaktních zateplovacích systémů setkáváme čím dál častěji také s omítkami na bázi organických pojiv [6].

2.2.5 Dělení omítek podle zpracování při aplikaci

Způsob, jakým je omítka nanášena, ovlivňuje její finální podobu, která tvoří estetický výraz celého díla. Nesmíme však zapomenout také na technické aspekty, které jdou ruku v ruce s konkrétním způsobem provedení. V dřívějších dobách patřilo umělecké pojednání omítek mezi základní řemeslnické dovednosti, v současnosti je kladen důraz spíše na materiálové vlastnosti, rychlost a finanční rentabilitu, tudíž umělecká stránka ustupuje do pozadí. S ohledem na velké množství historických objektů, vyžadujících pravidelnou obnovu,

jsou do výčtu zahrnuty i ty způsoby provádění, které se u současných objektů již neuvádějí [3, 4].

Roztírání spárovací malty

Tato technologie se řadí k nejstarším způsobům omítání staveb, u nás užívaných již v době raného středověku. Účelem bylo využít přebytky malty z ložných, případně i styčných spár, do kterých byly ukládány kamenné kvádry. Zatlačením kvádrů do maltového lože došlo k vytlačení spárovací malty před líc zdiva a ta mohla být následně stažena (rozetřena) po bezprostředním okolí spáry. Kromě částečného vyrovnání tvarových rozdílů podkladu, tvořených nejčastěji zdivem z kamene, přineslo řešení pohledově nesjednocené plochy se střídajícími se omítnutými a neomítnutými částmi. V závislosti na použitém stavebním materiálu vykazovaly plochy větší či menší pravidelnost, např. u do rádků kladených tesaných kvádrů bylo dosaženo pravidelnosti velmi vysoké, naopak u lomového zdiva o ní mluvit nelze takřka vůbec. U některých realizací se setkáváme také s prořezáváním spár za účelem zdůraznění jejich průběhu. V současné době se tato metoda aplikuje pouze u rekonstrukcí historických objektů [3].

Nahazované omítky

Nejběžnějším způsobem celoplošné aplikace omítek bylo její nahození. Doleženo jejíž ve středověku, ale používán je, nejen u rekonstrukcí starších staveb, dodnes. Omítková směs se za pomoci zednické lžice prudkými pohyby ruky nahazuje na předem připravený podklad, kterým může být zvlhčené zdivo, podhoz, nebo jádrová vrstva omítky. Řemeslnická zkušenost, ale i zvolená frakce kameniva mají vliv na výslednou podobu omítky. Písek s většími zrny dává vzniknout tzv. hrubé, či ostré omítce. Roli hraje ale také konzistence omítkové směsi, která se podílí na tvarování povrchového reliéfu [3, 4].

Dodatečným hlazením, tzv. strháváním, pomocí dřevěných či kovových hladítek se mění reliéf omítek. U dvou/vícevrstevných omítek rozeznáváme ještě tzv. omítky přitažené, či utahené. Metody se od sebe liší pouze pečlivostí provedení, postup je však u všech velmi podobný. Přitažená omítka má blíže k povrchově neupravované hrubé omítce, nejjemnější reliéf spjatý s nejvyšší rovinností ploch vzniká naopak u omítky utahované [3].

Krouživými pohyby hladítek se vytvářejí tzv. omítky zatírané, které po pohybu hladítka zanechávají efektní stopy. Jemný, rovinný povrch vytvářejí omítky kletované. Štuková povrchová vrstva je nejdříve zhutňována hladítky a po zaprašování povrchu vápnem (příp.

jiným pojivem) důkladně vyhlazena. Konečným napuštěním vyhlazené omítky emulgovaným včelím voskem, případně jinými látkami, je zajištěno zvýšení pevnosti a lesklosti povrchů.

Možnou úpravou povrchu je také tzv. vypichování, kdy byly pomocí koštěte do nezatvrdlé malty vytvořeny vrypy, tzv. pekování, jehož účelem bylo zvýšení adheze povrchové vrstvy [4].

Natahované omítky

Smyslem tohoto způsobu zpracování omítek je snaha o dosažení co největší rovinnosti a stejnorodosti povrchů. První pokusy o toto provedení zaznamenáváme již ve 14 století, ale hlavního rozvoje tyto omítky naznaly až s nástupem barokního slohu. Práce na tvorbě sestávala ze dvou částí. Nejdříve byla vytvořena jádrová omítka (případně i s podhozem), na kterou byla s určitým časovým odstupem natažena jemná štuková vápenná vrstva. Kvalita provedení závisela na zručnosti a zkušenostech štukatérů [3, 4].

Výjimečně byly prováděny natahované omítky se sádrovým pojivem. Na jádrovou omítku byla dřevěnými hladítky natažena jemná štuková vrstva, která byla následně zpevněna a uzavřena roztokem kostního klišu, mýdla nebo modré skalice. Závěrem se nanasla finální vrstva z jemně mleté sádry. Výsledná plocha dosahovala vysokých kvalit [3].

Touto technologií lze pomocí šablon také docílit vytvoření štukových profilů, od jednoduchých po velmi členité. Mírným zatlačením šablony do čerstvé omítky a následným tažením vznikne požadovaný profil, který lze dále ještě dotvořit například rýhováním nebo obtiskem jiné reliéfní šablony [4].

V současné stavební praxi se s natahovanými omítkami setkáváme především u rekonstrukcí, ale ani u novostaveb, kde není výhodné aplikovat omítky strojním způsobem, není tento způsob neobvyklý [5].

Stříkané omítky

U historických objektů našly stříkané omítky uplatnění nejčastěji u spodních vrstev – podhozů, kde zajistily dostatečně hrubou a nerovnou strukturu povrchu vhodnou k ukotvení jádrové vrstvy. Využívaly se také na fasádách za účelem vytvoření kontrastních ploch v kombinaci s jemnými hlazenými omítkami. Ruční aplikace omítek pomocí zednických lžící vyžadovala i v tomto případě jistou řemeslnickou zkušenost [3].

S ohledem na výrazně nižší požadavky na zručnost řemeslníků a snížení pracnosti je dnes čím dál rozšířenější stříkání omítek pomocí strojních omítaček. Výhodné je pro velkoplošné omítání bez vyšších požadavků na estetické pojednání fasád [5].

Tenkovrstvé strukturované omítky

Díky snaze snížit energetickou náročnost budov jsou ve stavební praxi hojně rozšířeny kontaktní zateplovací systémy, které však mají jiné nároky na povrchovou úpravu. Klasické omítkové systémy jsou nahrazeny difúzně více uzavřenými tenkovrstvými omítkami nanášenými na tzv. základní vrstvu – dvouvrstvou stěrkovou hmotu vyztuženou skleněnou síťovinou. Kromě zpevnění tepelné izolace má základní vrstva za úkol i snížení nerovností. Z tohoto důvodu je také možné provedení povrchové vrstvy o velmi malé tloušťce [8].

Pro zateplovací systémy rozlišujeme několik typů tenkovrstvých omítek; akrylátové, silikonové, silikátové a minerální, které se dle struktury povrchu dále dělí na škrábané a rýhované, vzájemně se odlišující zrnitostním rozložením plniva. Plynulou křivkou zrnitosti plniva docílíme vzniku škrábané struktury, při vynechání střední velikosti zrn kameniva vzniká rýhovaná struktura. Omítky jsou nanášeny hladítkem s důrazem na dodržení jednotné tloušťky. Následnými tahy hladítkem u rýhovaných omítek se získává struktura tvořená svislými, vodorovnými nebo kruhovými rýhami [6, 8, 9].

2.3 Složení omítek a materiálové dělení

Složením rozumíme jednotlivé části směsi, které dohromady vytváří výsledný materiál – omítku o konkrétních fyzikálních, mechanických i estetických parametrech. Každá z částí má v systému svou nezastupitelnou roli a v případě, že by byla vynechána, došlo by k výrazné změně vlastností, případně by omítky nevznikla vůbec.

Vzhledem k tomu, že se omítky skládá z několika rozličných materiálů, můžeme ji nazývat kompozitem. Obvykle je tvořena pojivem a plnivem, v některých případech i aditivami zlepšujícími vlastnosti [7, 10].

Spojení pevných částí – kameniva zajišťuje pojivo. Jedná se o látky anorganického či organického původu o velmi jemné frakci, které po smíchání s vodou vytvářejí pevnou strukturu. Anorganická pojiva jsou též někdy nahrazována termínem maltoviny, kterými označujeme nejpoužívanější pojiva, a to vápno, cement a sádku. Škálu doplňují pojiva organická – akrylátová, silikátová a silikonová [7].

Druhou nedílnou součástí omítek jsou tzv. plniva, zpravidla kamenivo o různých frakcích, organického či anorganického původu, jehož hlavním posláním je nejen zvětšení objemu hmoty, ale také zlepšení některých vlastností. Plnivo zvyšuje pevnost a odolnost, snižuje potřebné množství záměsové vody a omezuje smršťování při tuhnutí a tvrdnutí. Nejčastěji

jsou za tímto účelem používány písky, v současné době se však setkáváme i s využitím odpadních surovin z průmyslu – umělým kamenivem [7].

Poslední skupinou jsou tzv. aditiva. Látky přidávané do záměsí ve stopovém množství pozměňující určitým způsobem vlastnosti. Některé přísady ovlivňují tuhnutí, působí jako jejich zpomalovače a urychlovače. Nejvýraznější vliv na zpracovatelnost záměsí mají tzv. plastifikátory. Proti vzniku trhlin při vysychání se užívají látky zvyšující objemovou stálost. Dále rozlišujeme přísady pro úpravu vlastností po zatvrdnutí hmoty, jako jsou adhezivní přísady, látky pozměňující pórový systém, popř. pigmenty [7].

2.3.1 Hliněné omítky

Pro úplnost je potřeba uvést také ty druhy omítek, které se v dnešní době již příliš nepoužívají, mezi něž se řadí např. omítky hliněné. Použití hlíny smíchané s vodou za účelem stavby jednoduchých chatrčí je známo již v době pravěku. V předrománském období je na našem území zaznamenáno užití hlíny smíšené s vápnem, pískem, případně kamennou drtí a vodou. Poměr mezi množstvím hlíny a vápna v záměsí byl proměnlivý v závislosti na místních podmínkách. Vápnem bývalo pálené z vápenců obsahujících hliněné složky, které udílejí vápennému pojivu latentně hydraulické vlastnosti, které vedou ke zvýšení pevnosti pojiva. Zastoupení jednotlivých jílových minerálů (kaolinit, illit, montmorillonit) v hliněném pojivu mělo vliv na vlhkostní objemovou roztažnost a vznik smršťovacích trhlin při tuhnutí [3].

Výskyt tohoto druhu omítek zaznamenáváme převážně na venkovských stavbách až do 1. poloviny 20. století. Časté je použití hliněného pojiva s přídavkem vápna s přírodními plnivými, jako jsou zvířecí chlupy, plevy, řezanka nebo pazdeří v kombinaci s jemnými písky. Tzv. jílové bláto (podhoz) se nahazovalo na podkladní zdivo. Po proděravění a zdrsnění kovovými hřebeny se nanášela horní vrstva. V některých případech byla tato vrstva ponechána jako finální (např. u hrázděných severočeských domů), v jiných případech následovala ještě jemná štuková vrstva z vápenné kaše s jemným pískem [3].

V současné době se s hliněnými omítkami setkáváme u rekonstrukcí, kdy je nejčastěji používáno jílu vypáleného při teplotách 600–900°C za vzniku vysokereaktivního metakaolinu, který je vhodný pro doplňování odpadlých partií nebo stabilizaci uvolněných částí omítek injektáží. Četnější je v poslední době také jejich využití v interiérech objektů pro bydlení. Oblibu si získali pro svou jednoduchost aplikace, ale i pro dobré tepelně technické vlastnosti a trvanlivost. Výhodou oproti omítkám z ostatních materiálů je vysoká schopnost

absorbce vzdušné vlhkosti z okolního prostředí, spojená, díky retenci vlhkosti v materiálu, i s její regulací. Minimální energetické náklady potřebné k výrobě a zejména 100% recyklovatelnost materiálu jsou dobrými předpoklady k jeho dalšímu uplatnění. Časté je používání průmyslově vyráběných suchých směsí, garantujících stejnorodost a zamezujících vznik smršťovacích trhlin. Důležitá je také jejich zdravotní nezávadnost. Nejvíce se používají u dřevostaveb, ale výjimkou není aplikace ani u klasických zděných objektů [3, 5, 11].

2.3.2 Vápenné omítky

Podle dochovaných nálezů můžeme u vápenných omítek mluvit o historii téměř stejně dlouhé, jako u omítek hliněných. Dokladem je například Velká čínská zeď nebo Šalamounův chrám v Jeruzalémě, v obou případech díla postavená před naším letopočtem. V pozdějších dobách (Starověkého Řecka a Říma) se s omítkami tohoto typu setkáváme již zcela běžně. Zmíněny jsou dokonce i v díle římského stavitele Marka Vitruvia Pollia „Deset knih o architektuře“, která naznačuje vysoký stupeň znalostí o tomto materiálu, získaných na základě pozorování. Od středověku se stávají nejběžněji užívanou povrchovou úpravou, která v dalších stoletích prochází pouze obměnami podle požadavků současných uměleckých a technických trendů, spjatých s novými poznatky v oblasti zpracování a aplikace [3].

Pro výrobu vápna rozeznáváme v zásadě dva druhy surovin. Vápence a dolomity, tvořící první skupinu, se řadí mezi zdroje přírodní. Možné je však také použití odpadních surovin z hutního a chemického průmyslu. V tomto případě přicházejí v úvahu různé kaly (cukrovarnictví, výroba sody) nebo acetylen. Častěji jsou užívané přírodní suroviny. Z chemického pohledu je vápenec uhličitánem vápenatým doplněným, v závislosti na konkrétním zdroji, určitým množstvím dalších příměsí, kterými jsou různé oxidy, hlíny a silikáty. Těžba horniny probíhá v lomech odstřelem a následnou dvoufázovou úpravou za pomoci drtičů a čističů. Nejdříve se používají drtiče čelistové a posléze kladivové nebo odrazové. Velikost zrna se volí dle způsobu dalšího zpracování. Za účelem snížení obsahu nežádoucích příměsí je také možné surovinu proprat a předsušit. [12, 13].

V přírodě je ložisek s vysokoprocentním vápencem (definováno jako obsah uhličitanu vápenatého větší než 98 %) velmi málo. Znečištění se do horniny dostává buď sedimentací, v tom případě bývá homogenní, a nebo infiltrací pomocí vody, při které bývá nepravidelně koncentrováno a může způsobovat potíže v dalším výrobním procesu. Příměsí mají přímý vliv na mechanicko-fyzikální vlastnosti a určují podmínky pro spuštění procesu hydratace. Nečistoty jsou nejčastěji tvořeny oxidem křemičitým, dále pak oxidy železa a hliníku.

K vyjádření jejich množství se používá hydraulický modul, jenž je poměrem mezi oxidem vápenatým a dalšími (hydraulickými) oxidy. Na základě výsledné hodnoty dostáváme informaci o míře hydraulicity. S rostoucím zastoupením oxidů železa, hliníku a oxidu křemičitého se zvyšuje hodnota hydraulického modulu. Hodnota je směrodatná z hlediska volby způsobu následného zpracování a také jako ukazatel oblastí potenciálního využití konečného produktu [12].

$$H_m = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (1)$$

$H_m = 1,7-3$: silně hydraulická vápna,

$H_m = 3-6$: středně hydraulická vápna,

$H_m = 6-9$: slabě hydraulická vápna,

$H_m > 9$: vzdušná vápna [12].

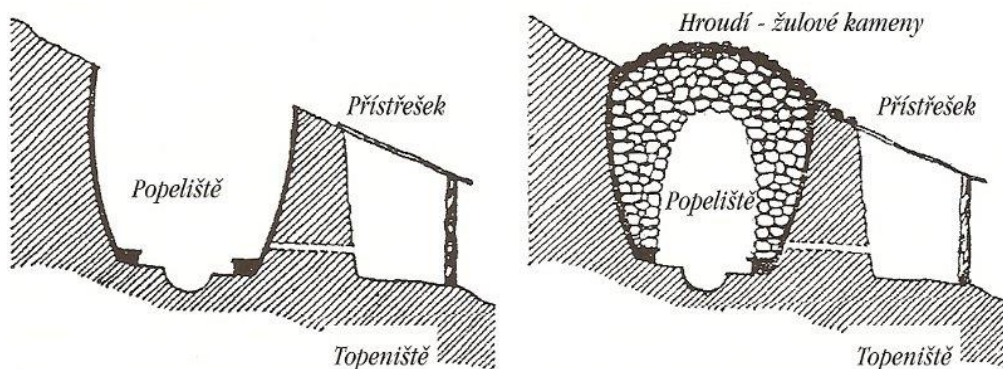
V dřívějších dobách bylo hydraulické vápno používané daleko častěji než v současnosti. Ve Starověkém Římě se vypalovalo s pucolánem, který se jako sopečná hornina přidával k výpalu. Své uplatnění našlo při budování inženýrských staveb, především aquaduktů. Na našem území se setkáváme se Staroměstským vápnem páleným z branických a podolských vápenců, jež také vykazovalo hydraulické vlastnosti. Používalo bylo i tzv. Kufsteinské vápno, vyráběné ze slínkového vápence, původem z pohoří Kufstein v rakouském Tyrolsku. Toto vysoce hydraulické vápno se vyskytuje především v omítkách a maltách staveb 2. poloviny 19. století. Postupná snaha zdokonalovat hydraulické vápno vedla na konci 18. století až k vynalezení románského cementu, resp. k jeho opětovnému zařazení mezi užívané materiály. Doloženo je totiž už v římském období. Výhodou hydraulického vápna, oproti vzdušnému, je jeho vyšší pevnost, která je však vyvážena nižší plasticitou [3, 13].

Vzdušné vápno nabízí svým složením dobrou zpracovatelnost a plasticitu při nanášení. Jeho porézní struktura umožňuje absorbovat vlhkost z okolního prostoru, ale také přes ní vlhkost může procházet opačným směrem, což je zvláště důležité u většiny starších objektů, které nemají komplexně vyřešen systém odvlhčení [7].

V současnosti se s omítkami s ryze vápennými pojivy setkáváme především u rekonstrukcí starších objektů. Průmyslově se vyrábí převážně vápna vzdušná. Největšími producenty jsou vápenky v Čertových schodech (okr. Beroun), Vápenka Vitošov (okr. Šumperk), Cementárny Lafarge Čížkovice (okr. Litoměřice) či Carmouse v Mokrém (okr. Brno) [14].

Technologie výroby vápna – typy pecí

Nejstarší známou technologií výroby vápna bylo pálení vápence v otevřených zemních pecích milířováním. Dokladem u nás jsou archeologické nálezy v oblasti Železných hor a Starého Města u Uherského Hradiště. Šachtová pec byla po svém obvodu pokryta výdřevou, nebo vyzděna kamennými kvádry, případně později žáruvzdornou vyzdívkou. Pro snížení úniku tepla bývala situována do svažitého terénu. Z jedné strany byl vytvořen otvor pro přikládání dřeva či uhlí do topeniště, ze zbylých stran byla obsypána zeminou. Vápencová vsázka ve tvaru segmentové klenby uzavírala se shora oblast topeniště. Pro zajištění rovnoměrného působení žáru a snížení úniku tepla pak došlo k vyplnění volných míst a pokrytí vrchu pece drobným vápencem. Nevýhodou byla ve srovnání s novějšími typy pecí vysoká energetická náročnost a nízká efektivita způsobená periodickým způsobem fungování s dlouhými technologickými přestávkami (např. chladnutí). [3, 15, 16].

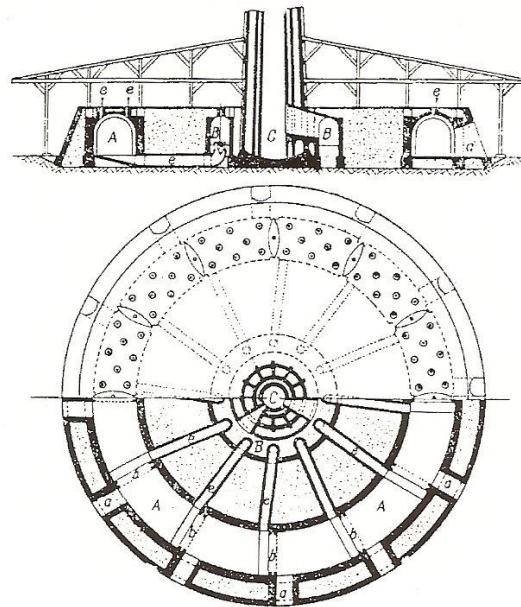


Obr. 1: Schématický řez otevřenou zemní pecí [16]

Podobným způsobem probíhala výroba v zahlobených trychtýřových pecích. Rozdílný byl tvar zemního otvoru, kónický, a způsob vkládání vsázky. Vrstvy vápence vyskládané ve tvaru segmentové klenby byly prostřídány palivem, nejčastěji dřevem. Vrch pokrýval jílový obklad. Netěsnosti byly vyplněny drny, poté mohlo dojít k výpalu, který trval cca jeden týden. Po sejmutí jílového obkladu následovalo odebrání vápna. Nedostatkem této jinak důmyslné metody byla nehomogenita vypáleného vápna, jež obsahovalo nevypálené shluky vápence. Energetická náročnost a pracnost spjatá s periodickým způsobem výroby byla také značná [3].

U větších objektů bylo ve středověku běžné, že měly kromě vlastní kamenické huti také svou vápenici. Lidé ve venkovských sídlech zpravidla užívali jedné, či několika společných vápenic sloužících celému sídelnímu celku [3].

V roce 1858 berlínský stavitel Bedřich Hoffman přišel s přelomovým vynálezem – kruhovou pecí na výrobu vápna, která byla oproti předcházejícím typům schopna kontinuálního výrobního procesu a zužitkování odpadního tepla k přehřátí spalovaného vzduchu a vápencové vsázky. Tím bylo dosaženo značných energetických úspor. Pec byla rozdělena na několik komor, které sloužily k zakládání vápence nebo k výběru hotového vápna, kde vnitřní stěna komor i vstupních dvířek musela být ze žáruvzdorného materiálu. Každá komora měla vlastní odtah ústící do centrálního komínu. Pomocí sypáků se otvory v klenbě do pece přikládalo palivo. Ke spalování byl určen prostor topných šachtic vymezených lámaným vápencem. K oddělení prostoru určenému k přehřívání od komor sloužily papírové přepážky. Daní za vyšší efektivnost dosaženou kontinuálním výrobním procesem byla namáhavá manuální práce v prašném a horkém prostředí. Na našem území se s tímto typem pecí setkáváme prvně v Přerově a to v roce 1868 [15, 16].

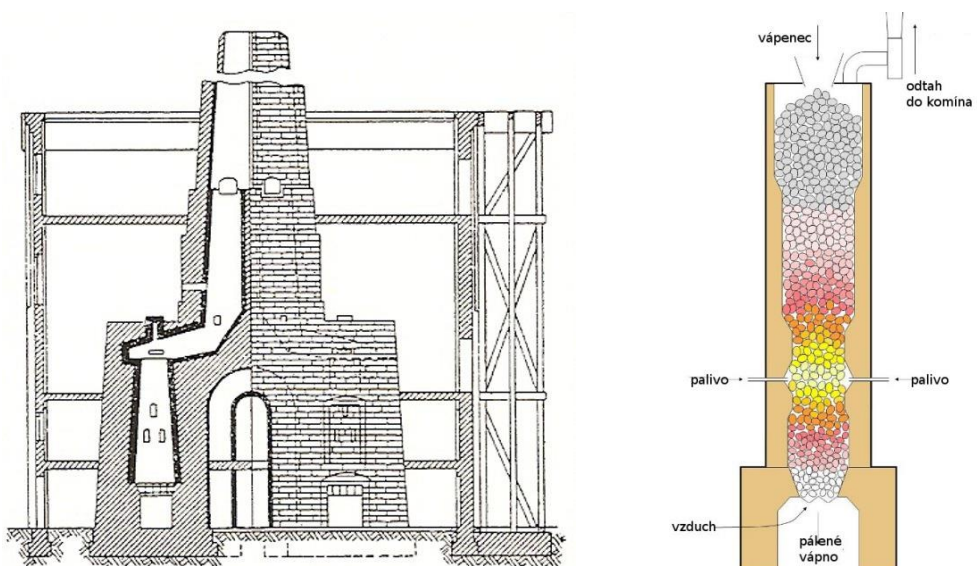


←
Obr. 1. Původní Hoffmannova kruhovka: a – dveře kruhového peciště, A – kruhové peciště, b – přepážky, B – sběrač kouře, C – komín, e – podzemní odtah do sběrače kouře, f – sypáky paliva.

Obr. 2: Schéma Hofmannovy kruhové pece [16]

Posledním typem jsou pece šachtové, které vývojově navazují na trychtýřové pece, u nás se s nimi prvně setkáváme v Železném Brodě v roce 1865. Vertikální uspořádání pece umožňuje rovněž kontinuální výrobní proces. Horní násypkou je vkládán vápenc, který dále postupuje směrem dolů. V 1/3 výšky se nachází pec obvykle s třemi topeništi z vodorovných roštů na spalování paliva, kterým může být jak dřevo, tak uhlí. V případě často stavěných dvojitých pecí mívá každá pec čtyři topeniště, dohromady tak celkem osm. Přes popelníky topenišť je nasáván vzduch. Pod topeništi se nachází otvory pro odběr vypáleného vápna. Jedná se o pec s vnějším topením. Druhým typem jsou pece, u kterých není prostor topeniště

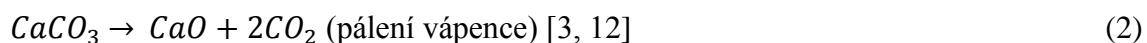
oddělen. V tomto případě se palivo spaluje v peci v prostoru spolu s vápencem. U těchto pecí bývá palivem koks. Posledním, nejmodernějším, typem jsou plně automatizované pece s plynovým topením, které fungují na jednoduchém principu. Do prostoru topeniště je dodáván pouze plyn, který po kontaktu s horkým cirkulujícím vzduchem začíná hořet. Tento princip zajišťuje rovnoměrné prohřívání vsázky. U některých konstrukcí se část vzduchu přivádí s plynem [15, 16]



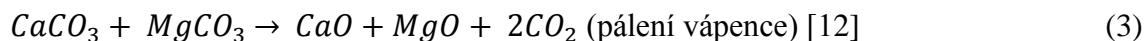
Obr. 3: Vlevo: šachtová pec s vnějším topením, vpravo: moderní plynová šachtová pec [16]

Pálení vápna

Výroba vápna z vápence, nazývajících se také kalcinací nebo dekarbonizací, se provádí tepelným rozkladem, který lze zapsat pomocí jednoduché chemické rovnice:



V případě, že je vstupní surovinou dolomit, do reakce vstupuje navíc uhličitán hořečnatý a chemická rovnice má následující podobu:



V závislosti na obsahu oxidu křemičitého a dalších oxidů se stanoví rozkladná teplota, při které začíná docházet k rozkladu uhličitanu vápenatého. Tato teplota souvisí s parciálním tlakem oxidu uhličitého obklopujícího uhličitanu vápenatý. Pro iniciaci rozkladu je systému nutné dodat takové množství energie, aby parciální tlak uhličitanu vápenatého uvolněného z vápence překročil parciální tlak oxidu uhličitého v okolním vzduchu. Reakce je závislá na teplotě a teoreticky je možné, aby k disociaci začalo docházet již od 600°C. Pro zrychlení

výpalu (porušení rozkladné rovnováhy) a získání požadovaných vlastností vápna po výpalu se obvykle používá vyšší teploty. Se zvyšující se teplotou klesá reaktivita při hašení a pórovitost a zvyšuje se objemová hmotnost. Pokud teplota nepřekročí 1050°C, hovoří se o měkce páleném vápnu, v opačném případě vzniká vápno tvrdě pálené. Pro aplikaci ve stavebnictví se doporučuje používat pouze první z uvedených druhů. Důvodem je nebezpečí „střílení omítek“ související s objemovou nestálostí. Podstata spočívá v tom, že hydratace tvrdě páleného vápna probíhá velmi pomalu a některá vápenná zrna nemusí stačit zhydratovat a vytvoří tzv. přepal. Jejich hydratace může začít následně při aplikaci omítky na podklad, což se vzhledem k objemovým změnám provázejícím hydratační proces může projevit paprscitými trhlinami [7, 12].

V závislosti na přítomnosti oxidů železa, hliníku a oxidu křemičitého ve vápenci mohou při teplotách 800–1200°C vznikat některé slínkové minerály (C_2S , CA , C_2F) udělující vápnu hydraulické vlastnosti. Pro získání hydraulického vápna je nejvhodnější použití slinitých vápenců s vysokým obsahem jílu. Možné je také smíchání hydraulických přísad s vápnem až po jeho výpalu. Platí, že s rostoucím obsahem jílových složek klesá teplota výpalu [12].

Hašení vápna

Vápno pro omítky a malty je používáno ve formě vápenného hydrátu, který je vytvořen hašením vápna. Jak již bylo uvedeno výše, teplota výpalu má přímý vliv na reaktivitu vápna při hašení. Čím je teplota výpalu nižší, tím je vyšší reaktivita. Hašení je reakcí vápna s vodou za vzniku hydroxidu vápenatého a tepla, jehož množství je závislé na reaktivitě. Proces je možné zapsat chemickou rovnicí takto:



V případě reakce oxidu hořečnatého (vápna z dolomitických vápenců) má rovnice obdobnou podobu, akorát je průběh reakce výrazně pomalejší:



V závislosti na množství vody použité při hašení rozlišujeme dvě formy vzniklého hydrátu. V případě, že je použito nadbytečného množství vody, reakce probíhá při relativně nízké teplotě (kolem 70°C) a výsledkem je suspenze tuhého hydroxidu vápenatého v jeho nasyceném roztoku, tzv. vápenná kaše. Její velmi jemné částičky mají po oddělení vody konzistenci změkklého másla a výbornou plasticitu a vaznost užívanou po smíchání s pískem pro aplikaci omítek. Procesu se říká mokré hašení [12].

Pokud je k vápnu přidán pouze malý přebytek vody, vzniká práškovitý produkt označující se jako vápenný hydrát. Při teplotě, která se u tohoto způsobu hašení blíží bodu varu, dochází k postupnému odpařování přebytečné vody. Postup je nejčastěji používán při kontinuálním průmyslovém zpracování. Reologické vlastnosti prášku nedosahují kvalit hydrátu vzniklého mokrým procesem, avšak pro účely stavebnictví je kvalita dostačující [12].

Pro dolomitická vápna je užíváno hašení vodní párou, které spočívá ve smíšení vápna s přebytkem vody v zásobníku, z kterého je pak obsah přepouštěn do vysokotlakého válce, kde dochází k hydrataci. Vháněním směsi do expanzní komory je dosaženo snížení tlaku a odpaření vody. Výsledkem je suchý vápenný hydrát [12].

Tvrdnutí vápna

Základní vlastností vzdušného vápna je, že netuhne za přítomnosti vody (vzniká vodná suspenze), ale až po jejím odpaření a vsáknutí porézním podkladem. Tvrdnutí je spuštěno oxidem uhličitým obsaženým ve vzduchu, přičemž vzniká nerozpustný uhličitán vápenatý a voda. Tato reakce se nazývá karbonataci, jejíž zápis chemickou rovnicí je následující:



Rychlost tohoto procesu je závislá na koncentraci oxidu uhličitého v okolním vzduchu, dále na teplotě, relativní vlhkosti a dalších faktorech [12].

V případě hydraulického vápna je proces trochu složitější. Vápno je složeno z částí o různých vlastnostech. Vápenný hydrát tvrdne v suchém prostředí, naopak hydraulické příměsi za přítomnosti vody. Proto je potřebné zpočátku zajistit podmínky pro tvrdnutí vzdušného pojiva a později uložení ve vlhkém prostředí. Tímto způsobem dochází k vytvoření základní sítě struktury omítek posílené později ještě karbonatačním procesem volného vápna. Obecně jsou omítky z hydraulického vápna nositeli vyšších pevností, ale jejich použití není v současné době časté [12].

2.3.3 Cementové omítky

Předchůdcem dnešního cementu byl tzv. románský cement, který je známý již z dob Starověkého Říma. Jeho základ tvořily přírodní suroviny pucolánového typu. Nejčastěji se jednalo o směs bílého vápna s drcenými cihlami či sopečným popelem, udělující výslednému produktu hydraulické vlastnosti. Tyto vlastnosti byly znovuobjeveny v roce 1756 Johanem Smeatonem při stavbě majáku na jihozápadním pobřeží Anglie. Na jeho práci navazovali další

vědci, kterými byl např. James Parker nebo Louis Vicat, jejichž výzkum vedl k objasnění hydraulického chování [12, 13, 17].

Cement vyráběný v dnešní době se od románského cementu odlišuje především teplotou výpalu, která dosahuje meze slinutí. Románský cement je z pohledu dnešní klasifikace vnímán, z důvodu nižší teploty výpalu, jako druh hydraulického vápna [3, 12, 17].

Dosažení vyšších teplot při výpalu, zapříčiňujících vznik slinutého materiálu, je až otázkou konce první poloviny 19. století, kdy s tímto poznatkem v rámci svých výzkumných prací přišel Joseph Apsdin. Takto připravovaný materiál se dnes nazývá portlandským slínkem a s jeho využitím v praxi se prvně setkáváme až na přelomu 19. a 20. století, kdy se přimíchával k vápennému pojivu za účelem zvýšení pevnosti. Až později se začal používat samostatně a dnes je jedním z nejrozšířenějších průmyslově vyráběných pojiv (nejen pro omítky). Výjimku tvoří historické objekty, kde se aplikace v důsledku poruch zapříčiněných jeho vlastnostmi omezuje, a to z důvodu nižší propustnosti pro vodní páru, která omezuje odvětrávání konstrukcí se zvýšenou vlhkostí, také vyšší pevnosti a nižší plasticitě, způsobující devastaci starších vápenných vrstev, v případě že je pojiva použito k doplnění degradovaných částí vápenných fasád [3, 4].

Základní surovinu pro výrobu cementů tvoří vápenec s vyšším obsahem jílových příměsí – oxidem křemičitým, hlinitým nebo železitým. Pro dobrou vaznost všech složek by však množství uhličitanu vápenatého nemělo překročit 76–78 %. Pokud je zastoupen ve větším množství, připadají v úvahu korekční složky jako křemenný písek nebo kyzové výpalky. Surovinovou směs pro přípravu cementu netvoří pouze vápenec, ale i další složky, kterými jsou zeminy a hlíny, obsahující rovněž jílové součásti. Nutné však bývá i zde použití korigujících surovin, například křemenného písku. Třetí skupinou jsou složky pozitivně ovlivňující proces slinování a upravující hydraulické vlastnosti slínkových minerálů, například kazivec [12, 13]

Vytvoření surovinové směsi s požadovanými vlastnostmi usnadňují cementářské moduly, které jsou ukazatelem optimálního poměru výchozích látek. Rozeznáváme tři základní; hydraulický, silikátový a hlinitanový, vyjadřující vždy poměr mezi oxidem vápenatým a dalšími oxidy. Číselné vyjádření oxidů je v hmotnostních procentech [12, 17].

Prvním používaným je hydraulický modul, stanovující předpokládanou pevnost a objemovou stálost. V tomto případě se ve jmenovateli vyskytuje oxid křemičitý, hlinitý i železitý.

$$M_H = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (7)$$

Dalším je silikátový modul, který se od předchozího liší ve jmenovateli vynechaným oxidem hlinitým. S jeho rostoucí hodnotou se zvyšuje výsledná pevnost, ale také obtížnost výpalu slínku. Naopak klesá rychlost tuhnutí a tvrdnutí.

$$M_s = \frac{CaO}{SiO_2 + Fe_2O_3} \quad (8)$$

Posledním je hlinitanový modul, jehož jmenovatel je tvořen pouze jediným oxidem, a to oxidem železitým. Jeho hodnota určuje teplotu výpalu. Čím je hodnota modulu vyšší, tím je také vyšší teplota potřebná ke slinování, ale rovněž výsledná pevnost. Modul se vyjadřuje také k hydratačnímu teplu a odolnosti vůči síranům.

$$M_s = \frac{CaO}{Fe_2O_3} \quad (9)$$

Kromě modulů se zohledňuje i množství volného oxidu vápenatého, které nazýváme jako stupeň sycení vápnem. Oxid vápenatý je nebezpečný v případě dodatečné hydratace v cementu. Zřetel by se měl brát také na zvolený způsob paliva pro výpal, tavitelnost surovin a jejich zrnitost [12, 17].

Výroba cementu

Jedná se o složitý proces složený ze dvou fází. První sestává z výroby slínku ze surovinové směsi. Nejdříve se za současného přimíchávání dalších složek, zajišťujících chemickou korekci a homogenizaci, drtí vápenec. Tato část může probíhat mokřím a suchým způsobem lišícím se množstvím spotřeby energie a také technologií míchání. Mokřím způsob aplikovaný na měkké suroviny je založen na společném mletí ve vodném prostředí, které napomáhá dobré homogenizaci. Nevýhodou je vyšší energetická náročnost. Oproti tomu suchý způsob vhodný spíše pro tvrdé suroviny je energeticky úspornější. Spočívá v drcení suroviny a dosoušení [7, 12, 17].

Dalším krokem je výpal prováděný při teplotách 1300–1450°C, při kterém vznikají slínkové minerály C₃S, C₂S, C₃A a C₄AF, které se podílejí na procesu hydratace. Ve slínku se po výpalu také nachází volné vápno, které se však z důvodu objemových změn při hydrataci stává ve větším množství nežádoucí, totéž platí o oxidu hořečnatém, u obou hrozí tzv. alkálievé rozpínání [7, 12, 17].

Druhá fáze spočívá ve smíchání slínku se sádrovcem a dalšími přísadami, ovlivňujícími rychlost hydratace, plasticitu i zpracovatelnost. Semletím vzniká cement, který je balen a expedován podle potřeb odběratele [12, 17].

Hydratace cementu

Průběh hydratace je závislý na chemickém složení cementu, konkrétně na zastoupení jednotlivých slínekových minerálů. Ty mají přímý vliv nejen na rychlost procesu, ale také na uvolněné množství tepla. Vytváří se hydrosilikátová a hydroaluminátová fáze někdy označované též jako C – S – H a C – A – H retgenno amorfní fáze s proměnlivým složením a náhodným uspořádáním ve struktuře. Tyto fáze jsou určující pro výslednou pevnost a další vlastnosti. Sádrovec iniciuje vznik ettringitu, který působí jako zpomalovač tuhnutí. Proces lze také rozdělit do několika period trvajících řádově několik minut až hodin [12, 17].

Součástí výsledného cementového kamene jsou kromě výše zmíněných hydratovaných fází také nezreagované slínekové částice, krystaly hydroxidu vápenatého, póry různých tvarů a velikostí a také pórový roztok [12, 17].

Druhy cementů užívané pro omítky

S ohledem na požadované vlastnosti omítek se užívají pouze určité druhy cementů, které jsou schopny tyto nároky splnit. V průmyslové výrobě se nejčastěji pracuje s cementy třídy II., které jsou zastoupeny portlandskými cementy s různými příměsemi, a to struskou, křemičitým úletem, pucolánem, popílkem, kalcinovanou břidlicí nebo vápencem. Možné je ale také použití portlandského cementu bez příměsí třídy I. Pevnosti v tlaku v obou případech bývají 32,5 nebo 42,5 MPa [7].

Pokud jsou omítky připravované přímo na staveništi, bývají zhotovovány také z cementů druhé třídy o pevnosti 32,5 MPa. U staveništní přípravy je však nutné brát v potaz pravděpodobnost vyšší nepřesnosti a nehomogenity záměsí, zapříčiněné pracovními i klimatickými podmínkami na staveništi a absencí laboratorního vybavení [7].

Pro fasádní a štukové omítky je téměř výhradně používán cement bílý, který je tvořen portlandským cementem z bílého vápence s absencí oxidu železitého. Tento oxid je zodpovědný za šedozeleň zbarvení běžných cementů. Změna mineralogického složení má vliv také na technologický postup při výrobě a hydrataci. Díky absenci oxidu železitého po výpalu nevzniká slínekový minerál C₄AF a jeho podíl je nahrazen trikalciem aluminátem s nejvyšší hydratační rychlostí, spjatou s nebezpečím hrudkovatění cementu při skladování ještě před jeho použitím. Z tohoto důvodu se bílý cement musí skladovat ve velmi suchém prostředí [7, 12].

Výjimečně se vyrábějí omítky také z hlinitanového cementu, charakteristickým vysokým obsahem oxidu hlinitého, který se vyznačuje rychlým nárůstem počátečních pevností při

hydrataci (po jednom dni může být jejich pevnost vyšší, než u běžných cementů po 28 dnech) a také dobrou odolností proti vysokým teplotám. Po několika letech však dochází ke změnám vnitřní struktury zatvrdlého pojiva vedoucím ke ztrátě soudržnosti. Nevýhodou je ve srovnání s běžně používanými portlandskými cementy až jeho desetinásobná cena [7, 12].

2.3.4 Sádrové omítky

Sádrové pojivo, zastupující síranová pojiva, je známé od dob Starověkého Egypta, kde se již 3 000 let před n. l. hojně používalo pro štukové úpravy povrchů staveb. Na našem území se začíná vyskytovat až v době raného středověku, a to, ve srovnání s Egyptem, v podstatně menším rozsahu. Důvodem byla, s ohledem na naše klimatické podmínky, jeho nízká životnost a také špatná dostupnost kvalitního surovinového zdroje. Důvody rozpadu těchto omítek v exteriéru však byly objasněny až pracemi Le Chateliera a Michaelise, kteří se v 19. století podrobně zabývali chemickými procesy při tuhnutí a tvrdnutí sádry ve styku s vnějším prostředím [3].

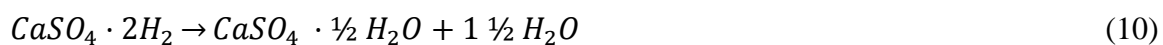
Rozvoje užívání se sádrové omítky dočkaly až v druhé polovině 19. století, kde se uplatňovaly pro štukové dekorace nově užívaných architektonických slohů, které byly charakteristické vysokou četností reliéfní výzdoby fasád provedené v omítkových vrstvách. Běžná bývala v exteriérech aplikace sádrového pojiva v kombinaci s vápenným, navíc zpevnovaným roztoky kamence nebo kyselinou šťavelovou. Ve vnitřních prostorech se sádrové malty postupně staly téměř výhradním pojivem užívaným pro finální úpravy povrchů. Provádění dekorativně pojednaných ploch fasád a místností kladou vysoké nároky na řemeslnickou zručnost [3].

Na našem území je evidováno pouze jedno ložisko s kvalitním sádrovcem. Vyskytuje se v opavské pánvi v Koberčicích ve Slezsku. V tomto prostoru je sádrovec těžen již od první poloviny 19. století až do současnosti [18]. Lépe jsou na tom však okolní země, Polsko a Německo, nebo také USA a Rusko, které mají zdroje sádrovce dostatek. V posledních letech se problém nedostatku sádrovce u nás vyřešil jiným způsobem. V souvislosti s odsířováním spalin se nově začal vyrábět materiál s názvem energosádrovec, jenž je odpadním produktem při odsíření spalin tepelných elektráren, který je schopný nahradit sádrovec přírodní. Tepelné elektrárny však nejsou jediným zdrojem umělého sádrovce. Při čištění vod nebo výrobě některých kyselin v chemických závodech vzniká tzv. chemosádrovec [6, 12, 13].

Pro úplnost je potřeba zmínit, že ne ve všech ložiscích se vyskytuje sádrovec, dihydrát síranu vápenatého, čistý. V některých případech je znečištěný anhydritem, dolomitem, jíly či vápencem [12, 13].

Výroba sádry

V závislosti na zpracování rozlišujeme několik druhů sádry, jež se vzájemně odlišují svými vlastnostmi. Výrobní postup je však pro všechny druhy principiálně stejný. Cílem je provedení tepelné dehydratace, která se liší pouze teplotou a tlakem a také tím, zdali je uskutečňována v suchém či mokřém prostředí. První krok dehydratace lze zapsat následující chemickou rovnicí [12].



Z dihydrátu síranu vápenatého vzniká částečným odloučením vody hemihydrát, který se podle zvoleného technologického postupu vyskytuje ve formě α nebo β sádry. α sádra se vyrábí autoklávováním za mírného přetlaku při teplotě 115–125°C sycená vodou nebo vodní párou. Výsledkem je pomalu tuhnoucí sádra o vysoké objemové hmotnosti dosahující pevností až kolem 50 MPa s nízkou spotřebou záměsové vody. Výroba β sádry je prováděna v rotačních pecích v suchém prostředí za normálního tlaku při teplotě 110–160°C, což vede ke vzniku vysoce pórovité struktury vykazující při smíchání s vodou výrazně nižších pevností, kterých však při hydratačním procesu nabývá ve srovnání s předchozím druhem daleko rychleji. Vyšší je také množství záměsové vody potřebné pro hydrataci [4, 12].

Pálením sádrovce v rotační peci nad 200°C dochází k rozkladu hemihydrátu za vzniku anhydritu, který je možné podle teplot ještě dále rozdělit na typy lišící se od sebe rozpustností.



Malá část anhydritu se při teplotě nad 1200°C ještě dále rozkládá a vzniká silně přepálená sádra, jinak také označovaná jako sádra estrichová [12, 13].

Hydratace sádry

Obě formy hemihydrátové sádry (α i β) jsou obecně považovány za rychle tuhnoucí. Tuhnutí i tvrdnutí probíhá po vsypání do vody v řádu několika minut. Z tohoto důvodu se při jejich použití pro přípravu omítek užívá zpomalovacích přísad. Charakteristickým rysem pro hemihydrátovou sádru je, že po započetí procesu hydratace již není možné proces zastavit. Skutečností je také nepřímá úměrnost mezi množstvím záměsové vody a výslednou pevností.

Se zvyšujícím se vodním součinitelem pevnost klesá. Výsledná struktura se utváří velmi rychle a hmota dosahuje konečných pevností již po 3 dnech [7, 12, 13].

Tuhnutí anhydrotové sádry je ve srovnání s předchozím typem velmi pomalé a není potřeba použití dalších přísad, proto se někdy také označuje jako pomalu tuhnoucí sádra. Z důvodu vysoké energetické náročnosti výpalu se však používá jen výjimečně, a to jako směs anhydritu a oxidu vápenatého pod názvem zednická, či potěrová sádra [7].

Negativem hemihydrátových sádrových omítek je klesající pevnost při vyšší vlhkosti okolního prostředí, což vede k nemožnosti použití sádrových omítek v exteriérech, či vnitřních prostorech se zvýšenou vlhkostí vzduchu. Navlhavost zatvrdlé sádry je však velmi nízká a obvykle nestoupá nad 1,5 %. Vlhkost je v případě nízké relativní vlhkosti okolního vzduchu schopná se z omítek uvolňovat, což zvyšuje pohodu vnitřního prostředí. Dobrá je též její odolnost proti vysokým teplotám, je možné jí použít jako protipožární ochranu např. ocelových konstrukcí [7, 12, 13].

Běžně se při přípravě omítek setkáváme s používáním β sádry, která i přes svou nižší pevnost k účelům omítání postačuje. α sádra se pro její vysokou cenu na výrobu omítek nevyužívá [7].

2.3.5 Ostatní pojiva omítek

V posledních letech se rozšiřují nové druhy pojiv aplikované především u objektů s kontaktním zateplovacím systémem.

Prvním z představitelů je vodní sklo, někdy též nazývané jako silikát. Materiál tvořený křemičitanem sodným a draselným. Vyrábí se tavením sklářského písku se sodou, nebo potaší, při teplotách 1300–1400°C. Tavenina se posléze chladí za vzniku granulí, které se dále rozemletím upravují na suché vodní sklo, nebo rozpouštěním na tekuté vodní sklo. U sodného skla hrozí nebezpečí tvorby viditelných výkvětů na povrchu omítek, proto se v běžné stavební praxi používá pouze vodní sklo draselné. Vysoká pevnost a difúzní odpor i možnost snadného probarvování jsou důvody, proč se omítky na bázi vodního skla v dnešní době používají. Další výhodou je možnost jejich distribuce nejen ve formě suché směsi, ale i pasty, kterou lze bez dalších úprav rovnou aplikovat. Zásaditý charakter zaručuje odolnost proti mechům a plísním. [7, 19].

Dalším zástupcem jsou omítky na bázi organických polymerních disperzí, umělých pryskyřic, označujících se jako akrylátové. Principiálně jsou tvořeny hydrosolmi skládajícími se z vody, polymeru a nepolymerní látky. V tomto případě je polymerem akrylátová

pryskyřice. Nepochybnými látkami jsou emulgátory, změkčovadla nebo ochranné koloidy. Tyto omítky se vyznačují dobrou přídržností k podkladu, vysokou odolností proti vodě a také vysokým difúzním odporem. Vykazují odolnost proti mrazu a kyselinám a jsou snadno probarvovatelné. Vhodná je jejich aplikace u polystyrenových zateplovacích systémů, ale pro systémy s minerální vlnou vzhledem k vysokému difúznímu odporu nikoliv [7, 19].

Silikonové omítky jsou svým složením podobné předchozímu typu. Skládají se rovněž z organických makromolekulárních látek v tomto případě na bázi uhlíku se siloxanovým skeletem. Pro použití do omítek se používají také ve formě polymerních disperzí. Nepochybná složka je tvořena identicky jako u omítek akrylátových. Kromě vlastností, které mají i akryláty, jsou tyto omítky schopny plnit i tepelně izolační funkci. Výhodou je též, díky jejich vysoké hydrofobicitě, odolnost proti zašpinění a nízký difúzní odpor pro vodní páru, důležitý pro „dýchání“ staveb. Proto jsou aplikovatelné na všechny typy zateplovacích systémů [6, 7, 19].

2.4 Plniva do omítek

Plniva jsou nedílnou součástí omítek tvořících kostru materiálu, zvětšují objem hmoty a upravují vlastnosti. Mají vliv na estetiku, celkovou pevnost, chemické složení i na další fyzikálně mechanické parametry, například omezují smršťování při vysychání. Propojení pojiva s plnivem je ovlivněno tvarem a strukturou povrchů. Pórovitost souvisí s nasákavostí a tepelně technickou charakteristikou. Výběr vhodného plniva závisí na pojivu a požadovaných vlastnostech výsledné omítky. Používány jsou běžně látky různé zrnitosti anorganického i organického původu, podmínkou je ale jejich chemická inertnost [3, 7].

V dřívějších dobách bylo použití plniv omezeno více méně jen na přírodní kamenivo, zastoupené pískem těžným v lomech v blízkosti staveb. Je však zachyceno i užívání dalších materiálů – moučky z mramoru, dolomitu nebo travertinu se speciální povrchovou texturou, či barevnými efekty. Ze spisů Marka Vitruvia Pollia se kromě dalších informací, týkajících se technologických postupů, dozvídáme, že již stavitelé v době Starověkého Říma si byli vědomi, že je potřebné, aby byla plniva čistá, bez příměsí, zvláště hlíny s obsahem humusových látek. Dále autor ve spisech upozorňuje také na nevhodnost použití mořského písku, aby bylo dosaženo dlouhé životnosti staveb, doporučuje použít kopaný písek říční [3].

U středověkých staveb se nejčastěji setkáváme s maltami obsahujícími pojivo z drceného kamene, často i s nejrůznějšími příměsemi. Podle výzkumů měly nejvíce negativní vliv na trvanlivost omítek příměsi tvořené humusovými látkami, sloučeninami železa a alkáliemi.

Jako nevhodná se z důvodu zvětrávání pyritu ukázala také břidlice. Preferovaný druh i kvalita plniva vycházela z požadavků konkrétních objektů a pojednání fasád, byla tedy individuální [3].

2.4.1 Obecné dělení kameniva

Kamenivo lze definovat jako „*zrnitý anorganický materiál, přírodního nebo umělého původu, s velikostí zrna do 125 mm, který je určen pro stavební účely*“ [20].

Kamenivo je možné dělit z několika pohledů, přičemž vlastnosti jednotlivých druhů, či skupin, jsou vzájemně odlišné a s ohledem na široké aplikační spektrum není možné obecně říci, zdali je konkrétní materiálová vlastnost lepší nebo horší. K výběru nejvhodnějšího kameniva se musí přistupovat vždy individuálně podle konkrétních potřeb daného užití.

2.4.1.1 Zrnitostní dělení

Rozdělení kameniva podle velikosti jednotlivých zrn se většinou zjišťuje tzv. síťovým rozbořem, který je prováděn pomocí soustavy sít o různých, normou definovaných, velikostech otvorů. Výsledkem je zrnitostní křivka, udávající hmotnostní zastoupení zrn jednotlivých frakcí. Frakcí se rozumí velikostní rozmezí, ve kterém se nachází konkrétní zrna kameniva. Ohraničena je dvojicí sít s oky o po sobě jdoucích velikostech [7, 19, 20].

Kamenivo se podle velikosti zrn rozděluje na dvě skupiny:

- drobné – velikost zrn kameniva je menší nebo rovna 4 mm,
- hrubé – velikost zrn kameniva je větší, než 4 mm [20].

Vzhledem k tomu, že dělení kameniva pouze do dvou skupin není pro technickou praxi dostačující, používá se pro drobné kamenivo ještě podrobnější dělení:

- filer – kamenivo s převládající velikostí částic menších než 0,063 mm, resp. s propadem na sítu o velikosti otvorů 0,063 mm větším než 75 hmotnostních % a u síta 0,125 mm větším než 85 hmotnostních %. Sítem s velikostí otvorů 2 mm musí propadnout všechen zkoušený materiál [19, 20].
- písek – velikost zrn kameniva se pohybuje v rozmezí 0,1 až 4 mm,
 - jemnozrný – písek u kterého převládá velikost zrn menší než 0,25 mm,
 - středně zrnitý – převládající velikost zrn od 0,5 do 1,6 mm,
 - hrubozrný – zrna větší než 1,6 mm [7].

Filler, někdy též označovaný jako kamenná moučka, vzniká jako odpadní produkt při třídění a drcení kameniva.

V omítkových záměsích se nejčastěji pro jemné štukové vrstvy setkáváme s plnivem ve formě jemnozrnného písku a pro hrubší povrchové nebo jádrové vrstvy s pískem středně zrnitým [7].

Zastoupení zrn jednotlivých velikostí úzce souvisí s množstvím záměsové vody. V průmyslové praxi se používá různých výpočtových postupů, které se volbou křivky zrnitosti snaží vodní součinitel snížit na minimum. Běžně se zrnitostní křivky počítají dle metodiky Bolomeye, Fullera nebo EMPY. Dobrá volba písku také výrazně snižuje riziko vzniku smršťovacích trhlin [7].

U průmyslově vyráběných omítek je správná volba granulometrie písku jednou z nejpodstatnějších záležitostí také z dalších důvodů. Výroba suchých omítkových směsí je totiž spojena s nutností jejich následného transportu na staveniště nejčastěji autocisternami ve volně loženém stavu. V případě přepravy na delších úsecích může vlivem špatně zvolené granulometrie dojít k odmísení směsi, což má za následek proměnlivou zrnitost směsi v omítačkách, vyvolávající nutnost neustále měnit množství záměsové vody. Nehomogenita záměsi vyvolává nepravidelné schnutí omezující, či v některých případech dokonce znemožňující, správné provedení finální povrchové úpravy [7].

2.4.1.2 Dělení kameniva podle původu

Z tohoto hlediska se kamenivo rozděluje na tři skupiny:

- přírodní – jedná se o kamenivo anorganického původu, získané z hornin drcením nebo těžbou bez použití chemických postupů. K rozdělení na menší kusy došlo samovolně přírodním procesem, zvětráváním, anebo průmyslovým, mechanickým drcením v drtičích. Příkladem je kamenivo z magmatických, sedimentárních i metamorfovaných hornin, přičemž se nejčastěji ve stavebnictví setkáváme s těžbou čediče, žuly, pískovce nebo břidlice,
- umělé – jak již z názvu plyne, jde v tomto případě o anorganické kamenivo vzniklé „nepřírodní“ cestou, nejčastěji jako odpadní produkt chemické výroby v elektrárnách, teplárnách, hutním průmyslu, při zpracování ropy, příp. v dalších průmyslových odvětvích. Příkladem takto vyrobeného kameniva může být perlit, expandit, liapor, atd.,

- recyklované – kamenivo vzniklé selekcí stavebního odpadu z demoličních prací. V praxi se setkáváme s recyklací kameniva z betonu, drcením cihelného střepu, ale také s pískem získaným ze zkarbonatovaných omítek [13, 19, 20, 21].

2.4.1.3 Dělení podle způsobu získávání

Technologie získávání kameniva se odvíjí od místa uložení, vnitřní stavby (struktury a textury) a také od míry kompaktnosti (zpevnění), související s geologickými procesy a erozními činiteli (voda, vítr, teplotní změny, mráz). Zpravidla jsou více zvětřelé, a tedy méně zpevněné horniny, situovány při povrchu nebo mělce pod povrchem. S rostoucí hloubkou se míra rozrušení snižuje. Toto tvrzení však není všeobecně platné. Složitý geologický vývoj na některých místech zapříčinil přeuspořádání horninových vrstev, na které se toto obecné pravidlo pak již nemusí vztahovat [22].

Rozlišují se tři základní způsoby získávání kameniva. Strojně technologická řešení se však odvíjí vždy od potřeb v konkrétní lokalitě:

- těžené – charakteristický způsob získávání pro usazené horniny přírodního původu vzniklé zvětřáváním starších hornin, které byly následně transportovány větrem, vodou či ledovcem. Reprezentantem jsou různé písky, šterky nebo šterkopísky vyznačující se ohlazeným povrchem a zaoblenými zrny. Mechanické opracování povrchů je zapříčiněné transportem za pomoci erozních činitelů,
- drcené – obvyklé pro přírodní horniny vyvřelé a přeměněné, případně usazené, s vysokou mírou kompaktnosti, nebo některé anorganické materiály. Principem je rozdrcení horniny (nebo materiálu) na menší kusy, které mohou být použity jako kamenivo. Vzniklá zrna mívají ostré hrany a drsný lomový povrch,
- těžené předdrcené – vzniká následným předdrcením těženého kameniva s velikostí zrn nad 2 mm, ze kterých bylo více než 40 hmotnostních % drceno [20].

2.4.1.4 Dělení podle objemové hmotnosti

Objemová hmotnost kameniva se odvíjí od materiálu a také geologického (příp. chemického) procesu, pomocí kterého vznikla. Určující je rovněž chemické složení a mikrostruktura. Pro vysokou výpovědní hodnotu je toto dělení v oboru materiálového inženýrství užíváno pro kamenivo nejčastěji [19]:

- těžké kamenivo – s objemovou hmotností nad 3000 kg.m^{-3} . Většinou se jedná o přírodní kamenivo z vyvřelých nebo přeměněných hornin s vysokým obsahem

železa nebo hořčíku, jejichž hlavními představiteli jsou čediče nebo amfibolity, které však limitní hodnotu objemové hmotnosti přesahují jen málo. Do této skupiny se řadí také některé přírodní nebo syntetické minerály vyskytující se v železné rudě, jako syntetický korund, baryt, magnetit nebo hematit, s objemovou hmotností v rozmezí cca od 4000 do 5300 kg.m³. V jaderné energetice, zdravotnictví nebo výzkumu se lze setkat také s těžkým kamenivem vyrobeným z odpadů vzniklých obráběním železa, litinovou drtí nebo ocelových broků, které je používáno pro výrobu těžkých betonů. Ze síranu barnatého jako plniva jsou vyráběny tzv. barytové omítky. Oblastí aplikace jsou v obou případech konstrukce tvořící ochranu proti radioaktivnímu nebo rentgenovému záření,

- hutné kamenivo – objemová hmotnost se pohybuje v rozmezí 2000–3000 kg.m⁻³. Do této kategorie spadají nejběžněji užívaná kameniva do omítek, malt i betonů. Z přírodních kameniv se do této skupiny řadí téměř všechny horniny vzniklé ze základních horninotvorných minerálů (křemeny, živce, kalcity). Z nejrozšířenějších lze jmenovat žulu, čedič, pískovec, vápenec, rulu nebo mramor. Místo zde však nacházejí také umělá kameniva, konkrétně vysokopecní struska používaná pro podkladní vrstvy vozovek nebo jako plnivo do betonů. U omítek se s ní jako pojivem běžně nelze setkat. Objemovou hmotnost v uvedeném rozmezí má také betonový recyklát vzniklý sekundárním zpracováním odpadního betonu, používaný jako hutné kamenivo. S ohledem na jeho nehomogenitu a horší materiálově fyzikální vlastnosti je však nutné vždy jeho použití v jednotlivých případech pečlivě zvážit,
- pórovité kamenivo – s objemovou hmotností nepřesahující 2000 kg.m⁻³, nebo sypnou hmotností do 1200 kg.m⁻³. Do této skupiny se řadí kameniva přírodní i umělá. Přírodní kameniva s ohledem na nedostatek surovinových zdrojů nebývají při výrobě maltovin v současném stavebním průmyslu používána. Přesto však lze zmínit typické zástupce, kterými jsou vulkanické tufy, tufity, čedičové lávy, pemza nebo křemelina. Mnohem častěji se lze setkat s umělými kamenivy s homogenní strukturou a stálými vlastnostmi, které vznikají průmyslovým zpracováním. Do této skupiny se řadí keramzit, kavitit, expandovaný perlit nebo vermikulit. U maltovin a betonů bývají použity také odpady ze stavebního průmyslu, jejichž typickým zástupcem je cihelná drť, nazývaná též někdy cihloporit [19, 20, 21].

2.5 Lehčené kamenivo

S ohledem na zaměření práce se na následujících stránkách budu podrobněji zabývat lehčenými kamenivy. Nejdříve představím jednotlivé typy a poté se podrobněji zaměřím na jejich vlastnosti a způsob výroby.

Ve srovnání s těžkými a hutnými kamenivy má lehčené (někdy také označované jako pórovité) kamenivo několik specifík. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, je charakteristické svou nízkou objemovou hmotností, nepřesahující dle ČSN EN 13055 (Pórovité kamenivo) 2000 kg.m^{-3} a sypnou hmotností do 1200 kg.m^{-3} . Vysoký podíl pórů materiálu udílí dobré tepelně technické vlastnosti, nacházející uplatnění při výrobě maltovin, především u tepelně izolačních omítek. Vysoká pórovitost má však vliv také na další vlastnosti, kterými je například nasákavost nebo pevnost. Právě nasákavost je vlastností ovlivňující potřebné množství záměsové vody. Při hydrataci totiž dochází k zaplňování pórů vodou, a ta se pak nemůže účastnit samotné hydratace pojiva. V případě opomenutí přídavku vody potřebné pro saturaci kameniva by hrozila částečná hydratace vedoucí ke snížení pevnosti a homogenity výsledného produktu [19, 21].

Dalším specifikem lehčeného plniva je tzv. samovakuování, které může probíhat po přidání záměsové vody ke směsi pojiva s kamenivem. Vlivem kapilárních sil je kamenivo schopné přijímat vodu mnohem déle než po dobu potřebnou pro smíchání omítkové směsi s kamenivem. Důsledkem může být rychlejší ztráta dobré zpracovatelnosti směsi. Pokud však proces probíhá i po zhutňování tekuté směsi (týká se hlavně betonů), má pozitivní vliv na soudržnost – přílnavost pojiva k povrchu zrn kameniva. Nepříznivým následkům je možné se vyhnout vlhčením kameniva před zpracováním [20].

2.5.1 Základní vlastnosti a způsoby stanovení

Norma ČSN EN 13055-1 (Pórovité kamenivo – Část 1: Pórovité kamenivo pro betony, malty a injektážní malty) definuje vlastnosti lehčeného kameniva užívaného pro výrobu malt a omítek, které je vhodné před jejich použitím prověřit. Následující odstavce budou věnovány popisu vlastností a zkušebních metod užívaných pro jejich zjištění. Jmenovány budou nejdůležitější vlastnosti s akcentem na aplikaci kameniva v omítkových směsích.

Fyzikální vlastnosti:

Objemová hmotnost ρ_v [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] je základní vlastnost vyjadřující hmotnost jednotlivých zrn kameniva složených z matrice (pevné části) a pórů (dutin vyplněných plynem) vztažené na jednotku objemu, do objemu se však nezapočítává prostor mezi jednotlivými zrny. Veličina úzce souvisí s formou vzniku zrn, s chemickým složením a vnitřním uspořádáním a odvíjejí se od ní mechanické, tepelné a další vlastnosti, proto je pro kamenivo dobrým třídícím znakem. Jednotlivé způsoby měření jsou zpracovány v normě ČSN EN 1097-6 (Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti) [19].

U kameniva s velikostí zrn v rozmezí 31,5–63 mm se nejčastěji pro měření objemové hmotnosti používá *Metoda s drátěným košem* založená na Archimédově zákoně, pomocí kterého se získá informace o rozdílu hmotnosti vzorku suchém a ponořeném do kapaliny. Postup měření se skládá z několika jednoduchých kroků. Nejprve je zkušební navážka vložena do drátěného koše, který se celý ponoří do nádoby s vodou, cyklickým zvedáním a zpětným vkládáním koše do vody s frekvencí 1x za sekundu dochází k postupnému odstranění vzduchu z navážky, následuje ponechání koše 24 hodin ve vodě a poté je protřepán a ve vodě zvážen. Po odstranění kameniva z koše se zváží prázdný koš a po lehkém usušení i kamenivo. Posledním krokem je úplné usušení kameniva v sušárně a opětovné zvážení. Podle jednoduchých matematických vzorců je pak proveden výpočet [19, 23].

Další možný způsob měření nabízí *pyknometrická metoda*. Základem je baňka se zátkou o známém objemu, tzv. pyknometr, do kterého se nalije voda a posléze vsype kamenivo. Znalostí hustoty vody, zvážením suchého kameniva, prázdné, vodou a posléze i kamenivem naplněné baňky se získává informace dostačující k určení objemové hmotnosti, hustoty a případně i měrného povrchu. Použitelnost metody pro zjištění objemové hmotnosti je omezena frakcí navážky, pohybující se v rozmezí 0,063–4 mm [19, 23].

Jednoduše lze objemovou hmotnost stanovit též za pomoci *odměrného válce*, kdy se měří objem vody vytlačené navážkou. Přibližně do poloviny válce se nalije voda, odečte se její objem a posléze je vsypáno kamenivo a proveden druhý odečet výšky hladiny vody. Ze znalosti hmotnosti suchého vzorku a hmotnosti vzorku nasyceného vodou zváženého po odebrání z odměrného válce se stanoví objemová hmotnost. Nevýhodou metody je její nepřesnost, pro orientační stanovení hodnoty je však metoda dostačující. Vzhledem k faktu, že metoda není citovaná normou, je možné ji ale použít pouze v případech, kdy není požadováno materiály testovat pomocí výhradně normových postupů [19, 23].

Sypná hmotnost ρ_{syp} [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] je vlastnost zavedená pro sypké hmoty definovaná poměrem hmotnosti vysušeného kameniva volně nasypaného do odměrné nádoby a objemem nádoby samotné. Použitelnost metody je do maximální velikosti zrna 63 mm.

Měření probíhá na podobném principu jako v předchozích případech. Nejdříve se zváží prázdná suchá nádoba, následně se přeplní zkušební navážkou, která se v horní části jemně opatrně zarovná, proběhne další odečet hmotnosti, postup se opakuje 3x za sebou. Ze znalosti objemu nádoby a obou hmotností se vypočítá výsledná hodnota, která se v rámci jednotlivých měření zprůměruje. Zkušební postup měření je zakotven v normě ČSN EN 1097-3 (Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 3: Stanovení sypné hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva) [19, 24]

Tímto pracovním se získá sypná hmotnost volně loženého kameniva. V případě potřeby se určuje také hmotnost v setřeseném stavu. Průběh zkoušky je obdobný, jen se odměrná nádoba při plnění kamenivem umístí na vibrační desku, pomocí které dochází k průběžnému zhutňování (vibrovaní) a doplňování kameniva až do chvíle úplného zhutnění. Dále zkouška probíhá obdobně. Zhutňování je možné provádět také za pomoci propichovací tyče, v tomto případě není vibračního stolu potřeba [24].

Mezerovitost (%) je veličina udávající objem mezer mezi jednotlivými zrny vztažená k celkovému objemu navážky, lze ji snadno vypočítat ze znalosti sypné a objemové hmotnosti. Postup měření je definovaný také normou ČSN EN 1097-3 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 3: Stanovení sypné hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva [24].

Pórovitost (%) je veličina, která je pro lehčené kamenivo jednou z nejdůležitějších. Udává zastoupení pórů v jednotlivých zrnech kameniva, pro její určení postačuje znát objemovou hmotnost a hustotu kameniva [19].

Pro přesnější určení se používají rtuťové nebo heliové, příp. optické pyknometry, fungující na principu vtlačování plynu nebo kapaliny do porézního prostoru při odporu (tlaku), který klade materiál při jeho průchodu. Zkoušku lze provádět dle postupu uvedením v normě ČSN EN 1997-7 [19].

Geometrické vlastnosti

Zrnitost (granulometrie) určuje hmotnostní podíl – poměrnou skladbu zrn jednotlivých velikostí obsažených v navážce. Určuje se pomocí sady sít se čtvercovými otvory, seřazenými se shora od síta s největšími otvory po síto s otvory nejmenšími, kterými je proséváno kamenivo. Následně se zváží dílčí zbytky na sítěch a přepočítají na celkové zbytky, pomocí

kterých je stanovena tzv. zrnitostní křivka, vyjadřující procentuální zastoupení jednotlivých frakcí kameniva vztažených k hmotnosti celé navážky. Navážka by měla být před nasypáním do zkušebních sít zbavena jemných částic a řádně vysušena. Postup je definován normou ČSN EN 933-1 (Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor) [19, 25].

Velikosti ok jednotlivých sít jsou pevně stanovena, běžně se používají tyto velikosti: 0,063 mm; 0,125 mm; 0,250 mm; 0,500 mm; 1 mm; 2 mm; 4 mm; 8 mm; 16 mm; 31,5 mm; 63 mm; 125 mm; 250 mm. Pro síta s velikostí menší než 4 mm se používá kovové tkaniny, větší síta jsou obvykle vyráběna z děrovaného plechu [25].

Se zrnitostí také úzce souvisí další vlastnosti, kterými je mezerovitost, sypaná hmotnost, propustnost, stlačitelnost nebo tepelné a akustické vlastnosti.

Tvar zrn se týká se zrn kameniva hrubé frakce a poukazuje na kvalitu kameniva. Rozeznáváme několik charakteristik, které tvar zrn popisují. Jedná se o index plochosti, tvarový index a popis tvaru zrn [19].

Index plochosti je definovaný pro úzkou frakci d/D , u které probíhá prosévání na tyčových sítích s rovnoběžnými mezerami šířky $D/2$. Výpočet souhrnného indexu se provádí z celkové hmotnosti zrn sítý propadlými a vyjádří se procentuálně k hmotnosti navážky [25].

Tvarový index SI je definovaný procentuálně jako hmotnostní podíl zrn s poměrem délka ku tloušťce (L/E) větším než 3 k celkové hmotnosti navážky, kde se za délku zrna považuje největší tečnová vzdálenost dvou rovnoběžných tečnových rovin a tloušťka jako vzdálenost nejmenší. Zkouška je prováděna se zrny hrubé frakce v rozmezí velikostí 4–63 mm. Zrna splňující tuto podmínku jsou označována jako zrna nekubického formátu. Měřena jsou za pomoci dvoučelistových posuvných měřidel [24].

Popisem tvaru zrn se rozumí drsnost, resp. hladkost povrchů, dále stanovení, zdali jsou na povrchu viditelné póry, uváděno je také zaoblení či nezaoblení (ostrohrannost) zrn a četnost výskytu nepravidelností v navážce [24].

Obsah jemných částic se posuzuje podle normy ČSN EN 933-10 (Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 10: Posouzení jemných částic - Zrnitost filerů (prosévání proudem vzduchu)). Za jemné částice jsou považovány takové, které projdou sítý o velikosti ok 0,063 mm. Podstatou je rozčlenění a oddělení zrn fileru a zjištění jejich hmotnostního podílu. Zkouška se provádí proséváním za pomoci proudu vzduchu postupně přes síta se čtvercovými otvory 0,063 mm; 0,125 mm a 2 mm a zaznamenávají se hmotnosti zůstatků. Pro další použití kameniva se obsah jemných částic považuje za neškodný, pokud nepřekročí hodnotu 3 % z hmotnosti zkoušené navážky kameniva [26].

Vlhkostní vlastnosti

Stanovení obsahu vlhkosti je u pórovitých materiálů zvláště důležité. Vlhkost lze uvádět dvěma způsoby, jako hmotnostní a objemovou, tedy jakou hmotnost či objem zaujímá ve zkoušeném materiálu vlhkost. Hodnoty se získají měřením úbytku hmotnosti, resp. měřením hmotnosti vlhkého vzorku a průběžným měřením při sušení až do ustálené hodnoty, kdy je vzorek považován za zcela vysušený. Rozdílem počáteční a koncové hmotnosti se stanoví hmotnost vlhkosti obsažené v materiálu. Postup je definován normou ČSN EN 1097-5 (Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 5: Stanovení vlhkosti sušením v sušárně). Jednotkou objemové i hmotnostní vlhkosti jsou procenta. Objemová vlhkost je poměrem mezi volnou vlhkostí v materiálu a objemem samotného materiálu. Hmotnostní vlhkost je definována jako úbytek hmotnosti vzorku ku hmotnosti vzorku v suchém stavu [19, 27].

Pórovité materiály v běžných podmínkách vždy obsahují určité množství vlhkosti, a to i v případě, že jsou pevně zabudovány do konstrukcí. Z hlediska vztahu vlhkosti k pevné matici materiálu se rozlišuje vlhkost volná (vyplňující velké póry a dutiny), fyzikálně vázaná, kapilární (nacházející se v malých pórech a kapilárách), adsorbovaná (pokrývající stěny kapilár a vyplňující nejmenší póry) a chemicky vázaná (součástí základní mřížky materiálu) [20].

Zdroje vlhkosti mohou být různé, do materiálu se vlhkost dostává výrobním procesem, při skladování, provozem stavby, ve které je materiál zabudován, ale i vzlínavostí z podzákladových partií, sorpcí okolního vzduchu nebo kondenzací vodní páry srážející se na povrchu či uvnitř materiálů. Po 2–7 letech od zabudování materiálu do konstrukce se obvykle vlhkost ustaluje a po té lze hodnotu vlhkosti označit za trvalou. Z důvodu výkyvů počasí i střídání ročních období hodnota vlhkosti v konstrukcích v průběhu roku osciluje kolem střední hodnoty [19].

Z hlediska funkčnosti materiálu se zavádí kritickou vlhkost, která uvádí maximální přípustné množství vlhkosti, při kterém ještě nedojde ke ztrátě vlastností, jenž by materiálu nedovolily plnit funkci, ke které byl určen [19].

Nasákavost vyjadřuje maximální množství vlhkosti, které je materiál schopný pojmout. Vyjádření je totožné s vlhkostí, kdy se dává do poměru změna hmotnosti ku hmotnosti suchého vzorku, resp. objem vlhkosti ku objemu materiálu, a udává se v procentech. Za hodnotu nasákavosti se považuje stav, kdy dojde k úplnému zaplnění všech pórů materiálu, vzhledem k tomu, že ke skutečnému dosažení tohoto stavu by byla potřeba nekonečně dlouhá

doba, v technické praxi se za tento stav považuje u většiny materiálů doba 24 hodin od chvíle, kdy byl vzorek ponořen do kapaliny [19].

Zjištění nasákavosti pórovitého kameniva se provádí podle normy ČSN EN 1097-6 (Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti). Nejprve je kamenivo vysušeno v sušárně a zváženo. Posléze je na dobu 48 hodin ponořeno do vody, vyjmuto, povrchově osušeno a opět zváženo. Rozdíl naměřených hmotností nám udává množství vody v materiálu, kterou považujeme za hodnotu nasákavosti [23].

Drobné pórovité kamenivo si vyžaduje trochu jiný postup, který je uveden v normě ČSN EN 13055 (Pórovité kamenivo). Po vysušení kameniva v sušárně se navážka zváží umístí na filtrační papír v Büchlerově nálevce, která je poté naplněna vodou. Po 5 minutách je voda pod tlakem přes baňku umístěnou pod nálevkou odsáta pryč. Následuje druhé vážení. Rozdílem hodnot zjistíme nasákavosti kameniva [28].

Výška vzlínivosti vody určuje, do jaké výšky je schopná vystoupat voda v případě, že dno válce, do kterého se umístí kamenivo, je v kontaktu s vodou. Zkušební postup stanovuje norma ČSN EN 1097-10 (Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 10: Stanovení výšky vzlínivosti vody) [29].

Mechanické vlastnosti

Stlačitelnost udává procentuální úbytek objemu mezi volně loženým a zhutněným kamenivem. Průběh zkoušky určuje norma ČSN EN 1097-11 (Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 11: Stanovení stlačitelnosti a pevnosti v tlaku pórovitého kameniva). Ocelový zkušební válec je zaplněn kamenivem a přikryt deskou. Po změření výškového rozdílu mezi horní hranou krycí desky a horním okrajem válce je provedeno vibrování. Poté je opět změřen výškový rozdíl. Z rozdílu naměřených hodnot a výšky navážky před zavibrováním lze dopočítat hodnotu stlačitelnosti [30].

Pevnost v tlaku u pórovitého kameniva je definována jako únosnost při 10 % deformaci. Stanovuje se rovněž podle normy ČSN EN 1097-11 (Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 11: Stanovení stlačitelnosti a pevnosti v tlaku pórovitého kameniva) v ocelových válcích, ve kterých je vsypáno a zavibrováno kamenivo. Poté přichází na řadu lis, do kterého je po přikrytí válec umístěn. Následuje stlačování a úchylkoměry se měří změna polohy desky a zatížení. Zatěžování pokračuje až do chvíle, kdy se změna výšky dosáhla 10 % výšky kameniva po zavibrování. Hodnota pevnosti je udávána v MPa [30].

Chemické vlastnosti

Jsou stanovovány v závislosti na původu kameniva nebo požadavcích konkrétní aplikace. V zásadě se provádějí dva typy testů. Prvním z nich je stanovení obsahu hmotnosti určité chemické látky, v druhém případě se jedná o srovnávací testy, kdy je účelem zjistit, zdali obsah určité látky nepřesahuje limitní hodnotu. Zkoušky probíhají podle norem EN 1744-1 až 3, které stanovují jejich postup [31].

Obvykle se zkoumá přítomnost a množství chloridů, síry, síranů rozpustných v kyselině nebo organicky znečišťujících částic. Zjišťovány mohou být i složky rozpustné ve vodě nebo nebo alkalicko křemičitá reaktivita [31].

2.5.2 Přírodní pórovitá kameniva

Užívání přírodních pórovitých kameniv je charakteristické pro oblasti s vysokou vulkanickou aktivitou. Použití betonu s přidavkem tufů je známé již v době Starověkého Říma, konkrétně u stavby římského Pantheonu. Ve stejné době se však lze i na dalších místech setkat s použitím pemzy nebo křemeliny [21].

Tato skupina kameniv je získávána z hornin vulkanického původu, případně pórových sedimentů. Nevýhodou je jejich vysoká nehomogenita projevující se kolísáním objemové hmotnosti a dalších vlastností. Kvalitní ložiskové zdroje tohoto kameniva jsou na našem území velmi omezené. Proto jsou pro výrobu maltovin užívány spíše výjimečně [19, 21].

Velikost i vzájemné uspořádání pórů se mohou lišit. Běžně se u těchto druhů kameniv vyskytují póry makroskopické až mikroskopické, otevřené i uzavřené. V závislosti na tomto rozložení se mění především vzlínavost, nasákavost, ale také objemová roztažnost [21].

2.5.2.1 Vulkanické tufy a tufity

Vulkanické tufy jsou pyroklastickou výlevnou horninu vulkanického původu. Tato hornina vznikla vyvržením materiálu do vzduchu při sopečné erupci. Před dopadem na zem došlo vlivem absorpce okolních plynů a vodní páry k jejímu zpěnění, následně probíhala na zemském povrchu sedimentace a setřídění součástí dle velikosti. Pojivou složkou, tmelem, jsou sopečné popely [21].

Podobným materiálem jsou také vulkanické tufity. Od tufů se liší průběhem vzniku i materiálovým složením. Kromě pyroklastických součástí obsahují také klastický materiál. Jejich finální zpevňování probíhalo ve vodním prostředí [21].

V případě, že tufy nebo tufity vznikly z větších hranatých úlomků, nazývají se někdy tufové brekcie. I v tomto případě pojivo tvoří obvykle láva [21].

Mechanicko fyzikální vlastnosti jsou závislé na objemové hmotnosti a vlhkosti. Krychelná pevnost se obvykle pohybuje mezi 4,5–20 MPa a objemová hmotnost ve vysušeném stavu v rozmezí 1000–1600 kg.m³. Nasákavost je udávána v mezích 10 až 35 hmotnostních % [21].

V současné době se na našem území nenacházejí žádná aktuálně těžená ložiska. V minulosti probíhala těžba na Bruntálsku na severní Moravě, konkrétně na ložiscích Uhlířský vrch a Venušina sopka. Těžitelnost však byla z důvodu špatné štípatelnosti při drcení obtížná. Proměnlivé vlastnosti ani četné zlomy v těžených lokalitách jednoduchosti též nepřidávaly. Využití surovina v minulosti našla nejen jako pojivo do lehčených maltovin a betonů, ale také jako štěrk pro stavby silnic nebo materiál pro stavbu domů a hospodářských budov [21, 32].

2.5.2.2 Lehké lávy

Svým mineralogickým složením jsou podobné čedičovým tufům. Kromě křemene obsahují také relativně vysoké množství vápence, periklasu, hematitu a alkálií. Vznik je spjatý se sopečnými erupcemi, při kterých docházelo ke kopcovitému navršování tekutého materiálu v blízkosti sopečného jícnu. S poklesem tlaku v materiálu při opuštění jícnu vznikly póry, které zůstaly v materiálu i po ochlazení přítomné [21].

Způsob vzniku pórů zapříčinil, že jsou většinou uzavřené, kulovitého nebo vejcovitého tvaru. Jejich velikost se pohybuje v rozmezí řádově několika desetin mm až do několika mm. Podíl velkých pórů bývá vyšší. Důsledkem uzavřenosti pórů je snížení nasákavosti, které zapříčiňuje vlhkostní roztažnost materiálu. Materiál tedy vykazuje ve srovnání s tufy nižší objemovou roztažnost a obecně nižší hodnoty obsahu vlhkosti, což zvyšuje jeho možnosti uplatnění ve stavebním průmyslu. Sypná hmotnost kolísá mezi hodnotami 750–1700 kg.m⁻³ [21].

Lehké lávy se na našem území ve větší míře nevyskytují. Známé je pouze naleziště Hodějov. Pro průmyslové využití se materiál v dřívějších dobách dovážel ze Slovenska [21].

2.5.2.3 Přírodní pemza

Vznik pemzy je shodný s lehkými lávami. Rozdílné je pouze mineralogické složení, které je tvořeno nižším zastoupením křemene, a naopak vyšším podílem periklasu a alkálií. Hematit se nevyskytuje vůbec. Materiál se v přírodě vyskytuje ve formě nezpevněných

šterkopískových drtí s velikostí zrn od několika milimetrů až po centimetry. Výhodou je velmi nízká hygroskopicitata a také neexistence objemových změn při vysychání. Z těchto důvodů je pemza nejlépe uplatnitelná jako plnivo do betonů a maltovin [21].

Na našem území se vyskytuje pouze v netěžitelném množství v oblasti Českého Středohoří. Větší a těžená ložiska se nacházejí v oblasti Porýní nebo na Kavkaze [21].

2.5.2.4 Křemelina

Mezi přírodní lehčená kameniva řadíme také křemelinu, která se od předchozích typů kameniv liší nezbytností tepelné úpravy po vytěžení z ložiska. Její původ není vázán na vulkanické procesy, nýbrž se schránkami jednobuněčných řas žijících ve vodě. Sedimentací křemičitých skořápek smíchaných s odumřelými rozsivkami a jílovými látkami vznikla lehce zpevněná zemina s názvem křemelina. Na některých místech došlo ještě k následné metamorfóze, zpevnění, po kterém se výsledná hornina nazývá trypl [21].

Ve stavebnictví se křemelina používala již v 6. století, a to k výrobě lehkých cihel. V současnosti se kromě dalších odvětví (chemický průmysl, papírenství, potravinářství) ve stavebnictví využívá po předchozích úpravách. Autoklávováním vápenokřemelinové směsi vzniká tvrzená křemelina, lze vyrábět také křemelinu pálenou. Ta nachází uplatnění při výrobě izolačních cihel nebo pro zachycovače zvířecích pachů, také může být použita jako tepelná izolace ve formě zásypů. Autoklávovaná křemelina nachází uplatnění u výroby plášťových desek a také tvárnic pro obvodové konstrukce [21].

Těžba křemeliny probíhá v povrchových lomech za pomoci korečkových rypadel. Poté je po dobu několika měsíců ponechána na volné skládce za účelem homogenizace a zásoby pro kontinuální výrobní provoz v zimních měsících. Následuje její transport do rozplavovačů, kde dochází ke smíchání s vápnem. Pro výrobky z autoklávované křemeliny se přidávají piliny a cement, po záměsi s vodou se převážejí na skládku, kde postupně vysychají. Ve srovnání s klasickými betonovými výrobky vykazují díky přítomnosti pilin křemelinové výrobky vysokou pružnost a houževnatost [21].

Největší a zároveň v současné době těžené ložisko na našem území se nachází mezi obcemi Borovany a Ledenice v Třeboňské pánvi nedaleko Českých Budějovic. V blízkosti se vyskytuje také dnes již částečně zatopený lom u Mydlovar. S velmi čisté ložisko křemeliny leží v západních Čechách v Hájku u Františkových Lázní. Krom toho se z této horniny skládá velká část podloží hnědouhelné pánve v severozápadních Čechách. Ze zahraničních států s významnějšími ložisky lze jmenovat Francii, Dánsko nebo USA [21].

2.5.3 Umělá kameniva z průmyslových odpadů

Další skupinu lehčených kameniv tvoří odpady z chemického a energetického průmyslu. Využití těchto surovin za účelem výroby plniv do betonů, malt a omítek je záležitostí poměrně nedávnou související s řešením otázky druhotného využití odpadních produktů vzniklých především spalováním pevných paliv hromadících se na skládkách. Další zpracování se jeví jako energeticky výhodné, nevýhodou však bývají kolísavé vlastnosti a nebezpečí přítomnosti škodlivin [21].

2.5.3.1 Škvára

Materiál vzniká jako odpadní produkt spalování uhlí a dalších pevných paliv. Nalézá se na roštích i v dalších částech topenišť. Vlastnosti škváry jsou závislé na mnoha faktorech, zvláště na stáří pevného paliva a průběhu hoření. Klíčový, pro sekundární využití, je obsah organických a anorganických zbytků, síry, solí, obsahu volného vápníku, hořčíku a humusových látek, které v závislosti na poměru a množství mohou mít negativní dopad při aplikaci. Obecně platí, že z geologicky staršího, více zkoksovatělého uhlí vzniká škvára s vlastnostmi příznivějšími pro aplikaci ve stavebnictví [21].

Škvára se po odebrání z topenišť zpravidla ukládá na haldách, kde probíhá její samovolné dohořívání, které má pozitivní vliv na vlastnosti. Dohořívání nedopáleného uhlí vede k vyluhování rozpustných solí a síry a také k oxidaci síry, která má negativní dopad na objemovou stálost. Dále probíhá samovolná hydratace a karbonatace volného vápna, zvyšující nebezpečí objemového rozpínání při procesu hydratace. Dostatečně dlouhá doba deponace škváry na odvalech (alespoň 6 měsíců) vede bez nutnosti využití jakýchkoliv technologií k celkovému zlepšení vlastností. Z tohoto důvodu je i přes obvyklou proměnlivost složení tento způsob „úpravy“ považován za nejefektivnější. V případě, že by pro některé speciální aplikace byl nedostačující, je možné odstraňovat některé nežádoucí látky praním a dekarbonizací, přepalováním nebo elektromagnetickým tříděním [21].

Proměnlivost vlastností souvisí i se zrnitostí, kdy nejvíce nežádoucích látek je obsaženo v nejjemnějších frakcích, z tohoto důvodu je před aplikací vhodné provedení zrnitostního třídění a pro stavební účely využití frakcí ostatních. U zbylých frakcí však také platí, že se jejich složení v závislosti na velikosti zrn mění [21].

Podle původu se škváry rozdělují na kotelní, jejichž velkým nedostatkem jsou velmi proměnlivé vlastnosti a také riziko zvýšené radioaktivity, a škváry vzniklé pálením směsného odpadu, které se za účelem výroby lehčených hmot užívají častěji. Norma ČSN 72 2050

z roku 1960 rozeznává tři jakostní třídy a dělí škváry podle oblasti aplikace na vhodné pro vyztužené škvárobetonové prvky, ostatní nevyztužené nosné prvky a pro výplňový beton a čistě tepelné izolace. V současné době se lze kromě betonů setkat také s uplatněním v maltách a tepelně izolačních omítkách, kde však aplikaci musí předcházet provedení analýzy složení, aby se předešlo případným vadám vzniklým jeho nekompatibilitou [21].

Objemová hmotnost volně sypané škváry při zrnitosti 0–16 mm nabývá hodnot 400–1000 kg.m⁻³ a pH by se v případě dalšího použití mělo pohybovat v rozmezí 5–7,5 [21].

Jak již bylo naznačeno výše, vznik škváry je vázán na spalování pevných paliv. Největšími producenty jsou proto tepelné elektrárny, ale také hutní a chemický průmysl a spalovny odpadů [21].

2.5.3.2 Cihelná drť a cihloporit

Pro úplnost je potřeba uvést také tento druh lehčeného kameniva, s kterým se lze v současné době setkat spíše výjimečně. Jak již z názvu vyplývá, jedná se o materiál s blízkým vztahem ke klasickým páleným keramickým cihlám. Pokud jde o cihelnou drť, nejvíce uplatňována byla po druhé světové válce na územích poničených bombardováním, kdy se tímto způsobem recyklovalo zdivo z trosek domů. Hrubé drcení sutě se realizovalo na pneumatických nebo čelistových drtičích, jemné drcení na drtičích válcových nebo kuželových [21].

Cihloporit je z hlediska složení a struktury téměř totožným materiálem, který však nevzniká druhotným zpracováním cihelného střepe, ale jeho výrobou. Ta je uskutečňována z mastných cihlářských jíílů s přispěním přísad zvyšujících pórovitost cihelného střepe. Jako přísady se nejčastěji používají hnědouhelné popely, uhelné moudy, rašelina a piliny [21].

Jediný rozdíl mezi oběma materiály je v pórovitosti, resp. objemové hmotnosti. Díky použití přísad je pórovitost cihloporitu vyšší, naopak objemová hmotnost ve srovnání s cihelnou drtí nižší. Hodnota pórovitosti cihloporitu dosahuje 25 až 45 %, objemová hmotnost 700–1200 kg.m⁻³ a nasákavost 14–35 % [21].

2.5.3.3 Struska

Výše uváděné typy kameniva z průmyslových odpadů mají společnou jednu vlastnost. V praxi mohou být uplatňovány bez provedení složitějších úprav. U strusky však toto pravidlo úplně neplatí. V dřívějších dobách bylo struskové pórovité kamenivo užíváno jako plnivo do lehkých betonů, dnes se s ním setkáváme pouze výjimečně [21].

Struska vzniká jako doprovodný produkt hutní výroby v topeništích vysokých pecích při redukci surového železa při teplotách 1400 až 1500°C. Používána bývá jako příměs u výroby cementu, hydraulického vápna a dalších maltovin nebo jako kamenivo – lehčené i těžké. Způsobů výroby lehčeného kameniva je několik, z nejčastěji používaných lze jmenovat: jámový s modifikací na pískových polích, na ocelových překlopných pánvích, na odstředivých strojích nebo zpěňovacích žlabech [21].

2.5.3.4 Agloporit

V současné době se jedná asi o nejvíce užívané umělé kamenivo z této kategorie vyráběné z pestré škály odpadních surovin jako jsou strusky, odpady z domácností, škváry, popílký, hlušiny z uhelných dolů nebo uhelnaté břidlice. Nejčastěji však z popílků, které mají původ v různých průmyslových odvětvích, zvláště v průmyslu hutním a energetice [21].

V závislosti na obsahu vlhkosti, stupni hutnosti a fyzikálního stavu lze vstupní suroviny dělit do tří základních kategorií. Na suché zrnité či kusové látky (škváry, břidličnaté výpěrky), dále na nepevné materiály s přirozenou nebo zvýšenou vlhkostí (různé kaly a haldoviny) a v neposlední řadě na suché prachové látky, kterými jsou především popílký [21].

Prvním výrobním krokem je úprava materiálu za účelem dosažení vlastností potřebných pro vytvoření kvalitní vsázky. Úprava je pro každou kategorii odlišná. Suché zrnité či kusové látky stačí jen promístit s vodou, u nepevných látek je potřebné surovinu rozemlít a posléze granulovat a u poslední zmiňované kategorie postačí látku většinou pouze granulovat, mletí přichází v úvahu v případě kolísavé jemnosti. Pro zajištění rovnoměrnějšího výpalu je ovšem možné mletí uskutečnit i u látek ostatních kategorií [21].

U vsázky se musí zohlednit také množství spalitelných látek, které při výpalu slouží jako palivo a garantují rovnoměrné působení žáru ve všech místech vypalovaného materiálu. Pokud je paliva nedostatek, hrozí nedostatečné slinutí s produkcí velkého množství částic o nejjemnějších frakcích, v opačném případě k tvorbě spečenců. Množství paliva má také vliv na rovnoměrnost prodyšnosti vsázky, která bývá největším technologickým problémem výroby jakostního agloporitu. Ke granulaci se užívá granulačních bubnů nebo sbalkovacích talířů. Množství vody ve zhotovených sbalcích má vliv na vlastnosti, pokud jsou suché, vykazují nízké pevnosti, příliš vlhké sbalky jsou zase měkké, snadno deformovatelné a náchylné ke slepování [21].

Výpal probíhá nejčastěji na aglomeračních roštech při teplotách 1100–1300°C, na kterých je uložena vertikálně se pohybující vsázka, přes kterou neustále pod tlakem proudí vzduch. Po

výšce probíhá postupné spékání sbalků. Výhodou tohoto způsobu výpalu je snadná kontrola a ovladatelnost a také umožnění okamžitého ukončení i zahájení procesu. Uplatnit lze však také šachtové a rotační pece [21].

Teplota, při které agloporit opouští prostor aglomeračního roštu, bývá kolem 900°C, proces pokračuje chlazením, které má přímý vliv na výslednou pevnost materiálu. Čím pomaleji chlazení probíhá, tím je dosaženo vyšších pevností. Příliš pomalé chlazení ale snižuje efektivitu výroby, a tak je k němu přistupováno pouze v případech, kdy jsou na výslednou pevnost s ohledem na oblast aplikace kladeny vysoké požadavky. Poslední fází je nadrcení spečenců a roztřídění podle požadovaných frakcí [21].

Vlastnosti hotového agloporitu jsou dosti odlišné nejen v závislosti na rychlosti chlazení, ale také na použitých vstupních surovinách a drcení spečenců. Objemová hmotnost hotového agloporitu se pohybuje mezi 600–1350 kg.m³, průvitost kolem 50 %, nasákavost v závislosti na textuře povrchů, resp. otevřené či uzavřené pórovitosti od 8 do 30 % a při pomalém chlazení může být u materiálu dosaženo pevností v tlaku až kolem 9 MPa [21, 33].

Nejčastěji je agloporit aplikován jako kamenivo do lehčených a tepelněizolačních malt, omítek a betonů, případně samostatně pro tepelněizolační zasypy. Pokud dosahuje vyšších pevností, tak je vhodný také pro betony konstrukčního charakteru. Nevýhodou je relativně vysoká energetická náročnost zpracování [21, 33].

2.5.4 Uměle vyráběná kameniva

Největším nedostatkem přírodních lehčených kameniv jsou proměnlivé vlastnosti a nehomogenita. Z těchto důvodů jsou možnosti jejich využití ve stavebnictví značně omezené. Řešením se ukázala úprava některých přírodních surovin, která dala vzniknout novým materiálům s vyšší stálostí a homogenitou uplatnitelným v praxi [21].

Historie výroby těchto nových materiálů sahá do druhého desetiletí 20. století a je spjatá se jménem Stephan John Hayde, podle kterého bylo pojmenováno první uměle vyrobené lehčené kamenivo – Haydit. Uplatnění našlo při stavbě lodí na sklonku první světové války. Ve stavebnictví se lehčené kamenivo začíná vyskytovat až po druhé světové válce, a to prvně v Dánsku pod označením leco. Náš průmysl se o výrobu expandovaných jíílů pokusil již v meziválečném období, nicméně do běžné stavební produkce se kamenivo dostalo až v roce 1956 otevřením keramzitky v Bratislavě [21].

Nejčastěji používanou úpravou přírodních hornin nebo zemin je expandování v žáru, kdy dochází k jejich provzdušnění a k následnému zakonzervování pórové struktury. Možným

způsobem jsou také úpravy při nižších teplotách za vzniku rozlískovaných slíd. V neposlední řadě k této skupině patří také dutá tělíska, resp. kuličky z cihlářských hlín, anebo pórovitého kameniva, zpevněná v žáru a též pórovité kamenivo s minimálními objemovými změnami během výroby. Ke snížení objemové hmotnosti dochází u tohoto kameniva vlivem odhořívání organických příměsí a snižováním obsahu vody [21].

2.5.4.1 Keramzit

Vstupní surovinou pro výrobu keramzitu jsou tavitelné hlíny, které se používají pro výrobu keramiky. Základní vlastností těchto zemin je schopnost nadýmání v žáru, kdy při vysokých teplotách dochází k objemové expanzi hmoty za vzniku uzavřených dutinek vyplněných plynem. Důsledkem je snížení objemové hmotnosti materiálu [21].

Předpokladem pro vznik tohoto dvoufázového vnitřního uspořádání je schopnost látky uzavřít její povrch, aby nedocházelo k úniku plynů vytvářejících se žářem uvnitř látky. Důležitá je také optimální míra viskozity zabraňující vzniku nadměrně velkých pórů, anebo úniku plynů, který by nedovolil vzniknout pórové vnitřní struktuře. Nutností je také uvolnění plynů ve chvíli vhodné k vytvoření vnitřní pórovité struktury. Látky splňující tyto předpoklady se označují jako pyroplastické [21].

Zajištění výše uvedených předpokladů je závislé na materiálovém složení i teplotě výpalu. Ta se obvykle pohybuje v rozmezí 1100 až 1200°C. Nezbytná je přítomnost určitého množství taviv, kterými jsou oxidy železa, vápníku, horčíku a alkálie. Obsah CaO by neměl překročit 5 % a oxidy železa by měly být přítomny v mezích 3–6 %. Procentuální zastoupení jednotlivých složek ovlivňuje teplotu tavení a slinutí. Slinutí ale není při procesu žádoucí, proto je potřebné výpal provádět takovým způsobem, aby nenastalo. Nadýmání způsobují organické uhelnaté látky přítomné v zemině. Jejich obsah však musí být regulován. Někdy zeminy obsahují i určité množství sirných sloučenin, které nejsou škodlivé pod podmínkou, že jsou schopny při žáru odtéct. V upraveném kamenivu je totiž již jejich výskyt nežádoucí. Roli hraje také textura zemin. Vhodné jsou jemnozrnné vysoce plastické zeminy s nízkým obsahem hrubozrnnějších složek s negativním vlivem na nadýmání. Expanzi také pomáhají slídoviny a minerál illit. Pokud se zaměříme na expandující plyny při tavení, je nutné zmínit vzduch, vodní páru, kyslík, vodík a různé oxidy – uhličitý, uhelnatý, siřičitý, sírový. Vodní pára a vzduch jsou obsaženy v surovině, kyslík se uvolňuje za zvýšené teploty rozkladem trojmocného železa, zbylé plyny vznikají také při zvýšení teploty rozkladem různých látek,

především uhličitany obsažených v organických složkách. Před výpalem je potřebné dbát na to, aby byla vstupní surovina homogenní [21].

Samotnému výpalu předchází sušení a předehřívání. Posléze se pokračuje výpalem s prudkým vzestupem teploty, to proto, aby nedošlo k odhoření organických látek dříve, než je potřebné pro vznik pórů. Za účelem zamezení úniku plynů zevnitř materiálu je nutné natavení pórů. Po výpalu přichází relativně dlouhotrvající fáze pozvolného chlazení vedeného tímto způsobem proto, aby bylo odstraněno vnitřní pnutí a zvýšena dosažená pevnost [21].

V praxi se lze setkat také s takzvaným granulovaným keramzitem, který se zpracovává trochu rozdílným způsobem. Nejčastěji se pracuje s hlinou ve formě plastického těsta, ale někdy i s materiálem suchým nebo mokrým. V případě výroby z plastického těsta je plastická hmota pomocí pásových cihlářských lisů vytvarována do válečků, které se následně vypalují v rotačních pecích vyhříváných nejčastěji zemním plynem nebo topnými oleji. Na rotačním bubnu probíhá chlazení, po kterém je keramzit tříděn, balen a podle potřeby expedován [21].

Možná je však také suchá výroba probíhající za pomoci trhacích válců nahrazujících složitější technologii předchozího způsobu výroby. Nevýhodou je nemožnost přimíchání dalších surovin a také nižší homogenita směsi. Před výpalem je surovina sušena kouřovými plyny s vysokou teplotou získaných jako odpadní produkt v rotačních pecích při výpalu, následuje mletí, granulace a výpal [21].

Univerzálním způsobem uplatnitelným prakticky u všech typů zemin je vypalování na slinovacích aglomeračních roštech. V tomto případě se surovinová vsázka před výpalem proloží pevným palivem, které při výpalu po kontaktu s proudícím vzduchem odhořívá a surovina expanduje. Rovnoměrné promíchání s palivem vede k homogennímu výpalu, jehož výsledkem je dokonale lehký, pórovitý a slinutý materiál. V porovnání s výrobky vypalovanými v rotačních pecích je při této technologii dosaženo nižší objemové hmotnosti, kterou ale doprovází také nižší pevnost. Podmínkou proveditelnosti je vhodné granulometrické složení umožňující vzduchu proudit při výpalu ve vertikálním směru a zajistit tak rovnoměrný výpal po celé výšce vsázky [21].

V západní Evropě se nejvíce uplatňuje původně Dánský způsob výroby, systém Leca. V tomto případě se v rotačních pecích bez dalších úprav zpracovává expandovaný mastný jííl. Otáčením pece je dosaženo vzniku kulovitých zrn, které se po vychlazení třídí dle zrnitosti [21].

Nejmodernější způsob zpracování využívá fluodizačních pecí. Ty se od klasických rotačních pecí liší hlavně rychlostí proudění vzduchu. Do pece jsou navedeny granálie, trychtýřovým výstupem situovaným v horní části pece odcházejí při výpalu velmi vysokou

rychlostí kouřové plyny, které s sebou strhávají sbalky z okrajových částí pece a vynášejí je do výše, vlivem ztráty tlaku v horní části však padají opět k zemi, čímž vzniká požadovaná cirkulace dávající vzniknout homogennímu materiálu se slinutým povrchem, který zvyšuje jeho pevnost. Výpál probíhá velmi krátce, cca 45 s. A palivem pecí bývá olej nebo plyn [21].

Hlavní výrobce keramzitu na našem území, LIAS Vintířov, sídlí v obci Vintířov nacházející se nedaleko Sokolova v západních Čechách. Pro výrobu používá středně zpevněného cypřišového jílovce těženého z nadložních skrývkových vrstev blízkého hnědouhelného dolu. Tento jílovec má optimální vlastnosti, bez nutnosti následné modifikace. Keramzit je zde vyráběn pomocí cihlářské sestavy ve formě granulí z plastického těsta, které je před výpalem v rotačních pecích lisováno. Výsledkem jsou oválná až peckovitá zrna s hladkým povrchem a rezavě hnědou barvou, které se dále třídí podle jednotlivých frakcí a expedují s obchodním názvem Liapor. Trochu jiného způsobu výroby užívají někteří zahraniční výrobci. Lisování před výpalem je vynecháno a tvorba keramzitových zrn z těsta je prováděna až při samotném výpalu převalováním po stěně pece. Cihlářskou pec schopnou vytvoření válečků nahrazují protlačovací mísidla se sítí o různých velikostech podle požadavků na průměr válečků [20, 21, 34].

Objemová hmotnost u nás vyráběného volně sypaného granulovaného keramzitu nabývá hodnot v rozmezí 300 až 700 kg.m⁻³, nejčastěji 500–650 kg.m⁻³. Hmotnostní nasákavost se pohybuje mezi 10 a 20 % a pevnost v tlaku je uváděna v rozmezí 2,8–4 MPa. Díky uzavřeným povrchům zrn je výhodou relativně malá schopnost vody pronikat do struktury, což se projevuje relativně nízkými hodnotami výše uvedené nasákavosti. Součinitel tepelní vodivosti dosahuje 0,09–0,15 Wm⁻¹K⁻¹. Vysoké hodnoty přísluší mezerovitosti, která u úzce tříděných frakcí dosahuje 40–45 % [21, 35].

Kromě Sokolovské pánve se lze s jílovcem vhodnými pro výrobu keramzitu na našem území setkat také u Malenovic a Slavičína nedaleko Zlína, na Jižní Moravě u Kyjova nebo ve východních Čechách v blízkosti Ústí nad Orlicí a České Třebové. Pro dostatečnou vydatnost západočeského ložiska však není v dalších lokalitách k těžbě důvod [32].

2.5.4.2 Kavitit

Jedná se o dnes již běžně nevyráběný materiál vzniklý z cihlářských hlín, ze kterých se s pomocí forem vytvářejí duté kuličky posléze vypalované při teplotách stejných jako u cihlářských výrobků, tedy kolem 900°C. Výsledkem jsou kuličky o průměru 10–30 mm a s tloušťkou stěny 1,5 až 3,5 mm. Pro dosažení těchto parametrů je nutné dokonalé

zpracování tělísek a použití středně plastických nebo plastických cihlářských hlín neobsahujících hrubé nečistoty. Hlavní aplikační oblastí byla výroba lehčených betonů [21].

Objemová hmotnost tohoto materiálu dosahuje $600\text{--}900\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, nasákavost bývá v rozmezí 17–20 % a hodnoty mezerovitosti se pohybují stejně jako u keramzitu kolem 40–45 % [21].

2.5.4.3 Expandit

Nejvíce používaným lehčeným kamenivem ve stavebním průmyslu je expandit. Svými vlastnostmi i způsobem výroby je podobný keramzitu. Odlišuje se ale vstupní surovinou pro jeho výrobu, kterou jsou jílovité břidlice s jemnozrnnou strukturou a laminární texturou tmavošedé barvy s vysokým výskytem illitu [21].

Výrobní proces expandované břidlice se skládá z několika fází. Nejprve je prováděno předdrcení, po kterém následuje drcení ve válcových drtičích za účelem vzniku zrn o maximální velikosti cca 25 mm. Protože existuje závislost mezi teplotou výpalu a velikostí zrn, je nutné před výpalem provést ještě roztřídění podle frakcí. Pak už přichází na řadu výpal v rotačních pecích o teplotě kolem 1150°C . Po něm břidlice postupuje přes vodu chlazený skluz do bubnového chladiče, kde probíhá její chlazení až na minimální teplotu 150°C . Postup třídění a expedice už je totožný s postupem užívaným u keramzitu. Nevýhodou břidlice je nebezpečí spékání zrn do velkých kusů a náchylnost tvorby nálepků v rotačních pecích. Nicméně i v případě, že dojde ke spečení zrn, zůstává materiál vysoce pórovitý, což mu po vytažení z pece a rozdrcení umožňuje normální použití. Průchod břidlice pecí trvá cca 70 min, z toho 20 min je břidlice za účelem expanze vystavována žáru. Palivem v pecích bývá nejčastěji uhlí [21].

Vnitřní struktura vzniklého kameniva je vysoce, avšak jemně pórovitá, což dokládá mj. objemová hmotnost dosahující $500\text{--}800\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, nejčastěji $550\text{--}650\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Nasákavost bývá kolem 13 %, tlaková pevnost nabývá ve srovnání s keramzitem hodnot vyšších [21].

Břidlice pro výrobu expanditu je nejčastěji získávána z odvalů vznikajících při těžbě břidlice pro střešní krytiny nebo je spjata s těžbou uhlí. Z nejvýznamnějších ložisek, které se nachází na našem území můžeme jmenovat Hrubou Vodu v Nížkém Jeseníku, lokalitu Mokrá a Křtiny u Brna, Nemojany u Vyškova. Výskyt ale zaznamenáváme také na dalších místech [21].

2.5.4.4 Vermikulit

Dalším druhem lehčeného kameniva, s kterým se lze běžně setkat je vermikulit. Stejně jako předchozí kameniva vzniká tepelnou expanzí přírodní suroviny, kterou je v tomto případě hořečnatohlinitý slídovitý křemičitan vzniklý zvětráváním slíd se jménem vermikulit. Rozdílný je princip expanze, která neprobíhá při dosažení pyroplastického stavu, nýbrž rozlískováním, což je proces charakteristický pro minerály s vrstevnatou krystalovou mřížkou tvořenou vrstvami slídy se strukturálně vázanou vodou. Zvýšením teploty dochází k dehydrataci a zvyšování tlaku vodní páry spojené s destrukcí krystalové mřížky, jejíž důsledkem je vzdalování slídových vrstev. Projevem je mnohanásobné zvětšení objemu ve směru kolmém na vrstvičky a značné snížení soudržnosti, a tedy i pevnosti, která se s ohledem na vedení expanze při teplotách nižších, než 1260°C nezvyšuje. Při této teplotě by totiž bylo dosaženo pyroplastického stavu, potažmo slinutí. Expandování je prováděno obvykle v rotačních pecích při teplotách 800–900°C [21, 32].

Jak již bylo naznačeno, expandovaný vermikulit vykazuje velmi nízké pevnosti, jeho předností je ale ve srovnání s ostatními materiály velmi nízký součinitel tepelné vodivosti, který se při běžných teplotách pohybuje kolem 0,06–0,08 W.m⁻¹K⁻¹. Objem se při expanzi zvětšuje 5 až 20 krát a objemová hmotnost bývá v rozmezí 60–200 kg.m⁻³ [21, 36].

Ložiska této suroviny jsou na našem území značně omezená. Menší ložisko je situováno nedaleko Dubiny u Zruče nad Sázavou. Největší těžená světová ložiska se nacházejí v USA a Jihoafrické republice, výroba však probíhá také v Argentině, Indii a mnoha dalších zemích. Na našem území se zpracováním zabývá firma Grena se sídlem ve Veselí nad Lužnicí, která vermikulit používá jako náhradu za azbest do různých deskových materiálů. Běžně se však pro jeho dobré tepelně izolační vlastnosti vermikulit používá i pro výrobu lehčených betonů a tepelně izolačních malt a omítek [21, 32].

2.5.4.5 Perlit

Ve stavebnictví asi nejrozšířenější uměle vyráběné lehčené kamenivo vyráběné z vulkanického ryolitového skla, perlitu, z chemického pohledu amorfního křemičitanu hlinitého. Název perlit vychází z textury materiálu připomínající navzájem spojené perličky. Vznik horniny je vázaný na sopečnou činnost, vzniká ochlazováním lávy vyvrhnuté na povrch při vulkanické erupci. Díky vysoké viskozitě při ochlazování magmatu nemohla proběhnout krystalizace, která by umožnila uniknout vodě obsažené ve materiálu. Tato skutečnost činí materiál schopným tepelné expanze [21].

Perlit se obvykle těží v povrchových lomech, ze kterých je dopraven na místa jeho dalšího zpracování, která jsou většinou situována v blízkosti míst odběru. A to z důvodu dopravní efektivity, stejné množství perlitu zaujímá po expanzi několikrát větší objem než před tepelnou úpravou, proto je výhodnější ho na delší vzdálenosti přepravovat v surovém stavu [21].

S ohledem na nejednotnou velikost těženého materiálu se před samotnou úpravou provádí drcení na čelistových či válcových drtičích. Konečná frakce je volena v závislosti na požadovaných vlastnostech a místu aplikace. Obvykle se perlit drtí na zrna do 2,4 mm, kdy se označuje jako jemný perlit, nebo se pracuje i se zrny většími, v tom případě se nazývá zrnitým perlitem [21].

V neupraveném perlitu s objemovou hmotností $1600\text{--}2000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ se obvykle vyskytuje kolem 2–3 % vody, z níž část je zakonzervována z doby tuhnutí magmatu a druhou část tvoří sekundární voda složená z vody adsorbované a zeolitické s nejpevnější vazbou ze slabě vázané molekulární vody. Předností zeolitické vody je její postupný únik při zahřívání, což má pozitivní vliv na expandování perlitu. Spolu s perlitem se v ložiscích vyskytuje někdy také obsidián, který je charakteristický vyšší objemovou hmotností ($2100\text{--}2400\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) a nižší pórovitostí [21].

Výpal perlitu je dvoustupňový. První fáze probíhá po dobu 10 až 20 minut při teplotě 350 až 500°C a jejím smyslem je snížení obsahu vody a rovnoměrné předehřátí hmoty před druhou fází. Při teplotách od 600°C začínají vznikat v materiálu póry, jejichž počet a velikost se při zvyšující se teplotě roste. Hlavní expanze však probíhá až při teplotě 900–1300°C. Teplota se upravuje v závislosti na zrnitosti, obsahu zbylé vody, chemickém složení surovin, ale i požadovaném objemu výsledného materiálu. Druhá fáze zpravidla nepřekračuje délku 1 min, u jemně mleté, snadno se nadýmající suroviny trvá pouhých 5–10 vteřin. Předehřátí v první fázi umožňuje expandovat hrubší frakce a snižuje tepelný náraz při expandování, což snižuje pravděpodobnost mechanického rozpadu, popraskání nebo roztříštění zrn způsobeného náhlým únikem většího množství vody v krátkém časovém úseku. Dvoustupňový výpal má pozitivní vliv na výslednou strukturu, která je vysoce pórovitá, přesto však rovnoměrná. Velikost póru se pohybuje mezi 0,05–0,1 mm a součinitel expanze nabývá hodnot 4 až 12. Nevhodné je při výpalu použití zrn větších, než 3 mm a opačně také zrn velmi jemných. Příliš velká zrna mají větší náchylnost k praskání spjatou s nedokonalou expanzí, opačně malá zrna se lepí na stěny pecí a vytvářejí prach s vysokou nasákavostí a velmi nízkou pevností. Expanze obsidiánu probíhá při teplotě kolem 1000°C, výsledný

produkt ve srovnání s perlitem vykazuje sice vyšší pevnosti, avšak menší objemové zvětšení [21].

V závislosti na zrnitosti perlitu jsou užívány různé typy pecí, často se speciální konstrukcí. Pokud se jedná o perlit s jemnou frakcí, setkáváme se s pecemi horizontálními rourovými, souprůdnými rotačními, či pecemi s vertikální orientací s různým řešením vkládání suroviny. Umístění topení může být horní, dolní, nebo etážové, surovina je často pálena ve vzosu. Hrubozrnější vsázky se vypalují v rotačních pecích rozdělených díky dvoustupňovému systému na dvě samostatné pece. Jako paliva se užívá výhradně plynu či topných olejů [21].

Výsledkem tepelné úpravy jsou drobné polyedrické pěnové kuličky bílé barvy o velmi jemné pórovitosti. Objemová hmotnost je ve srovnání s předchozími typy lehčeného kameniva mimořádně nízká s hodnotami v rozmezí 70–450 kg.m³. Platí pravidlo, že se zmenšujícím se rozměrem zrn objemová hmotnost klesá. Nedostatkem kameniva je nízká pevnost, která je ale bohatě vykompenzována velmi dobrými tepelně izolačními vlastnostmi s hodnotou součinitele tepelné vodivosti kolem 0,06 W.m⁻¹K⁻¹. S vysokou pórovitostí souvisí také vysoká nasákavost, která u nejjemnějších frakcí může dosahovat až 300 hmotnostních %. Pod 100 % se dostávají pouze velká málo expandovaná zrna. V případě některých aplikací může být vysoká nasákavost nepříznivá, ale jsou i oblasti, u kterých ji lze využít. Předností materiálu je vysoká tepelná odolnost [21].

Nejčastěji své uplatnění perlit nachází jako tepelně izolační materiál, pro zasypy stropů, jader, komínů a dalších dutých prostor, ale i zateplení podlah. Užívá se však často také do tepelně izolačních lehčených betonů a malt v kombinaci s nejrůznějšími pojivy (cementem, vápnem, sádrou, vodním sklem, atd.). Jemnozrný perlit je vhodný zvláště do tepelněizolačních omítek, které mohou být připravovány přímo na stavbě, nebo v podobě průmyslově vyráběných suchých maltových směsí, které se na stavbě mísí jen s vodou, čímž je zaručena jejich jakost. Vysoké nasákavosti perlitu se využívá u prostor s vysokou relativní vlhkostí, kde jsou aplikovány do tzv. antikondenzačních omítek fungujících na principu absorpce vzdušné vlhkosti. Plnivo mohou ale tvořit i u sanačních omítek používaných u zvlhlého zdiva. Jsou totiž schopny pohlcovat relativně velké množství vlhkosti, které po průchodu omítkou může být na druhé straně odpařeno do volného prostoru [21].

Hydrofobizací expandovaného perlitu silikonovou pryskyřicí vzniká vapol vytvářející tepelněizolační zasypané teplovodů, dalším produktem je vapex užívaný pro pohlcení ropných produktů při haváriích různého druhu. Kromě stavebnictví expandovaný perlit našel své místo i v jiných hospodářských odvětvích, například zemědělství, potravinářství nebo chemii.

Počátky výroby expandovaného perlitu spadají do období poválečného Československa, přesněji do roku 1965, kdy výrobu této suroviny zahájily Keramické závody v Košicích. Z výhradně českých výroben můžeme jmenovat závod v Šenově u Nového Jičína vzniklý v roce 1970, nebo firmu Perlit Praha, spol. s r.o. se sídlem v Praze – Kyjích [21, 37, 38].

Ložiska perlitu se nacházejí především v zahraničí a to v USA, Turecku, Řecku, či Japonsku. Tepelná úprava však probíhá také ve většině evropských zemí, z nichž je vhodné zmínit zvláště Francii a Německo, Velkou Británii, Belgii či Rakousko. Největší ložisko na Slovensku se vyskytuje v oblasti Pohronia v Hliníku nad Hronom s lomem v Lehôtke pod Brehmi, ze kterých je surovina nejčastěji dovážena také do českých závodů [20].

3 Experimentální část

3.1 Popis použitých materiálů

V laboratořích K 123 byly u materiálů užitých v experimentální části práce stanoveny následující vybrané charakteristiky:

- *prvkové složení*: měřeno pomocí přístroje ED-XRF spektrometr Quant X, Thermo Scientific,
- *hustota matrice*: zjišťováno pomocí heliového pyknometru Pycnomatic ATC, ThermoFisher SCIENTIFIC,
- *sypaná hmotnost ve volně loženém, resp. setřeseném stavu*: pomocí odměrného válce a digitální váhy, podle ČSN EN 1097-6 (Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva: Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti),
- *měrný povrch*: zjišťován Bleinovým přístrojem, permeabilní metodou, podle ČSN EN 196-6 (Metody zkoušení cementu - Část 6: Stanovení jemnosti mletí),
- *distribuce částic*: zjišťována síťovým rozborem, podle ČSN EN 933-1. (Zkoušení geometrických vlastností kameniva: Část 1: Stanovení zrnitosti – Síťový rozbor) pomocí prosévačky AS 200, Retsch a u velmi jemných látek (pojiva) laserovým analyzátozem částic ANALYSETTE 22 MicroTec plus, FRITSCH.

3.1.1 Vápenný hydrát

Materiál byl získán přímým odběrem ve vápence Čertovy schody nacházející se na okrese Beroun mezi obcemi Koněprusy, Tmaň a Suchomasty. Tato vápenka je největším výrobcem vápna a vápenných výrobků na našem území. Surovinu odebírá ze dvou lomů situovaných v bezprostřední blízkosti závodu, které jsou z chemického pohledu nejkvalitnějším zdrojem vápence v České republice. Od roku 1992 je vápenka součástí mezinárodní skupiny Lhoist ve vápence bylo odebráno stavební hašené vápno CL 90-S [39].

3.1.2 Hydraulické vápno

Bylo vybráno hydraulické vápno Celidur NHL 3,5 od firmy Otterbein se sídlem v německém Hesensku nedaleko města Grossenlüder. Vzhledem k tomu, že neobsahuje cement ani sádro, je zvláště vhodné pro aplikaci v oblasti památkové péče. Také je užíváno

při výstavbě ekologických a biologických domů a bytů, ale i pro sanaci starších omítkových vrstev. Výrobce garantuje vysokou odolnost vůči síranům, dobrou přilnavost ke kamennému podkladu a vysokou pružnost, díky které nedochází k vnitřnímu pnutí při tvrdnutí. Vápno je také schopné částečné ochrany zdiva před zanesením solemi. Surovinou pro jeho výrobu je mušlový vápenec těžený v místě zpracování, který je posléze pálen a hašen. Po smíchání s vodou dochází k silně alkalické reakci, která vede k hydratačnímu tvrdnutí [40].

3.1.3 Cement

Cement pro byl získán přímým odběrem ze sil cementářského závodu v Radotíně. Tento závod patří výrobcí Českomoravský cement, jež je součástí mezinárodního koncernu Heidelbergcement Group. Cementárna v pražském Radotíně byla založena v roce 1871, velkého rozmachu se dočkala v 30. letech 20. století, v období po 2. světové válce se stala národním podnikem, po roce 1989 byla postupně součástí několika větších společností. V současné době je, spolu se závodem Mokrá, největším producentem cementu v Česku. Surovina je těžena v blízkém lomu a po úpravě expedována ve formě pytlů, autocisternami nebo železničními vagony. Kromě cementu různých tříd je závod producentem také různých betonů a betonových směsí [41].

V práci jsem použil rychlovazný Portlandský cement CEM I 42,5 R, který je charakteristický rychlým nárůstem pevnosti, spjatým s vysokými počátečními pevnostmi a prudkým vývinem hydratačního tepla. Používá se pro rychlovazné betony běžných i vyšších pevnostních tříd a také pro betony předpínané. V běžné stavební produkci nachází uplatnění také při výrobě suchých omítkových a maltových směsí. Hlavní složkou je portlandský slínek tvořící 95–100 % celkové směsi. Zbýlých 0–5 % tvoří jako doplňující složka vápenec.

V technickém listu výrobce také uvádí hodnoty pevnosti v tlaku a tahu za ohybu stanovené podle ČSN EN 196-1 (Metody zkoušení cementu. Část 1: Stanovení pevnosti), viz. Tab. 1.

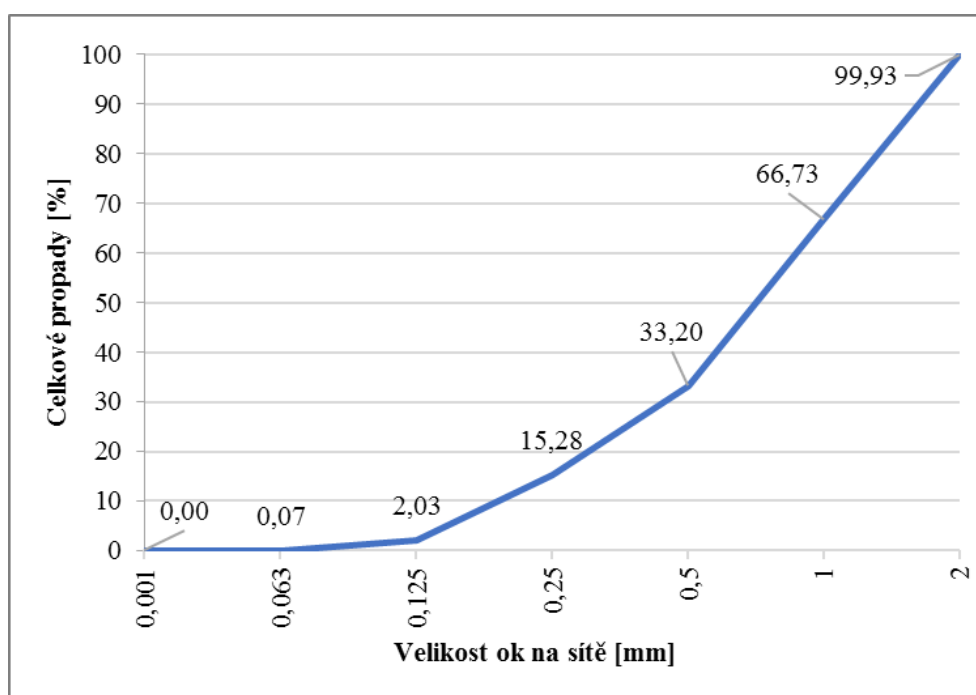
Tab. 1: Pevnost v tlaku a tahu za ohybu, CEM I 42,5 R [42]

Doba	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]
1 den	16	4
2 dny	30	5
7 dní	50	8
28 dní	60	9
56 dní	64	9
90 dní	66	9

3.1.4 Křemenný písek

Do záměsí byl použit filtrační křemičitý písek získaný z lomu na katastru obce Chlum u Doks na okrese Český Lípa. Tento lom patří společnosti Eurovia, jež je součástí skupiny Vinci. Písek je získáván těžebním a následným drcením železa. Tato jemnozrnná hornina je nahnědle šedé barvy s bělavými povlaky patřící zeolitu či kalcitu. Hrany lomů jsou ostré [43].

Pro účely experimentu došlo ke smíchání kameniva tří různých zrnitostí v hmotnostním poměru 1 : 1 : 1, označovaných jako PG 1 s frakcí 0,063–0,5 mm, PG 2 s frakcí 0,5–1 mm a PG 3 s frakcí 1–2 mm. Výrobce uvádí pro kamenivo s frakcí 0–2 mm objemovou hmotnost 2454 kg.m⁻³. Podle normy ČSN EN 933-2 (Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 2: Stanovení zrnitosti - Zkušební síta, jmenovité velikosti otvorů) byl na kamenivu proveden síťový rozbor (popsaný v kapitole 2.4.1), následující Obr. 4 je vyjádřením křivky zrnitosti směsi písku smíchaného v hmotnostním poměru 1 : 1 : 1.



Obr. 4: Křivka zrnitosti směsi kameniva PG 1, PG 2 a PG 3

3.1.5 Perlit

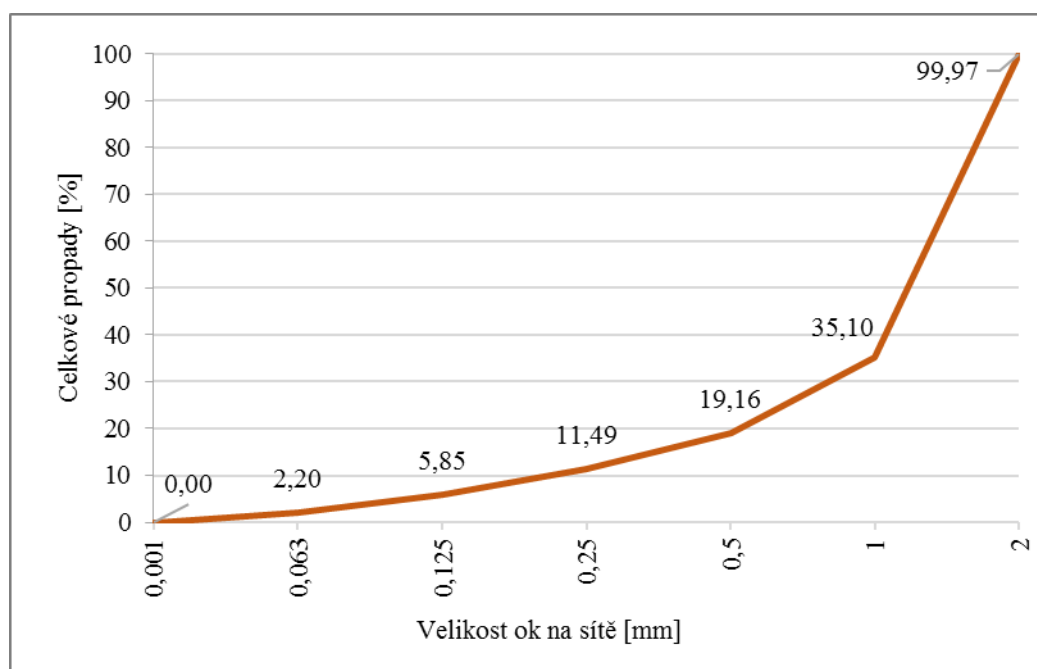
Jako lehčené plnivo byl zvolen expandovaný perlit od firmy Perlit Praha. Tento materiál je vyráběn tepelnou úpravou přírodního perlitu, horniny sopečného původu o chemickém složení i vlastnostech podobných sklu. Expandování probíhá při teplotách 950–1200°C za vzniku vysoce pórovitých zrn s objemem, ve srovnání s neupravenou horninou, až 10x větším. Jemně

zrnitý produkt je šedé barvy a má formu drobných dutých kuliček o velmi nízké objemové hmotnosti s vysokými tepelně a zvukově izolačními schopnostmi. Běžně se s ním lze setkat při výrobě lehčených izolačních omítek, malt a betonů. Může být také použit při výrobě izolačních zásypů a žáruvzdorných materiálů. Výhodou je jeho zdravotní nezávadnost a biologická i chemická inertnost [44].

V práci jsem použil expandovaný perlit EP 100 a EP 150 PB. Tyto materiály se vzájemně liší zrnitostí, přičemž frakce 0–0,5 mm náleží perlitu EP 100 a frakce 0,5–2 mm EP 150 PB, u kterého výrobce deklaruje minimálně 50% zrnitostní podíl nad 0,5 mm.

Obě frakce byly následně smíchány v poměru 1 : 4, kdy větší díl příslušel perlitu EP 150 PB. Důvodem smíchání kameniva dvou různých frakcí byla snaha se granulometrií přiblížit směsi křemenného písku. Kromě výše uvedených měření byla podle ČSN EN 1097-6 (Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti) zjišťována hmotnostní nasákavost měřená 24 hod po ponoření kameniva do vody. Hodnota hmotnostní nasákavosti dosáhla 199,6 %.

Výsledky síťového rozboru provedeného na směsi kameniva zobrazuje Obr. 5, z něhož je patrné zastoupení všech frakcí v dostatečné míře.



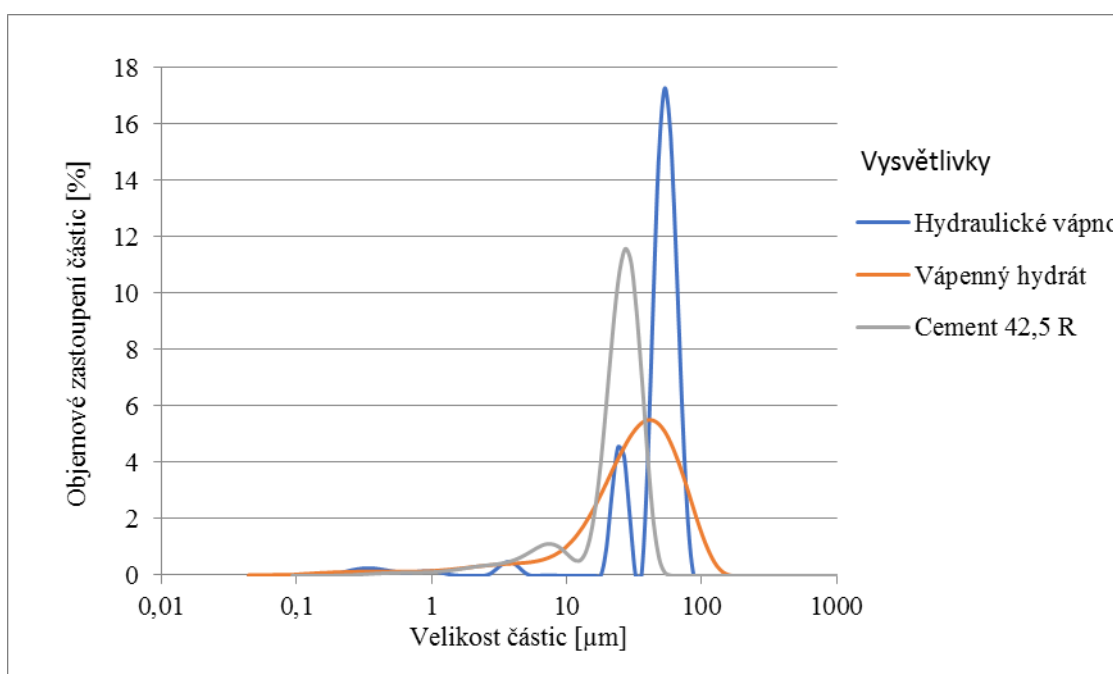
Obr. 5: Křivka zrnitosti expandovaného perlitu

3.1.6 Laboratorně zjišťované vlastnosti

Výsledky distribuce částic zjišťované u jemně zrnitých materiálu (pojiv) jsou prezentovány v Tab. 2, grafickému vyjádření objemového zastoupení částic je věnován Obr. 6.

Tab. 2: Velikost částic

Procentuální zastoupení	Velikost [μm]		
	Vápenný hydrát CL 90-S	Hydraulické vápno Celidur NHL 3,5	Cement CEM 42,5 R
Freq d_{10}	0,80	23,50	6,00
Freq d_{50}	4,30	52,40	22,80
Freq d_{90}	50,80	69,10	32,40



Obr. 6: Srovnání objemového zastoupení velikostí částic užitých pojiv.

Jak je vidět z výsledků zastoupení a na obrázku, nejjemnější zrnitost má cement, vápenný hydrát se skládá ze zrn s relativně velkým zrnitostním rozpětím a hydraulické vápno je složeno ze zrn s převažujícími dvěma velikostmi.

Tab. 3: Chemické složení použitých materiálů

Složka	Obsah [hmotnostní %]			
	Vápenný hydrát CL 90-S	Hydraulické vápno Celidur NHL 3,5	Cement CEM 42,5 R	Perlit EP 100 a EP 150 PB
SiO ₂	0,10	6,10	19,0	76,70
TiO ₂	0,00	0,20	0,30	0,10
Al ₂ O ₃	0,10	3,50	4,30	12,60
Fe ₂ O ₃	0,10	4,10	2,40	1,50
CaO	98,70	82,10	62,90	1,20
MgO	0,40	1,90	1,80	0,10
K ₂ O	0,00	1,10	0,80	5,00
Na ₂ O	0,00	0,20	0,10	2,80
SO ₃	0,10	0,20	3,20	-

Tab. 4: Základní vlastnosti

Veličina	Vápenný hydrát CL 90-S	Hydraulické vápno Celidur NHL 3,5	Cement CEM 42,5 R	Perlit EP 100	Perlit EP 150 PB	Perlit směs EP 100 a EP 150 PB 1 :4
$\rho_{\text{syp vol}} [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	469,0	671,0	1167,0	55,0	233,0	190,0
$\rho_{\text{syp set}} [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	536,0	828,0	1381,0	73,0	279,0	237,0
$\rho_{\text{mat}} [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	2211,0	2590,0	3129,0	651,0	572,0	578,0
měrný povrch [m ² ·kg ⁻¹]	2211,0	1090,0	360,0	-	-	-

3.2 Přehled receptur a příprava zkušebních vzorků

Celkem bylo připraveno 15 receptur o různém materiálovém složení, které lze podle použitého pojiva rozdělit do tří skupin – s pojivem čistě vápenným, s vápenocementovým a s vápnem hydraulickým. Jako plniva byla použita směs křemenného písku a expandovaného perlitu v různém poměrovém zastoupení.

Zhotoveny byly tři sady referenčních zkušebních těles s plnivem ve formě křemenného písku. U dalších vzorků došlo k částečné (či úplné) náhradě křemenného písku expandovaným perlitem. Množství záměsové vody bylo upraveno tak, aby bylo dosaženo konstantní hodnoty rozlivu čerstvé omítkové směsi 160 ± 5 mm stanovené s použitím setřásacího stolku podle

normy ČSN EN 1015-3 (Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)).

Z každého druhu pojiva bylo vyhotoveno po pěti zkušebních sadách vzorků. První (referenční) sada obsahovala 100% podíl plniva z křemenného písku. Dále bylo plnivo nahrazeno objemově 25, 50, 75 a 100 % expandovaným perlitem, čímž vznikly zbylé čtyři sady zkušebních těles.

Vzorky s vápenným pojivem byly označeny písmenem „M“, vápenocementové dostaly zkratku „VC“ a vzorky z hydraulického vápna „NHL“. Referenčním sadám (bez náhrady lehčeným plnivem) bylo přiděleno „-R“, v případě náhrad plniva expandovaným perlitem písmeno „P“, po kterém následovala ještě upřesňující informace, kolik procent křemenného písku bylo nahrazeno (25, 50, 75, 100). Tímto způsobem byly sestaveny celkem tři skupiny vzorků vždy s pěti různými kombinacemi.

V následujících Tab. 5–7, jsou uvedeny použité receptury jednotlivých záměsí.

Tab. 5: Receptury malt s vápenným pojivem

Vápenné malty					
Složka	Zastoupení v kg.m ⁻³				
	M-R	MP 25	MP 50	MP 75	MP 100
Vápenný hydrát	326,0	337,0	366,0	385,0	408,0
Písek 0.0/0.5	435,0	337,0	243,0	128,0	-
Písek 0.5/1.0	435,0	337,0	243,0	128,0	-
Písek 1.0/2.0	435,0	337,0	243,0	128,0	-
Perlit EX 100	-	3,0	5,0	9,0	11,0
Perlit PB 150	-	42,0	89,0	141,0	188,0
Voda	391,0	320,0	266,0	200,0	134,0

Tab. 6: Receptury malt s vápenocementovým pojivem

Vápenocementové malty					
Složka	Zastoupení v kg.m ⁻³				
	VC-R	VCP 25	VCP 50	VCP 75	VCP 100
Vápenný hydrát	242,0	240,0	250,0	262,0	274,0
CEM I	242,0	240,0	250,0	262,0	274,0
Písek 0.0/0.5	452,0	336,0	234,0	122,0	-
Písek 0.5/1.0	452,0	336,0	234,0	122,0	-
Písek 1.0/2.0	452,0	336,0	234,0	122,0	-
Perlit EX 100	-	2,0	5,0	7,0	10,0
Perlit PB 150	-	41,0	86,0	124,0	173,0
Voda	348,0	264,0	210,0	157,0	99,0

Tab. 7: Receptury malt s pojivem na bázi hydraulického vápna

Malty z hydraulického vápna					
Složka	Zastoupení v kg.m ⁻³				
	NHL-R	NHLP 25	NHLP 50	NHLP 75	NHLP 100
NHL	410,0	412,0	417,0	420,0	423,0
Písek 0.0/0.5	465,0	351,0	236,0	119,0	-
Písek 0.5/1.0	465,0	351,0	236,0	119,0	-
Písek 1.0/2.0	465,0	351,0	236,0	119,0	-
Perlit EX 100	-	2,0	4,0	6,0	9,0
Perlit PB 150	-	39,0	79,0	120,0	161,0
Voda	308,0	223,0	142,0	80,0	21,0

Přípravě zkušebních těles předcházelo zjištění vhodné konzistence a výpočet hmotnostního zastoupení jednotlivých složek připravované směsi, který byl posléze prakticky ověřen vytvořením pokusných záměsí a stanovením hodnoty rozlivu, za kterou je, podle Tab. 2 normy ČSN EN 1015-2 (Zkušební metody malt pro zdivo – Část 2: Odběr základních vzorků malt a příprava zkušebních malt) pro čerstvé malty s objemovou hmotností v rozmezí 600 až 1200 kg.m⁻³ považováno 160 ± 5 mm, Obr. 7. Hodnota rozlití byla stanovena podle postupu uvedeném v normě ČSN EN 1015-3 (Zkušební metody malt pro zdivo – Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím setřásacího stolku)). K této zkoušce je zapotřebí setřásací stůl s deskou, kovový kužel, dusadlo, vlhká tkanina a minerální olej. Před započítáním zkoušky byla deska setřásacího stolku i vnitřní povrch kovového kužele, včetně okraje, setřeny vlhkou tkaninou a posléze potřeny tenkou vrstvou oleje. Kovový kužel byl umístěn na desku stolku a ve dvou vrstvách naplněn čerstvou směsí. Každá vrstva byla pomocí 10 lehkých úderů dusadlem rozprostřena po vnitřním prostoru kužele. Poté došlo za pomoci špachtle k odstranění přebytečné malty na horním okraji a ke znovu otření desky v okolí kužele za účelem získání maximálně suché a čisté plochy. Krouživými pohyby se dosáhlo postupného zvednutí kužele a roztečení čerstvé malty po desce, kterému bylo ještě napomoženo 15 zhutňovacími rázy vyvolanými otáčením kliky setřásacího stolku s frekvencí 1 s. Poté byl ve dvou na sebe kolmých směrech změřen průměr koláče malty. Pokud se naměřená hodnota shodovala s normou, zastoupení jednotlivých složek záměsí bylo považováno za vyhovující, pokud nikoliv, došlo k úpravě receptury – vodního součinitele.



Obr. 7: Stanovení konzistence čerstvé malty na setřásacím stolku

Výroba zkušebních těles sestávala z několika dílčích kroků. Před vytvořením záměsí bylo potřebné navážít jednotlivé složky (pojivo, plnivo, voda) pomocí váhy ExplorerPro s přesností 0,1 g a vsypat všechny složky plniva do jedné nádoby. Výjimku tvořil perlit, který byl navážen, nasycen vodou a do záměsí byl aplikován v mokřém stavu. Volná voda obsažená v perlitu se stala součástí záměšové vody a byla zohledněna při výpočtu vodního součinitele. Poté bylo postupováno v souladu s normou EN 196-1 stanovující způsob a časový průběh míchání záměsí v míchačce. Použita byla automatická míchačka na cementy a malty FORM+TEST PRÜFSYSTEME, viz. Obr. 8.

Jednotlivé kroky a jejich časové vymezení jsou pro přehlednost vypsány v bodech:

- 1) sejmутí míchací nádoby z míchačky a vsypání pojiva,
- 2) smíchání záměšové vody s pojivem a umístění nádoby zpět do míchačky,
- 3) zapnutí míchačky na I. rychlostní stupeň,
- 4) za stálého strojového míchání se začátkem v čase 30 s po zapnutí míchačky po dobu 40 s vsypání plniva (kameniva) za pomoci trychtýře,
- 5) v čase 60 s od zapnutí míchačky přepnutí na II. rychlostní stupeň,
- 6) v čase 90 s od počátku míchání vypnutí míchačky, vyjmutí nádoby a ruční promíchání za pomoci špachtle za účelem zamezení pozůstatku nsmíchaných složek v blízkosti dna,
- 7) po 90 s od vyjmutí nádoby její opětovné osazení na míchačku a její spuštění na II. rychlostní stupeň,
- 8) vypnutí míchačky v čase 240 s od jejího prvního spuštění,
- 9) vyjmutí nádoby se záměsí.



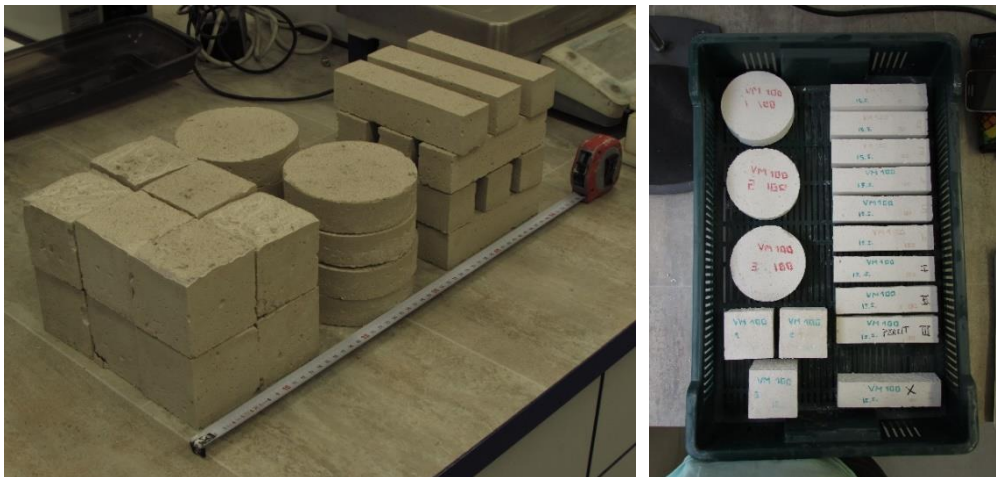
Obr. 8: Vlevo: vážení kameniva do záměsi, vpravo: míchání záměsi v míchačce

Za pomoci zednické lžice následovalo uložení záměsi do forem, které byly ještě před tím vymazány olejem. Ukládání bylo realizováno v jedné vrstvě a poté bylo provedeno zhutnění několika rázy, přebytečná malta na povrch odstraněna a povrch lžící uhlazen do roviny. Po zaplnění všech forem došlo k překrytí sady vzorků plastovou neprodyšnou fólií za účelem zamezení odpařování záměsové vody. Po dobu tří dnů byly vzorky ponechány v laboratoři při teplotě $21 \pm 2^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti 35–45 %, dobu zrání (25 dní) strávily v přepravkách vyskládaných do kádě s konstantní teplotou $22 \pm 2^\circ\text{C}$ a relativní vlhkostí $67 \pm 5 \%$. Po uplynutí této doby byly vzorky přemístěny ze skladovacích prostor zpět do laboratoří, kde byly postoupeny laboratorním experimentům popsaným v následující kapitole.



Obr. 9: Vlevo: plnění forem čerstvou maltovou směsí; vpravo: vzorky před odbedněním

S ohledem na měření, která měla být na vzorcích posléze prováděna, byl zvolen počet a rozměry potřebných vzorků. Celkem byla zhotovena zkušební tělesa tří různých tvarů a velikostí. Trámce o velikosti 40 x 40 x 160 mm, dále krychle s velikostí hrany 70 mm a válce o průměru 115 mm a výšce 35 mm.



Obr. 10: Vlevo: sada zkušebních těles po odbednění: vpravo: vzorky připravené k provádění experimentů

S ohledem na vymezené cíle výzkumu bylo nejdříve definováno, jaká měření bude potřebné na zkušebních tělesech provádět. Normy stanovují minimální počet opakování experimentu, aby se zkouška dala považovat za statisticky průkaznou. V souvislosti s tímto faktem byl určen nezbytný počet zkušebních těles.

Prováděné experimenty byly zaměřeny na různé skupiny vlastností. Nesmí se však zapomenout na jejich vzájemnou provázanost, která plyne z fyzikálně-chemické podstaty vzorků. Tuto skutečnost lze ilustrovat například na přímé závislosti mezi objemovou hmotností a tepelnou vodivostí. Přesto, že každá charakteristika patří do jiné skupiny, se změnou jedné z nich se dá zároveň očekávat pokles či vzrůst druhé.

Prováděná měření v rámci této práce je možné rozdělit do několika skupin. První z nich tvoří základní vlastnosti, dále jsou to mechanické vlastnosti a nedílnou součástí jsou také tepelné a vlhkostní charakteristiky. Následující část je věnována jednotlivým veličinám a pracovním postupům, pomocí kterých probíhalo měření.

Pokud není uvedeno jinak, měření probíhala v laboratořích s konstantní teplotou $22 \pm 2^\circ\text{C}$ a relativní vlhkostí 35–45 %, kterých bylo dosaženo za pomoci klimatizační jednotky.

3.2.1 Základní vlastnosti

Do této skupiny se řadí objemová hmotnost, hustota a pórovitost.

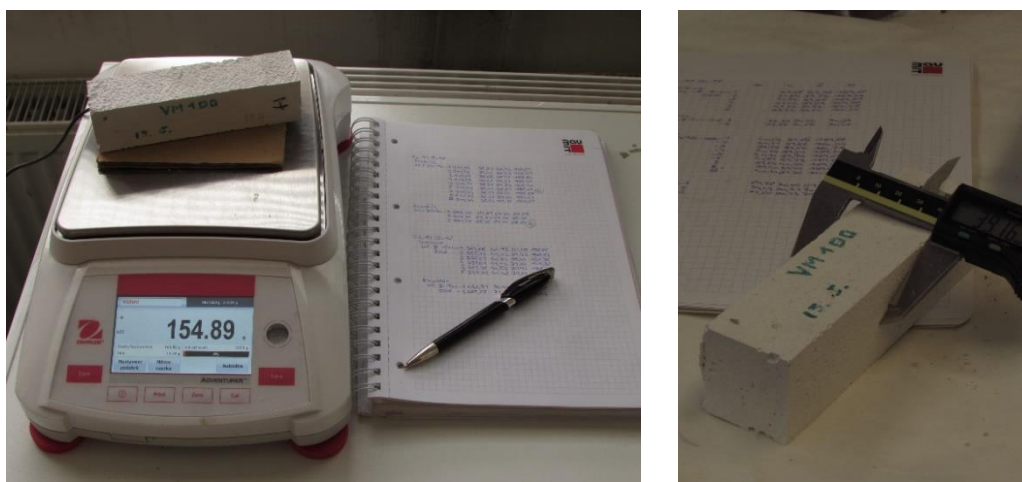
3.2.1.1 Objemová hmotnost

Zkouška byla prováděna gravimetrickou metodou na zkušebních trámcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm v souladu s normou ČSN EN 1015-10 (Zkušební metody malt pro zdivo – Část 10: Stanovení objemové hmotnosti suché zatvrdlé malty). Na vzorcích byla postupně pomocí digitálního posuvného měřidla zjišťována výška, šířka a délka, každý z těchto rozměrů vždy ve třech místech. Výsledná hodnota se získala aritmetickým průměrem naměřených hodnot. Měření probíhalo vždy na 6–9 zkušebních trámcích a 2–3 krychlích. Ve druhém kroku došlo ke zvážení vzorků na váze Ohaus Adventurer s přesností 0,01 g. Posledním krokem bylo provedení výpočtu, který sestává z jednoduchého vztahu:

$$\rho_v = \frac{m}{b \cdot h \cdot l} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (12)$$

kde je ρ_v objemová hmotnost [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 m hmotnost vzorku [g],
 b šířka vzorku [mm],
 h výška vzorku [mm],
 l délka vzorku [mm].

Aritmetickým průměrem výsledků měření zkušebních těles byly získány výsledné hodnoty prezentované ve poslední části této práce.



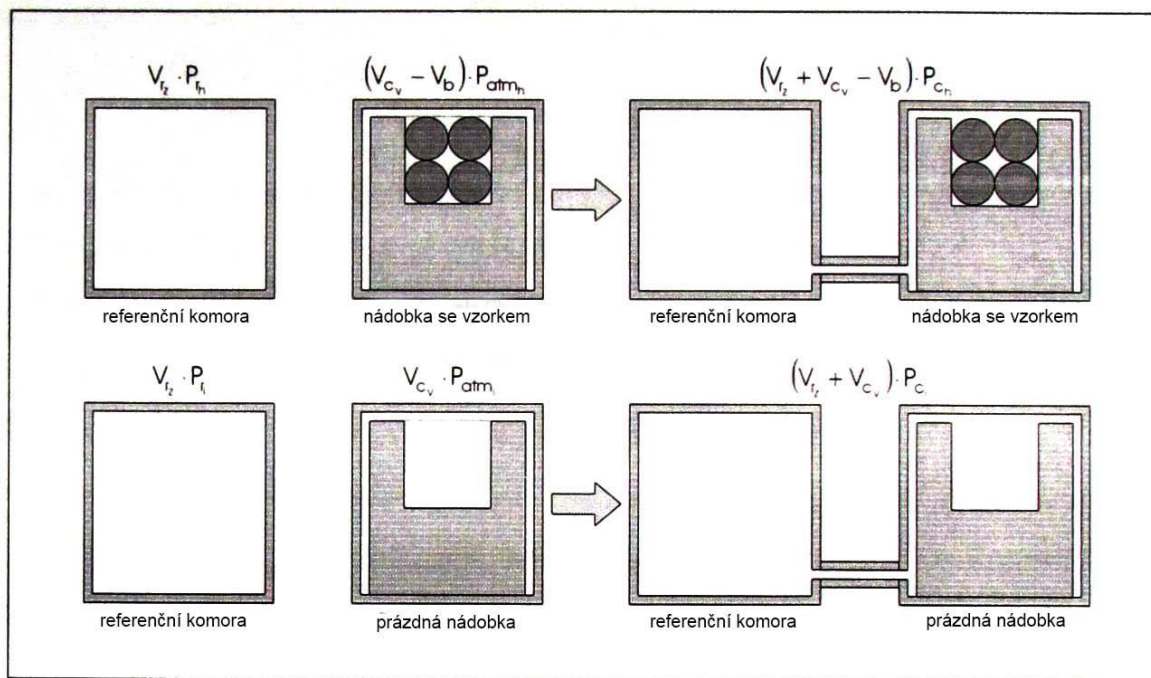
Obr. 11: Vlevo: vážení vzorků na digitální váze: vpravo: měření délek posuvným měřidlem

3.2.1.2 Hustota matrice

Hustota je definována jako hmotnost látky vztažená na jednotku objemu. Do objemu se však, narozdíl od objemové hmotnosti, nezapočítávají mezery mezi pevnou fází (póry, kaverny, dutiny). Pro tělesa skládající se pouze z pevné fáze se tedy obě veličiny rovnají, to ovšem není případ maltovin, jejichž struktura je složena z pevné i plynné složky – matrice, kterou prostupují různě velké póry. Měření objemu pravidelného tělesa, kde do objemu počítáme pevnou i plynnou fází, je záležitostí relativně jednoduchou, horší je to však v případě, kdy chceme zjistit pouze objem matrice.

Za tímto účelem se používá metody zvané pyknometrie. Princip spočívá v tom, že předem zvážený vzorek je umístěn do nádoby o známém objemu, která je posléze vyplněna médiem. Ze znalosti objemu nádoby a množství média, která vyplnila prostor nádoby získáme rozdílem hodnot objem, který zaujímá matrice zkoušeného tělesa. Prostupnost tělesa tekutinou (plynem) je však závislá na velikosti pórů, resp. velikosti molekul vyplňující látky. Vzhledem ke snaze dosáhnout co nejpřesnějších výsledků se preferuje pro vyplnění nádoby použití srovnávací tekutiny s velmi malými rozměry molekul, nejčastěji helia [19].

Měření probíhá pomocí automatických heliových pyknometrů s vysokou přesností. Přístroj je po zadání vstupních údajů o měřeném vzorku (hmotnosti) a typu použité nádoby schopen samostatného měření, jehož výsledkem je objem měřeného vzorku bez pórů. Konkrétně se zkušební postup skládá z několika dílčích kroků. Přístroj vpustí pod známým tlakem helium do referenční komory, poté je tentýž objem helia přečerpán do nádoby se vzorkem, vlivem změny objemu dojde ke změně tlaku. Ze znalosti objemu referenční komory a prázdné nádoby, atmosférického tlaku a tlaku pod kterým byl plyn vpuštěn do komory i nádoby se vzorkem je přístroj schopen vypočítat objem matrice. Obr. 12 schematicky vyjadřuje pracovní postup přístroje Pycnomatic ATC, ThermoFisher SCIENTIFIC, který byl pro měření vzorků omítek [45].



Obr. 12: Schématický náčrt postupu měření přístroje Pycnomatic ATC, ThermoFisher SCIENTIFIC [45]

Výpočet objemu matrice přístroj provádí na základě matematických rovnic, na tomto místě je uveden výsledný tvar po úpravách:

$$V_{mat} = V_b + V_{rz} \cdot \frac{P_{rh} - P_{ch}}{P_{ch} - P_{atmh}} \quad [\text{m}^3], \quad (13)$$

kde je

- V_{mat} objem matrice vzorku [m^3],
- V_b objem nádoby se vzorkem [m^3],
- V_{rz} objem referenční komory [m^3],
- P_{rh} tlak v nádobě se vzorkem [Pa],
- P_{ch} tlak v referenční komoře [Pa],
- P_{atmh} atmosférický tlak okolního prostředí [Pa] [45].

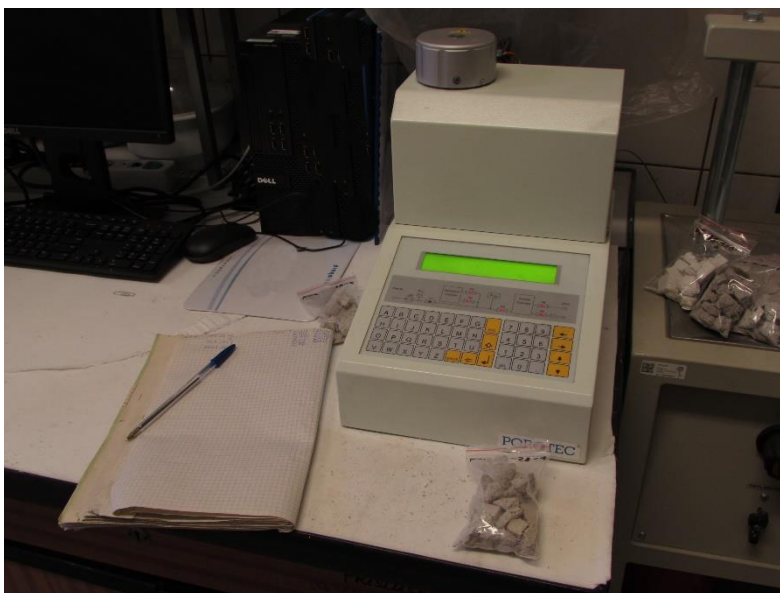
Ze znalosti objemu matrice a hmotnosti vzorku lze podle jednoduchého vzorce dopočítat hustotu matrice:

$$\rho_{mat} = \frac{m}{V} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}], \quad (14)$$

kde je

- ρ_{mat} hustota matrice [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
- m hmotnost vzorku [kg],
- V objem matrice vzorku [m^3] [18].

K měření hustoty matrice bylo použito částí zkušebních těles zbylých z pevnostních zkoušek. Při výběru byl kladen důraz na použití těch částí vzorků, u kterých nebyla vlivem mechanického stlačování v lisu porušena vnitřní struktura – tedy části krajní. Ty byly následně opatrně nalámány na drobnější části a uloženy do vakuové sušárny s teplotou $60 \pm 5^\circ\text{C}$. Po dosažení ustálené hmotnosti byla stanovena jejich hmotnost na digitální váze Ohaus Discovery s přesností 0,00001 g. Změřená hmotnost byla zadána jako vstupní hodnota při vložení vzorku do nádoby přístroje Pycnomatic ATC, ThermoFisher SCIENTIFIC, poté došlo k ověření otevření kohoutu regulujícího přísun helia do zařízení a měření bylo spuštěno. Po ukončení procesu došlo k odečtení naměřených hodnot (zobrazených na displeji přístroje). Poté se měření opakovalo u dalších vzorků.



*Obr. 13: Přístroj Pycnomatic ATC, ThermoFisher SCIENTIFIC
pro měření hustoty matrice*

3.2.1.3 Otevřená pórovitost

Jedná se o objem pórů obsažených v materiálu, které jsou spojené s povrchem látky. Kromě těchto pórů rozlišujeme ještě póry uzavřené. Ty se od předchozích liší tím, že nejsou propojeny s dalšími póry a tvoří uzavřené dutinky, nepřístupné z vnějšku. Problém uzavřených pórů spočívá v tom, že jsou velmi těžko identifikovatelné a kvantifikovatelné. Z tohoto důvodu se nejčastěji při charakterizaci materiálů setkáváme pouze s pórovitostí otevřenou. Vznik otevřených pórů je u maltovin spjatý s odpařováním vody při tuhnutí. Velikost, tvar i objem pórů v materiálu má přímý vliv na vlhkostní, tepelně fyzikální i

mechanické vlastnosti. Otevřené póry kromě toho ovlivňují schopnost difúze kapalin a plynů materiálem [19].

Pórovitost je definována jako objem pórů obsažený v materiálu ku jeho celkovému objemu a je vyjadřována bezrozměrným číslem nebo v procentech. Vypočítá se podle vztahu:

$$p = 1 - h = 1 - \frac{\rho_v}{\rho_{mat}} \quad [- ; \%], \quad (15)$$

kde je

- p pórovitost [- ; %],
- h hutnost [- ; %],
- ρ_v objemová hmotnost [kg.m⁻³],
- ρ_{mat} hustota matrice [kg.m⁻³] [19].

Hodnoty pórovitosti zkušebních těles byly vypočteny pomocí výše uvedeného vzorce na základě znalosti jejich objemové hmotnosti a hustoty matrice získané z předchozích měření.

3.2.2 Mechanické vlastnosti

Tuto skupinu vlastností lze svým způsobem označit také za základní. Informuje nás o tom, do jaké míry je materiál schopný odolávat vnějšímu zatížení, aniž by došlo k nevratnému porušení jeho vnitřní struktury a ztrátě pevnosti nebo soudržnosti. I když by se mohlo zdát, že tyto parametry jsou důležité pouze u materiálů tvořících nosné konstrukce, je nutné se jimi zabývat také u dalších materiálů, ke kterým řadíme i omítky. Pevnost omítek souvisí s odolností vůči vlivům vnějšího prostředí, s jejich chováním na styku vrstev odlišného stáří i s přílnavostí k podkladu. Úkolem omítek je rovněž redistribuce zatížení způsobeného objemovými změnami podkladních vrstev a konstrukcí (vyvolanými teplotními výkyvy). Dalšími ovlivňujícími faktory roztažnosti jsou změny vlhkosti a vlhkost obsažená v materiálu, která se v zimních měsících mění na pevné skupenství (led) spojené se zvětšením objemu. Nebezpečná je pro materiál také krystalizace solí uvnitř omítek, která může mít z mechanického pohledu stejný efekt jako led. V obou případech dochází při plném nasycení pórů k vnitřním tlakům, což se při nedostatečné pevnosti může projevit ztrátou soudržnosti („rozpadem“) materiálu.

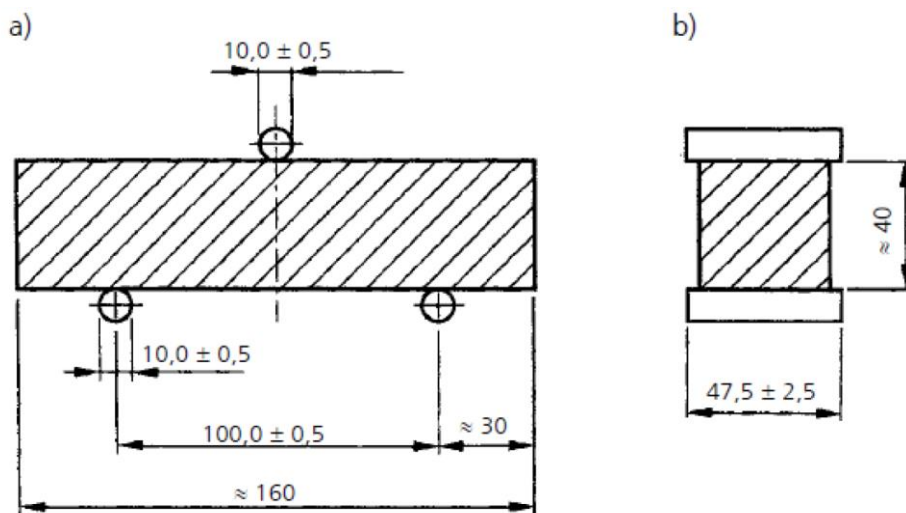
Pevností materiálu se rozumí schopnosti vzdorovat silovým účinkům. Překročení meze pevnosti se u křehkých materiálů projevuje porušením, vznikem tahových trhlin kolmo na směr působícího vnitřního napětí nebo deformací vnitřní struktury [19].

Tato kapitola je věnována vysvětlení i popisu měření pevnosti v tahu za ohybu, pevnosti v tlaku a dynamickému modulu pružnosti, které byly na zkušebních vzorcích testovány.

3.2.2.1 Pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu je testována u materiálů, které dosahují výrazně vyšších pevností v tlaku než v tahu. Zpravidla se jedná o křehké materiály, jako je beton, keramika, ale i maltoviny, za které pokládáme i omítky. Při tomto testování dochází k prvnímu porušení, vzniku trhliny, na straně tažených vláken, a díky okamžitému vyčerpání tahové pevnosti materiálu se trhlina rychle šíří ze spodní části směrem vzhůru až dojde k prolomení průřezu za vzniku dvou zlomků zkušebního tělesa – trámce. Porušení nastává v místě největšího ohybového momentu, který bývá v případě symetricky působícího středového zatížení situován doprostřed průřezu [19].

Tento druh pevnosti se stanovuje pomocí tříbodového zatěžování, které díky postupnému zvyšování zatěžovací síly způsobí porušení zkušební vzorku. Síla potřebná k porušení se zaznamená pro výpočet pevnosti. Zkušební postup uvádí norma ČSN EN 1015-11 (Zkušební metody malt pro zdivo – Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku). Testování probíhá na trámčích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm, aby mohla být zkouška považována za průkaznou, je nutné ji opakovat minimálně na 3 vzorcích stejného složení. Obr. 14 zachycuje uložení zkušebního tělesa do zkušebního stroje (násady) včetně rozměrového uspořádání [46].



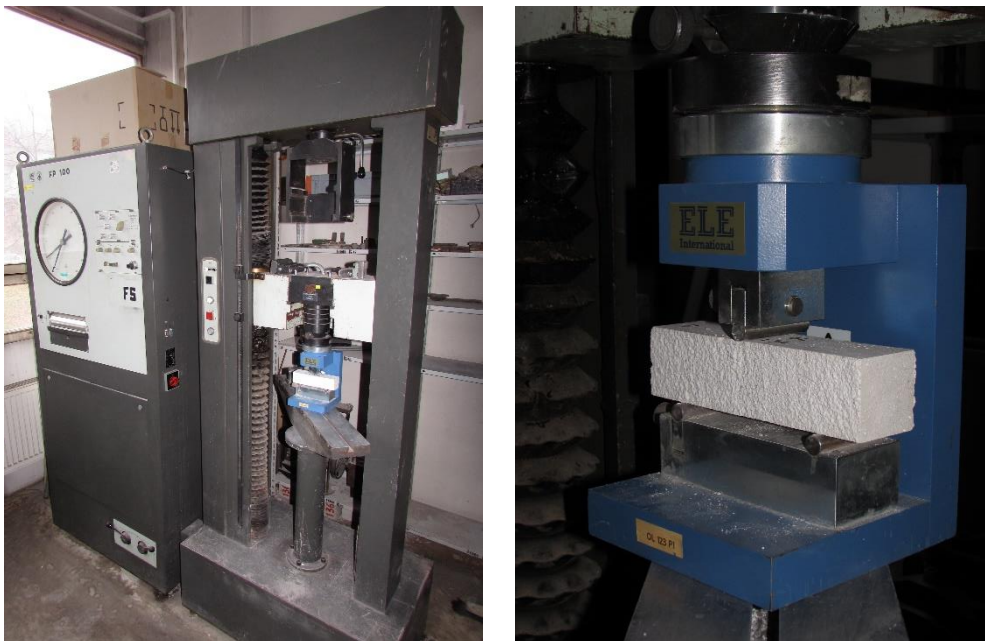
Obr. 14: Uložení a rozměrové uspořádání vzorků na ocelových válcích zkušebního přístroje (rozměry uvedeny v mm) [46]

Výpočet pevnosti v tahu za ohybu je prováděn ze znalosti rozměrů zkušebních vzorků, prostorového uspořádání vzorku, zkušebního zařízení a síly, která způsobila porušení tělesa a sestává z následujícího vztahu:

$$f_{btm} = 1,5 \frac{F \cdot l_p}{b \cdot d^2} \quad [\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}], \quad (16)$$

kde je f_{btm} pevnost v tahu za ohybu [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$],
 F maximální zatížení na zkušební těleso [N],
 l_p vzdálenost mezi osami podpěrných válců [mm],
 b šířka zkušebního tělesa [mm],
 d výška zkušebního tělesa [mm] [46].

Zkouška vzorků omítek byla provedena pomocí mechanického lisu značky Heckert FP 100 s kapacitou do 100 kN s násadou ELE International na trámcích ve stáří 28 dní. Před každou zkouškou byly čistou tkaninou ořeny povrchy podpěrných válců násady mechanického lisu a také boční stěny zkušného tělesa. Poté byly postupně vloženy ve směru kolmém na směr hutnění do násady přístroje na podpěrné ocelové válce tak, aby byla pozice vzorku na podpěrách v souladu s nákresem, Obr. 15. Důvodem uložení těles v tomto směru je eliminace potenciální nehomogenity materiálu při ukládání do forem po výšce průřezu. Dalším krokem bylo spuštění zatěžování realizovaného poklesem horní středové podpory probíhajícího až do rozlomení tělesa na dvě části. Hodnota síly, při které došlo k porušení byla zaznamenána a posléze použita při výpočtu výsledné pevnosti v tahu za ohybu.



Obr. 15: Vlevo: celkový pohled na mechanický lis Heckert FP 100, vpravo: ELE International pro měření pevnosti v tahu za ohybu

3.2.2.2 Pevnost v tlaku

Tlaková pevnost obecně vyjadřuje schopnost materiálu odolávat účinkům silového zatížení působícího na zkoušené těleso dostřednou silou. U křehkých materiálů se neurčuje skutečná pevnost materiálu, ale smluvní hodnota vypočtená z dosaženého zatížení, při kterém byla vyčerpána pevnost v tahu působením příčných napětí. Tato skutečnost je důsledkem toho, že tyto materiály vykazují v tlaku výrazně vyšší pevnosti než v tahu, proto ve spojení s průběhem vnitřních sil při zatížení tlakem dochází ke vzniku tahových trhlin kolmo na průběh maximálních příčných napětí dříve než k dosažení meze tlakové pevnosti [19].

Z hlediska materiálového zkušebnictví se rozlišuje pevnost krychelná, hranolová a válcová podle tvaru vzorků, které jsou zkoušeny. Protože při zatěžování těles hraje roli také vliv tření působícího mezi tlačnými deskami stroje a plochami vzorku, s ohledem na poměr výšky ku délce základny zkušební tělesa jsou nejvyšší pevnosti zaznamenávány u vzorků krychlového tvaru, kde dochází k většímu příčnému sevření tělesa [19].

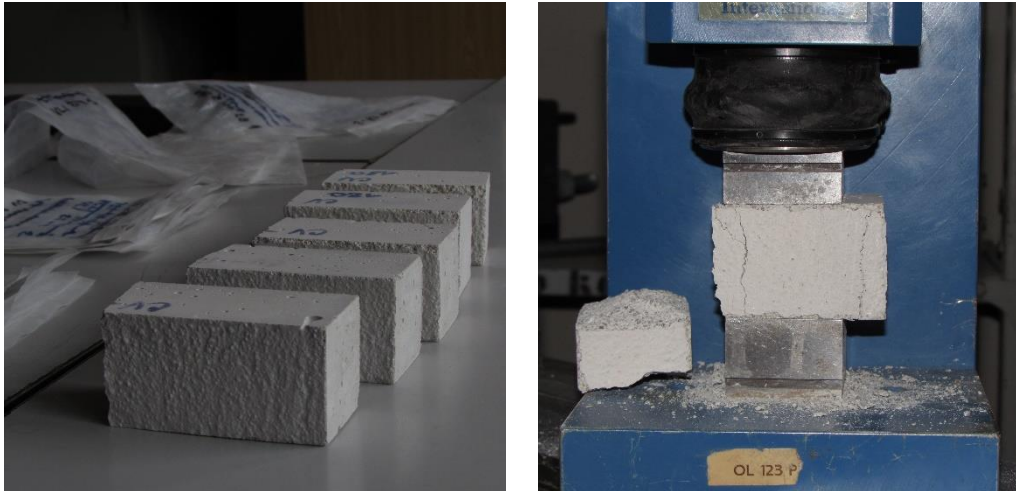
Zkouška pevnosti v tlaku se provádí rovněž podle normy ČSN EN 1015-11 (Zkušební metody malt pro zdivo – Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku), která definuje rozměry zkušebních těles, stáří, tepelně fyzikální okrajové podmínky i jednotlivé kroky zkoušky. Zkušební násada stroje sestává ze dvou rovnoběžných desek, spodní pevně uložené a horní tlačné, která se při zatěžování pohybuje směrem dolů. Desky mají konstantní rozměry 40 x 40 mm. Mezi ně je umístěn zkušební vzorek a s poklesem desky roste tlaková síla vyvozená na těleso. Za mez pevnosti je považován stav, kdy dojde ke vzniku příčných trhlin způsobených tahovým namáháním a začíná drcení vzorku. Pevnost v tlaku se vypočte podle jednoduchého vztahu ze znalosti síly vyvozené na vzorek podělené styčnou plochou mezi deskou a tělesem [46].

$$f_b = \frac{F}{a_s \cdot b_s} \quad [\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (17)$$

kde je f_b pevnost v tlaku [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$],
 F maximální zatížení na zkušební těleso [N],
 a_s délka styčné plochy desky se vzorkem [mm],
 b_s šířka styčné plochy desky se vzorkem [mm].

Pevnost byla testována na polovinách trámečků, které vznikly rozlomením při zkoušce pevnosti v tahu za ohybu ve stáří 28 dní. Zkouška byla provedena rovněž na mechanickém lisu značky Heckert FP 100 s nástavcem určeným ke zkoušení tlakové pevnosti ELE international. Šířka vzorků byla 40 mm, délka cca 80 mm. Zatěžování probíhalo až do vzniku

svislých trhlin, resp. počátku drcení vzorku. Poté byla odečtena hodnota síly vyvozená deskou na vzorek. Platnost zkoušky se ověřila tvarem styčných ploch středové a krajních částí. V případě vydutého tvaru plochy byla zkouška považována za platnou. Nakonec byla vypočtena pevnost podle výše uvedeného vztahu.



Obr. 16: Vlevo: zkušební tělesa připravená ke zkoušce pevnosti v tlaku, vpravo: pohled na zkušební vzorek po provedení zkoušky pevnosti v tlaku

3.2.2.3 Dynamický modul pružnosti

Modul pružnosti informuje o tom, k jak velké deformaci materiálu dojde, pokud se do něj bude vnášet napětí, přesněji, je vyjádřením závislosti mezi přetvořením a napětím. Platí, že s rostoucí hodnotou modulu pružnosti klesá míra deformace. V praxi se modul používá pro výpočty deformací, průhybů, smršťování nebo dotvarování materiálů. Z hlediska způsobu měření se rozlišuje modul statický a dynamický. V rámci této práce byl testován modul dynamický [47].

Dynamický modul se zjišťuje z rychlosti šíření akustického vlnění při průchodu ultrazvukových vln materiálem. Vzhledem ke skutečnosti, že rychlost šíření vln se mění v závislosti na mechanicko-fyzikálních vlastnostech materiálu, je možné při znalosti rozměrů a hmotnosti zkoušeného tělesa získat hodnoty pružných charakteristik. Kromě toho se metoda používá v oblasti defektoskopie (určování nehomogenity materiálů). Podstatou měření je zjišťování doby potřebné pro průchod ultrazvukové vlny prostředím (materiálem). K jedné stěně vzorku se přiloží budič vysílající impulzy, které jsou na straně druhé zachycovány snímačem. Obě sondy jsou spojeny s řídicí jednotkou zaznamenávající čas odchodu a příchodu vln. Měření je ovlivněno vlhkostí a teplotou, nehomogenitami (trhliny, dutiny),

tvarem a velikostí zkušebního tělesa. Podrobněji se stanovením rychlosti šíření ultrazvukového impulsu zabývá norma ČSN EN 12054-4 (Zkoušení betonu – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu), ve které je uveden také vztah pro výpočet rychlosti ultrazvukové vlny [48, 49]:

$$V_L = \frac{L}{T} \quad [\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (18)$$

kde je V_L rychlost šíření impulsu [mm],
 L délka měřicí základny (vzdálenost mezi budičem a snímačem) [mm],
 T čas potřebný k průchodu vlny prostředím (měřicí základnou) [μm] [44].

Výpočet dynamického modulu pružnosti se získá součinem výše uvedeného vztahu s rovnicí pro výpočet objemové hmotnosti a součinitelem rozměrnosti prostředí. Za předpokladu, že se součinitel rovná hodnotě 1, lze jednoduchými matematickými úpravami dojít ke vztahu:

$$E_d = \rho_v \cdot V_L^2 \cdot \frac{1}{k} = \frac{m}{V} \cdot \left(\frac{L}{T}\right)^2 = \frac{m}{b \cdot h \cdot L} \cdot \frac{L^2}{T^2} = \frac{m \cdot L}{b \cdot h \cdot T^2} \quad [\text{GPa}] \quad (19)$$

kde je: E_d dynamický modul pružnosti [GPa],
 ρ_v objemová hmotnost materiálu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 V_L^2 rychlost šíření impulsu [mm],
 k součinitel rozměrnosti prostředí ($k = 1$) [-],
 m hmotnost vzorku [kg],
 V objem vzorku [mm^3],
 L délka měřicí základny (vzdálenost mezi budičem a snímačem) [mm],
 T čas potřebný k průchodu vlny prostředím (měřicí základnou) [μm],
 b šířka vzorku [mm],
 h výška vzorku [mm] [48, 49].

Zkouška byla provedena na krychlích o délce hrany 70 mm předem vysušených v sušárně s teplotou $60 \pm 5^\circ\text{C}$ do ustálené hmotnosti. Poté byl na dvě rovnoběžně orientované strany nanesen vysoce vodivý gel, po kterém následovalo přiložení sond přístroje Starmans DiO 562 NLF a provedeno měření. Výsledné hodnoty rychlosti průchodu vln byly zobrazeny na displeji přístroje a zaznamenány.

3.2.3 Vlhkostní vlastnosti

Přihlédnutí k parametrům této skupiny je s ohledem na správnou funkčnost omítkových vrstev při návrhu směsí zvláště důležité. Schopnost omítek propouštět kapalnou vlhkost se projevuje nejen v životnosti podkladových konstrukcí, ale i omítkových vrstev, souvisí s přilnavostí i hygienickou nezávadností. Vysoce propustné (nasákavé) omítky jsou vhodné zvláště pro aplikaci u starších objektů, opačně, vlhkostně uzavřené omítky nacházejí uplatnění u novostaveb, u kterých není předpoklad, že by konstrukce obsahovaly velké množství zabudované vlhkosti, které by bylo potřebné odvézt z konstrukcí pryč.

Obecně platí pravidlo, že příliš vysoká míra vlhkosti konstrukcím škodí, z tohoto důvodu je snahou zabránit vstupu vlhkosti do materiálů. Výjimkou jsou výše zmíněné případy, kdy je potřebné vlhkost z konstrukcí přes další konstrukce (v našem případě omítky) odvést.

Vlhkostní parametry souvisí s vnitřní stavbou materiálu, jsou ovlivněny velikostí, množstvím, tvarem a vzájemným uspořádáním pórů. Kapilární vztlínavost je důležitým faktorem, díky kterému je materiál schopný aktivně pohlcovat vlhkost z okolních konstrukcí. Vztlínavost je úzce spjata s velikostí pórů.

Popis parametrů byl proveden pomocí několika vzájemně závislých veličin vycházejících z experimentů založených na principu ponoření zkušebních těles do kapaliny a následného měření přírůstků hmotnosti v závislosti na čase. O jednotlivých veličinách i způsobech jejich získávání je pojednáno v následujících odstavcích.

3.2.3.1 Absorpce

Tento sorpční jev, nasákání, se projevuje vstřebáváním tekutin (plynů nebo kapalin) dovnitř tuhé fáze materiálu. V běžném prostředí se lze s tímto jevem setkat v případě kolísání relativní vlhkosti vzduchu, na základě kterého dochází ke změnám obsahu vlhkosti uvnitř materiálů v kontaktu s tímto prostředím [19].

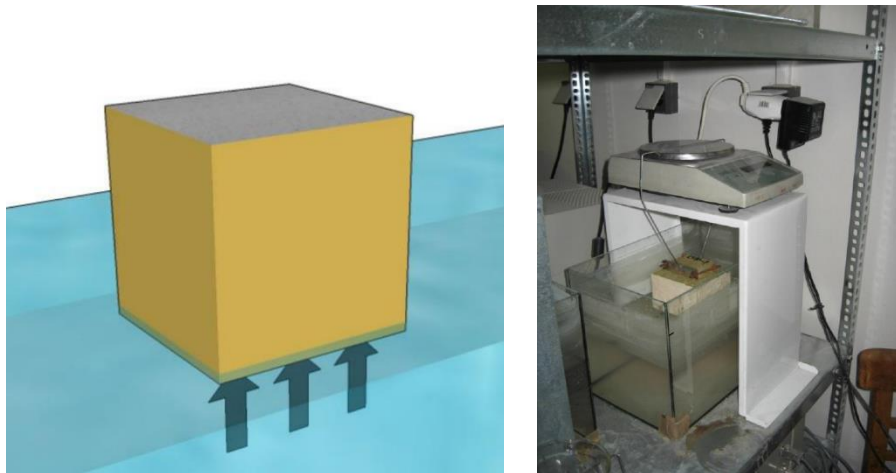
Měření absorpce probíhalo na polovinách zkušebních trámů o rozměrech 40 x 40 x 75 mm, které byly nejprve opatřeny epoxidovým nátěrem LEPOX METAL, skládajícím se ze dvou složek rozmíchaných v hmotnostním poměru 1 : 2, kde dva díly příslušely složce A a jeden díl složce B. Po rozmíchání byla pomocí malé špachtle zkušební tělesa opatřena ze čtyř stran vrstvou nátěru v takové tloušťce, aby byla zajištěna jeho nepropustnost (zaizolování pro zajištění jednorozměrného transportu vlhkosti). Horní a spodní strany (z pohledu uložení ve formách při výrobě těles) zůstaly bez nátěru. Vzorky byly až do vytvrdnutí nanesené vrstvy ponechány ve standardních laboratorních podmínkách a poté

vysušeny v sušárně při teplotě $60 \pm 5^\circ\text{C}$ až do ustálení hmotnosti. Dalším krokem bylo změření rozměrů pomocí posuvného měřidla, a to vždy na třech místech jedné strany, naměřené hodnoty byly zprůměrovány. Pomocí digitální váhy Ohaus AdventurerPro byla změřena hmotnost vzorků s přesností 0,01 g.



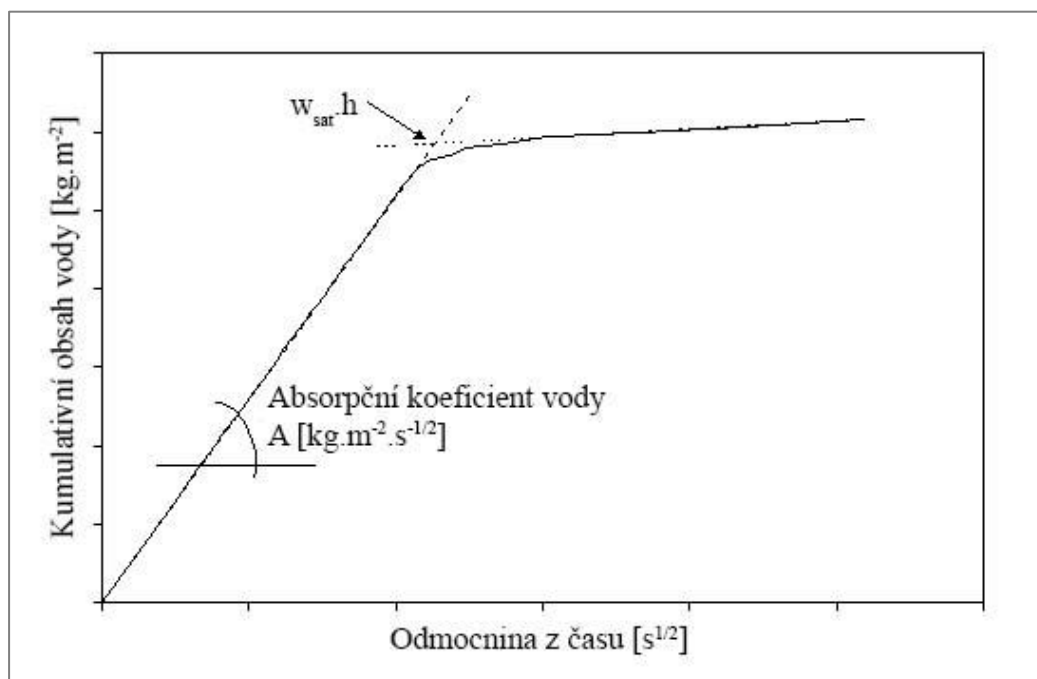
Obr. 17: Vlevo: LEPOX METAL – složka A a B, vpravo: vzorky po nanesení vrstvy epoxidu

Posledním krokem bylo měření absorpce, které probíhalo v souladu s normou ČSN EN 1015-18 (Zkušební metody malt pro zdivo – Část 18: Stanovení koeficientu kapilární absorpce vody v zatvrdlé maltě). Vzorky byly ponořeny cca 5 mm pod hladinu vodní lázně (vkládání do vody probíhalo z důvodu odstranění vzduchových bublin v šikmé poloze) a na stejné váze Ohaus AdventurerPro byly měřeny přírůstky hmotnosti až do ustálení hmotnosti vzorků odpovídajícímu maximálnímu množství vody, které je schopný materiál při daných okrajových podmínkách pohltit. Odečet hmotnosti probíhal automaticky a kontinuálně s pomocí jednoduchého závěsného držáku, na který byl vzorek ponořený do vodní lázně uchycen a zatížení přeneseno na plochu váhy. Výhodou oproti obvyklému „ručnímu“ měření byla nepotřebnost manipulace se vzorkem při každém odečtu hmotnosti, a tím i částečná eliminace nepřesnosti měření [50].



Obr. 18: Vlevo: princip zkoušky nasákavosti; vpravo: zařízení pro kontinuální měření přírůstků hmotnosti vzorku ponořeného do kapaliny [51]

Na základě získaných naměřených hodnot byla vykreslena křivka nasákavosti, viz Obr. 19, vyjadřující závislost přírůstku hmotnosti kapaliny na odmocnině z času, kde přírůstek hmotnosti je vztažený na plochu, která je v kontaktu s vodou, a označuje se jako kumulativní obsah vody [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$]. Směrnice křivky je po celou dobu experimentu stoupající, ale sklon křivky se s přibývajícím časem snižuje. Ze směrnice křivky počátečního nárůstu kumulovaného obsahu vody na odmocnině z času je definován absorpční koeficient vody A [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1/2}$] [50, 51].



Obr. 19: Schématické znázornění křivky nasákavosti

Kapilární obsah nasycené vlhkosti představuje maximální hmotnost vody vztaženou na jednotkový objem materiálu zjištěný při maximálním nasycení vzorku. Zpravidla se označuje jako w_{sat} [kg.m⁻³]. Vypočítá se podle jednoduchého vztahu:

$$w_{sat} = \frac{m_{sat} - m_o}{V} \quad [\text{kg.m}^{-3}] \quad (20)$$

kde je w_{sat} kapilární obsah nasycené vlhkosti [kg.m⁻³],
 m_{sat} hmotnost vzorku plně nasyceného vodou [kg],
 m_o hmotnost suchého vzorku [kg],
 V objem vzorku [m³] [51].

Součinitel vlhkostní vodivosti se vypočítá z hodnoty známého vodního toku směřujícího do vzorku v průběhu nasákání. Jeho průměrná hodnota odpovídá podílu absorpčního koeficientu vody a kapilárního obsahu nasycené vlhkosti umocněné na druhou, vzorcem vyjádřeno:

$$\kappa = D_w \approx \left(\frac{A}{w_{sat}} \right)^2 \quad [\text{m}^2.\text{s}^{-1}] \quad (21)$$

kde je κ součinitel vlhkostní vodivosti [m².s⁻¹],
 A absorpční koeficient vody [kg.m⁻².s^{-1/2}],
 w_{sat} kapilární obsah nasycené vlhkosti [kg.m⁻³] [51].

Hmotnostní nasákavost vyjadřuje poměr hmotnosti vody obsažené v plně nasyceném vzorku ku hmotnosti vzorku suchého. Hodnota se zpravidla udává v procentech a v případě, že je měřena na materiálech s objemovou hmotností nižší, než je hustota vody, její hodnota může značně překročit 100 %. Vztah pro výpočet lze vyjádřit několika způsoby:

$$E = \frac{m_{sat} - m_o}{m_o} = \frac{m_{H_2O}}{m_o} = \frac{w_{sat} \cdot V}{\rho_{V0} \cdot V} = \frac{w_{sat}}{\rho_{V0}} \quad [- ; \%] \quad (22)$$

kde je E hmotnostní nasákavost [- ; %],
 m_{sat} hmotnost vzorku plně nasyceného vodou [kg],
 m_o hmotnost suchého vzorku [kg],
 m_{H_2O} hmotnost vody [kg],
 w_{sat} kapilární obsah nasycené vlhkosti [kg.m⁻³],
 ρ_{V0} objemová hmotnost suchého vzorku [kg.m⁻³],
 V objem vzorku [kg.m⁻³] [19].

3.2.4 Tepelné vlastnosti

Tepelná ochrana objektů je ve stavebnictví stále více diskutovanou problematikou. Se zpříšňováním požadavků vedoucím k úspoře energetických nákladů na vytápění a chlazení objektů je spjata také hledání nových, či modifikování dříve užívaných, stavebních materiálů, tvořících konstrukce na styku teplotních zón. Vzhledem k tomu, že nejčastější oblastí aplikace jsou pro omítky obvodové pláště objektů, znalost jejich tepelně fyzikálních vlastností je pro jejich další vývoj velmi potřebná.

Vedení tepla v látkách probíhá obecně třemi způsoby; vedením, prouděním a zářením, přičemž u pevných pórovitých látek, mezi něž řadíme i omítky, připadá do úvahy první a poslední ze způsobů. Vliv na tepelný tok, podávající informaci o rychlosti přenosu tepla zkoušeným materiálem, má kromě velikosti a zastoupení pórů také teplota a vlhkost. S rostoucí teplotou a vlhkostí tepelný tok roste. Protože v reálném prostředí vlhkost a teplota v závislosti na výkyvech počasí a střídání ročních období kolísá, je potřebné tuto skutečnost zohlednit i při laboratorním testování a experimenty provádět nejen u vzorků v suchém stavu, ale také při jejich plném a částečném nasycení vodou [19, 52].

Metody měření tepelně technických parametrů se dělí do dvou základních skupin. Na metody stacionární, které spočívají v měření charakteristik s konstantním tepelným výkonem v ustáleném stavu. Nevýhodou je časová náročnost (řádově měření trvá hodiny až dny), avšak přesnost získaných výsledků je velmi vysoká. Druhou skupinou jsou metody nestacionární, u kterých se měření uskutečňuje v neustáleném stavu proměnlivým tepelným výkonem. Výsledky nejsou ve srovnání s prvním způsobem měření tak přesné, avšak za účelem vzájemného porovnání a rámcového zjištění charakteru jednotlivých vzorků dostačující. Výhodou je menší časová náročnost měření pohybující se v řádu několika minut, maximálně hodin [19, 52].

K popisu tepelně fyzikálních vlastností slouží několik charakteristik, které jsou popsány níže. Z jednoho měření zkušebními přístroji lze obvykle získat informaci o hodnotách všech veličin, není tedy nutné provádět pro získání jedné veličiny vždy jedno samostatné měření.

Součinitel tepelné vodivosti je základní tepelně fyzikální veličinou vyjadřující schopnost materiálu vést teplo, nebo jinak řečeno podávající informaci o tom, jak snadno se vyrovnávají teplotní rozdíly v případě odlišných teplot na každé straně tělesa. Teplo se snaží dostat z prostředí o vyšší teplotě do prostředí s teplotou nižší, a právě tato veličina informuje o tom, jaké množství tepla projde za jednotku času jednotkou plochy v případě, že mezi stěnami je

udržován jednotkový teplotní rozdíl. Součinitel tepelné vodivosti se značí λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] a je závislý na vlhkosti, pórovitosti, struktuře, teplotě materiálu, tlaku, teplotě a vlhkosti okolního prostředí [19, 52].

Měrná tepelná kapacita poskytuje informaci o množství tepla, které je potřeba dodat materiálu o jednotkové hmotnosti, aby se zvýšila jeho teplota o jeden kelvin, veličina se značí c [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] a lze ji spočítat ze znalosti objemové tepelné kapacity. V případě měření prováděného na vysušených vzorcích se vypočte podle vztahu:

$$c = \frac{c_{\rho}}{\rho_{vo}} \quad [\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}] \quad (23)$$

kde je c měrná tepelná kapacita [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],
 c_{ρ} objemová tepelná kapacita [$\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$],
 ρ_{vo} objemová hmotnost suchého vzorku [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] [19, 51, 52].

V případě stanovení objemové tepelné kapacity na zkušebních tělesech saturovaných vodou se výpočet provádí přes měrnou tepelnou kapacitu suchých vzorků podle vztahu zahrnujícího hmotnostní vlhkost a měrnou tepelnou kapacitu vody:

$$c = \frac{(c_o + c_w + w)}{(1 + w)} \quad [\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}] \quad (24)$$

kde je c měrná tepelná kapacita [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],
 c_o měrná tepelná kapacita suchého vzorku [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],
 c_w měrná tepelná kapacita vody (4180) [$\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$],
 w hmotnostní vlhkost [$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$] [19, 51, 52].

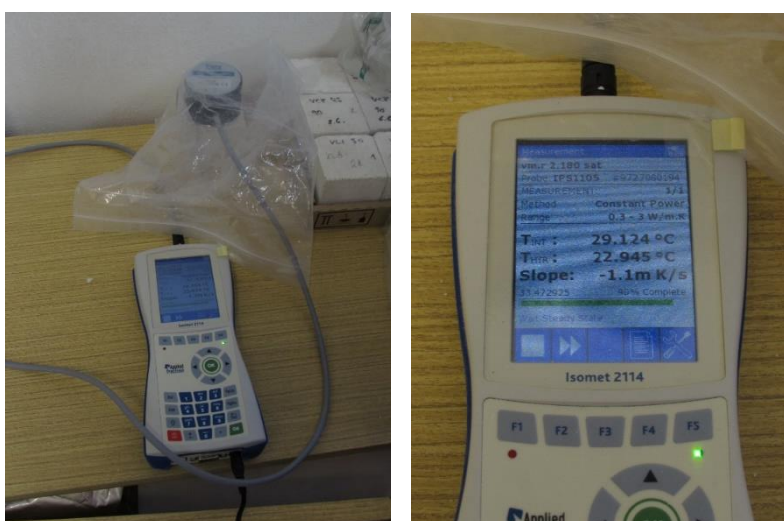
Součinitel teplotní vodivosti vyjadřuje schopnost materiálu vyrovnávat rozdílné teploty při neustáleném vedení tepla za předpokladu, že je definovaná jeho vlhkost. Jeho výpočet je závislý na znalosti tepelně fyzikálních vlastností, konkrétně na výše popisovaných dvou veličinách. Platí, že s rostoucí hodnotou teplotní vodivosti materiálu se zvyšuje závislost teploty uvnitř materiálu na teplotě povrchu, a s tím souvisí i hodnota součinitele; čím je vyšší, tím rychleji nastane změna teploty uvnitř materiálu v případě změny teploty při jeho povrchu. Součinitel je možné vypočítat dle následujícího vztahu:

$$a = \frac{\lambda}{c_p} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}] \quad (25)$$

kde je a součinitel teplotní vodivosti [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],
 λ součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 c_p objemová tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$] [19, 51, 52].

Pro zjištění tepelných vlastností vzorků omítek bylo použito nestacionární metody měření fungující na principu „hot-disk“, jehož podstatou je vysílání impulsů tepelného toku do materiálu za pomoci rezistoru. Podmínkou je tepelně vodivé spojení mezi sondou a materiálem. Parametry jsou u tohoto způsobu měření získávány s pomocí polovodičového snímače zachycením teplotní reakce materiálu na vysílaný tepelný tok.

Samotnému měření předcházela příprava zkušebních těles tvořených krychlemi o délce hrany 70 mm. Krychle ve stáří 28 dní byly před započítím experimentu vysušeny v sušárně při teplotě $60 \pm 5^\circ\text{C}$ do ustálené hmotnosti, poté byly přeneseny do klimatizované laboratoře, vloženy do uzavíratelného neprodyšného obalu a na vzorky byla pevně položena plošná sonda a obal i se sondou uzavřen. Měření probíhalo pomocí přenosného přístroje ISOMET 2114, Aplied Precision, napojeného na přívod elektrické energie řízeného mikroprocesorem, viz Obr. 20. Délka měření jednoho vzorku se pohybovala mezi 20–30 min. v závislosti na jeho vlastnostech, poté byl obal otevřen, sonda ze vzorku odebrána a z displeje přístroje odečteny naměřené hodnoty. Minimální počet měření, resp. zkušebních těles jednoho složení, byl stanoven na dva kusy, v některých případech byly testovány vzorky tři, získané výsledky pak byly zprůměrovány. Měření bylo dále opakováno po částečném a úplném saturování vzorků vodou. Konkrétně byly měřeny stavy při 25, 50, 75 a 100% saturaci.



Obr. 20: Měření tepelných vlastností na přístroji ISOMET 2114 Aplied Precision

3.3 Výsledky a diskuze

Výsledky jsou prezentovány společně pro všechny zkušební sady vzorků, členěné do podkapitol dle skupin vlastností.

3.3.1 Základní fyzikální vlastnosti

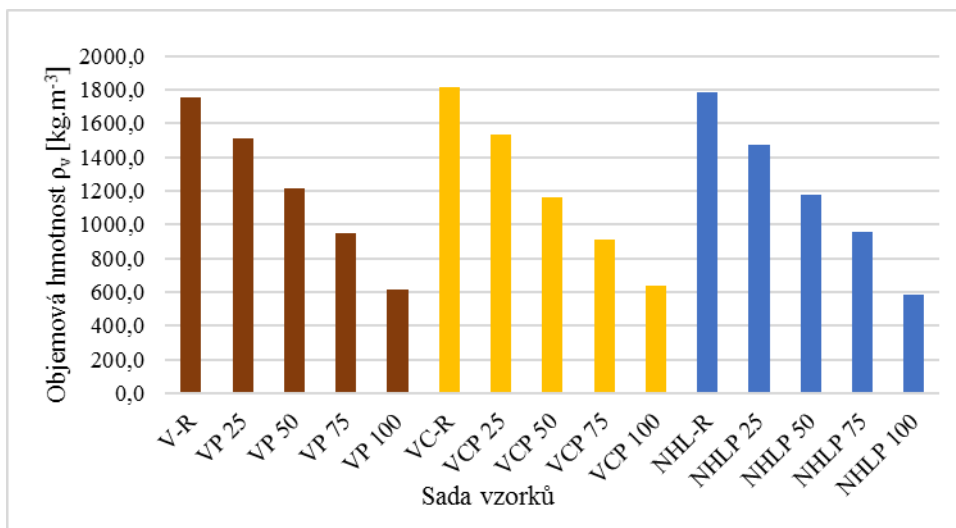
Následující Tab. 8 zachycuje průměrné hodnoty objemové hmotnosti, hustoty matrice a otevřené pórovitosti. Měření jednotlivých veličin probíhalo vždy minimálně na třech zkušebních vzorcích totožného složení s výjimkou objemové hmotnosti, která byla stanovována aritmetickým průměrem z hodnot získaných měření celkem 6 až 9 zkušebních těles každého druhu.

U objemové hmotnosti se chyba měření pohybuje do 1 %, u hustoty matrice lze uvažovat s chybou do 0,1 % a otevřená porozita má maximální chybu měření 1 %.

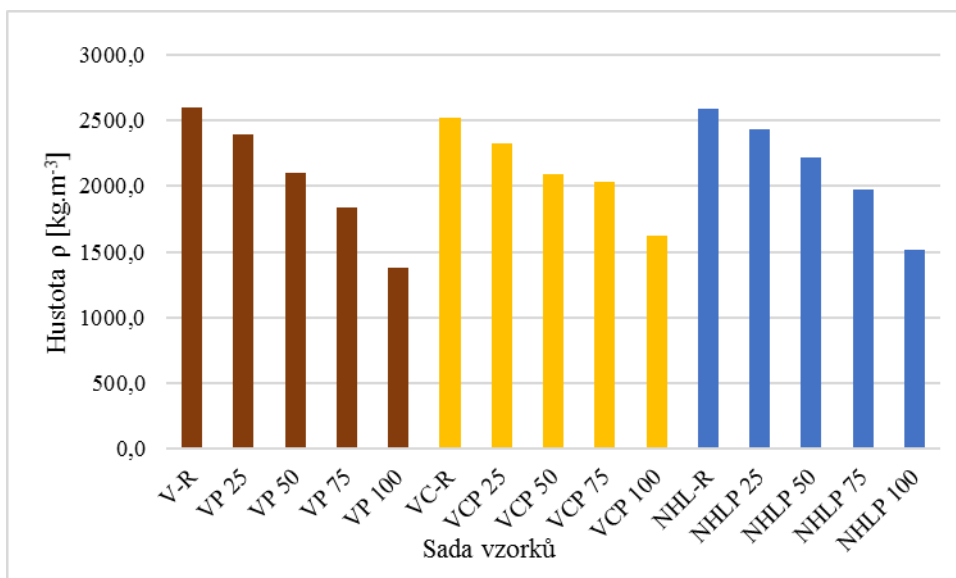
Pro přehlednost a lepší možnost porovnání vývoje hodnot v závislosti na složení, jsou naměřená data prezentována nejen formou tabulky uvádějící konkrétní hodnoty, ale také formou souhrnných sloupcových grafů zachycující trend vývoje jednotlivých veličin.

Tab. 8: Základní fyzikální vlastnosti

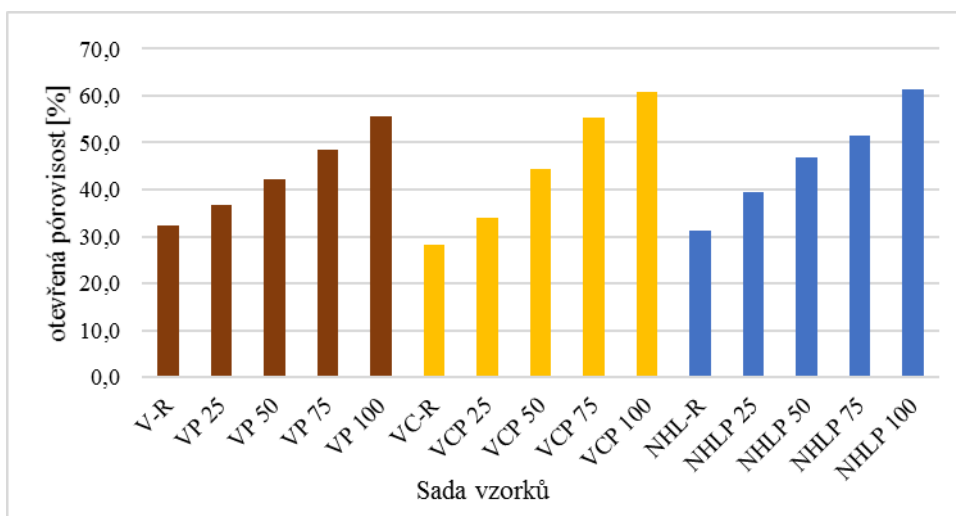
Skupina	Objemová hmotnost ρ_v [kg.m ⁻³]	Hustota matrice ρ_{mat} [kg.m ⁻³]	Otevřená porozita p [%]
V-R	1757,0	2598,0	32,40
VP 25	1514,0	2389,0	36,60
VP 50	1216,0	2101,0	42,10
VP 75	945,0	1836,0	48,50
VP 100	612,0	1378,0	55,60
VC-R	1815,0	2525,0	28,10
VCP 25	1536,0	2330,0	34,10
VCP 50	1163,0	2090,0	44,40
VCP 75	908,0	2034,0	55,30
VCP 100	635,0	1618,0	60,80
NHL-R	1781,0	2587,0	31,10
NHLP 25	1474,0	2438,0	39,50
NHLP 50	1179,0	2222,0	46,90
NHLP 75	956,0	1973,0	51,50
NHLP 100	588,0	1520,0	61,30



Obr. 21: Grafické znázornění objemové hmotnosti



Obr. 22: Grafické znázornění hustoty



Obr. 23: Grafické znázornění otevřené pórovitosti

Z výsledků je patrné, že objemová hmotnost referenčních vzorků se vzájemně liší v řádu několika procent. Nejvyšší hodnoty dosahují vzorky s vápenocementovým pojivem (VC), jejichž objemová hmotnost je o 3 % vyšší, než u vzorků zhotovených z vápenného hydrátu (V). Rozdíl objemové hmotnosti referenčních zkušebních těles z vápenného hydrátu (VP) a hydraulického vápna (NHL) činí přibližně 1,5 %.

Výraznější pokles objemové hmotnosti je sledovatelný s rostoucím množstvím náhrady křemenného kameniva perlitem. Vzhledem ke skutečnosti, že objemová hmotnost perlitu je ve srovnání s křemenným pískem výrazně nižší (přibližně o 92 %), je pokles zcela logický. Pokles objemové hmotnosti je přímo úměrný objemové náhradě klasického kameniva perlitem. Rozdíl objemové hmotnosti referenčních vzorků a vzorků se 100% náhradou plniva lehčeným kamenivem se pohybuje u všech tří skupin vzorků v rozmezí 65–67 %.

U hustoty matrice referenčních vzorků není zaznamenán větší než 3% rozdíl hodnot. Nejnižších hodnot nabývají vápenocementové vzorky (VC), nejvyšších pak tělesa zhotovená z vápenného hydrátu (V). Co se týče vývoje objemové hmotnosti v závislosti na změně množství náhrady plniva lehčeným kamenivem, s rostoucím množstvím náhrady dochází ke snižování hustoty materiálu, což je, vzhledem k odlišné hustotě křemenného písku a perlitu, předvídatelné (hustota písku je vyšší).

Pokud se zaměřím na procentuální úbytek hustoty, lze konstatovat, že nejznatelnější je změna u první skupiny vzorků, s vápenným hydrátem, kde rozdíl hustoty mezi vzorky referenčními (V-R) a se 100% náhradou klasického kameniva (VP 100) činí 46 %, naopak u vápenocementových je rozdíl pouze 36 %, mezi tyto dvě skupiny lze zařadit vzorky z hydraulického vápna s rozdílem 41 %.

Poslední testovanou charakteristikou této skupiny je otevřená pórovitost, která dosahuje u referenčních vzorků rozdílnosti hodnot do 14 %. Testováním se prokázal předpoklad nepřímé úměrnosti mezi otevřenou pórovitostí a objemovou hmotností. S nárůstem otevřené pórovitosti hodnoty objemové hmotnosti klesají. Nejméně pórovité jsou referenční vzorky s vápenocementovým pojivem (VC-R), nejvíce pak tělesa tvořená 100% náhradou přírodního kameniva z hydraulického vápna (NHLP 100). Pórovitost perlitu je ve srovnání se zrny křemenného kameniva výrazně vyšší.

Pokud se zaměřím na srovnání hodnot otevřené pórovitosti mezi referenčními vzorky a vzorky se 100% náhradou kameniva, největšího procentuálního rozdílu dosahují vzorky vápenocementové s 54 %, nejmenšího vyrobené z vápenného hydrátu s rozdílem 42 %. Růst hodnot otevřené pórovitosti v závislosti na zvyšující se objemové náhradě křemenného kameniva je přibližně lineární.

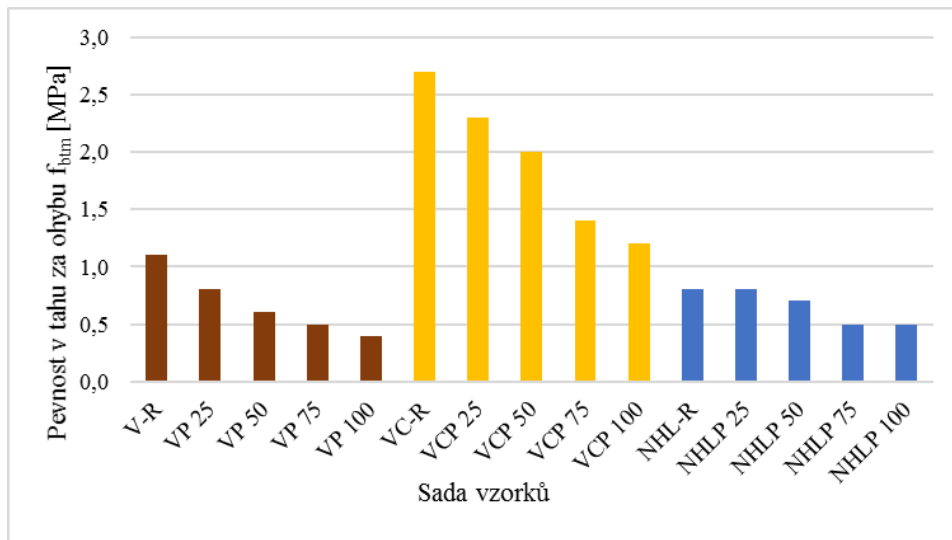
3.3.2 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti byly testovány vždy na 2–3 zkušebních tělesech totožného složení, výsledné, zde prezentované hodnoty vznikly aritmetickým průměrem. Maximální chyba měření pevnosti v tahu za ohybu i pevnosti v tlaku je 1,2 %. Dynamický modul pružnosti má chybu nepřesahující 2 %.

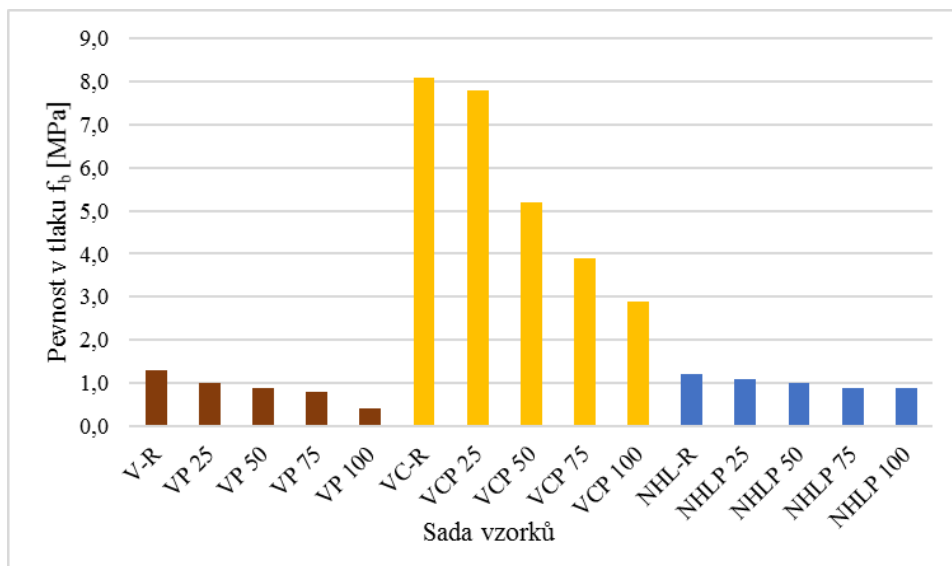
Stejně, jako v předchozí kapitole, jsou výsledky vyjádřeny nejen formou tabulky s konkrétními hodnotami, ale také pomocí sloupcových grafů, které jsou pro rychlou orientaci ve výsledcích přehlednější. Tab. 9. obsahuje výsledky měření pevnosti v tahu za ohybu, tlakové pevnosti i dynamického modulu pružnosti.

Tab. 9: Mechanické vlastnosti

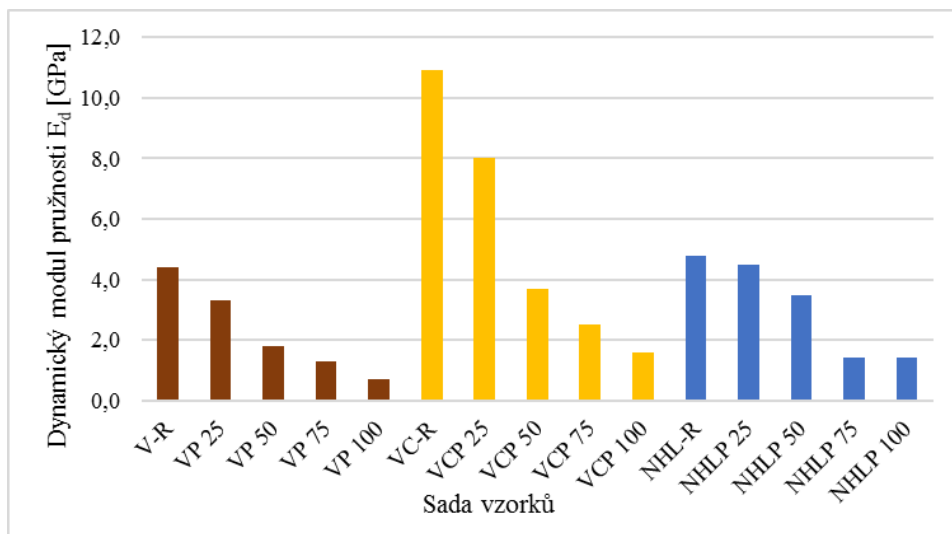
Skupina	Pevnost v tahu za ohybu f_{btm} [MPa]	Pevnost v tlaku f_b [MPa]	Dynamický modul pružnosti E_d [GPa]
V-R	1,10	1,30	4,40
VP 25	0,80	1,00	3,30
VP 50	0,60	0,90	1,80
VP 75	0,50	0,80	1,30
VP 100	0,40	0,40	0,70
VC-R	2,70	8,10	10,90
VCP 25	2,30	7,80	8,00
VCP 50	2,00	5,20	3,70
VCP 75	1,40	3,90	2,50
VCP 100	1,20	2,90	1,60
NHL-R	0,80	1,20	4,80
NHLP 25	0,80	1,10	4,50
NHLP 50	0,70	1,00	3,50
NHLP 75	0,50	0,90	1,40
NHLP 100	0,50	0,90	1,40



Obr. 24: Grafické znázornění pevnosti v tahu za ohybu



Obr. 25: Grafické znázornění pevnosti v tlaku



Obr. 26: Grafické znázornění dynamického modulu pružnosti

Z výsledků je na první pohled patrné, že hodnoty všech veličin se od sebe vzájemně liší nejen v závislosti na různém objemovém zastoupení náhrady kameniva, ale také, a to zvláště, podle druhu užitého pojiva. Vzorky s přídavkem cementu dosahují výrazně vyšších pevností i hodnot dynamického modulu pružnosti.

Pevnost v tahu za ohybu referenčních vzorků se pohybuje mezi 0,8–2,7 MPa, nejvyšší pevnost přísluší vápenocementovým vzorkům (VC-R) a nejnižší vzorkům z hydraulického vápna (NHL-R). Rozdíl tahových pevností referenčních vzorků z vápenného hydrátu (V-R) a hydraulického vápna (NHL-R) činí 27 %, což je ve srovnání se 70% rozdílem mezi vzorky vápenocementovými (VC-R) a z hydraulického vápna (NHL-R) výrazně méně.

Míra poklesu pevnosti v tahu za ohybu způsobena náhradou křemenného písku perlitem je nejvíce znatelná u omítek z vápenného hydrátu, kde při srovnání referenčního vzorku (V-R) se vzorkem se 100% náhradou kameniva (VP 100) byl zjištěn rozdíl až 64 %, při srovnání stejných vzorků z vápenocementových omítek je to 57 % a u vzorků z hydraulického vápna pouhých 37 %. Z této skutečnosti vyplývá, že největší vliv na pokles tahové pevnosti má perlit u vzorků ze vzdušného vápna. Lze také konstatovat, že s rostoucím zastoupením náhrady křemenného písku lehčeným kamenivem se snižují rozdíly tahové pevnosti mezi vzorky se shodným procentem objemové náhrady s rozdílným druhem pojiva, například srovnám-li vápenocementové vzorky s tělesy z hydraulického vápna při plné náhradě písku perlitem (VCP 100 a NHLP 100), dostávám rozdíl hodnot pouze 58 %, což je méně, než výše uvedený rozdíl u vzorků referenčních.

Rozdíl hodnot tlakové pevnosti v závislosti na užitém druhu pojiva je znatelný ještě více. Pevnost vápenocementových referenčních vzorků (VC-R) je přibližně 7x vyšší (rozdíl 85 %), než u referenčních vzorků z dalších dvou pojiv (V-R a NHL-R). Hodnoty pevností zbylých dvou referenčních vzorků (V-R a NHL-R) jsou takřka srovnatelné, rozdíl mezi nimi činí pouhých 8 %

Největší pokles tlakové pevnosti v závislosti na náhradě kameniva perlitem zaznamenávám, stejně jako u pevnosti v tahu za ohybu u vápenných vzorků, kde dosahuje rozdílu 69 % při srovnání referenčního vzorku (V-R) se vzorkem s úplnou náhradou kameniva (VP 100). Nejméně se náhrada plniva projevuje u vzorků z hydraulického vápna, kde při srovnání ekvivalentních vzorků (NHL-R a NHLP 100) činí rozdíl hodnot pouhých 25 %.

Hodnoty dynamického modulu pružnosti byly měřeny za účelem ověření výše popsaných veličin. Z Obr. 26 je dobře patrné, že s výjimkou drobných odchylek způsobených pravděpodobně nepřesností měření, jsou veličiny vzájemně závislé (vývoj hodnot veličin je

totožný, liší se pouze absolutními hodnotami). Tato skutečnost potvrzuje, že lze hodnoty stanovené na mechanickém lisu považovat za relevantní.

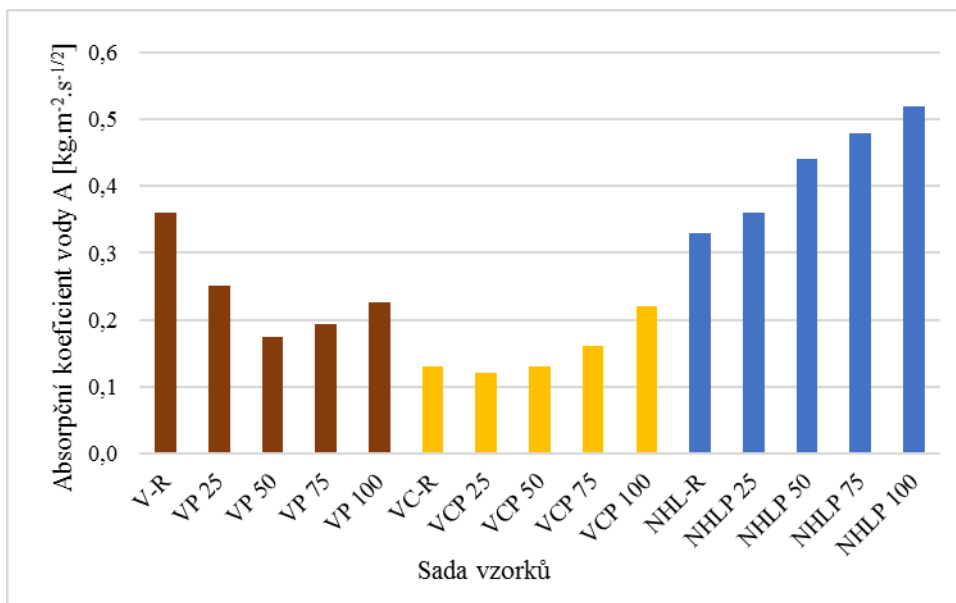
3.3.3 Vlhkostní vlastnosti

U veličin popisujících transport vody materiálem je při vyhodnocování potřeba rozlišit, zdali konkrétní veličina charakterizuje počáteční reakci materiálu na styk s vodou, či stav po delším časovém úseku. Absorpční koeficient vody je reprezentantem první skupiny veličin, protože je definován jako tangenta počátečního nárůstu kumulovaného obsahu vody na odmocnině z času. Naopak kapilární vlhkost vyjadřuje maximální množství vody, které je schopný materiál pojmout, což nastává po delším čase. Do stejné kategorie lze zařadit také nasákavost vycházející z kapilární vlhkosti. Mezi nimi se nachází součinitel vlhkostní vodivosti kapa vycházející z absorpčního koeficientu vody a kapilární vlhkosti.

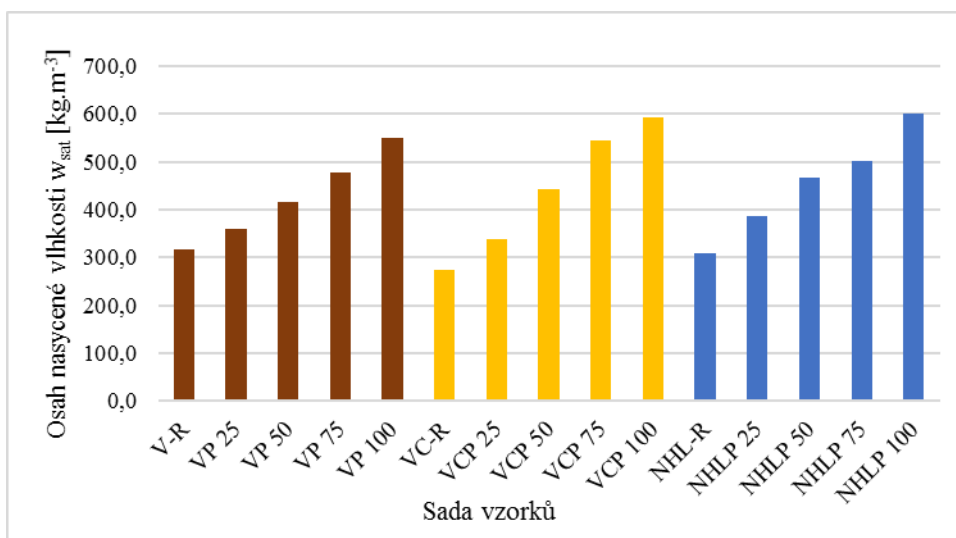
Zde uváděné hodnoty byly s ohledem na časovou náročnost a velký počet zkušebních těles získány aritmetickým průměrem ze dvou měření. Prezentovány jsou výše uvedené veličiny, chyba měření je do 10 %. Tab. 10 s hodnotami absorpčního koeficientu vody, součinitele vlhkostní vodivosti a hmotnostní nasákavost je doplněna sloupcovými grafy.

Tab. 10: Vlhkostní vlastnosti

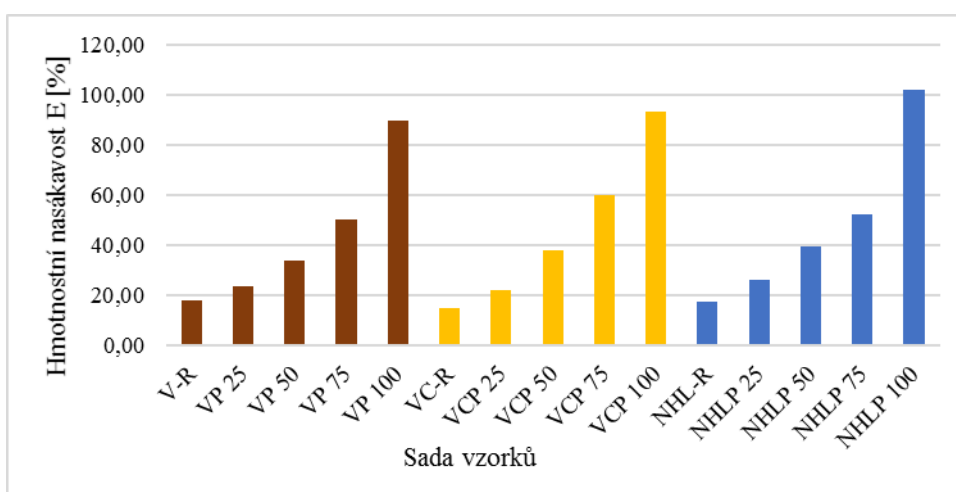
Skupina	Absorpční koeficient vody A [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1/2}$]	Obsah nasycené vlhkosti w_{sat} [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Součinitel vlhkostní vodivosti κ [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$] · 10^{-7}	Hmotnostní nasákavost E [%]
V-R	0,360	317,0	12,900	18,00
VP 25	0,250	359,0	4,850	23,70
VP 50	0,170	415,0	1,760	34,10
VP 75	0,190	478,0	1,630	50,60
VP 100	0,230	550,0	1,690	89,80
VC-R	0,130	275,0	2,230	15,20
VCP 25	0,120	338,0	1,260	22,00
VCP 50	0,130	443,0	0,860	38,10
VCP 75	0,160	544,0	0,870	59,90
VCP 100	0,220	593,0	1,380	93,40
NHL-R	0,330	308,0	11,480	17,30
NHLP 25	0,360	387,0	8,650	26,30
NHLP 50	0,440	467,0	8,880	39,70
NHLP 75	0,480	501,0	9,180	52,40
NHLP 100	0,520	601,0	7,490	102,30



Obr. 27: Grafické znázornění absorpčního koeficientu vody



Obr. 28: Grafické znázornění obsahu nasycené vlhkosti



Obr. 29: Grafické znázornění hmotnostní nasákavosti

Z Obr. 27 je patrné, že absorpční koeficient vody dosahuje nejnižších hodnot u vápenocementových vzorků, a naopak nejvyšších u vzorků zhotovených z hydraulického vápna. Tato skutečnost souvisí s rychlostí akumulace vody v počáteční fázi absorpce. Kromě vnitřního uspořádání struktury hraje roli také množství a velikost obsažených pórů. Kapilární póry jsou zodpovědné za rychlé nasákání vody materiálem, v případě větších pórů do nich voda také proniká, avšak není hnaná kapilárními silami, a tak proces probíhá výrazně pomaleji. Srovnatelné množství křemenného písku, resp. perlitu u vzorků všech tří skupin poukazuje na skutečnost, že rozdílnou rychlost počáteční absorpce zapříčiňují pojiva. Cementovou omítkou prochází voda ve srovnání s čistě vápennou výrazně pomaleji. Srovnám-li materiál s hydraulickým vápnem a vápenným hydrátem, lépe na tom je v rychlosti absorpce první z nich.

Kolísavé hodnoty absorpčního koeficientu v závislosti na množství náhrady písku perlitem u první skupiny vzorků s vápenným pojivem mohou být způsobeny rozdíly v uspořádání materiálu, kdy i přes vyšší pórovitost způsobenou více zastoupeným perlitem není vodě umožněno snadno strukturou procházet. Méně výrazné kolísání zaznamenáváme také u vápenocementových vzorků, předpokladatelný průběh mají vzorky zhotovené z hydraulického vápna, u kterých se s rostoucí náhradou písku perlitem zvyšuje také hodnota absorpčního koeficientu.

Hodnoty obsahu nasycené vlhkosti se od sebe v závislosti na užitém druhu pojiva liší maximálně o 5–15 %. Lze tedy konstatovat, že z dlouhodobého hlediska jsou materiály srovnatelné pórovitosti schopny pohltit podobné množství kapaliny. S rostoucím zastoupením perlitu roste také obsah absorbované vody. Rozdíl hodnot obsahu nasycené vlhkosti mezi referenčními vzorky a vzorky s plnou náhradou písku lehčeným kamenivem činí u všech skupin kolem 48 %. Závislost mezi množstvím perlitu a obsahem nasycené vlhkosti je přibližně lineární.

Výraznější rozdíly hodnot součinitele vlhkostní vodivosti jsou patrné mezi referenčními vzorky a vzorky s částečnou, resp. úplnou náhradou kameniva, kupříkladu u skupiny vzorků z vápenného hydrátu je hodnota součinitele referenčního vzorku ve srovnání se vzorkem se 100% náhradou až 8x vyšší. Hodnoty u vzorků s náhradou perlitem kolísají a lze konstatovat, že vývoj přibližně odráží rozdíly v hodnotách absorpčního koeficientu vody.

Z hodnot hmotnostní nasákavosti je na první pohled patrné, že akumulační schopnost materiálu se s rostoucím množstvím náhrady kameniva zvyšuje. Všechny skupiny vykazují při ekvivalentním množství náhrady srovnatelné hodnoty s rozdílem do 16 %. U vzorků se 100% náhradou kameniva zaznamenáváme ve srovnání s omítkami se 75% zastoupením

perlitu nasákavost až 1,8 x vyšší. S klesajícím množstvím náhrady se rozdíl hodnot snižuje, nasákavost vzorků s 25% náhradou je už oproti referenčním v průměru jen 1,4 x větší.

Závěrem lze říci, že množství perlitu, tedy pórovitost materiálu, má na akumulaci vlhkostní parametry výrazný vliv.

3.3.4 Tepelné vlastnosti

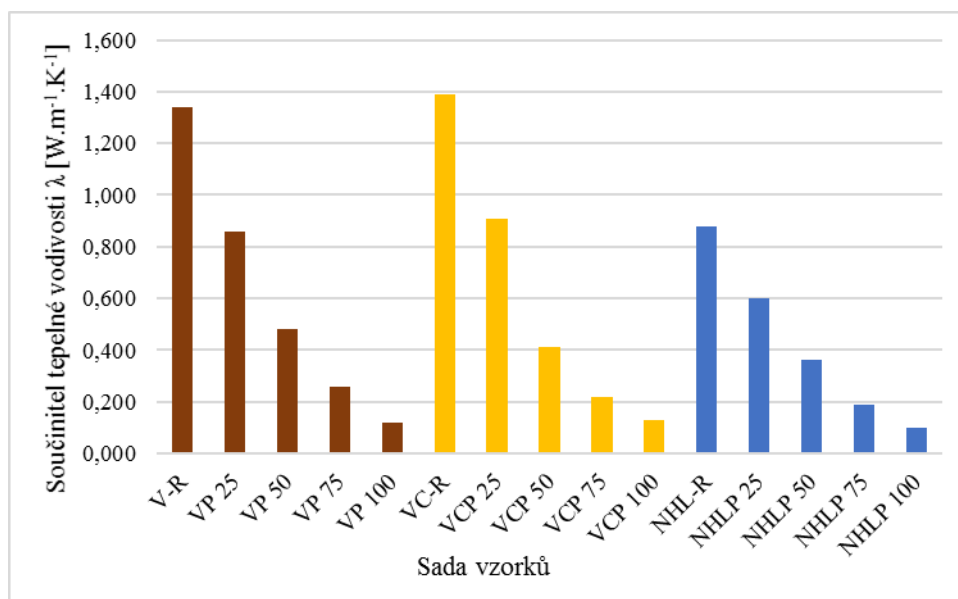
Tepelné vlastnosti jsou hodnoceny ze dvou pohledů; první je zaměřen na vyhodnocení vlastností vzorků v suchém stavu, poté jsou prezentovány výsledky experimentu vykonaném na vzorcích částečně, resp. plně saturovaných vodou. Tabulky s vyjádřením hodnot jsou i v tomto případě doplněny pro lepší orientaci sloupcovými grafy.

S ohledem na zvolený způsob testování může chyba měření dosahovat až 10 %. Z důvodu časové náročnosti přípravy vzorků před měřením (vysoušení, částečná, resp. úplná saturace) na velkém množství zkušebních těles, bylo zkoušení prováděno vždy na dvou až třech vzorcích z každé skupiny, zde uvedené výsledky jsou jejich aritmetickým průměrem.

První hodnocenou veličinou je součinitel tepelné vodivosti, jehož hodnoty prezentuje Tab. 11 zachycující nejen suchý stav, ale také změny součinitele v závislosti na saturaci.

Tab. 11: Tepelné vlastnosti – součinitel tepelné vodivosti

Skupina	Součinitel tepelné vodivosti λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]					
	Saturace [%]	0	25	50	75	100
V-R		1,340	1,950	2,420	2,690	2,970
VP 25		0,860	1,360	1,720	2,060	2,250
VP 50		0,480	0,730	1,000	1,230	1,530
VP 75		0,260	0,610	0,840	1,030	1,140
VP 100		0,120	0,370	0,550	0,670	0,730
VC-R		1,390	2,150	2,580	2,800	2,910
VCP 25		0,910	1,490	1,870	2,070	2,180
VCP 50		0,410	0,790	1,050	1,220	1,350
VCP 75		0,220	0,480	0,680	0,820	0,920
VCP 100		0,130	0,300	0,450	0,570	0,670
NHL-R		0,880	1,610	2,190	2,500	2,900
NHLP 25		0,600	1,100	1,490	1,730	2,040
NHLP 50		0,360	0,790	1,090	1,280	1,380
NHLP 75		0,190	0,560	0,790	0,900	0,920
NHLP 100		0,100	0,250	0,370	0,470	0,560



Obr. 30: Grafické znázornění součinitele tepelné vodivosti vzorků v suchém stavu

Z grafu je patrná různorodost součinitele tepelné vodivosti u referenčních vzorků, zatímco u vápenných (V-R) a vápenocementových vzorků (VC-R) se hodnoty téměř neliší (jen necelými 4 %), součinitel tepelné vodivosti u vzorků třetí skupiny – z hydraulického vápna (NHL-R) je výrazně nižší, 1,5 x. U ostatních vzorků se však hodnoty součinitele tepelné vodivosti, srovnávám-li zástupce zhotovené z různých pojiv o stejném množství náhrady písku perlitem, liší méně. Například hodnota součinitele tepelné vodivosti u vzorku NHLP 50 je přibližně jen 1,2 x nižší, než u VCP 50.

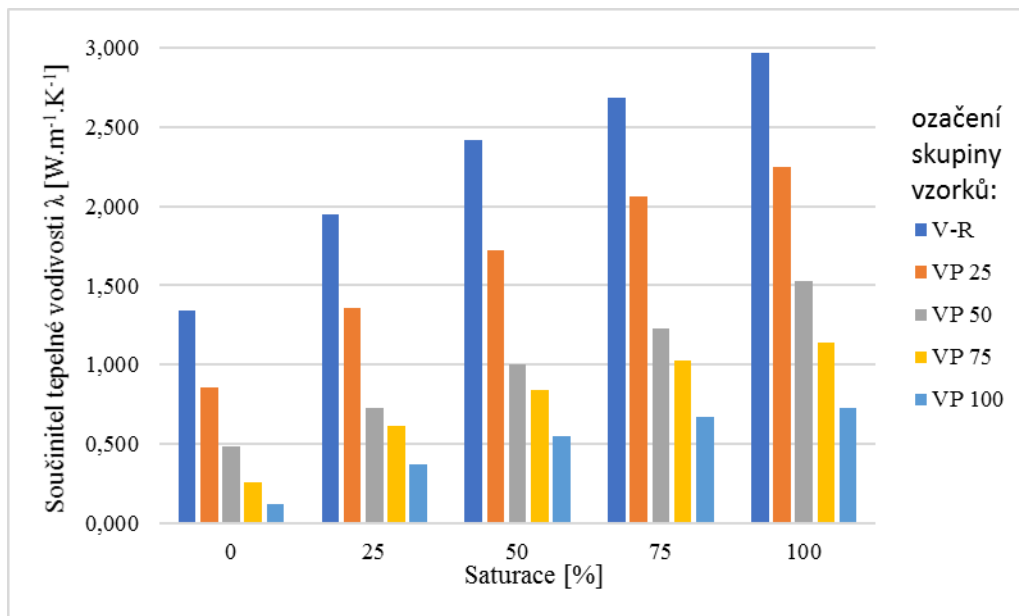
Pokud se zaměřím na vzorky zhotovené z jednoho druhu pojiva, z výsledků jasně vyplývá, že s rostoucím zastoupením perlitu součinitel tepelné vodivosti klesá, což je vzhledem ke zvyšující se pórovitosti materiálu spojené s poklesem objemové hmotnosti logické. Pokles však není lineární a se zvyšujícím se objemem náhrady kameniva klesá mírněji. Rozdíl hodnot mezi referenčními vzorky a vzorky s úplnou náhradou písku je nezávisle na použitém pojivu blízky 90 %.

Ze tří skupin vzorků součinitel nabývá nejnižších hodnot v případě použití hydraulického vápna. Naopak nejvyšší hodnoty dosahuje u vápenocementových omítek, nepatrně nižších u omítek vápenných.

Na Obr. 31 je dobře viditelné, že součinitel v závislosti na zvyšující se saturaci vzorku stoupá. V první fázi saturace více, se zvyšující se vlhkostí vzorku je růst pozvolnější, což platí nezávisle na množství náhrady písku perlitem. Kdybych hodnotami změřenými při konkrétním stupni saturace proložil křivku, lze pozorovat, že její sklon by se lišil také v závislosti na množství perlitu obsaženém ve vzorku. Čím je jeho obsah vyšší, tím je nárůst

součinitele tepelné vodivosti v závislosti na zvyšující se vlhkosti méně výrazný. Tato skutečnost může být zapříčiněna velikostí a uspořádáním pórů. Přestože je jejich celkový objem v perlitu, ve srovnání s křemennými zrny výrazně vyšší, teplo snadněji při zvyšující se saturaci proudí křemennými zrny, což se projevuje i na výraznějším nárůstu hodnot součinitele vzorků s převládajícím zastoupením tohoto materiálu.

Následující graf pracuje s hodnotami součinitele tepelné vodivosti pro vzorky zhotovené z vápenného pojiva, grafické vyjádření hodnot omítek vápenocementových a z hydraulického vápna by bylo obdobné, lišilo by se pouze konkrétními absolutními hodnotami.



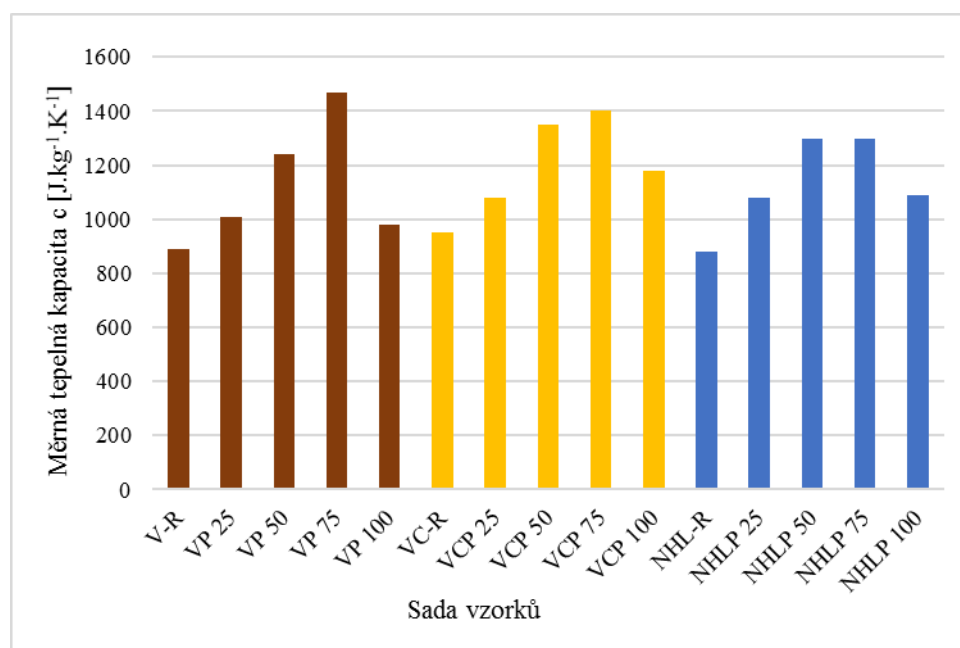
Obr. 31: Grafické znázornění součinitele tepelné vodivosti pro vzorky z vápenného hydrátu (V) v závislosti na vlhkosti

Další prezentovanou veličinou je měrná tepelná kapacita, Tab. 12 se stejně jako v předchozím případě zabývá nejen hodnotami získanými u vzorků v suchém stavu, ale rovněž výsledky měření prováděných na vzorcích částečně, resp. plně saturovaných.

Výsledky této veličiny je nutné interpretovat s ohledem na fakt, že veličina se stanovuje výpočtem z podílu objemové tepelné kapacity a objemové hmotnosti materiálu, jedná se tedy o množství energie vztážené k jednotkové hmotnosti.

Tab. 12: Tepelné vlastnosti – měrná tepelná kapacita

Skupina	Měrná tepelná kapacita c [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]					
	Saturace [%]	0	25	50	75	100
V-R		890	1000	1090	1170	1240
VP 25		1010	1120	1240	1340	1420
VP 50		1240	1460	1580	1670	1790
VP 75		1470	1730	1890	2010	2110
VP 100		980	1440	1690	1870	1990
VC-R		950	1100	1200	1270	1320
VCP 25		1080	1270	1390	1480	1530
VCP 50		1350	1600	1710	1790	1880
VCP 75		1400	1710	1880	1900	2070
VCP 100		1180	1620	1830	1950	2040
NHL-R		880	1010	1100	1180	1250
NHLP 25		1080	1230	1340	1430	1510
NHLP 50		1300	1510	1640	1730	1810
NHLP 75		1300	1640	1820	1910	1940
NHLP 100		1090	1490	1710	1870	1980

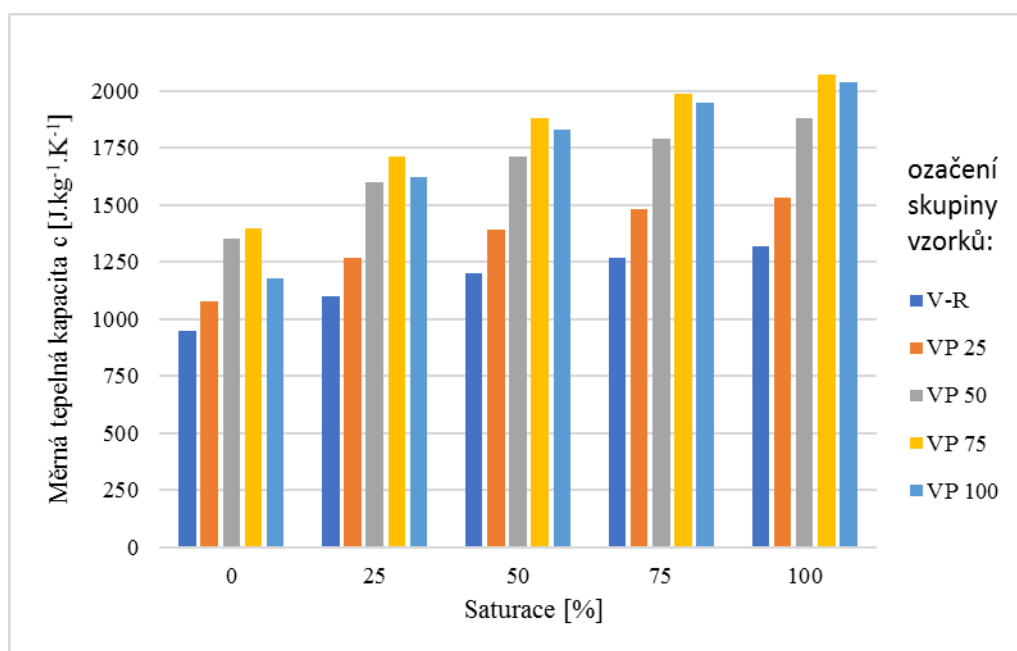


Obr. 32: Grafické znázornění měrné tepelné kapacity v suchém stavu

Hodnoty měrné tepelné kapacity všech tří skupin mají podobný průběh. Z referenčních vzorků dosahují nejvyšší hodnoty měrné tepelné kapacity vápenocementové (VC-R), následované v těsném sledu vzorky z vápenného hydrátu (V-R) a hydraulického vápna (NHL-R). Rozdíl hodnot prvního a posledního zástupce však není velký a činí přibližně 7 %.

Měrná tepelná kapacita zkušebních těles v závislosti na zvyšujícím se zastoupení perlitu nejdříve, až do 75% náhrady (s výjimkou vzorků z hydraulického vápna, kde stagnuje) roste, a poté se trend obrací a kapacita klesá. Nejvyšší hodnoty tak dosahuje při 75% objemové náhradě křemenného písku. Perlitové vzorky (se 100% náhradou) mají tedy hodnoty ve srovnání se 75% náhradou nižší, ale hodnotu referenčních těles nepodkročí. Při srovnání tří výsledků náležejících vzorkům o stejném složení kameniva a s různým druhem pojiva nelze konstatovat, která ze skupin vzorků celkově vykazuje nižší, resp. vyšší hodnoty měrné tepelné kapacity, protože se v maximální hodnotě skupiny při měnícím se množství náhrady plniva střídají. Důvodem může být kromě vysoké nepřesnosti měření také do výpočtu vstupující objemová hmotnost.

Z vlhkostního pohledu je vývoj hodnot srozumitelnější. Obr. 33 zachycuje měrnou tepelnou kapacitu v závislosti na vlhkosti u vápenocementových vzorků. Analogický trend vývoje by byl pozorovatelný také u vzorků vápenných a z hydraulického vápna, odlišné by byly pouze konkrétní hodnoty.



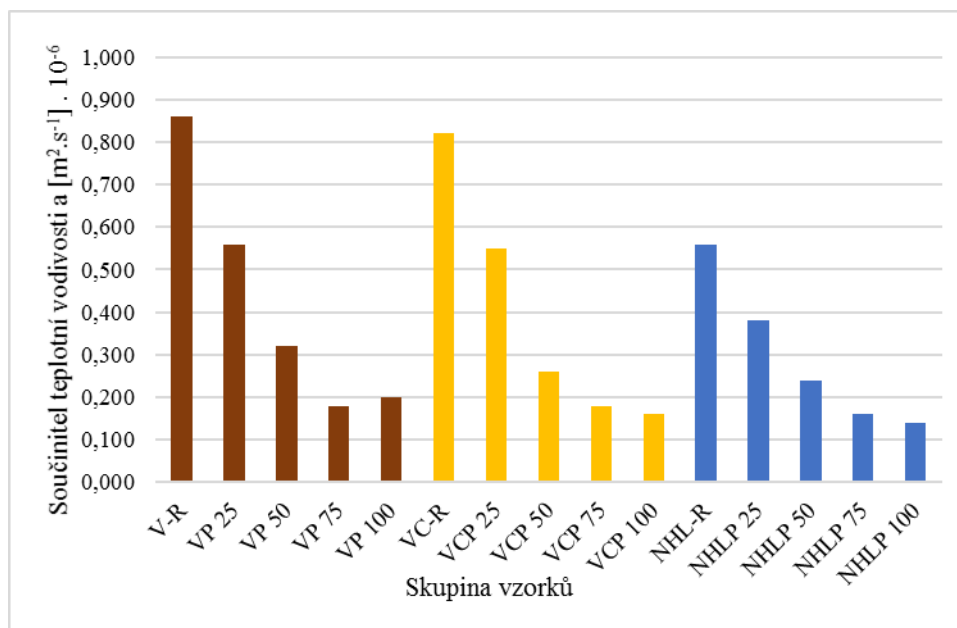
Obr. 33: Grafické znázornění měrné tepelné kapacity vzorků s vápenocementovým pojivem (VC) v závislosti na vlhkosti

Stejně jako součinitel tepelné vodivosti, tak i měrná tepelná kapacita v závislosti na vlhkosti roste, jen pomalejším tempem. Největší změnu hodnot lze zaznamenat u vzorků se 100% náhradou křemenného kameniva, nejnižší pak u vzorků referenčních. S ohledem na vysokou tepelnou kapacitu vody a její zastoupení v perlitu je výše uvedená skutečnost v souladu s předpokladem.

Posledním vyhodnocovaným parametrem je součinitel teplotní vodivosti vycházející ze součinitele tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity. Prezentován je stejným způsobem jako předcházející dvě veličiny – tabulkou doplněnou grafy.

Tab. 13: Tepelné vlastnosti – součinitel teplotní vodivosti

Skupina	Součinitel teplotní vodivosti a $[m^2 \cdot s^{-1}] \cdot 10^{-6}$					
	Saturace [%]	0	25	50	75	100
V-R		0,860	1,120	1,330	1,470	1,590
VP 25		0,560	0,850	1,040	1,220	1,300
VP 50		0,320	0,480	0,640	0,770	0,950
VP 75		0,180	0,410	0,550	0,660	0,720
VP 100		0,200	0,370	0,440	0,410	0,450
VC-R		0,820	1,200	1,390	1,460	1,490
VCP 25		0,550	0,820	0,980	1,070	1,120
VCP 50		0,260	0,460	0,580	0,660	0,720
VCP 75		0,180	0,330	0,420	0,490	0,530
VCP 100		0,160	0,270	0,320	0,360	0,370
NHL-R		0,560	0,920	1,170	1,280	1,440
NHLP 25		0,380	0,630	0,810	0,900	1,030
NHLP 50		0,240	0,480	0,630	0,710	0,760
NHLP 75		0,160	0,390	0,490	0,540	0,550
NHLP 100		0,140	0,260	0,300	0,320	0,330

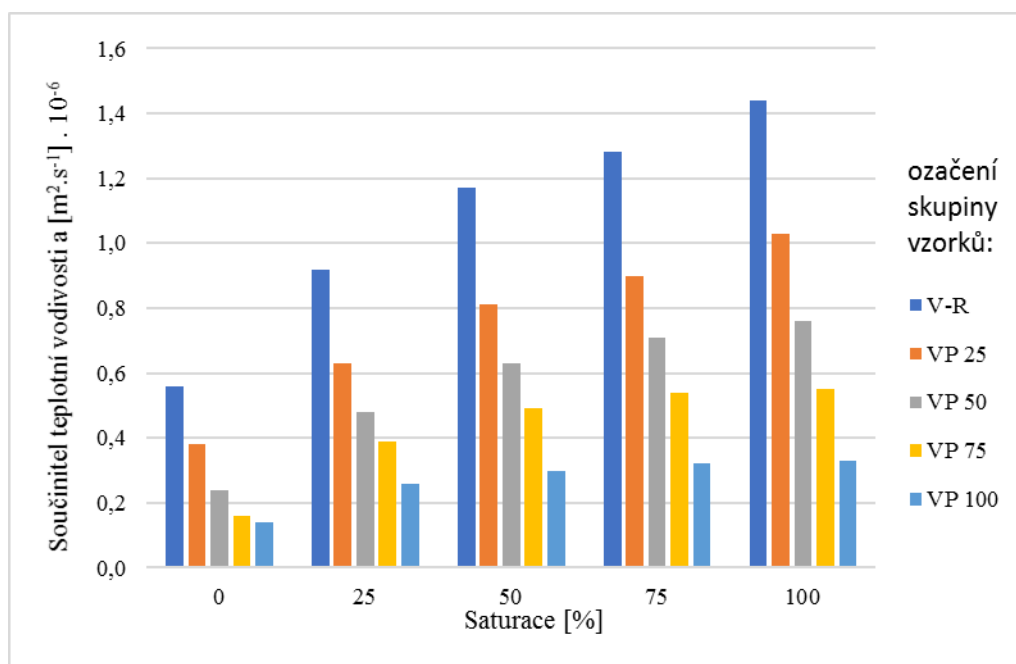


Obr. 34: Grafické znázornění součinitele teplotní vodivosti u suchých vzorků

Vývoj hodnot součinitele teplotní vodivosti je srovnatelný se součinitelem tepelné vodivosti s rozdílem vzorků, u kterých byly naměřeny maximální hodnoty. Nejvyšší hodnota v tomto případě přísluší referenčnímu vzorku z vápenného hydrátu (V-R), o necelých 5 % nižší hodnota byla zjištěna u vápenocementových vzorků (VC-R) a nejnižší s rozdílem 35 % vůči prvnímu náleží referenčním vzorkům z hydraulického vápna (NHL-R).

S rostoucím množstvím perlitu ve vzorcích hodnota součinitele klesá. Pokles hodnot se se zvyšujícím se množstvím perlitu snižuje. Hodnoty součinitele teplotní vodivosti referenčních vzorků jsou 4–5 x vyšší, než u vzorků se 100% náhradou písku perlitem. Pórovitost spojená se vzduchovými dutinami obsaženými v materiálu součinitel teplotní vodivosti snižuje. Teplo se tak materiálem šíří hůře. Naměřené výsledky tedy odrážejí očekávatelný průběh.

Obr. 35 zachycuje změny hodnot součinitele teplotní vodivosti v závislosti na vlhkosti. Vybrána byla skupina vzorků z hydraulického vápna.



Obr. 35: Grafické znázornění součinitele teplotní vodivosti u vzorků z hydraulického vápna (NHL) v závislosti na vlhkosti

Vývoj hodnot součinitele teplotní vodivosti v závislosti na vlhkosti je obdobný s průběhem hodnot součinitelem tepelné vodivosti. Hodnoty součinitele teplotní vodivosti se zvyšujícím se stupněm nasycení rostou. Stejného tvaru je též křivka, která by vznikla proložením hodnot náležejících jednotlivým stupňům saturace. Se zvyšujícím se zastoupením náhrady plniva perlitem se vliv saturace na hodnotu součinitele teplotní vodivosti snižuje. Rozdíl hodnot součinitele suchých a plně nasycených vzorků je v průměru 60 %.

4 Závěr

Jak již bylo zmíněno v úvodu, návrh materiálů o vlastnostech splňujících požadavky vyplývajících z místa jejich potenciálního uplatnění není jednoduchý. Vzhledem ke skutečnosti, že přínos každé vlastnosti je vykompenzován negativy projevujícími se při hodnocení z jiného úhlu pohledu, hledání materiálů s „optimální“ charakteristikou je založeno na kompromisech. V ideálním případě dochází k alespoň částečnému uspokojení všech hledisek.

Za účelem prohloubení poznání o potenciálně využitelných materiálech v běžné stavební praxi vznikla také tato práce, jejíž náplní bylo experimentálně ověřit vlastnosti omítek s určitým (proměnlivým) množstvím náhrady klasického křemenného kameniva lehčeným perlitem. První, teoretická, část se věnuje omítkám v obecnější rovině. Kromě historického vývoje jsou zde omítky rozděleny z technologického i materiálového pohledu, na který je kladen největší důraz. Nezastupitelnou roli v omítkách kromě pojiv mají také plniva zajišťující pevnost, stálost a objem. Těm je věnována samostatná kapitola s obecným rozdělením podle materiálových vlastností, způsobu získávání, nebo geologického původu. Umělá kameniva jsou předmětem poslední a nejrozsáhlejší kapitoly první části, která si dává cíl vytvoření přehledu všech v současné době dostupných lehčených kameniv reálně či potenciálně uplatnitelných při výrobě omítkových směsí, zahrnujících jak kameniva přírodní, tak umělá, včetně získaných druhotně z průmyslových odpadů. Kromě technologie výroby byly (v případě dostupnosti) uvedeny také základní materiálové charakteristiky – pevnost, pórovitost i tepelné vlastnosti.

Z důvodu příznivých materiálových vlastností a dobré dostupnosti (vč. finančního aspektu) se pro aplikaci v druhé, experimentální, části ukázal nejlepším umělý perlit. Podstatou experimentu bylo vytvoření záměsí s třemi druhy pojiva, jmenovitě s vápenným hydrátem, hydraulickým vápnem a pojivem vápenocementovým, doplněných plnivem ve formě křemenného písku s částečnou, resp. úplnou náhradou umělým perlitem. Vytvoření zkušebních těles předcházelo naměření vlastností užitých materiálů prezentovaných v první kapitole této části práce. Poté bylo přikročeno k tvorbě zkušebních záměsí upravovaných tak, aby bylo dosaženo normou definované konzistence čerstvé maltové směsi. Výsledkem byla receptura, podle které byla v dalším kroku vyrobena zkušební tělesa. Hmotnostní zastoupení jednotlivých složek všech receptur je uvedeno v druhé kapitole praktické části. Nejprve bylo

provedeno zhotovení referenční sady vzorků s plnivem z křemenného písku, pokračovalo se zamícháním směsí s 25, 50, 75 a 100% objemovou náhradou přírodního kameniva perlitem. Čerstvá směs byla uložena do zkušebních forem a po dobu tří dnů přikryta neprodyšnou fólií, poté byly vzorky odbedněny a skladovány v konstantních tepelně vlhkostních podmínkách po dobu 28 dní ode dne výroby. Po uplynutí této lhůty bylo započato testování vlastností. Výsledkem byl soubor dat prezentovaný v poslední kapitole experimentální části.

Jako první byly prezentovány základní fyzikální vlastnosti. Naměřené hodnoty doložily rozdílnost vlastností křemenného písku a perlitu. Perlit, jako lehčený materiál, obsahuje velké množství pórů, tudíž má vysokou hodnotu pórovitosti, a tedy i nízkou objemovou hmotnost. Tato skutečnost se projevila i u vzorků omítek; s rostoucí náhradou písku perlitem došlo ke zvýšení hodnot otevřené pórovitosti a snížení objemové hmotnosti, s vyšším množstvím perlitu klesala i hustota. Pokles, resp. růst stanovených hodnot byl přibližně lineární.

Naměřené hodnoty mechanických vlastností, jmenovitě pevnosti v tahu za ohybu a tlaku, poukázaly na rozdílnost v závislosti na užitém druhu pojiva. Zatímco pevnosti omítek z hydraulického vápna a vápenného hydrátu se lišily jen v řádu několika procent, pevnost v tlaku vápenocementových omítek byla ve srovnání s dalšími dvěma druhy téměř 8x vyšší a tahová pevnost skoro 3x vyšší. S rostoucím množstvím perlitu v omítkách pevnosti klesaly, nejzřetelněji u vápenocementových omítek, nejméně u vzorků z hydraulického vápna. Dynamickým modulem byla ověřena pravdivost hodnot získaných zkouškami na mechanickém listu.

Jasný trend vývoje absorpčního koeficientu vody v závislosti na množství perlitu se ukázal být pouze u zkušebních těles z hydraulického vápna, kde s rostoucím množstvím náhrady písku stoupal, u dalších dvou skupin bylo zaznamenáno kolísání hodnot poukazující na fakt, že absorpční koeficient není závislý pouze na pórovitosti, ale také na velikosti a rozložení pórů a jejich uspořádání ve struktuře materiálu. Nejrychleji se voda dostávala do vzorků z hydraulického vápna, nejpomaleji naopak do omítek vápenocementových.

Hodnoty obsahu nasycené vlhkosti i hmotnostní nasákavosti se zvyšujícím se množstvím perlitu v omítce stoupaly. Zajímavé byly takřka totožné hodnoty (s rozdílem několika procent) obou parametrů při srovnání vzorků se stejným zastoupením náhrady plniva a jiným druhem pojiva. Druh pojiva tedy neovlivňuje množství vody, které je schopný vzorek v dlouhodobém časovém horizontu pohltnout.

Testováním se prokázalo, že na hodnoty tepelných vlastností má vliv jak materiálové složení, tak i vlhkost, resp. saturace vzorků vodou. Součinitel tepelné i teplotní vodivosti se zvyšujícím se množstvím perlitu klesá. Tato skutečnost je snadno odůvodnitelná, tepelně

izolační schopnost materiálů v důsledku zvyšujícího se objemu pórů roste, a proto tepelná vodivost klesá. Nejlépe tepelně izolují omítky z hydraulického vápna, avšak u vzorků s 50%, či vyšším zastoupením perlitu, jsou hodnoty součinitelů tepelné vodivosti ve srovnání s ostatními druhy pojiva při stejném množství náhrady takřka ekvivalentní. Naměřené hodnoty měrné tepelné kapacity potvrzují skutečnost, že čím má materiál lepší izolační schopnosti, tím je potřebné mu dodat více energie, aby došlo k jeho ohřátí o určitou teplotu. Zvyšující se nasycení vzorků omítek vodou přináší zhoršení tepelně izolačních vlastností. Hodnoty obou součinitelů i měrné tepelné kapacity v důsledku zvyšujícího se nasycení vzorků rostou přibližně lineárně.

Testované omítky by mohly, s ohledem na své vlastnosti, najít uplatnění v oblasti rekonstrukcí historických staveb, ale také u objektů novodobých. Výhodou omítek z hydraulického vápna jsou malé změny (snížení) pevností při rostoucím zastoupení náhrady kameniva perlitem spojené s výrazným poklesem součinitele tepelné vodivosti. Z těchto důvodů by omítky tohoto druhu mohly být použity při rekonstrukcích historicky pojednaných, členitých fasád, u kterých není možná aplikace kontaktního zateplovacího systému. V případě aplikace omítek o větší tloušťce (které jsou u starších objektů obvyklé) by došlo ke zvýšení tepelně izolační schopnosti obvodového pláště a zároveň i k zachování estetické hodnoty fasády. V případě potřeby (dle původního vzoru) by omítky mohly být opatřeny např. jemnou štukovou vrstvou či přetřeny vápennou barvou. Při srovnání hodnot pevností i součinitele tepelné vodivosti v závislosti na množství náhrady se jako nejlépe uplatnitelná jeví omítka se 75% náhradou – NHLP 75, avšak s ohledem na konkrétní místo aplikace by bylo možné samozřejmě vybrat i materiál s jiným objemovým zastoupením perlitu.

Častým problémem staveb zatížených vlhkostí vztlínající z podzákladových konstrukcí bývají neprodyšné vrstvy bránící její akumulaci mimo nosné konstrukce a nemožnost následného vypařování do okolního prostředí. Za účelem snížení negativních důsledků vzniklých těmito skutečnostmi by mohly být na soklové partie objektů použity vápenocementové omítky s částečnou, resp. úplnou, náhradou plniva perlitem. Přesto, že pevnost těchto omítek s rostoucím zastoupením perlitu klesá, hodnoty jsou i tak ve srovnání s referenčními omítkami na bázi vápna více než 2x vyšší. Protože je však perlit oproti křemennému písku, díky své pórovitosti, schopný z dlouhodobého hlediska pojmout výrazně větší množství vody, užitím umělého kameniva se zvyšuje akumulační schopnost (obsah nasycené vlhkosti i nasákavost). V případě dostačující pevnosti kolem 3 MPa by stálo za úvahu použití omítky čistě perlitové (VCP 100), schopné pohlit ve srovnání s referenční omítkou s plnivem ve formě písku až 2x větší množství vody.

Vápenné perlitové omítky by mohly najít uplatnění v interiérech staveb, zvláště pak v přízemních prostorech se zvýšeným vlhkostním zatížením konstrukcí, v místnostech na styku teplotních zón (např. obývaná místnost a nevytápěná chodba, strop nejvyššího podlaží a prostor půdy) či také v technických provozech s vysokou relativní vlhkostí vnitřního vzduchu a to z důvodu, že jsou schopné pojmout relativně velké množství vody a se zvyšujícím se zastoupením perlitu se zvyšuje i jejich tepelně izolační schopnost. Jedinou nevýhodou je jejich relativně nízká, s rostoucím zastoupením perlitu klesající, pevnost. Při zhodnocení všech aspektů se nejpříhodněji pro využití v praxi jeví vápenná omítka s 50% náhradou křemenného písku VP 50, ale možné je rovněž použití omítek s jiným množstvím náhrady křemenného písku perlitem.

Literatura

- [1] HOŠEK, Jiří a Jan MUK. *Omítky historických staveb*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1990. Učebnice pro vysoké školy (Státní pedagogické nakladatelství).
- [2] MENCL, Václav. *Výtvarný vývoj středověkých omítek*. Praha: Orbis, 1968.
- [3] HOŠEK, Jiří a LOSOS, Ludvík. *Historické omítky: průzkumy, sanace, typologie*. Praha: Grada, 2007. Stavitel. ISBN 978-80-247-1395-3.
- [4] GIRSA, Václav a Dagmar MICHONOVÁ. *Tradiční vápenné omítky: poznání a praktické postupy*. Praha: IC ČKAIT, 2015. ISBN 978-80-87438-72-5.
- [5] BLAHA, Martin. *Omítky*. Praha: Grada, 2004. ISBN 80-247-0898-1.
- [6] LANK, Jiří a Pavel HLAVÁČEK. *Rekonstrukce fasád*. Brno: ERA, 2006. Stavíme. ISBN 80-736-6072-5.
- [7] FRIDRICHOVÁ, Marcela, Karel DVOŘÁK a Rudolf FRIDRICH. *Omítky*. Brno: ERA group, 2004. Stavíme. ISBN 80-736-6004-0.
- [8] *Zateplovací systémy ETICS* [online]. [cit. 2018-09-28]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/zateplovaci-systemy/303-zateplovaci-systemy-etics>
- [9] *Aplikace tenkovrstvé omítky* [online]. [cit. 2018-09-28]. Dostupné z: <http://www.ceresit.cz/cz/systemy/thermal-insulation/jak-zateplovat/aplikace-tenkovrstve-omitky.html>
- [10] MĚŠŤAN, Radomír. *Omítkářské a štukatéřské práce*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [11] *Hliněné omítky přinesou do interiéru zdravé klima* [online]. [cit. 2018-10-02]. Dostupné z: <https://www.estav.cz/cz/2494.hlinene-omitky-prinesou-do-interieru-zdrave-klima>
- [12] HLAVÁČ, Jan. *Základy technologie silikátů*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1981.
- [13] SLIVKA, Vladimír. *Těžba a úprava silikátových surovin*. Praha: Silikátový svaz, 2002.
- [14] *Výroba vápna v ČR loni rostla, letos ale vápenky očekávají pokles* [online]. [cit. 2018-10-11]. Dostupné z: <http://www.stavebnictvi3000.cz/zpravy/58600-vyroba-vapna-v-cr-loni-rostla-letos-ale-vapenky/>
- [15] *Technologie výroby vápna* [online]. [cit. 2018-10-07]. Dostupné z: <http://muzeum.mineral.cz/vapenictvi/technologie-vyroby-vapna.php>
- [16] *Vápenka* [online]. [cit. 2018-10-07]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/V%C3%A1penka>
- [17] BARTA, Rudolf. *Chemie a technologie cementu*. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1961.
- [18] *Kde se v ČR těží sádrovec?* [online]. 27. 7. 2011 [cit. 2018-10-13]. Dostupné z: <https://www.ceskestavby.cz/clanky/kde-se-v-cr-tezi-sadrovec-20003.html>
- [19] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 4. vydání. Praha, 2018.

- [20] Kamenivo. *Institut geologického inženýrství, Hornicko-geologická fakulta, VŠB* [online]. [cit. 2018-10-16]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/kamenivo.html#literatura>
- [21] DROCHYTKA, Rostislav. *Lehké stavební látky*. Brno: Vysoké učení technické, 1993. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0514-7.[2: České vysoké učení technické,
- [22] CHLUPÁČ, Ivo. *Geologická minulost České republiky*. Vyd. 2., opr. Praha: Academia, 2011. Neživá příroda. ISBN 978-80-200-1961-5.
- [23] ČSN EN 1097-6. *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva: Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [24] ČSN EN 1097-3. *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva: Část 3: Stanovení sypané hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1999.
- [25] ČSN EN 933-1. *Zkoušení geometrických vlastností kameniva: Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [26] ČSN EN 933-10. *Zkoušení geometrických vlastností kameniva: Část 10: Posouzení jemných částic - Zrnitost filerů (prosévání proudem vzduchu)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [27] ČSN EN 1097-5. *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva: Část 5: Stanovení vlhkosti sušením v sušárně*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008.
- [28] ČSN EN 13055. *Pórovité kamenivo: Část 1: Pórovité kamenivo do betonu, malty a injektážní malty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [29] ČSN EN 1097-10. *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva: Část 10: Stanovení výšky vzlínivosti vody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [30] ČSN EN 1097-11. *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva: Část 11: Stanovení stlačitelnosti a pevnosti v tlaku pórovitého kameniva*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [31] ČSN EN 1744-1+A1. *Zkoušení chemických vlastností kameniva: Část 1: Chemický rozbor*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [32] KUŽVART, Miloš, ed. *Ložiska nerudných surovin ČSR*. Praha: Univerzita Karlova, 1983.
- [33] Vlastnosti Agloporitu. *Agloporit* [online]. [cit. 2018-10-29]. Dostupné z: <http://agloporit.cz/lehke-umele-kamenivo/>
- [34] *Výroba keramického kameniva Liapor* [online]. [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <https://www.liapor.cz/jak-se-vyrabi>
- [35] LIAS Vintřov, lehký stavební materiál a.s. [online]. *Prohlášení o vlastnostech, kamenivo Liapor*. 2017, [cit. 2018-10-27]. Dostupné z: <https://www.liapor.cz/ke-stazeni>
- [36] Grena a.s. [online]. *Technický list – Vermikulit*. 2018, [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <http://www.grena.cz/kontakt.html>

- [37] Historie firmy. *Perlit Šenov u Nového Jičína* [online]. [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <http://www.perlit.cz/o-firme-perlit/>
- [38] O společnosti. *Perlit Praha spol. s r.o.* [online]. [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <http://www.perlitpraha.cz/o-nas/>
- [39] *Skupina Lhoist* [online]. [cit. 2018-11-17]. Dostupné z: https://www.lhoist.com/cs_cs/
- [40] *Zement und Kalkwerke Otterbein: Technisches Merkblatt* [online]. [cit. 2018-11-17]. Dostupné z: <https://www.zkw-otterbein.de/service/dokumentencenter>
- [41] *Českomoravský cement: Závod Radotín* [online]. [cit. 2018-11-17]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/kontakty/cmc/vyrobni-zavody/radotin>
- [42] *Českomoravský cement, závod Radotín: Technický list CEM I 42,5 R* [online]. [cit. 2018-11-17]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/volne-lozeny-cement/cemi425r>
- [43] *Eurovia kamenolomy: Provozovna Chlum* [online]. [cit. 2018-11-18]. Dostupné z: http://www.euroviakamenolomy.cz/provozovny_detail.aspx?strediska_id=1250
- [44] Expandovaný perlit pro stavebnictví. *Perlit Praha* [online]. [cit. 2018-11-18]. Dostupné z: <http://www.perlitpraha.cz/perlit/>
- [45] *Instruction Manual: Pycnomatic and Pycnomatic ATC*. Thermo electron corporation.
- [46] ČSN EN 1015-11. *Zkušební metody malt pro zdívo – Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdělých malt v tahu za ohybu a v tlaku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2000.
- [47] EBeton. *Slovník pojmů: modul pružnosti* [online]. [cit. 2018-12-01]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/modul-pruznosti>
- [48] ČSN EN 12054-4. *Zkoušení betonu – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005.
- [49] BROŽOVSKÝ, Jiří. *K problematice určování pevnosti betonu v konstrukci z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu podle ČSN EN13791*. BETON – technologie, konstrukce, sanace. Praha: BETON TKS, s. r. o., 2012, sv. 1, str. 80–83,
- [50] ČSN EN 1015-18. *Zkušební metody malt pro zdívo – Část 18: Stanovení koeficientu absorpce vody v zatvrdlé maltě*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2003.
- [51] ČERNÝ, Robert a ROVNANÍKOVÁ, Pavla. *Transport Processes in Concrete*. Spon Press, London 2002
- [52] ŠESTÁK, Jaroslav, HUBÍK, Pavel a MAREŠ, Jiří J. *Thermal physics and thermal analysis*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-319-45899-1.

Seznam obrázků

Obr. 1: Schématický řez otevřenou zemní pecí.....	20
Obr. 2: Schéma Hofmannovy kruhové pece	21
Obr. 3: Vlevo: šachtová pec s vnějším topením, vpravo: moderní plynová šachtová pec.....	22
Obr. 4: Křivka zrnitosti směsi kameniva PG 1, PG 2 a PG 3.....	59
Obr. 5: Křivka zrnitosti expandovaného perlitu.....	60
Obr. 6: Srovnání objemového zastoupení velikostí částic užitých pojiv.	61
Obr. 7: Stanovení konzistence čerstvé malty na setřásacím stolku.....	65
Obr. 8: Vlevo: vážení kameniva do záměsi, vpravo: míchání záměsi v míchačce	66
Obr. 9: Vlevo: plnění forem čerstvou maltovou směsí: vpravo: vzorky před odbedněním	66
Obr. 10: Vlevo: sada zkušebních těles po odbednění: vpravo: vzorky připravené k provádění experimentů	67
Obr. 11: Vlevo: vážení vzorků na digitální váze: vpravo: měření délek posuvným měřidlem	68
Obr. 12: Schématický náčrt postupu měření přístroje Pycnomatic ATC, ThermoFisher SCIENTIFIC.....	70
Obr. 13: Přístroj Pycnomatic ATC, ThermoFisher SCIENTIFIC pro měření hustoty matrice	71
Obr. 14: Uložení a rozměrové uspořádání vzorků na ocelových válcích zkušebního přístroje (rozměry uvedeny v mm)	73
Obr. 15: Vlevo: celkový pohled na mechanický lis Heckert FP 100, vpravo: ELE International pro měření pevnosti v tahu za ohybu.....	74
Obr. 16: Vlevo: zkušební tělesa připravená ke zkoušce pevnosti v tlaku, vpravo: pohled na zkušební vzorek po provedení zkoušky pevnosti v tlaku	76
Obr. 17: Vlevo: LEPOX METAL – složka A a B, vpravo: vzorky po nanesení vrstvy epoxidu	79
Obr. 18: Vlevo: princip zkoušky nasákavosti; vpravo: zařízení pro kontinuální měření přírůstků hmotnosti vzorku ponořeného do kapaliny	80
Obr. 19: Schématické znázornění křivky nasákavosti.....	80
Obr. 20: Měření tepelných vlastností na přístroji ISOMET 2114 Aplid Precision	84
Obr. 21: Grafické znázornění objemové hmotnosti	86
Obr. 22: Grafické znázornění hustoty	86
Obr. 23: Grafické znázornění otevřené pórovitosti	86
Obr. 24: Grafické znázornění pevnosti v tahu za ohybu	89

Obr. 25: Grafické znázornění pevnosti v tlaku	89
Obr. 26: Grafické znázornění dynamického modulu pružnosti	89
Obr. 27: Grafické znázornění absorpčního koeficientu vody	92
Obr. 28: Grafické znázornění obsahu nasycené vlhkosti	92
Obr. 29: Grafické znázornění hmotnostní nasákavosti	92
Obr. 30: Grafické znázornění součinitele tepelné vodivosti vzorků v suchém stavu	95
Obr. 31: Grafické znázornění součinitele tepelné vodivosti pro vzorky z vápenného hydrátu (V) v závislosti na vlhkosti.....	96
Obr. 32: Grafické znázornění měrné tepelné kapacity v suchém stavu	97
Obr. 33: Grafické znázornění měrné tepelné kapacity vzorků s vápenocementovým pojivem (VC) v závislosti na vlhkosti	98
Obr. 34: Grafické znázornění součinitele teplotní vodivosti u suchých vzorků	99
Obr. 35: Grafické znázornění součinitele teplotní vodivosti u vzorků z hydraulického vápna (NHL) v závislosti na vlhkosti	100

Seznam tabulek

Tab. 1: Pevnost v tlaku a tahu za ohybu, CEM I 42,5 R	58
Tab. 2: Velikost částic	61
Tab. 3: Chemické složení použitých materiálů	62
Tab. 4: Základní vlastnosti	62
Tab. 5: Receptury malt s vápenným pojivem	63
Tab. 6: Receptury malt s vápenocementovým pojivem	63
Tab. 7: Receptury malt s pojivem na bázi hydraulického vápna.....	64
Tab. 8: Základní fyzikální vlastnosti	85
Tab. 9: Mechanické vlastnosti	88
Tab. 10: Vlhkostní vlastnosti.....	91
Tab. 11: Tepelné vlastnosti – součinitel tepelné vodivosti.....	94
Tab. 12: Tepelné vlastnosti – měrná tepelná kapacita.....	97
Tab. 13: Tepelné vlastnosti – součinitel teplotní vodivosti	99