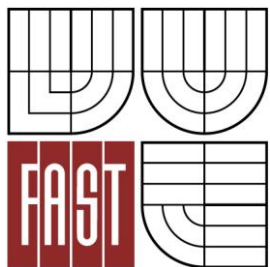




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV CHEMIE

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF CHEMISTRY

VÁPENNÉ MALTY MODIFIKOVANÉ JEMNĚ MLETÝM CIHELNÝM STŘEPEM

LIME MORTARS MODIFIED BY FINE GROUND BRICK BODY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. LUDMILA ŠMERDOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. RNDr. PAVLA ROVNANÍKOVÁ, CSc.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. LUDMILA ŠMERDOVÁ
Název	Vápenné malty modifikované jemně mletým cihelným střepem
Vedoucí diplomové práce	prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2012
Datum odevzdání diplomové práce	11. 1. 2013
V Brně dne 31. 3. 2012	

.....
prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc.
Vedoucí ústavu

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

Podklady a literatura

HANYKÝŘ, V., KUTZENDÖRFER, J. Technologie keramiky. 1. vydání. Praha: Silikátový svaz, 2008. ISBN 978-80-86821-48-1.

BARONIO, G., BINDA, L. Study of the pozzolanity of some brick and clays. Construction and Building Materials, Vol. 11, No. 1, 2007, 41-46.

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

NACERI, A., HAMINA, M. CH. Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar. Waste Management, Vol. 29, 2009, 2378-2384.

O'FARREL, M., SABIR, B. B., WILD, S. Pore size distribution and compressive strength of waste clay brick mortar. Cement and Concrete Composites, Vol. 23, 2001, 81-91.

Zásady pro vypracování

Proveďte rešerši v oblasti využití cihelného střepu do vápenných malt. V teoretické části uveďte přehled používání pucolánů jako aktivní příměsi do vápenných malt. Popište charakteristiku cihelného střepu, přeměnu jílových minerálů na pojivé složky střepu. Popište možnosti stanovení reaktivity střepu jako pucolánu. V experimentální části

v I. etapě charakterizujte vlastnosti vstupních surovin.

Ve II. etapě použijte přídavek stoupajícího množství jemného cihelného střepu ke konstantnímu množství vápna.

Ve III. etapě nahraďte část vápna stoupajícím množstvím jemného cihelného střepu. Ze směsí vyrobte zkušební tělesa 40×40×160 mm, stanovte pevnosti v čase a nasákavost po 28 dnech. U vybraných vzorků stanovte mrazuvzdornost a přídržnost k podkladu. Výsledky zpracujte do přehledných tabulek a grafů, v závěru práce proveďte diskusi a zhodnocení dosažených výsledků. Rozsah diplomové práce

60 až 80 stran, teoretickou část zpracujte s použitím literatury na cca 20 stran.

Předepsané přílohy

.....

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

Abstrakt

Přírodní pucolánové materiály hrály významnou roli již v antickém stavitelství. V posledních desetiletích a dnes nacházejí své uplatnění zejména umělé pucolány, které se přidávají jako příměs do malt a betonů za účelem zlepšení některých, zejména mechanických vlastností. V diplomové práci je studován pucolán typu jemného cihelného prachu, který je vedlejším produktem při výrobě kalibrovaných cihel. Vedle sledování pucolánové aktivity cihelného prachu jsou zde zkoumány vlastnosti vápenných malt s různými podíly cihelného prachu jako příměsi či částečné náhrady vápna. Sledován je především jeho vliv na konzistenci těchto malt, nasákavost, pevnosti v čase či lomově-mechanické parametry malt. Výsledky ukazují na možný potenciál využití tohoto zdroje pucolánové příměsi do vápenných malt a omítek, které se dnes používají především pro opravy fasád historických objektů.

Klíčová slova

Vápenná malta, vápenná omítka, vápno, oxid vápenatý, vápenný hydrát, pucolán, pucolanita, pucolánová aktivita, cihelný střep, cihelný prach.

Abstract

Natural pozzolanic materials played an important role in Ancient architecture. In the last decades and nowadays it is artificial pozzolan which especially finds its use as an additive to mortar and concrete to improve some, especially the mechanical properties. This master thesis deals with study of pozzolan type of fine brick powder which is a by-product of the production of calibrated bricks. Along with studying pozzolanic activity of brick powder, lime mortar with different proportions of brick powder as an additive or replacement of lime dust are investigated. What is observed is its impact on the consistency of these mortar, water absorption, strength in time or fracture-mechanical parameters of mortar. The results may indicate the possible potential use of this source of pozzolanic admixture in lime mortar and plaster which are nowadays mainly used for the restoration of facades of historic buildings.

Keywords

Lime mortars, lime plasters, lime, calcium oxide, hydrated lime, pozzolan, pozzolanicity, pozzolanic activity, brick body, brick dust.

Bibliografická citace VŠKP

ŠMERDOVÁ, Ludmila. *Vápenné malty modifikované jemně mletým cihelným střepekem*. Brno, 2012. 102 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie. Vedoucí práce prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc..

Prohlášení:

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

V Brně dne 11. 1. 2013

.....
podpis autora
Ludmila Šmerdová

Ráda bych poděkovala prof. RNDr. Pavle Rovnaníkové, CSc. za cenné rady a připomínky, trpělivou a ochotnou pomoc při zpracovávání tématu.

Poděkování patří ing. Evě Navrátilové za rady a milou pomoc v laboratoři, také děkuji paní Naděždě Krmíčkové za provedené zkoušky a celému Ústavu chemie na VUT FAST v Brně za poskytnutý prostor.

Děkuji doc. Ing. Pavlu Schmidovi, Ph.D. za ochotné provedení lomových zkoušek a prof. Ing. Zbyňku Keršnerovi, CSc. za pomoc při jejich vyhodnocování.

Děkuji své rodině za zázemí a podporu po celou dobu studia

ÚVOD	11
CÍL PRÁCE	12
I. TEORETICKÁ ČÁST	13
1 Vápenné malty a omítky	13
1.1 Historie vápenných malt a omítek	14
1.2 Vápenocementové omítky	14
1.3 Vápenné malty a omítky s příměsí pucolánů	15
1.4 Cihelný střep jako pucolánová příměs ve vápenných maltách a omítkách	15
2 Vápno	17
2.1 Karbonatace vápenného pojiva	17
2.2 Vzdušné vápno	18
2.3 Hydraulické vápno	19
3 Cement	20
4 Pucolanita	21
4.1 Charakteristika	21
4.2 Rozdělení	21
4.2.1 Technogenní příměsi	22
5 Cihelný střep	24
5.1 Charakteristika cihelného střepu	24
5.2 Suroviny	25
5.2.1 Plastické suroviny	25
5.2.1.1 Chemické a mineralogické složení jílovinových zemin	26
5.2.1 Neplastické suroviny	26
5.3 Výroba	26
5.3.1 Fyzikální a chemické procesy ve střepu při výpalu	27
5.3.1.1 Přeměna jílových minerálů na pojivé složky střepu	27
5.4 Vlastnosti keramického střepu	28
6 Pucolánová reakce	28
6.1 Pucolanita cihelného střepu	29
6.2 Stanovení reaktivity střepu jako pucolánu	30
6.2.1 Popis vybraných metod	31
II. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	34
7 I. etapa - Charakteristika vstupních surovin	34
7.1 Vápenný hydrát	34
7.2 Cement	34

7.3	Cihelný prach	35
7.3.1	Stanovení granulometrie cihelného prachu	37
7.3.2	Stanovení mineralogického složení cihelného prachu XRD analýzou ...	39
7.3.3	Stanovení pucolánové aktivity cihelného prachu	40
7.4	Písek	41
8	II. etapa - Stoupající množství jemného cihelného střepu ke konstantnímu množství vápna	42
8.1	Složení malt	42
8.2	Příprava zkušebních těles	42
8.3	Výsledky zkoušek	42
8.3.1	Pevnost v tlaku	43
8.3.2	Objemová hmotnost.....	43
8.3.3	Nasákavost.....	44
8.4	Vyhodnocení	44
9	III. etapa – Nahrazení části vápna stoupajícím množstvím jemného cihelného střepu.....	45
9.1	Složení malt	45
9.2	Příprava zkušebních těles	47
9.3	Vlastnosti vápenných malt s jemným cihelným střepem	48
9.3.1	Stanovení konzistence čerstvé malty.....	48
9.3.1.1	Měření konzistence na střešacím stolku	48
9.3.1.2	Měření konzistence s použitím přístroje pro stanovení hodnoty penetrace.....	49
9.3.2	Množství záměsové vody	50
9.3.3	Nasákavost.....	51
9.3.4	Mechanické vlastnosti.....	52
9.3.1	Vlastnosti vápenných malt pro vybrané směsi	62
9.3.1.1	Lomově-mechanické parametry	63
9.3.1.2	Objemová hmotnost čerstvé a ztvrdlé malty.....	72
9.3.1.3	Obsah vzduchu v čerstvé maltě	74
9.3.1.4	Přídržnost k podkladu	75
9.3.1.5	Mrazuvzdornost.....	77
9.3.1.6	Součinitel difúze pro vodní páru	80
9.3.1.7	REM (rastrovací elektronový mikroskop)	83
10	DISKUSE VÝSLEDKŮ.....	88
11	ZÁVĚR.....	92
12	LITERATURA	95

13	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	98
14	SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ	98
14.1	TABULKY.....	98
14.2	OBRÁZKY.....	99

ÚVOD

Neustále se rozvíjející stavebně materiálový průmysl se snaží vytvářet inovativní technologie a produkty s co nejhodnotnějšími materiálovými vlastnostmi. K tomu používá nejrozumnějších moderních surovin, často uměle připravených.

V oblasti péče o stavební památky však „modernost“ nenachází své uplatnění a je zde naopak spíše vyžadováno používání tradičních technologií a materiálů pro šetrné ošetřování a věrohodné zachování původního díla. Jedním z těchto tradičních stavebních materiálů jsou vápenné malty a omítky, používané pro spojování zdiva a k omítání fasád do doby před nástupem cementu.

Vlastnosti samotného vápenného pojiva však ne vždy postačují danému použití a je snaha o zlepšování jeho vlastností, které je možné shrnout do pojmu trvanlivost. Vápenné malty dochované několik století na fasádách hradů a zámek obsahovaly obvykle přirozeně hydraulická vápna, která měla vyšší či nižší hydraulicitu. V některých případech se k vápnu používaly příměsi hydraulického nebo pucolánového charakteru, které měly podobný účinek, jako použití hydraulického vápna. Jako pucolány byly využívány přírodní materiály s obsahem amorfního oxidu křemičitého, často se používaly pálené jíly ve formě drcených cihel nebo jiného keramického zboží, ale také odpady ze skláren, různé strusky z hutí apod.

Ve snaze přiblížit se složení historických malt při obnově památek je žádoucí mít představu o možnostech použití současných materiálů pro opravné malty.

Na základě provedených analýz historických malt se hledají podobné materiály, které byly dříve používány. Jednou z možností je využití jemného cihelného střepu, který je produkován jako odpad při broušení cihel. Cihelný prach, jehož znovuvyužití v původní výrobní technologii není vždy žádoucí, se stává odpadem. Díky své jemnosti a chemickému a mineralogickému složení má určitý potenciál stát se dobrým pucolánem z hlediska technologického, jeho využití má i aspekt ekonomický a ekologický.

CÍL PRÁCE

V oblasti péče o stavební památky je vyžadováno používání tradičních technologií a materiálů pro šetrnou obnovu a věrohodné zachování původního díla. Jedním z těchto tradičních stavebních materiálů jsou vápenné malty a omítky, které byly v minulosti modifikovány různými druhy pucolánů. Přírodní, ale i technogenní pucolánové materiály hrály významnou roli již v antickém stavitelství.

Cílem diplomové práce bylo zjistit možnosti využití do malt pro zdění a omítání jemného cihelného prachu, který je vedlejším produktem při výrobě kalibrovaných cihel. Jako hlavní parametry, určující reaktivní vlastnosti cihelného prachu, které bylo nutno zjistit pro zjištění vlivu na mechanické vlastnosti modifikovaných malt, bylo chemické a mineralogické složení a pucolánová aktivita.

Metodika experimentálního výzkumu byla rozdělena do tří etap. První etapa byla zaměřena na charakteristiku vstupních surovin. Bylo provedeno stanovení chemického složení použitého cementu, stanovení granulometrie použitého písku, granulometrie, mineralogické složení a pucolánová aktivita cihelného prachu. Ve druhé etapě byly zkoumány vlastnosti malt s přídavkem stoupajícího množství cihelného prachu ke konstantnímu množství vápna. Zkoumanými vlastnostmi byla pevnost v tlaku v čase, objemová hmotnost a nasákavost malt. Ve třetí byl vápenný hydrát procentuálně nahrazován stoupajícím množstvím cihelného prachu. Na maltách byla testována konzistence čerstvých malt, objemová hmotnost, nasákavost a pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu v čase. U vybraných vzorků byla dále stanovována mrazuvzdornost, difúze, lomově-mechanické charakteristiky a přídržnost k podkladu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 Vápenné malty a omítky

Vápno bylo výhradním pojivem pro malty a omítky až do konce 19. století, kdy se začal používat také portlandský cement. Vápenné pojivo je v pravdě historickým pojivem a jeho použití je vyhledáváno především v péči o stavební památky. V této oblasti je snaha o co největší podobnost nových malt a omítek pro obnovu s původním materiálem. Jsou zkoumány procesy, jakými dochází k tvorbě pevné struktury vápenných malt, omítek a nátěrů, které mohou souviset s dlouhodobou trvanlivostí historických vápenných materiálů. Je tedy snaha nejen o podobnost použitých surovin, ale i stejnou technologii výroby přípravy a výroby těchto surovin, jakožto i o stejné postupy provedení malt a omítek a použití stejných pomůcek při provádění (čili uplatňování tradičního řemesla) [1] [2].



Zdroj: archiv autorky

Obrázek 1.1 Vápenná povrchová úprava fasády městského domu v Nice

- Vymezení pojmu vápenná malta a vápenná omítka

Malta je stavební materiál, který se používá ke spojování různých stavebních prvků, k ochraně a zušlechťování povrchu stavebního díla. Vápenná malta je malta, v níž je pojivem vápno. Vápenné malty se dělí na malty zdící (na zdění), omítkové (na omítání), malty spárovací, štukové apod.

Naproti tomu vápenná omítka je plošná povrchová úprava svislých a vodorovných konstrukcí, která vznikla omítnutím konstrukce vápennou maltou. Omítání se provádí nahazováním nebo natahováním malty. Na vlhké vápenné omítky je možné malovat – provádět fresky. Další úprava omítek po zatvrdnutí a vyschnutí se může provádět nátěry, malbami a dalšími technikami. Provádí se jako jednovrstvé nebo vícevrstvé [2].

1.1 Historie vápenných malt a omítek

Nejstarší zjištěné omítkové vrstvy pocházejí z období 7. až 6. tisíciletí před Kristem ze středovýchodní oblasti na území dnešního Turecka. V Egyptě se vyskytovaly první sádrovápenné omítky pro úpravy venkovní i úpravy interiéru. Později například vícevrstvé vápenné omítky s příměsí křemenného písku a jílu, plněné sekanou slámou. Římské venkovní omítky byly většinou jednovrstvé o poměrně značné tloušťce a téměř zásadně byly vedle písku plněny drcenými cihlami, což jim dodávalo částečné hydraulické vlastnosti. V Byzanci se navazovalo na římské způsoby omítání. Silné, na vápno bohaté omítky byly v přímořských oblastech plněny pemzou po řeckém způsobu, naopak ve vnitrozemí po římském – drcenými keramickými střepy. Tyto příměsi dodávaly vápennému pojivu lepší mechanické vlastnosti a trvanlivost dnes známou pucolánovou reakcí s Ca(OH)_2 [3].

1.2 Vápenocementové omítky

V současné době jsou nejčastěji používanými omítkami. Při vyšších obsazích cementu si vápenocementová malta dlouhodobě udržuje vysokou hodnotu pH pórového roztoku, protože hydratací vzniklý hydroxid vápenatý je ukládán i v pevné formě mezi hydratačními produkty a teprve s postupnou karbonatací přecházejí jeho další podíly do roztoku a karbonátují. U tohoto typu omítky zaručuje rychlý vývin pevností přítomný cement, takže omítka je již od začátku pevná v celé své hmotě. Póry ve vápenocementové omítce mají menší průměr, což následně vede k většímu odporu proti propustnosti vodní páry a možnosti výraznějšího zavlhání vztlínající vodou z podzákladí a vodou kondenzovanou z ovzduší.

Při opravách historických omítek se vápenocementové omítky příliš nepoužívají. I jen malé přidání cementu do vápenné malty působí na historických stavbách

nepřirozeně a tvrdě. Výjimku tvoří památky z minulého století, při jejichž stavbě byl portlandský cement nebo směsné cementy používány [4].

1.3 Vápenné malty a omítky s příměsí pucolánů

Vápenné malty a omítky s pucolánovými příměsemi jsou dobře známy například z období Starověkého Říma, kde se aplikovaly především do vlhkých prostor a na stavbách v přímém styku s vodou. Přednost se dávala přírodním pucolánům (podrcený a pomletý materiál sopečného původu), byly-li dostupné. Při nedostupnosti přírodního pucolánu se do těchto pojiv často přidávaly podrcené a pomleté cihly, nebo jiné keramické střepy. Již Marcus Vitruvius Pollio¹ ve svých knihách o architektuře píše:

„...Lepšího složení malty pro použití dosáhne však ten, kdo při písku říčním nebo mořském přidá i třetinu roztlučených a prosetých pálených cihel a střepů...”

Do vápenných malt se také přidávalo například jemně drcené sklo a různé druhy strusek. Funkci pucolánu ve vápenném pojivu plnily i různé anorganické zbytky po spalování organických paliv (sláma, dřevo, uhlí apod.). Tyto složky zvyšují pevnosti vápenných malt i jejich korozní odolnost oproti vápenným maltám bez hydraulických složek [5].

Dnes se často s většími i menšími úspěchy ve světě i u nás experimentuje s přidavkem pucolánového materiálu do vápenných malt a omítek zejména na bázi pálených jílců, jako je metakaolin, metalupek nebo cihelný prach. Výzkumy a vývoje směsí jsou určeny především pro obnovu fasád památkově chráněných objektů.

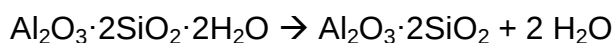
1.4 Cihelný střep jako pucolánová příměs ve vápenných maltách a omítkách

Malty a omítky složené z vápna a cihelné moučky byly používány již v Antice pro své hydraulické a pucolánové vlastnosti. Použitá cihelná moučka vykazovala poměrně vysokou pucolanitu především díky vysokému obsahu jílových minerálů a výpalu na nízké teploty. Naproti tomu některé cihelné zdivo (spojované těmito maltami) se často vyznačovalo odlišným mineralogickým a chemickým složením a nízkou pucolanitou, jak bylo různými analýzami prokázáno. Je tedy zřejmé, že střep pro přípravu malt a omítek byl záměrně vybírán.

¹ Výtažek z díla *Deset knih o architektuře* (lat. *De architectura libri X.*). Dílo vychází z učení starořecké kultury. Autor Marcus Vitruvius Pollio (1. stol. př. n. l.) - římský architekt, inženýr a teoretik, zde většinou cituje a doplňuje starší, nekompletní práce. O stavebních materiálech je pojednáno ve druhé knize.

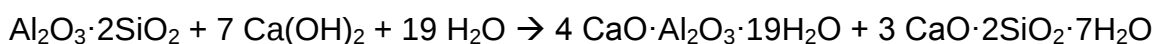
Mleté cihly užívané jako alternativní pojivo do malt a omítek, zajišťovaly po smíchání s vápnem a vodou vysoké mechanické pevnosti. Vyznačovaly se tuhostí a kompaktností, vysokou porozitou. Pro svou stálost ve vlhkém prostředí byly s oblibou používány na konstrukce akvaduktů, mostů, vodních nádrží nebo lázní. Stejně tak jako zdící malty, finální omítky vnitřního zdiva veřejných lázní nebo jako vyplňující materiál pro dlážděné podlahy, teracco či mozaiky.

Suroviny pro výrobu cihel měly vysoké zastoupení SiO_2 , živců a dalších minerálů. Z jílovitých hlín byly odstraněny hrubé částice, a poté byl jíl smíchán s vodou. Plastické těsto bylo tvarováno, sušeno a vypáleno. Teplota výpalu se pohybovala mezi 450–800 °C. Se zvyšující se teplotou výpalu dochází k přeměně krystalické struktury. Při teplotě mezi 450–800 °C se jílové minerály dehydratují a tvoří se amorfní látky s pucolánovými vlastnostmi. Např. kaolinit uvolňuje vodu podle rovnice



Typy těchto látek jsou závislé na poměru jílových minerálů zastoupených v základní hmotě (při teplotách nad 800 °C pucolánová aktivita klesá se snižováním měrného povrchu a s formováním mineralogických fází vznikajících za vysokých teplot – mullit, cristobalit, apod.).

Vznikající amorfní fáze typu aluminosilikátů jsou schopny reagovat s vápnem a vodou za vzniku hydratovaných křemičitanů a hlinitanů, které udávají hydraulický charakter maltám a omítkám. Tyto fáze zajišťují vysokou stálost a pevnost omítek.



Vápenné omítky s cihelným plnivem jsou porézním materiálem s poměrně nízkou objemovou hmotností. Objemové hmotnosti těchto malt se většinou pohybují kolem 1700 kg/m³, s porozitou kolem 38 %. Pevnosti v tlaku dosahují i více než 10 MPa, podle složení směsi a druhu střepeu.

Tyto omítky jsou odolné a trvanlivé ve vlhkém, jsou pevné a mají dobrou adhezi k povrchu. Mnohé z těchto zkoušených historických omítek mají specifickou narůžovělou barvu, pevnou strukturu a hladkou texturu. Omítkové směsi byly vždy velice dobře promíseny a pečlivě nanášeny.

Hlíny s dostatečným obsahem jílových minerálů mohou být po vypálení dobrými pucolány, musí být však vypáleny při nižších teplotách - do 900 °C. Pucolánová aktivita potom klesá se vzrůstající teplotou výpalu [6] [7] [8].

2 Vápno

Vápno je nejstarším pojivem používaným ve směsi s pískem a kamennou drtí k přípravě malt pro zdění a omítání staveb již několik tisíciletí.

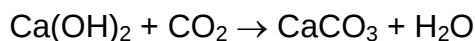
Termín vápno, ve smyslu vápenného pojiva, se používá pro materiál o různém složení. Velmi čisté vápno, tedy s vysokým obsahem CaO se označuje jako vápno vzdušné, podle ČSN EN 459-1 vápno bílé. Vápno o obsahu oxidu hořečnatého vyšším než 5 % se označuje jako vápno dolomitické. Obě tato vápna tuhnou a tvrdnou pouze na vzduchu, a proto se označují jako vzdušná pojiva. Jestliže vápno obsahuje určité množství hydraulických složek, jedná se o vápno hydraulické. Toto vápno v závislosti na poměru CaO a hydraulických oxidů (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) tuhne a tvrdne ve vlhku, někdy i pod vodou, jedná se tedy o hydraulické pojivo.

Označení vápno se používá také pro různá výrobní stadia vápenného pojiva. Vápnem je nazýván produkt, který vznikne bezprostředně po vypálení vápence. Mívá podobu drtě nebo po umletí podobu mleté moučky. Chemicky se jedná o oxid vápenatý CaO o různé čistotě. Přesnější označení je nehašené vápno, kusové nebo mleté, dříve též pálené vápno. Ve starší literatuře se termínem vápno označuje i vápenná malta [2].

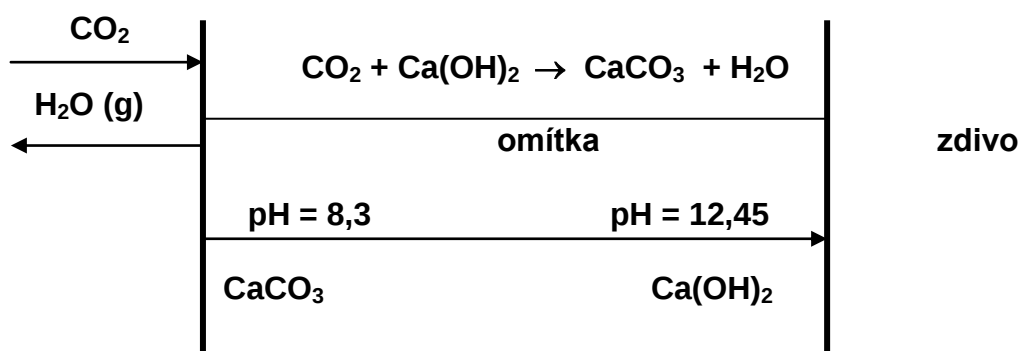
Název vápno se také používá pro produkt vzniklý řízeným vyhašením vypáleného vápna (s přesně odměřeným množstvím vody), nazývaný hašené vápno, které je v podstatě hydroxidem vápenatým o různé čistotě. Dodává se ve formě jemného prášku pod názvem vápenný hydrát. Hašení v nadbytku vody pak vede k vytvoření suspenze hydroxidu vápenatého, která má podobu hutné plastické kaše a obsahuje okolo 50 % sušiny. Suspenze je odedávna používanou formou vápna pod názvem - vápenná kaše. Zředěním této suspenze se získává produkt používaný zejména k nátěrům – vápenné mléko [4].

2.1 Karbonatace vápenného pojiva

Proces vytváření pevné struktury vápenných omítek je založen na karbonataci hydroxidu vápenatého, který probíhá podle rovnice:



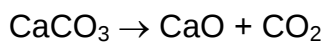
Reakce je závislá na teplotě, vlhkosti omítky, relativní vlhkosti vzduchu a na koncentraci CO_2 , tedy jeho parciálním tlaku, ve vzduchu. Nízká teplota a kapalná voda v pórech omítky jsou příčinou výrazného zpomalení karbonatace, a to se v praxi projeví pomalým vytvářením pevné struktury omítky. Proces probíhající při karbonataci je schematicky znázorněn na obrázku 2. V průběhu karbonatace pevnost klesá směrem od líce omítky k líci zdiva, dokud nedojde k úplné karbonataci přítomného hydroxidu vápenatého [4].



Obrázek 2.1 Karbonatace vápenné omítky [4]

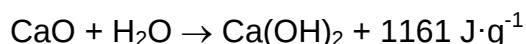
2.2 Vzdušné vápno

Základní surovinou pro výrobu vápna je přírodní vápenec s vysokým obsahem hlavní složky – uhličitanem vápenatým CaCO_3 . Surovina se vypaluje v šachtových nebo rotačních pecích při teplotě v rozmezí mezi 1050 až 1250 °C. Při výpalu dochází k rozkladu vápence, event. dolomitu, na oxid vápenatý, resp. hořečnatý a oxid uhličitý podle rovnic



Výpalem vzniká pálené vápno. Vlastnosti vápna určuje mimo jiné jeho mikrostruktura, která závisí na teplotě výpalu a ovlivňuje jeho aktivitu, rychlost hašení vápna, vydatnost a plasticitu. Pro použití vápna jako stavebního pojiva se pálené

vápno tzv. hasí, tj. reaguje s vodou. Hašení vápna je v podstatě hydratační reakce oxidu vápenatého za vzniku hydroxidu vápenatého, tzv. hašeného vápna a uvolnění tepla.



Vápno vyhašené v nadbytku vody se nechává ve formě suspenze uležet několik měsíců (dříve několik let), aby došlo k vytvoření hydrogelu, který způsobuje plasticitu kaše a následně i vytvoření malty.

Práškový vápenný hydrát se používá pro výrobu malty na stavbě, ale hlavní využití má při výrobě suchých maltových směsí. Plasticita kaše po smíchání vápenného hydrátu s vodou nedosahuje plasticity odleželé vápenné kaše ze správně vyhašeného měkce páleného vápna. Tento nedostatek se v suchých směsích řeší přidávkem některých přísad.

Kvalita vápna se posuzuje především podle rychlosti hydratační reakce a množství vybařeného tepla. Měkce pálená vápna (900 až 1100 °C) jsou porézní, mají velký povrch a rychle reagují s vodou. Tvrdě pálená vápna (> 1100 °C) mají vyšší objemovou hmotnost, menší porozitu a nižší rychlost hydratace [4].

Tabulka 2.1 Mezní vlastnosti vzdušného vápna

Vlastnost	Měkce pálené vápno	Tvrdě pálené vápno
Objemová hmotnost	1500 kg/m ³	2800 kg/m ³
Vnitřní povrch	10000 m ² /kg	500 m ² /kg
Velikost krystalu	2 μm	20 μm
Reaktivita	2 min	≥ 5 min
Aktivita	80 °C / 2 min	60 °C / 5 min

2.3 Hydraulické vápno

Hydraulické vápno stojí svými vlastnostmi mezi vzdušným vápnem a cementem. Kromě CaO obsahuje hydraulické oxidy (SiO₂, Al₂O₃ a Fe₂O₃) ve formě slínekových minerálů, které způsobují, že vápno se z chemického hlediska chová částečně jako portlandský cement. V hydraulickém vápně však není obsažen C₃S, který je hlavní složkou portlandského slínku, vznikající při teplotě nad 1250 °C (podle fázového diagramu CaO–SiO₂). Tyto sloučeniny hydratují podobně jako v portlandském cementu za vzniku hydrátů, které jsou ve vodě nerozpustné. Hydraulické vápno je charakterizováno tzv. hydraulickým modulem:

$$H_M = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

$H_M < 1,7$
 $H_M = 1,7-3$
 $H_M = 3-6$
 $H_M = 6-9$
 $H_M > 9$

Románský cement
 Silně hydraulické vápno
 Středně hydraulické vápno
 Slabě hydraulické vápno
 Vzdušné vápno

Hydraulická vápna se hasí průmyslově a dodávají se v práškové formě.

Při tuhnutí a tvrdnutí hydraulického vápna dochází k hydrataci sloučenin, vytvořených v procesu pálení z oxidu vápenatého a hydraulických oxidů. Tím se vytvoří poměrně rychle základní síť struktury zatvrdlého produktu. Následně probíhá karbonatace volného vápna, hydroxidu vápenatého, což je proces daleko pomalejší. Malty s hydraulickým vápnem vykazují vyšší pevnosti v porovnání s maltami vyrobenými ze vzdušného vápna.

V důsledku vyšších pevností a vyšší odolnosti proti působení agresivních látek z ovzduší v porovnání s vápennými omítkami se vzdušným vápnem lze přepokládat, že omítky na bázi hydraulického vápna mají perspektivu delší životnosti [4].

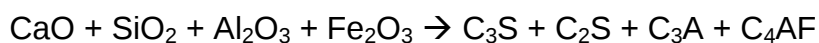
3 Cement

Za počátek výroby portlandského cementu lze považovat rok 1824, kdy byl Josephu Aspdinovi udělen patent na výrobu portlandského cementu. Na našem území se vyrábí od roku 1860.

Portlandský cement je práškové hydraulické pojivo, vyrobené jemným rozemletím portlandského slinku s hlavní přísadou sádrovcem. Po smísení s vodou vytváří po určité době pevnou, vodě odolnou hmotu. Od hydraulického vápna se portlandský cement liší, jak bylo výše uvedeno, především přítomností trikalciumpříslušného silikátu, který vzniká až za vysokých teplot při pálení slinku. Tato sloučenina reaguje s vodou rychle a je nositelem počátečních i konečných pevností hydratovaného cementu.

Hlavní složkou výroby cementu jsou vápence znečištěné jílovými složkami (jíly, slídy, lupky, břidlice) a doplňující korekční složky (železná ruda, bauxit, křemenný písek)

Výpal slinku probíhá v rotační peci za teploty 1470 °C, kdy vznikají slinkové minerály – nositelé hydraulicity cementu [4].



SLINKOVÉ MINERÁLY

Tabulka 3.1 Obecné chemické složení cementu

Sloučenina	Obsah v cementu [%]
CaO	60-69
SiO ₂	18-24
Al ₂ O ₃	4-10
Fe ₂ O ₃	1-8
MgO	Max. 6
K ₂ O + Na ₂ O	Max. 1,5
TiO ₂ , P ₂ O ₅ , SO ₃	0,2-2

4 Pucolanita

4.1 Charakteristika

Pucolány jsou amorfní křemičité či křemičito-hlinité látky, které samy o sobě mají malé nebo nemají žádné pojivé vlastnosti. V jemně mleté formě a za přítomnosti vody jsou však schopny reagovat při běžných teplotách (20 °C) s hydroxidem vápenatým za tvorby sloučenin s výraznými pojivými vlastnostmi [4].

Hlavní charakteristika pucolánů je tedy definována jako:

- schopnost reagovat s vápnem,
- schopnost tvořit nerozpustné produkty s pojivými vlastnostmi a po zatvrdnutí být stálé ve vlhkém i vodním prostředí [8].

4.2 Rozdělení

Podle vzniku lze pucolány rozdělit přírodní a umělé (technogenní).

▪ Přírodní

Jsou buď vulkanického (tufy) nebo sedimentárního (tufity, křemelina) původu. Původním pucolánovým materiálem byly vyvřeliny nacházející se v blízkosti sopky Vesuv u města Puzzuoli, od něhož je odvozen název. Dále se tyto materiály hojně vyskytují v okolí Říma, Neapole, na ostrově Santorini, a také na některých místech v Německu a ve Francii. Mezi přírodní pucolány lze rovněž zařadit sedimenty s vysokým obsahem reaktivního SiO₂, jako např. křemeliny. Naleziště křemelin jsou v mnoha zemích i v České republice – v okolí Borovan a Trhových Svin.

▪ Technogenní

Vyrábějí se záměrně z primárních surovin (např. metakaolin), nebo to mohou být odpady a vedlejší produkty z různých průmyslových odvětví s vysokým obsahem reaktivní formy SiO_2 a Al_2O_3 (popílek, mikrosilika, struska, cihelná drť, aj.) [4].

4.2.1 Technogenní příměsi

Vybrané technogenní pucolány

- Metakaolin

Vyrábí se výpalem kaolinitických jíílů a jiných vhodných surovin v teplotním rozmezí 600–900 °C a následným jemným namletím. Měrný povrch jemně namletého metakaolinu se pohybuje v rozmezí 2000–20000 m²/kg. S výhodou se používá jako příměs do betonů (i vysokohodnotných) a malt, kde kromě pucolánové reakce příznivě ovlivňuje reologii betonu, snižuje nasákavost, zlepšuje mechanické vlastnosti. Jeho použití je příznivé rovněž jako příměs ve vápenných omítkách, kde zlepšuje mechanické vlastnosti a zvyšuje odolnost proti mrazu [9].

- Elektrárenské popílký

Popílký jsou nerostné zbytký po spalování tuhých paliv ve formě velmi malých částic. Elektrárenské popílký vznikají při spalování černého nebo hnědého uhlí, a to buď v režimu vysokoteplotního spalování, nebo fluidním režimem spalování (ve vzosu). Optimálnějších vlastností pro využití tohoto pucolánu dosahuje právě vysokoteplotní popílek. Je tvořen sklovitými částicemi kulovitého tvaru o průměru 1–100 μm a dosahuje měrného povrchu 200-300 m²/kg. Obsahuje SiO_2 převážně v amorfní formě, ten pak je příčinou jeho pucolánových vlastností [9]. Neaktivní složkou je mullit, obsah CaO je v našich popílcích nízký, max. do 3 %.

Tabulka 4.1 Obecné složení vysokoteplotního popílký [10]

Sloučenina	Obsah ve strusce [%]
SiO_2	40-50
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	30-40
CaO	2-20

- Křemičité úlety - mikrosilika

Křemičité úlety jsou vedlejším produktem při výrobě křemíku, ferosilicia a dalších slitin křemíku. Mají mimořádně vysoký měrný povrch 15000–20000 m²/kg. Obsahují 80-98 % amorfního SiO₂, zrna mají průměr 0,1–0,2 μm. Dále se může vyskytovat CaO, Fe₂O₃ a stopy uhlíku [9].

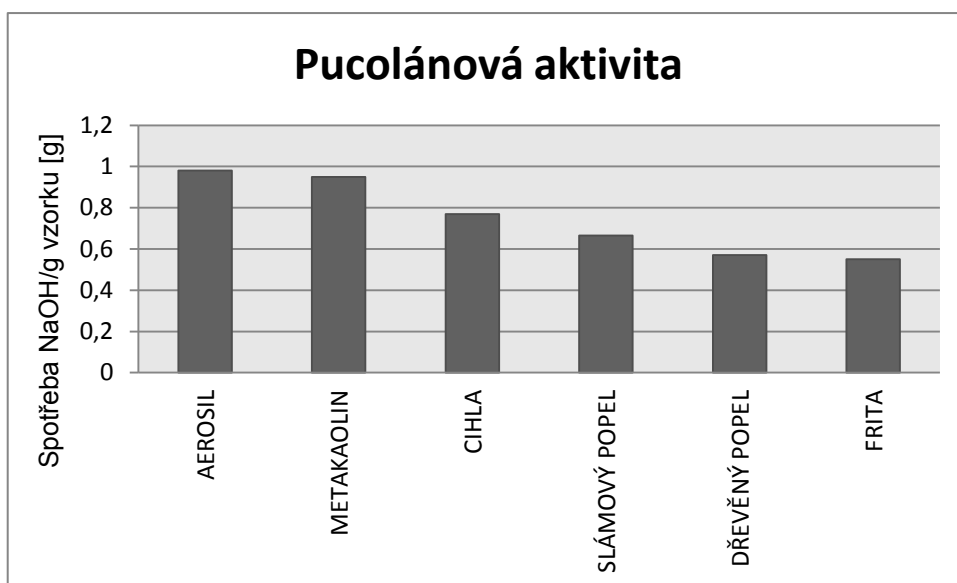
- Granulovaná vysokopecní struska

Vzniká rychlým ochlazením taveniny zásadité strusky, která vzniká jako vedlejší produkt při výrobě surového železa ve vysoké peci. Jedná se o latentně hydraulickou látku, její hydratace probíhá velmi pomalu, proto se přidávají budiče hydratace ve formě zásaditých sloučenin, zejména hydroxidu vápenatého nebo cementu [9].

Tabulka 4.2 Obecné složení vysokopecních strusek [10]

Sloučenina	Obsah ve strusce [%]
CaO	30-50
SiO ₂	28-38
Al ₂ O ₃	8-24
MgO	1-18
FeO	1-3
MnO	1-3
S	1-3

- Popely z různých přírodních organických materiálů (z pšeničné slámy, dřevěných pilin, ze slámy z cukrové třtiny, z rýžových slupek, bambusového listí apod.) obsahují amorfni SiO₂, který je příčinou jejich pucolánových vlastností.
- Cihelný prach a drť – pucolán používaný v maltách již v Antice pro spojování zdiva a povrchové úpravy. Pucolánová aktivita cihelného materiálu je závislá na složení suroviny pro výrobu keramiky, teplotě výpalu (pod 900 °C) a jemnosti pomletí [11].



Obrázek 4.1 Srovnání pucolánové aktivity vybraných pucolánů [12]

5 Cihelný střep

Cihlářská výroba je spolu s hrnčířstvím nejstarším oborem keramické výroby po několik tisíciletí. I v současné době představují cihlářské výrobky klasický stavební materiál pro pozemní stavby a vedle betonu a bitumenů stojí na třetím místě využívání tohoto materiálu pro výstavbu [13].

5.1 Charakteristika cihelného střepu

Keramické materiály se definují jako pevné anorganické nekovové polykrystalické látky vyrobené keramickým výrobním způsobem z minerálních surovin s převládající složkou jílových minerálů, vytvarované a vypálené na vysokou teplotu (nad 800 °C). Vypalem procesem slinování nastává zpevnění mikrostruktury střepu.

Cihelný střep se obecně vyznačuje vysokou nasákavostí nad 12 %, pevností v tlaku od 3 do 60 MPa a objemovou hmotností od 800 do 2000 kg/m³. Výjimku tvoří hutné až slinuté lícové cihly, dlaždice a obkladové pásy, které dosahují nasákavosti pod 10 % s pevnostmi v tlaku až 170 MPa a objemovou hmotností až 2500 kg/m³.

Cihlářské výrobky se používají jako zdící prvky pro svislé konstrukce, prvky pro vodorovné konstrukce a jako pálená střešní krytina pro šikmé střechy. Menší objem výroby tvoří ostatní cihlářské výrobky (trativodky, komínovky, obkladové pásy, dlaždice) [14].

5.2 Suroviny

Základními surovinami pro výrobu cihlářských výrobků jsou cihlářské zeminy (jíly, hlíny) s příměsí nejčastěji ostřiva (např. křemenný písek) a někdy i lehčiva (např. dřevěné piliny, papírenské kaly). Vytváření se děje z plastického těsta s obsahem vlhkosti kolem 20 % na vakuových šnekových lisech a vypalují se většinou při teplotách 830 až 1050 °C. Výrobky jsou přijatelné pro životní prostředí, jsou schopny ve výrobě nezávadně spotřebovat řadu průmyslových odpadů a po dožití jsou schopné recyklace [14].

Dle ČSN 72 1564 jsou cihlářské zeminy zplodiny přírodního rozkladu hornin, které jsou použitelné pro průmyslovou výrobu buď přímo nebo ve směsi nebo po vhodné úpravě.

Keramická technologie využívá kromě přírodních surovin, zejména jílu, také i surovin syntetických (např. oxid hlinitý, oxid zirkoničitý, apod.) Aktuální problematikou a trendem je využívání druhotných surovin odpadajících z některých průmyslových odvětví, které lze dále s výhodou zpracovávat (surovinové kaly, apod.) [15].

Podle chování po smísení s vodou se keramické suroviny dělí na plastické a neplastické. Plastické suroviny jsou schopné tvarování po smísení s vodou (jíly, hlíny, kaoliny). Neplastické tuto schopnost nemají a upravují chování směsi surovin při vytváření, sušení a pálení (další dělení na ostřiva, taviva a lehčiva) [16].

5.2.1 Plastické suroviny

Mezi typickou surovinu patří jílovinové zeminy. Ty jsou schopny po určitém přídavku vody (cca 20 % hmotnostních) vytvořit dále bez porušení celistvosti tvárné těsto. Mají schopnost vázat zrna neplastických surovin. Mohou být sypké (jíl, hlína, kaolin) nebo zpevněné (jílovec, lupek) [16].

Tabulka 5.1 Jílovité zeminy [13]

Jílovité zeminy	kaolinitické a litické	nezpevněné	kaoliny, jíly, anorganické pigmenty
		zpevněné	jílovce, lupky, jílové břidlice
	montmorillitické		bentonity
	allitické, chlorotické, montmorillitické, kaolitické	nezpevněné	hlíny vápenité jíly slíny
		zpevněné	hlínovce, jílovce

Tabulka 5.2 Granulometrie jílovitých zemin [13]

1. Jílovina $d < 2 \cdot 10^{-6} \text{m}$	2. Prachovina $d \in (2;50) \cdot 10^{-6} \text{m}$	3. Pískovina $d \in (0,05;2) \cdot 10^{-3} \text{m}$
Jíl (≥ 50 % jíloviny) Hlína ($20 \div 50$ % jíloviny + $50 \div 80$ % prachoviny) Prach (< 20 % jíloviny + > 30 % prachoviny) Písek (< 20 % jíloviny + > 50 % pískoviny)		

5.2.1.1 Chemické a mineralogické složení jílovinových zemin

Na základě chemického rozboru se nejčastěji udává obsah SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O [17].

Jílové minerály jsou hlinitokřemičitany s chemicky vázanou strukturní vodou, které někdy ve své struktuře obsahují atomy hořčíku, železa nebo alkálií. Jsou krystalické a mají vrstevnatou nebo řetězovou strukturu SiO_4 a AlO_6 . Nejvýznamnějšími jílovými minerály z hlediska keramické technologie jsou kaolinity, illity, chlority, montmorillonity a halloysity. Z dalších vrstevnatých minerálů to pak jsou mastky, slídy, pyrophyllity. Z nejílových minerálů obsahují jílovinové zeminy zejména křemen ($\beta\text{-SiO}_2$), živce (ortoklas, albit), slídy (muskovit, biotit), vápenec, dolomit, organické látky (zuhlňatělé zbytky rostlin), hydroxidy železa, další minerály (hematit, rutil, anatas, hydroxidy hlinité), škodliviny (sádrovec, pyrit, siderit) [15].

5.2.1 Neplastické suroviny

Tyto suroviny upravují chování surovinové směsi při vytváření, sušení a pálení. Současně působí na výsledné vlastnosti výrobků tím, že ovlivňují mikrostrukturu vypáleného střepe.

Po smísení s vodou nejsou schopné vytvořit plastické těsto. Využívají se jako příměsi do plastických keramických surovin. Podle funkce to jsou ostřiva, taviva a lehčiva [16].

5.3 Výroba

Základní technologické kroky výroby zahrnují přípravu směsí pro výrobu keramiky (včetně rozdružení a následné homogenizace), fyzikálně mechanickou a fyzikálně chemickou úpravu surovin a vytváření, dále pak sušení a výpal, který je nejvýznamnějším krokem výroby. Výpal, během něhož dochází ke zpevňování

keramického střepe procesem slinování, představuje tepelné zpracování keramické výrobní směsi podle stanoveného režimu (pálící křivky) [16].

5.3.1 Fyzikální a chemické procesy ve střepe při výpalu

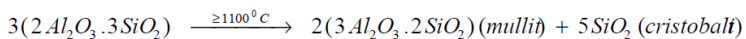
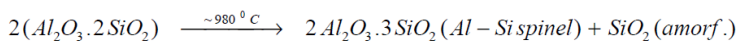
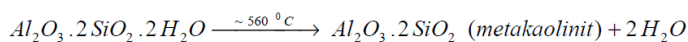
Vznikající produkty jsou ovlivněny chemickým složením směsi a složek, teplotou výpalu a dobou působení. Rychlost reakcí ovlivňuje velikost, tvar a hustota skladby zrn v reagující směsi.

Dehydratace jílových minerálů probíhá odstraňováním konstitučně vázané vody, která se neodstraní sušením. Fyzikálně vázaná voda (adsorbovaná) se odstraňuje při 80-120 °C, voda vázaná v krystalohydrátech při 60-250 °C, voda vázaná v krystalové mřížce jílových minerálů se uvolňuje při 250-750 °C za tvorby metafází [16].

5.3.1.1 Přeměna jílových minerálů na pojivé složky střepe

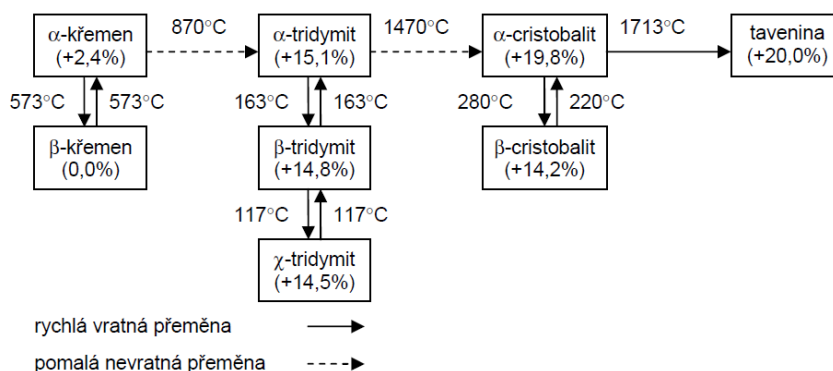
- **Kaolinit:** ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) přechází v metakaolinit ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$). V průběhu dehydroxylace (při asi 560 °C) dochází ke smrštění, vzniku silné pórovitosti a vyvození napětí ve střepe.

Reakce postupují v tomto sledu:



- **Montmorillonit:** do 300 °C uvolňuje fyzikálně vázanou vodu, při 400–700 °C probíhá dehydroxylace, při 850 °C rozpad krystalové mřížky. Vznikají nové fáze spinel, cristobalit, anortit.
- **Illit:** do 250 °C uvolňování fyzikálně vázanou vodu, 450–550 °C probíhá dehydroxylace, nad 850 °C se krystalová mřížka rozpadá, později vzniká spinel, mullit, leucit, korund.
- **Chlorit:** do 200 °C se odstraní fyzikálně vázaná voda, v rozmezí teplot 450-550 °C probíhá dehydroxylace, nad teplotou 750 °C nastává rozpad krystalové mřížky. Dle složení mohou vznikat Mg-silikáty hematit, mullit, tavenina.
- **Mullit:** počátek vzniku je již od 950 °C (1200 °C), dokončení krystalizace v intervalu 1150–1250 °C je spojené s vysokým smrštěním. Vzniká výpalem

jílových minerálů. Nejcennější fáze keramického výrobku, vyznačuje se pevností, žáruvzdorností, odolností proti korozi struskou, nízkým součinitelem objemové roztažnosti [16].



Obrázek 5.1 Modifikační přeměny křemene v závislosti na teplotě a příslušné objemové změny během výpalu [17]

Z mineralogického hlediska lze charakterizovat cihlářské výrobky jako materiály obsahující β-křemen, rentgenoamorfni fázi, živce, slídy.

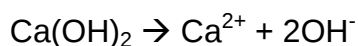
5.4 Vlastnosti keramického střepu

Výsledné technické vlastnosti vypáleného produktu přímo ovlivňuje uspořádání mikrostruktury, podíl různých fází, vazby mezi zrnny, přítomnost pórů. Mezi nejdůležitější vlastnosti patří pevnost, mrazuvzdornost, tepelná vodivost, chemická odolnost, ohrusnost, žáruvzdornost, tvrdost atd. [17]

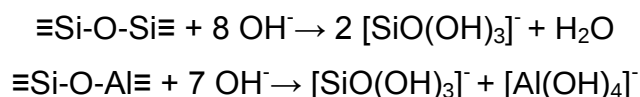
Pro využití keramického střepu jako součást pojivových systémů je důležité chemické a mineralogické složení suroviny a následně střepu, teplota výpalu, podíl krystalických fází, porozita a velikost zrn. Příměsi používané k vylepšení vlastností keramických výrobků, může mít na reaktivitu střepu jak pozitivní, tak i negativní účinek.

6 Pucolánová reakce

Hydroxid vápenatý je silný hydroxid a ve vodném prostředí je zcela disociován na ionty:



Při 25 °C má nasycený roztok hydroxidu vápenatého hodnotu pH = 12,45. Tato vysoká koncentrace OH⁻ iontů způsobuje rozštěpení vazeb v SiO₂ křemičitanech a hlinitokřemičitanech za vzniku jednoduchých iontů:



Při kontaktu vzniklých křemičitanových a hlinitanových iontů s Ca^{2+} ionty dojde k tvorbě hydratovaných křemičitanů (CSH) a hlinitanů vápenatých (CAH). Křemičitanové složky se rozpouštějí rychleji než hlinitanové a pro tvorbu hlinitanů vápenatých je třeba vyšší koncentrace Ca^{2+} iontů [4].

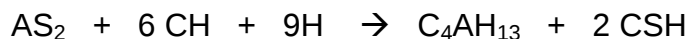
Látky obsahující křemičité i hlinité složky reagují s hydroxidem vápenatým za tvorby různých reakčních produktů. Jejich složení je závislé na typu pucolánového materiálu, na podmínkách průběhu reakce (zejména na teplotě a vlhkosti). Dalšími produkty mohou být C_4AH_{13} , C_3AH_6 , C_3AS_2 , $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, C_2ASH_8 .

Pucolány neobsahují žádné nebo jen velmi malé množství oxidu vápenatého, na rozdíl od latentně hydraulických příměsí, jejímž jediným dnes známým zástupcem je granulovaná vysokopecní struska [4].

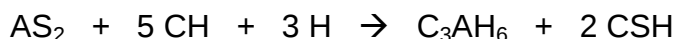
6.1 Pucolanita cihelného střepu

Charakteristickou pucolánovou schopnost získává cihelný střep výpalem, kdy dochází k přeměně jeho původního mineralogického složení. Jílové minerály vykazují pucolanitu při výpalu na 600–900 °C a jsou-li jemně pomlety. Tyto látky obsahují převážně křemičité a hlinité složky. Během výpalu dochází k odstranění vody (volné i chemicky vázané), a dále k destrukci krystalické mřížky jílových složek a k tvorbě křemičitých a hlinitých látek v amorfnní formě.

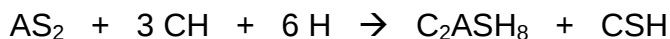
Obsahují-li jílové složky převážně jílový minerál kaolinit, který dehydroxylací při teplotě okolo 560 °C (400–800 °C podle složení) přechází v metakaolinit, mohou vznikat tři alternativy chemických reakcí mezi vápnem, vodou a amorfnními křemičitými a hlinitanovými složkami.



Metakaolinit + vápno + voda $\rightarrow$ tetrakalcium aluminát hydrát + tobermorit (CSH1)



Metakaolinit + vápno + voda $\rightarrow$ trikalcium aluminát hydrát + tobermorit (nebo CSH1)



Metakaolinit + vápno + voda $\rightarrow$ gehlenit + tobermorit (nebo CSH1)

Vznik hexagonálního dikalciumaluminosilikáthydrátu, neboli hydrogehlenitu.

Při teplotách výpalu nad 900 °C se SiO_2 a Al_2O_3 dále mění na mullit, tridymit, cristobalit, atd. Tyto modifikace však již nemají schopnost reagovat s Ca(OH)_2 a výsledný střepek nemá pucolánové vlastnosti [11].

6.2 Stanovení reaktivity střepeu jako pucolánu

Pro stanovení pucolánové reaktivity existuje několik fyzikálních i chemických metod. Metody lze dále rozdělit na přímé a nepřímé. Přímé metody sledují přítomnost Ca(OH)_2 a následné snížení jeho množství při probíhající pucolánové reakci za použití analytických metod jako je rentgenová difrakční analýza, termogravimetrická analýza nebo klasická chemická titrace. Nepřímé metody zahrnují měření fyzikálních vlastností jako je stanovení pevnostních charakteristik zkušebních těles, elektrická vodivost nebo uvolnění reakčního tepla při pucolánové reakci.

- Nepřímé fyzikální metody:
 - Mechanické stanovení na základě pevnostních charakteristik (pevnost v tlaku, nebo pevnost v tahu za ohybu). Stanovuje se poměr pevností zkušebních těles s částečnou náhradou cementu pucolánem a referenčním tělesem bez pucolánu.
 - Roztokovou kalorimetrií se stanovuje vývin reakčního tepla rozpouštění vzorku pucolánu v roztoku kyseliny dusičné, po přidavku kyseliny fluorovodíkové, kdy vznikají hexafluorokřemičitany a hexafluorohlinitany, a následně se stanovuje obsah reaktivního SiO_2 srážecí reakcí s dusičnanem draselným. Vzniká nerozpustný hexafluorokřemičitan draselný, reakce probíhá za uvolnění tepla. Výsledky se vyhodnocují podle kalibračního grafu, vytvořeného ze stoupajících množství aerosilu (amorfního velmi čistého SiO_2).
- Přímé chemické metody:
 - Metoda stanovení zbytkového Ca(OH)_2 – upravený Chapelleho test
 - Sacharátová metoda
 - Metoda podle Franke
 - Metoda podle ČSN EN 196-5 Metody zkoušení cementu – Část 5: Zkouška pucolanity pucolánových cementů
 - Metoda podle Payá

6.2.1 Popis vybraných metod

- Stanovení zbytkového $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - upravený Chapelleho test

Metoda identifikuje pucolánovou aktivitu jako úbytek hydroxidu vápenatého v reakční směsi v suspenzi obsahující testovaný pucolán a oxid vápenatý.

Do tlakové láhve (autoklávu) o objemu 80 ml se naváží CaO připravený výpalem CaCO_3 a testovaný pucolán v přepočítaném poměru a dolije se vodou neobsahující CO_2 .



Obrázek 6.1 Tlakové nádoby o objemu 80 ml

Tlaková nádoba se vloží do sušárny a zahřívá se na $93\text{ }^{\circ}\text{C}$ za současného míchání na magnetické míchačce po dobu 24 hodin. Po vyjmutí, ochlazení a otevření tlakové nádoby je její obsah kvantitativně převeden do 250 ml Erlenmayerovy baňky, tlaková nádoba je do téže baňky vypláchnuta 64 ml roztoku sacharosy (odměřeno pipetou), poté je baňka uzavřena a reakční směs je míchána po dobu 15 min na magnetické míchačce. Suspenze je poté zfiltrována a 40 ml filtrátu je nepipetováno do titrační baňky a titrováno odměrným roztokem HCl na fenolftalein.

Ze získaných výsledků se vypočítá množství $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reagující za daných podmínek s 1 g pucolánu [18].

- Metoda podle ČSN EN 196-5 Metody zkoušení cementu – Část 5: Zkouška pucolanity pucolánových cementů

V této metodě se srovnává obsah hydroxidu vápenatého, který se vytvoří po určité době ve vodní suspenzi s obsahem hydroxidu vápenatého v nasyceném roztoku stejné alkality. Výsledek zkoušky je považován za vyhovující, když koncentrace rozpuštěného hydroxidu vápenatého v suspenzi je menší, než koncentrace nasyceného roztoku. Výsledky se stanovují v milimolech na litr s přesností na 0,1 mmol/litr.

Do polyethylenové láhve se pipetou přidá 100 ml čerstvě převařené destilované vody neobsahující CO_2 a vytemperuje se v sušárně na 40 °C (asi 1 hodinu). Poté se do láhve naváží testovaný pucolán o hmotnosti $20 \pm 0,01$ g. Polyethylenová láhev se vloží do sušárny a zahřívá se na teplotu 40 °C po dobu 8-15 dní. Láhev má stát vodorovně, aby se vytvořila sedimentovaná vrstva rovnoměrné tloušťky. Po uplynutí stanovené doby se obsah polyethylenové láhve zfiltruje a ve filtrátu je stanovena koncentrace hydroxidových iontů titrací s odměrným roztokem kyseliny chlorovodíkové a koncentrace oxidu vápenatého titrací roztokem EDTA.

Stanovení koncentrace hydroxylových iontů

Z promíchaného filtrátu se odpipetuje 50 ml do 250 ml kádinky, přidá se 5 kapek indikátoru methyloaranže a titruje se kyselinou chlorovodíkovou pro stanovení celkové aktivity k barevnému přechodu ze žlutého do oranžového zbarvení. Stanoví se obsah hydroxidových iontů.

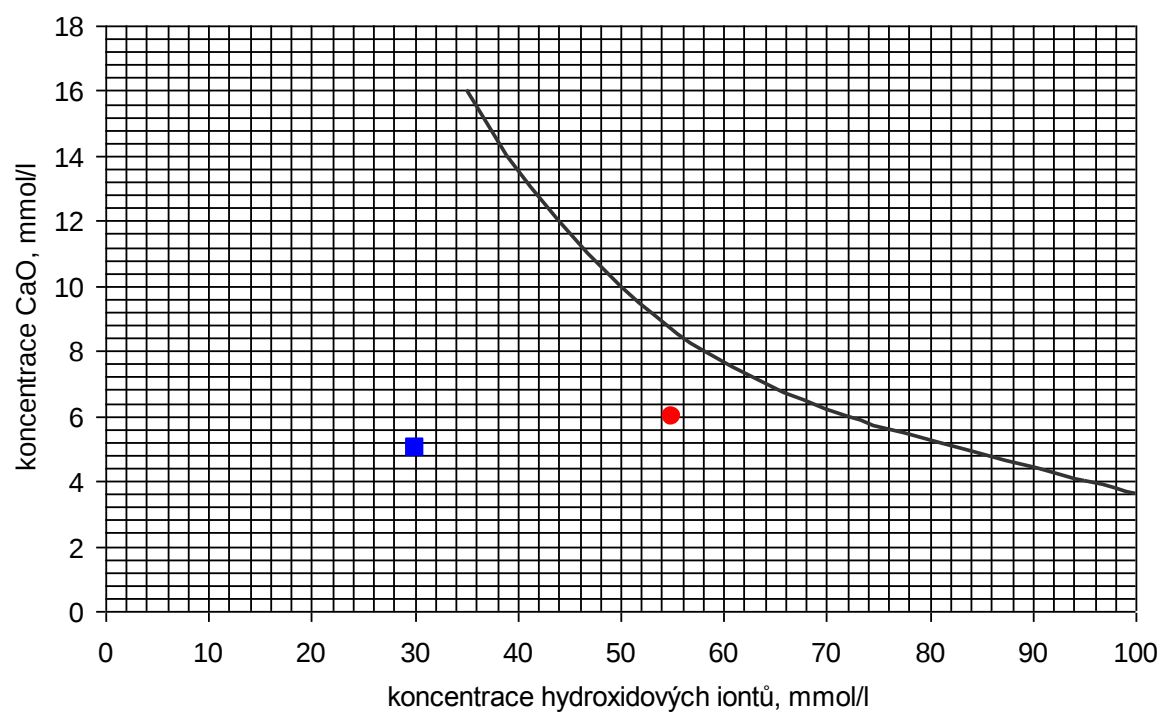
Stanovení koncentrace oxidu vápenatého

Stejný, již ztitrovaný roztok, se doplní 5 ml roztoku hydroxidu sodného, přidá se asi 50 mg indikátoru murexid a titruje se oxid vápenatý roztokem EDTA pomocí byrety k trvalé změně zbarvení roztoku purpurově červeného do fialového. Stanoví se obsah vápenatých iontů [19].

Průměrné hodnoty koncentrace hydroxylových iontů a koncentrace oxidu vápenatého v roztoku, určují v obrázku 1 bod, který udává rozpustnost oxidu vápenatého v závislosti na obsahu hydroxidových iontů při teplotě 40 °C.

Zkoušený pucolán vyhoví zkoušce pucolanity, jestliže bod leží pod křivkou nasycenosti oxidu vápenatého na obrázku 6.2.

Křivka představuje součin rozpustnosti $\text{Ca}(\text{OH})_2$.



Obrázek 6.2 Křivka nasycenosti oxidu vápenatého

II. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální studie byla zaměřena na sledování vlastností cihelného prachu (CP) jako odpadního materiálu z výroby broušených cihel firmy HELUZ z hlediska jejich pucolánového potenciálu. První etapa experimentální studie charakterizuje vstupní suroviny, zejména jsou vlastnosti použitého CP (pucolánová aktivita, granulometrie, stanovení mineralogického složení RGT analýzou). Ve druhé etapě byly zkoumány vlastnosti vápenných malt se stoupajícím množstvím jemného cihelného střepu ke konstantnímu množství vápna. Pro navrženou recepturu byly stanoveny pevnosti v tlaku v čase, objemová hmotnost a nasákavost ve stáří 28 dní. Ve třetí etapě byly navrženy 3 řady receptur, v nichž se postupně procentuálně zvyšovalo množství CP modifikací vápna (ve třetí receptuře modifikace vápna a cementu). Pro všechny směsi byla zjišťována konzistence čerstvé malty, nasákavost ve stáří 28 dní, pevnosti v tlaku, pevnosti v tahu za ohybu a objemové hmotnosti v čase. Pro vybrané směsi byly dále realizovány lomové zkoušky, mrazuvzdornost ve stáří 28 dní. Poté byla z každé navržené receptury vybrána 1 směs, na které bylo prováděno určení objemové hmotnosti čerstvé malty, obsah vzduchu v čerstvé maltě. Ve stáří vzorků 28 dní pak určována přídržnost k podkladu a difúze.

7 I. etapa - Charakteristika vstupních surovin

7.1 Vápenný hydrát

Jako hlavní pojivá složka pro výrobu zkušebních těles vápenných malt s cihelným střepem byl použit vápenný hydrát Ca(OH)_2 , produkováný společností CARMEUSE CZECH REPUBLIC s.r.o., závod Mokrý. Produkt má označení Bílé vápno CL 90 – S dle ČSN EN 459-1 a je nabízen pod obchodním názvem SuperCalco.

Tento vápenný hydrát je připraven výpalem z velmi čistých vápenců. Pro svůj vysoký obsah CaO je vhodný pro použití do suchých omítkových směsí, pro maltařské práce ve stavebnictví, pro úpravu vod, včetně neutralizace odpadních vod.

7.2 Cement

Pro výrobu zkušebních těles z vápenocementové malty s cihelným prachem byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R produkováný společností Českomoravský cement, a.s., závod Mokrý. Cement splňuje požadavky dle ČSN 197-1.

Portlandský cement obsahuje 95-100 % portlandského slínku a 0-5 % doplňujících složek. Dosahuje pevností v tlaku po 28 dnech min. 42,5 MPa. Je specifický rychlým a vysokým vývinem hydratačního tepla.

Dne 11. 10. 2012 byla provedena analýza složení cementu. V tabulce 7.1 je uvedeno chemické složení cementu.

Tabulka 7.1 Chemické složení CEM 42,5 R

Sloučenina	Obsah [%]
Al ₂ O ₃	4,284
CaO	62,988
Fe ₂ O ₃	3,564
K ₂ O	0,810
MgO	1,067
MnO	0,076
Na ₂ O	0,171
P ₂ O ₅	0,110
SiO ₂	18,518
SrO	0,035
SO ₃	2,594
TiO ₂	0,174
ZŽ	0,000

7.3 Cihelný prach

Pro experimentální studii v I. a II. etapě - zkoumání vlivu zvyšujícího se množství cihelného prachu ve vápenných maltách byl použit prach jako odpadní materiál z broušení cihel. Broušením se cihly upravují za účelem dosažení přesnějších rozměrů, kdy jejich rovinnost umožňuje spojování zdiva lepidlem namísto maltou. Se zvyšující se produkcí takto kalibrovaných výrobků se zvyšuje i odpad z této technologie. Tvoří ho velmi jemný cihelný prach, který je někdy využíván jako ostřívo do další keramické výroby. Z důvodu však jiných než požadovaných vlastností na vstupní suroviny keramických výrobků se tento odpad častěji stává ve výrobní technologii nevyužitelným. Na poznatku, že vypálený keramický materiál může po rozemletí, díky obsahu amorfních křemičitanů a hlinitokřemičitanů, vykazovat určitý stupeň pucolanity, je založen možný potenciál využití tohoto odpadního materiálu v cementových a vápenných pojivech.

Pro výrobu malt byly použity 2 druhy cihelného prachu, který je produkován při výrobě broušených cihel firmy Heluz cihlářský průmysl v. o. s., konkrétně

se jednalo o cihelný prach pod pracovním názvem *Heluz 3/12* a *Heluz Family 13. 9. 2012* ze závodu v Hevlíně.

Broušené cihelné bloky HELUZ Family mají výborné tepelně izolační vlastnosti. Jsou určeny pro výstavbu domů s nízkou spotřebou tepla na vytápění (nízkoenergetické a pasivní domy). Broušené cihelné bloky se vyrábějí podle ČSN EN 771-1 a současně odpovídají ČSN 72 2600 Cihlářské výrobky: Společná ustanovení [20].

Specifické sytě oranžové zbarvení cihelného prachu je dáno obsahem oxidů železa ve výchozí surovině (cihlářské zemině).



Zdroj: <http://www.estav.cz/zpravy/nove/libochovice-heluz-brousene-cihly.html>

Obrázek 7.1 Zdění broušených cihel Heluz



Obrázek 7.2 Cihelný prach s označením Heluz Family 13. 9. 2012

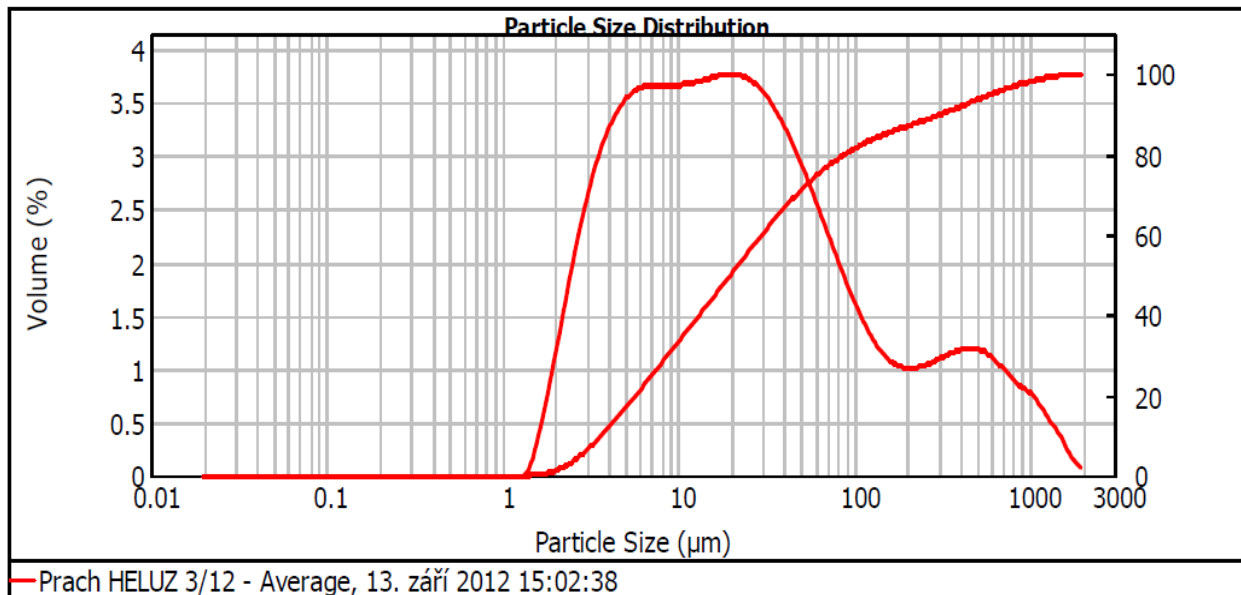
7.3.1 Stanovení granulometrie cihelného prachu

Pro stanovení granulometrie použitého cihelného prachu bylo provedeno měření na přístroji Malvern Mastersizer 2000 metodou laserové difrakce. Metoda je založena na měření intenzity a úhlu dopadu rozptýleného laserového paprsku, který prochází částicí. Velikost částice je nepřímo úměrná reakčnímu úhlu laserového světla. Tato metoda se používá převážně pro určení zastoupení velikosti zrn u jemných částic [21].

Křivky zrnitosti byly měřeny v tekutém disperzním prostředí (destilovaná voda).

Výstupem z této analýzy je křivka zrnitosti – distribuce množství a velikosti částic v disperzním prostředí.

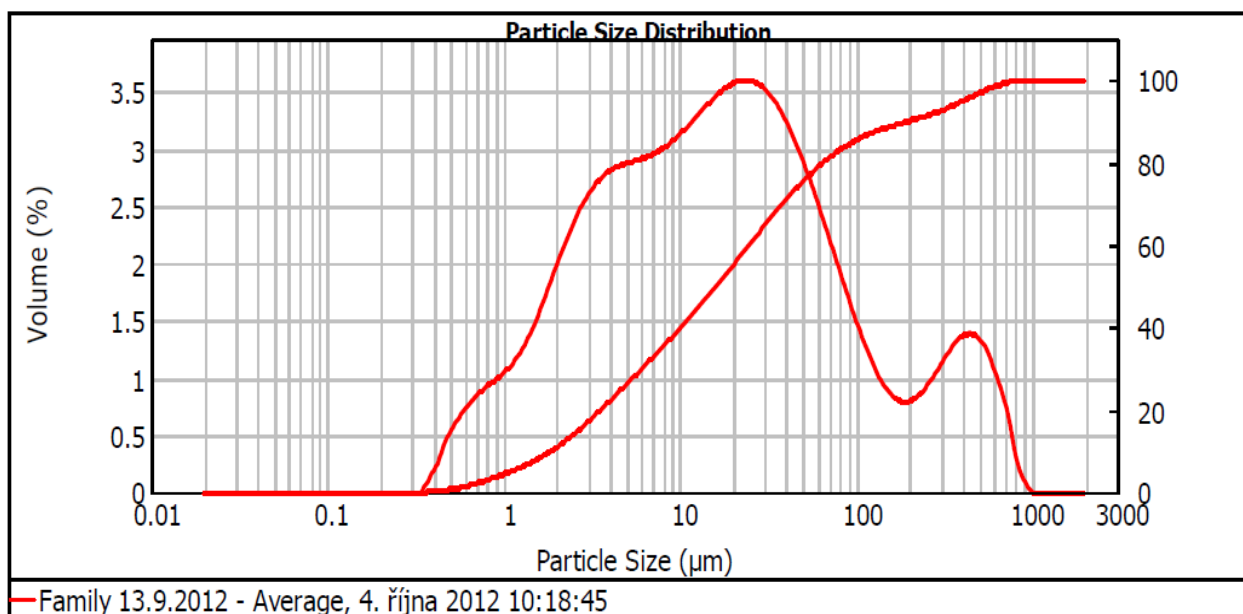
Z výsledků měření obou typů cihelného prachu (CP) je patrné nejvyšší zastoupení částic o velikosti mezi 5–40 μm . U CP Heluz 3/12 byl zjištěn měrný povrch 223 m^2/kg a byl zaznamenán výskyt částic do velikosti 2 mm. CP Heluz Family má měrný povrch 5× vyšší oproti prvnímu typu – 1021 m^2/kg . Na rozdíl od prvního typu zde byl zaznamenán výskyt jemnějších částic - od 0,35 μm a všechny částice byly menší než 1 mm. Výsledky stanovení jsou uvedeny v grafech na obrázku 7.3 a 7.4 a tabulkách 7.2 a 7.3.



Obrázek 7.3 Křivka zrnitosti CP Heluz 3/12

Tabulka 7.2 Velikost a zastoupení částic v CP Heluz 3/12

Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %
0.634	0.00	5.053	2.86	40.244	2.53	320.535	0.90
0.717	0.00	5.709	2.90	45.469	2.37	362.148	0.93
0.810	0.00	6.450	2.92	51.371	2.20	409.163	0.95
0.915	0.00	7.287	2.92	58.041	2.02	462.281	0.95
1.034	0.00	8.233	2.92	65.575	1.83	522.296	0.92
1.168	0.00	9.302	2.92	74.089	1.65	590.102	0.87
1.320	0.05	10.510	2.93	83.707	1.47	666.711	0.80
1.491	0.30	11.874	2.94	94.574	1.30	753.265	0.72
1.684	0.61	13.416	2.97	106.852	1.14	851.056	0.66
1.903	0.97	15.157	2.99	120.724	1.02	961.542	0.61
2.150	1.34	17.125	3.00	136.397	0.92	1086.372	0.52
2.429	1.70	19.348	3.00	154.104	0.85	1227.408	0.41
2.745	2.02	21.860	2.99	174.110	0.81	1386.753	0.31
3.101	2.28	24.698	2.95	196.714	0.80	1566.785	0.17
3.503	2.50	27.904	2.88	222.251	0.81	1770.189	0.09
3.958	2.66	31.527	2.79	251.105	0.84	2000.000	
4.472	2.78	35.620	2.67	283.704	0.87		
5.053		40.244		320.535			



Obrázek 7.4 Křivka zrnitosti CP Heluz Family 13. 9. 2012

Tabulka 7.3 Velikost a zastoupení částic v CP Family 13. 9. 2012

Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %	Size (μm)	Volume In %
0.634	0.66	5.053	2.31	40.244	2.50	320.535	0.99
0.717	0.72	5.709	2.32	45.469	2.35	362.148	1.07
0.810	0.77	6.450	2.35	51.371	2.17	409.163	1.11
0.915	0.82	7.287	2.39	58.041	1.98	462.281	1.08
1.034	0.89	8.233	2.43	65.575	1.78	522.296	0.98
1.168	0.98	9.302	2.49	74.089	1.57	590.102	0.80
1.320	1.11	10.510	2.56	83.707	1.37	666.711	0.60
1.491	1.26	11.874	2.63	94.574	1.18	753.265	0.26
1.684	1.44	13.416	2.70	106.852	1.00	851.056	0.08
1.903	1.61	15.157	2.77	120.724	0.85	961.542	0.00
2.150	1.78	17.125	2.82	136.397	0.74	1086.372	0.00
2.429	1.93	19.348	2.86	154.104	0.66	1227.408	0.00
2.745	2.05	21.860	2.87	174.110	0.63	1386.753	0.00
3.101	2.15	24.698	2.86	196.714	0.64	1566.785	0.00
3.503	2.22	27.904	2.82	222.251	0.70	1770.189	0.00
3.958	2.26	31.527	2.74	251.105	0.79	2000.000	0.00
4.472	2.29	35.620	2.64	283.704	0.89		
5.053		40.244		320.535			

7.3.2 Stanovení mineralogického složení cihelného prachu XRD analýzou

Metody rentgenové difrakční analýzy (XRD) slouží ke stanovení mineralogického složení zkoumaných krystalických materiálů – k jeho kvalitativnímu posouzení.

Metoda je založená na interakci rentgenového záření s elektrony atomů spočívající v pružném (bezfotonovém) rozptylu. Díky pravidelnému periodickému uspořádání atomů v krystalické fázi dochází po rozptylu a následné interferenci rentgenového záření ke vzniku difrakčních maxim, jejichž poloha, intenzita a tvar závisí na druhu atomů a dokonalosti jejich uspořádání v 3D prostoru. Studium tohoto difrakčního obrazce pak umožňuje zpětně studovat krystalické složení vzorku a jeho mikrostrukturu.

RTG paprsky po průchodu nebo po odrazu na krystalu dávají vznik difrakčnímu obrazu s charakteristickými maximy a minimy intenzity difrakčních skvrn.

$$2 \cdot d \cdot \sin \theta = n \lambda \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Uvedený vztah se nazývá Braggova rovnice. Známe-li vlnovou délku λ a změříme-li úhel θ , můžeme určit vzdálenosti d krystalických rovin, jež jsou identifikovány Millerovými indexy (h,k,l) , které udávají polohu rovin v prostorové mřížce [22].

Vzorek CP byl upraven mletím v achátovém mlýně a následně ještě rozetřen v achátové třecí misce do velmi jemného práškovitého stavu o velikosti částic pod

63 μm a umístěn do tzv. nosiče vzorku. Povrch vzorku v nosiči se zarovnal do jedné roviny přitlačením krycího sklíčka. Měření bylo prováděno v přístroji Philips PW 1130. Na PC byla zaznamenávána intenzita difraktovaného záření v závislosti na úhlu odrazu. Na výsledném záznamu – rentgenogramu bylo provedeno vyhodnocení krystalických fází.

Na ose X jsou vyneseny hodnoty úhlů difraktovaného záření 2θ a na ose Y jeho intenzita Ostrá maxima intenzity, která indikují splnění Braggovy rovnice se označují termínem vrchol (pík, linie).

Obečný postup vyhodnocení:

- vyznačení hodnot úhlů na ose X,
- stanovení mezirovinných vzdáleností,
- určení minerálů podle mezirovinných vzdáleností s použitím kartotéky ASTM [22].

Vyhodnocení rentgenogramu

Na záznamu z XRD analýzy byly nalezeny minerály: biotit, muskovit, ortoklas, albit, anortit, gehlenit, wollastonit.

Tabulka 7.4 Minerály nalezené na záznamu z XRD analýzy

Minerál	Chemický vzorec
biotit	$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{OH}, \text{F})_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}$
muskovit	$\text{KAl}_2[(\text{OH}, \text{F})_2/\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$
ortoklas	KAlSi_3O_8
albit	$\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$
anortit	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$
gehlenit	$\text{Ca}_2\text{Al}(\text{Si}_2\text{O}_7)$
wollastonit	$\text{Ca}_3\text{Si}_3\text{O}_9$

7.3.3 Stanovení pucolánové aktivity cihelného prachu

Pucolánová aktivita použitých typů cihelného prachu byla prováděna metodou stanovení zbytkového $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (upravený Chapelleho test). Metoda identifikuje pucolánovou aktivitu jako úbytek hydroxidu vápenatého v reakční směsi v suspenzi obsahující testovaný pucolán a oxid vápenatý. Pucolánová aktivita byla vyjádřena jako množství $\text{Ca}(\text{OH})_2$ v mg vázaného jedním gramem cihelného prachu. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 7.5.

Tabulka 7.5 Množství $\text{Ca}(\text{OH})_2$ v mg vázaného jedním gramem pucolánu

Označení pucolánu (cihelného prachu)	Výsledná hodnota
Heluz 3/12	422 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2$ / 1 g pucolánu
Heluz Family 13. 9. 2012	366 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2$ / 1 g pucolánu

Vyšší hodnotu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ vázaného na 1 g pucolánu vykazuje CP Heluz 3/12, a to 422 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2$ / 1 g pucolánu. CP Heluz Family 13. 9. 2012 pak hodnotu 366 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2$ / 1 g pucolánu. Ve srovnání s jinými druhy pucolánů (např. metakaolin – cca 1000 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /1 g, popílek – cca 700 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /1 g) to je hodnota 1,5–4krát nižší, ale nicméně není zanedbatelná.

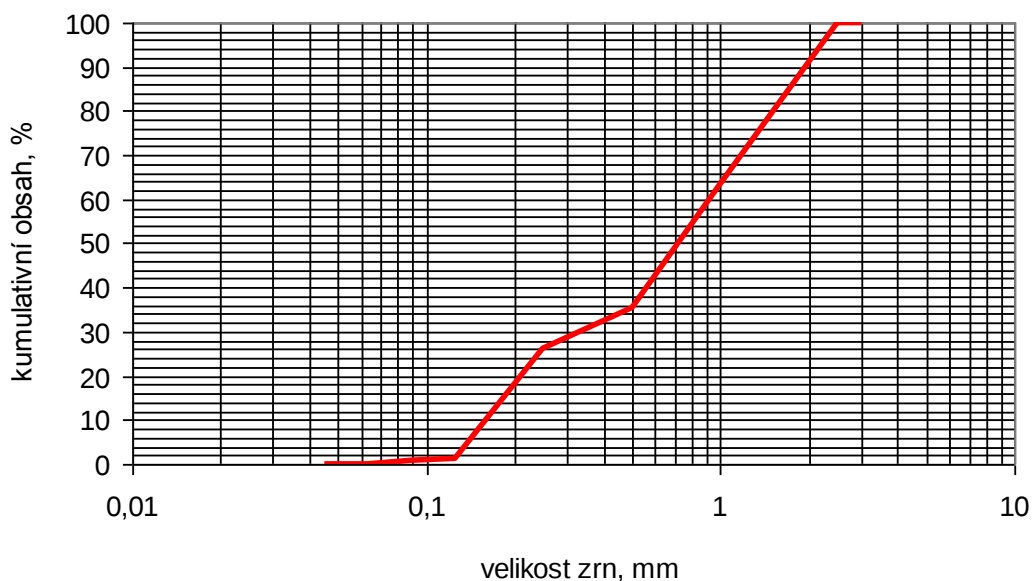
7.4 Písek

Pro přípravu malt byl použit Zkušební písek dle ČSN 72 1208 Zkušební písky Sp a N II, frakce PG 1, PG 2 a PG 3. Písek splňuje požadavky podle normy ČSN EN 13139 Kamenivo pro malty.

V tabulce 7.6 je uvedena zrnitost těchto frakcí a v grafu na obrázku 10 výstupní křivka zrnitosti po smísení všech tří frakcí.

Tabulka 7.6 Použité frakce zkušebního písku

Označení	Frakce kameniva [mm]
PG1	0,0 až 0,5
PG2	0,125 až 2,50
PG3	0,5 ž 5,0



Obrázek 7.5 Granulometrie zkušebních písků po smísení v poměru PG1+PG2+PG3 = 1:1:1

8 II. etapa - Stoupající množství jemného cihelného střeptu ke konstantnímu množství vápna

Cílem tohoto experimentu bylo zjistit chování cihelného prachu jako příměsi ve vápenné maltě. Cihelný prach zde působí jako aktivní pucolánová příměs, přidaná do vápenné malty ke konstantnímu množství vápna, za účelem zlepšení některých vlastností, zejména mechanických.

8.1 Složení malt

Pro zkoušení vlastností vápenných malt s konstantním množstvím vápna a stoupajícím množstvím CP byla navržena jedna receptura. Receptura zahrnovala celkem 5 směsí (včetně referenční), v nichž se poměrově zvyšoval obsah CP.

Poměr v hmotnostních dílech byl 3:1:0,0 až 1,0 (písek:vápno:cihelný prach). Složení směsí uvádí tabulka 8.1.

Tabulka 8.1 Složení směsí

Označení záměsi	Poměr složek		
	Vápenný hydrát	Cihelný prach	Písek zkušební 1:1:1
REF	1	0,00	3
AV-1	1	0,10	3
AV-2	1	0,25	3
AV-3	1	0,50	3
AV-4	1	1,00	3

8.2 Příprava zkušebních těles

Pro pevnostní zkoušky a zkoušku nasákavosti bylo z každé směsi připraveno 15 zkušebních těles 40×40×160 mm. Byl použit zkušební písek o třech frakcích, vápenný hydrát CL 90–S, cihelný prach **Heluz 3/12** a voda. Na homogenní směsi byly provedeny zkoušky konzistence a při vyhovujícím výsledku byla směs uložena do ocelové, olejem vymazané, trojformy pro tělesa 40×40×160 mm a trojforma byla zhutněna 5 poklepy z každé strany formy (napodobení nanášení malty zednickou lžicí). Tělesa byla odformována po dvou až třech dnech od namíchání a označena lihovým fixem. Tělesa byla uložena v prostoru laboratoře při teplotě 21 ± 1°C a relativní vlhkosti vzduchu 50 ± 5 %.

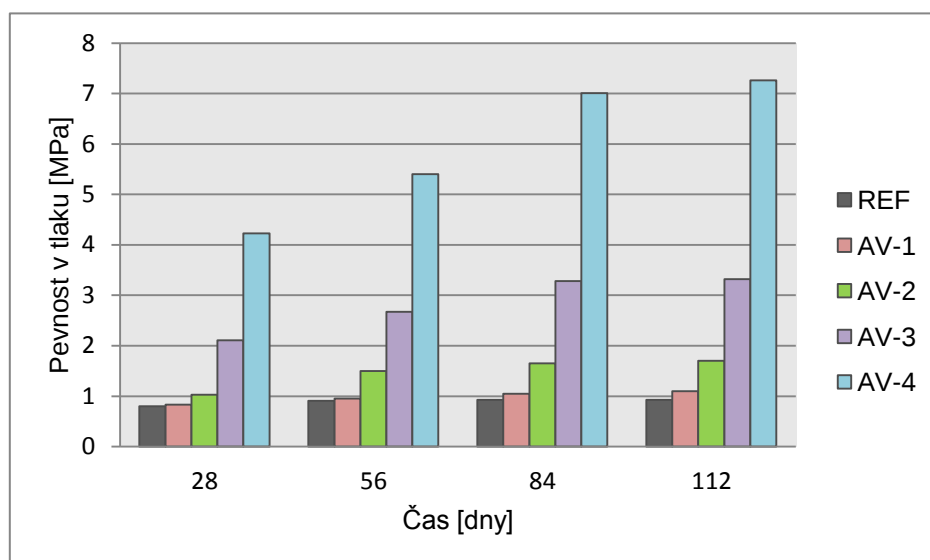
8.3 Výsledky zkoušek

V této etapě byly stanoveny vlastnosti vápenných malt z hlediska pevností v tlaku, nasákavosti a objemové hmotnosti.

8.3.1 Pevnost v tlaku

Tabulka 8.2 Pevnosti v tlaku ve stáří 28, 56, 84 a 112 dní

	Pevnost v tlaku [MPa] ve stáří			
	28 dní	56 dní	84 dní	112 dní
REF	0,8	0,9	0,9	0,9
AV-1	0,8	1,0	1,1	1,1
AV-2	1,0	1,5	1,7	1,7
AV-3	2,1	2,7	3,3	3,3
AV-4	4,2	5,4	7,0	7,3

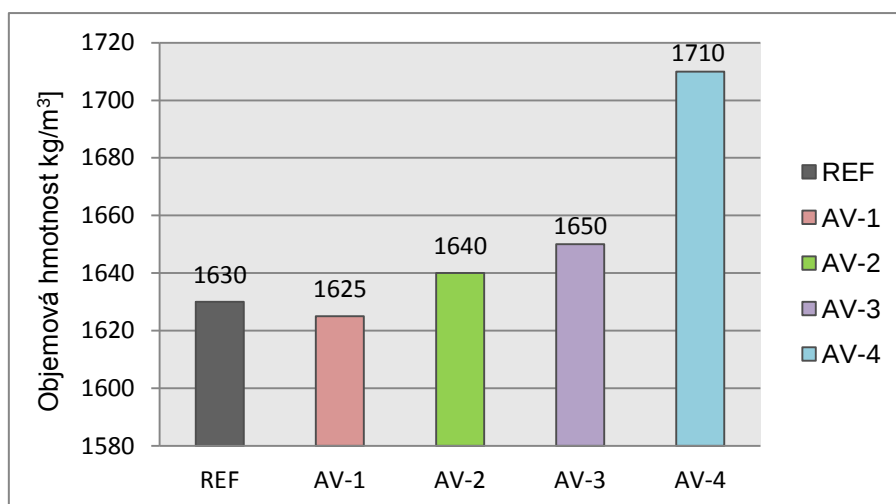


Obrázek 8.1 Porovnání pevností v tlaku ve stáří 28, 56, 84 a 112 dní

8.3.2 Objemová hmotnost

Tabulka 8.3 Objemové hmotnosti ve stáří 28 dní

Označení směsi	Objemová hmotnost [kg/m ³]
REF	1630
AV-1	1625
AV-2	1640
AV-3	1650
AV-4	1710

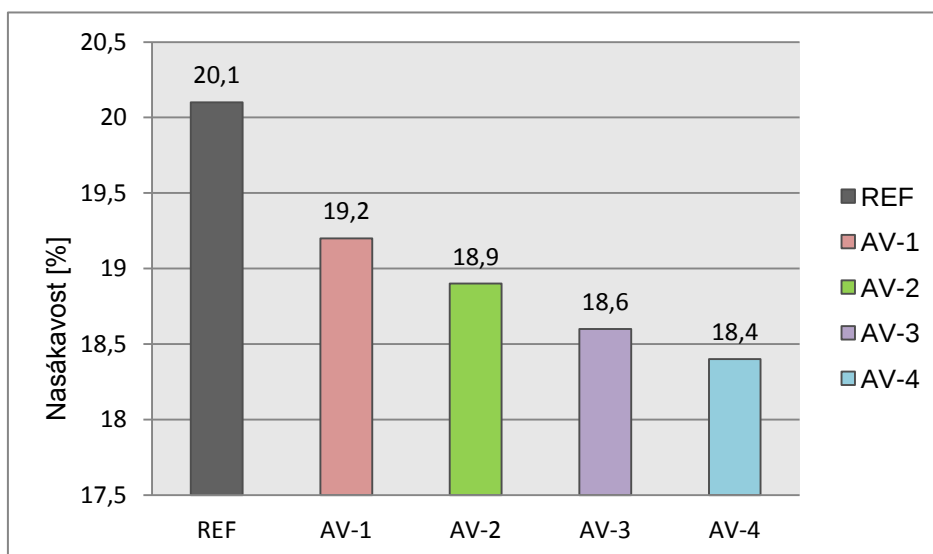


Obrázek 8.2 Porovnání objemových hmotností jednotlivých směsí

8.3.3 Nasákavost

Tabulka 8.4 Nasákavost ve stáří 28 dní

Označení směsi	Nasákavost [%]
REF	20,1
AV-1	19,2
AV-2	18,9
AV-3	18,6
AV-4	18,4



Obrázek 8.3 Porovnání nasákavosti jednotlivých směsí ve stáří 28 dní

8.4 Vyhodnocení

Z výsledků pevností v tlaku je zřejmé, že při konstantním množství vápna se výrazně uplatní pucolánová reakce cihelného prachu. Po 84 a 112 dnech dosáhly pevnosti až 7násobek pevností referenční malty bez CP. Vzhledem k velikosti částic prachu se

příliš neuplatňuje porozita kusového cihelného střeptu, a proto se zvýšila objemová hmotnost ztvrdlé malty a snížila se nasákavost v důsledku tvorby CSH, resp. CAH sloučenin.

9 III. etapa – Nahrazení části vápna stoupajícím množstvím jemného cihelného střeptu

9.1 Složení malt

Pro zkoušení vlastností vlivu cihelného prachu na modifikaci vápna v maltách a omítkách byly zvoleny 3 druhy receptur. Hlavní pojivou složkou byl vápenný hydrát CL 90-S, ve třetí receptuře byla použita směs vápenného hydrátu a portlandského cementu. Pojivo bylo postupně nahrazováno zvyšujícím se množstvím cihelného prachu, a to až do výše 80 %. Množství vody bylo přizpůsobeno požadované konstantní konzistenci čerstvé malty – 160 ± 5 mm podle stanovení konzistence – rozliti dle ČSN EN 1015-3: Zkušební metody malt pro zdivo – Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku). Na jednu trojformu bylo naváženo 1600 g suchých složek.

Receptura A

V receptuře A byl hlavní pojivou složkou vápenný hydrát v poměru s pískem 1:3. Kamenivo bylo složeno ze 3 frakcí zkušebního písku v poměru 1:1:1. Celkem bylo připraveno 9 směsí, včetně referenční. Vápno bylo nahrazováno zvyšujícím se podílem cihelného prachu (CP) Heluz 3/12 po 10 % až do výše zastoupení 80 %. Složení směsi je uvedeno v tabulce 9.1.

Tabulka 9.1 Receptura A

Označení záměsi	Poměr složek		
	Vápenný hydrát	Cihelný prach Heluz 3/12	Písek
A-REF	1,00	0,00	3
A-1	0,90	0,10	3
A-2	0,80	0,20	3
A-3	0,70	0,30	3
A-4	0,60	0,40	3
A-5	0,50	0,50	3
A-6	0,40	0,60	3
A-7	0,30	0,70	3
A-8	0,20	0,80	3

Receptura B

V receptuře B byl hlavní pojivou složkou vápenný hydrát v poměru s pískem 1:4. Kamenivo bylo složeno ze 3 frakcí zkušebního písku v poměru 1:1:1. Celkem bylo připraveno 9 směsí, včetně referenční. Vápno bylo nahrazováno zvyšujícím se podílem cihelného prachu (CP) Heluz 3/12 po 10 % až do výše zastoupení 80 %. Složení směsi je uvedeno v tabulce 9.2.

Tabulka 9.2 Receptura B

Označení záměsi	Poměr složek		
	Vápenný hydrát	Cihelný prach Heluz 3/12	Písek
B-REF	1,00	0,00	4
B-1	0,90	0,10	4
B-2	0,80	0,20	4
B-3	0,70	0,30	4
B-4	0,60	0,40	4
B-5	0,50	0,50	4
B-6	0,40	0,60	4
B-7	0,30	0,70	4
B-8	0,20	0,80	4

Receptura BC

V receptuře BC byl pojivou složkou vápenný hydrát a portlandský cement CEM I 42,5 R v poměru 1:1, a tato směs v poměru s pískem 1:3. Kamenivo bylo složeno ze 3 frakcí zkušebního písku v poměru 1:1:1. Celkem bylo připraveno 9 směsí, včetně referenční. Vápno s cementem bylo nahrazováno zvyšujícím se podílem cihelného prachu (CP) Heluz Family 13. 9. 2012 po 10 % až do výše zastoupení 80 %. Složení směsi je uvedeno v tabulce 9.3.

Tabulka 9.3 Receptura BC

Označení záměsi	Poměr složek			
	Vápenný hydrát	CEM I 42,5	Cihelný prach Heluz Family 13. 9. 2012	Písek
BC-REF	0,50	0,50	0,00	4
BC-1	0,45	0,45	0,10	4
BC-2	0,40	0,40	0,20	4
BC-3	0,35	0,35	0,30	4
BC-4	0,30	0,30	0,40	4
BC-5	0,25	0,25	0,50	4
BC-6	0,20	0,20	0,60	4
BC-7	0,15	0,15	0,70	4
BC-8	0,10	0,10	0,80	4

9.2 Příprava zkušebních těles

Pro pevnostní zkoušky bylo z každé připraveno 18 zkušebních těles o velikosti 40×40×160 mm. Na elektronických vahách s přesností 0,1 g byl nejprve navážen písek třech frakcí a zhomogenizován. Poté byl navážen vápenný hydrát a cihelný prach a opět byla celá směs důkladně promíchána. Postupně byla do záměsi zapracována voda. Na homogenní směsi byly provedeny zkoušky konzistence a při vyhovujícím výsledku byla směs uložena do ocelové, olejem vymazané trojformy pro tělesa 40×40×160 mm mm a trojforma byla zhutněna. Míchání každé záměsi zpravidla probíhalo s týdenním odstupem. Tělesa byla odformována po dvou až třech dnech od výroby a tělesa byla označena lihovým fixem. Tělesa byla uložena v prostoru laboratoře při teplotě 20 ± 1 °C a relativní vlhkosti vzduchu 50 ± 5 %.

Na obrázku 9.1 jsou zobrazena zkušební tělesa jednotlivých směsí receptury B. Patrný je barevný přechod se zvyšujícím se podílem CP.



Obrázek 9.1 Zkušební tělesa receptury B

9.3 Vlastnosti vápenných malt s jemným cihelným střepem

9.3.1 Stanovení konzistence čerstvé malty

9.3.1.1 Měření konzistence na střešacím stolku

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

Do středu desky střešacího stolku byl umístěn kovový kužel, který se naplnil připravenou maltou ve dvou vrstvách, kdy každá byla zhutněna 10 údery dusadla. Přebytečná malta se pomocí špachtle odstranila z povrchu kužele a povrch byl urovnán. Volná plocha desky byla otřena do sucha, včetně odstranění vody kolem spodního okraje kužele. Kovový kužel byl zvednut kolmo vzhůru a malta se rozlila na ploše stolku 15 nárazy s konstantní frekvencí jednoho zdvihu za 1 s. Průměr koláče byl změřen ve dvou na sebe kolmých směrech pomocí měřítka a zaznamenán [23], viz obrázek 9.2.

Měření bylo prováděno dvakrát a výsledek byl zprůměrován. Měření bylo opakováno s různým množstvím vody v záměsi tolikrát, dokud průměr rozlité malty nedosahoval požadované hodnoty konzistence 160 ± 5 mm. Při této hodnotě bylo zaznamenáno použité množství vody v ml.



Obrázek 9.2 Měření rozlití malty na střešacím stolku

Pro všechny záměsi bylo určena konzistence 160 ± 5 mm, čímž se určilo potřebné množství vody.

9.3.1.2 Měření konzistence s použitím přístroje pro stanovení hodnoty penetrace

Stanovení probíhalo dle ČSN EN 1015-4 Zkušební metody malt pro zdivo – Část 4: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím přístroje pro stanovení hodnoty penetrace).

Měřicí tyčka na přístroji byla zajištěna ve své výchozí poloze pomocí upevňovacího šroubu a penetrační váleček se před zkouškou očistil vlhkou tkaninou a otřen do sucha. Ocelová nádoba byla naplněna maltou ve dvou vrstvách a každá vrstva byla zhutněna 10 krátkými údery dusadla. Přebytečná malta byla setřena špachtlí a povrch srovnán s horním okrajem nádoby.

Nádoba byla umístěna na desku přístroje a uvolněním upevňovacího šroubu spadla volně tyčka s penetračním válečkem do nádoby, obrázek 9.3. Hodnota penetrace válečku do malty byla odečtena na stupnici měřicí tyčky s přesností na 1 mm, obrázek 9.4. Měření každé záměsi bylo provedeno dvakrát a výsledek zprůměrován [24]. Výsledky stanovení penetrace, tabulka 9.4, sloužily ke zjištění množství záměsové vody.



Obrázek 9.3 Detail ponoření penetračního válečku do nádoby s maltou



Obrázek 9.4 Odečítání hodnoty penetrace

Tabulka 9.4 Penetrace válečku do malty pro jednotlivé receptury

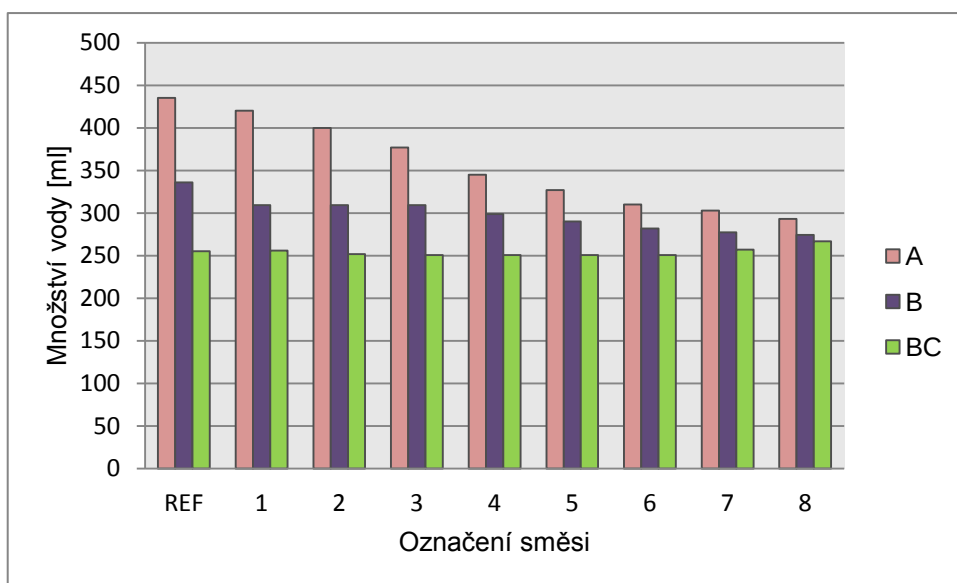
Označení směsi	Penetrace [mm]	Označení směsi	Penetrace [mm]	Označení směsi	Penetrace [mm]
A-REF	32	B-REF	31	BC-REF	28
A-1	28	B-1	30	BC-1	35
A-2	33	B-2	28	BC-2	31
A-3	29	B-3	31	BC-3	28
A-4	31	B-4	29	BC-4	27
A-5	29	B-5	30	BC-5	28
A-6	30	B-6	30	BC-6	25
A-7	31	B-7	29	BC-7	31
A-8	30	B-8	28	BC-8	30

9.3.2 Množství záměsové vody

Pro všechny typy směsí byla požadována konstantní konzistence čerstvé malty – rozliti 160 ± 5 mm (dle ČSN EN 1015-3). Potřebné množství vody pro každou záměs bylo zjišťováno právě z této zkoušky. Voda byla dávkována objemově a výsledné množství vody je zaznamenáno v ml, viz tabulka 9.5 a graf na obrázku 9.5.

Tabulka 9.5 Množství vody pro jednotlivé receptury

Označení směsi	Množství vody [ml]	Označení směsi	Množství vody [ml]	Označení směsi	Množství vody [ml]
A-REF	435	B-REF	336	BC-REF	255
A-1	420	B-1	309	BC-1	256
A-2	400	B-2	309	BC-2	252
A-3	377	B-3	309	BC-3	251
A-4	345	B-4	299	BC-4	251
A-5	327	B-5	290	BC-5	251
A-6	310	B-6	282	BC-6	251
A-7	303	B-7	277	BC-7	257
A-8	293	B-8	274	BC-8	267



Obrázek 9.5 Porovnání potřebného množství vody pro konzistenci rozliti 160 ± 5 mm

Z grafu je patrné klesající množství vody pro konstantní konzistenci se stoupajícím zastoupením CP. Nejpatrnější pokles množství vody je u receptury A, kde činil poměr VH+CP : písek 1:3 na rozdíl od receptury B s poměrem 1:4. Potřebné množství vody u receptury BC (VH+PC+CP) se téměř nemění, naopak u směsí BC-7 a BC-8 s vysokým obsahem CP mírně stoupá.

9.3.3 Nasákavost

Zkoušení nasákavosti vápenných malt bylo prováděno v souladu s ČSN EN 13755. Zkouška byla prováděna na zkušebních tělesech o velikosti 40×40×160 mm ve stáří 28 dní pro 1 těleso z každé záměsi.

Před měřením bylo těleso vysušeno při teplotě 105 až 110 °C do ustálené hmotnosti, a poté ponořeno na 24 hodin do vody a následně zváženo. Nasákavost NV byla vyjádřena podle následujícího vztahu:

$$NV = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100\%$$

m_1 ... hmotnost nasáknutého vzorku

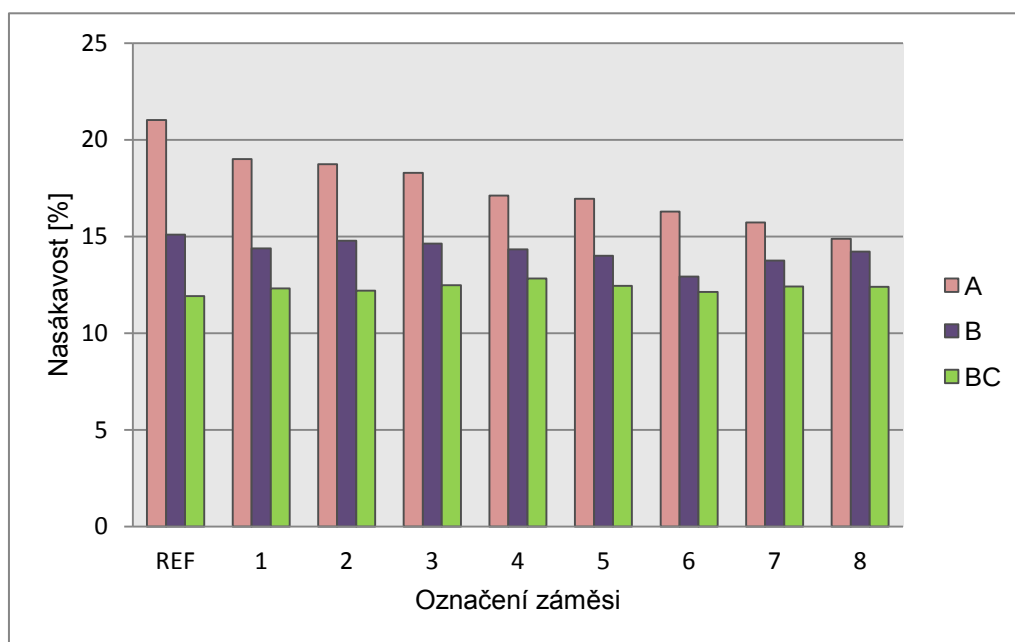
m_2 ... ustálená hmotnost vysušeného vzorku

[25]

Výsledky jsou uvedeny v tabulce 9.6 a v grafu na obrázku 9.6.

Tabulka 9.6 Nasákavost pro jednotlivé receptury

Označení směsi	Nasákavost [%]	Označení směsi	Nasákavost [%]	Označení směsi	Nasákavost [%]
A-REF	21	B-REF	15	BC-REF	12
A-1	17	B-1	14	BC-1	12
A-2	19	B-2	15	BC-2	12
A-3	18	B-3	15	BC-3	12
A-4	17	B-4	14	BC-4	13
A-5	17	B-5	14	BC-5	12
A-6	16	B-6	13	BC-6	12
A-7	16	B-7	14	BC-7	12
A-8	15	B-8	14	BC-8	12



Obrázek 9.6 Porovnání nasákavosti zkušebních těles ve stáří 28 dní

Se stoupajícím množstvím CP u malty A nasákavost klesá, u receptur B a BC je u všech směsí téměř konstantní, ale nižší než u malty A. Nižší nasákavost je pravděpodobně způsobena vyšším obsahem kameniva v maltách B a BC.

9.3.4 Mechanické vlastnosti

Stanovení mechanických vlastností probíhalo dle ČSN EN 1015-11 Zkušební metody malt pro zdivo – Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku. Pevnosti se určovaly ve stáří zkušebních těles 7, 28, 90 dní. Zkušební tělesa byla vyrobena ještě pro stanovení ve stáří 180 a 360 dní, výsledky však budou z časových důvodů předmětem dalšího výzkumu.

Pevnost v tahu za ohybu byla stanovována tříbodovým zatěžováním do porušení zkušebního trámečku (40×40×160 mm).

Pevnost v tahu za ohybu byla vypočtena dle následujícího vztahu:

$$f = 1,5 \frac{F \times l}{b \times d^2} \text{ [MPa]}$$

F ... maximální zatížení na zkušební těleso [N];

l ... vzdálenost mezi osami podpěrných válců [mm];

b ... šířka zkušebního tělesa [mm];

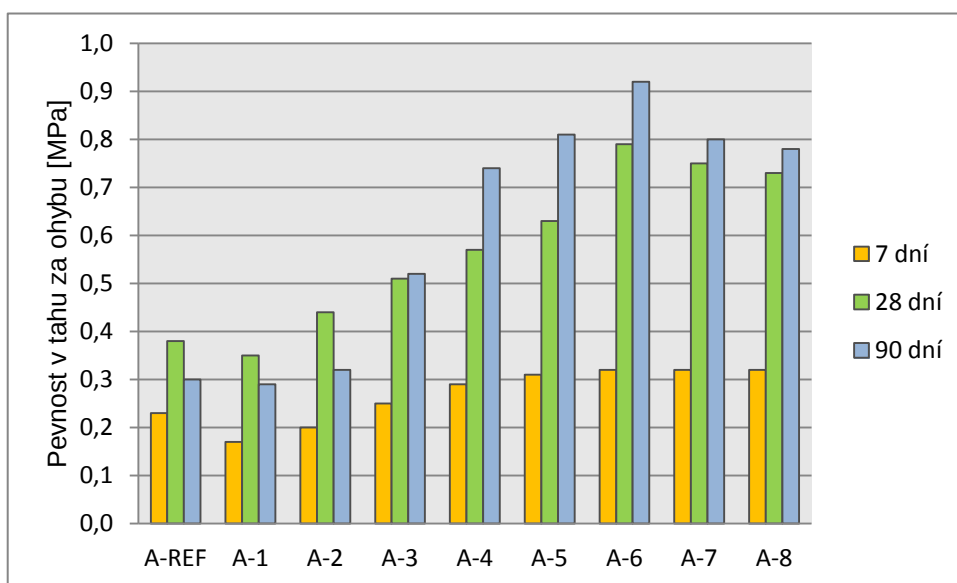
h ... výška zkušebního tělesa [mm].

[26]

Výsledky stanovení pevností udávají tabulky 9.7, 9.8 a 9.9, grafické zpracování výsledků je na obrázku 9.7, 9.8 a 9.9.

Tabulka 9.7 Výsledky pevností v tahu za ohybu - receptura A

Označení záměsi	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]		
	7 dní	28 dní	90 dní
A-REF	0,2	0,4	0,3
A-1	0,2	0,4	0,3
A-2	0,2	0,4	0,3
A-3	0,3	0,5	0,5
A-4	0,3	0,6	0,7
A-5	0,3	0,6	0,8
A-6	0,3	0,8	0,9
A-7	0,3	0,8	0,8
A-8	0,3	0,7	0,8

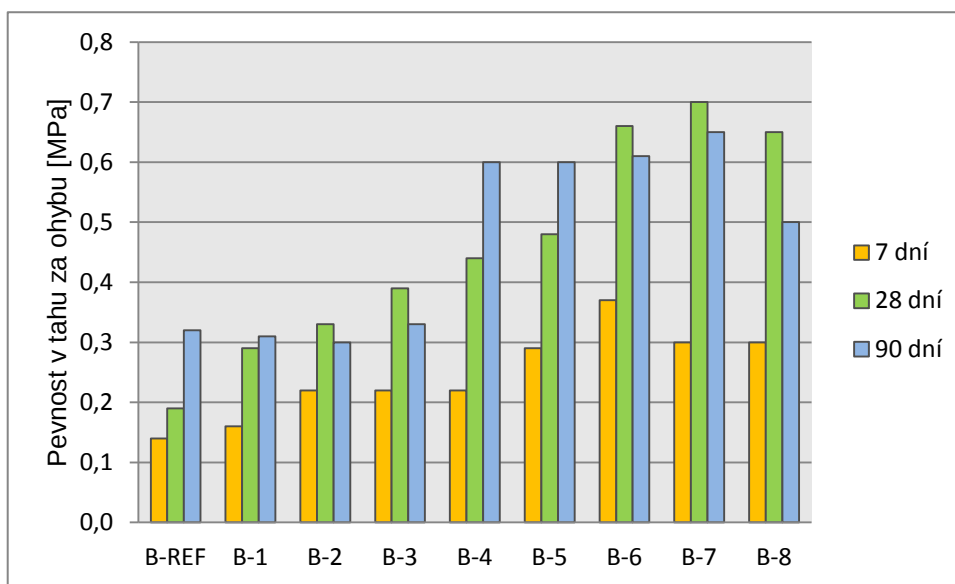


Obrázek 9.7 Pevnosti v tahu za ohybu v čase - receptura A

U malty A se zvyšovala pevnost po 28 a 90 dnech až do poměru vápenný hydrát (VH) :CP 40:60. Z hlediska výsledků stanovení pucolánové aktivity bylo na 1 g CP spotřebováno 422 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2$, tedy i pro poměr VH:CP 40:60 je množství hydroxidu vápenatého dostačující. Malta A-6 vykazala po 90 dnech 3krát vyšší pevnost v tahu za ohybu než malta referenční.

Tabulka 9.8 Výsledky pevností v tahu za ohybu - receptura B

Označení záměsi	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]		
	7 dní	28 dní	90 dní
B-REF	0,1	0,2	0,3
B-1	0,2	0,3	0,3
B-2	0,2	0,3	0,3
B-3	0,2	0,4	0,3
B-4	0,2	0,4	0,6
B-5	0,3	0,5	0,6
B-6	0,4	0,7	0,6
B-7	0,3	0,7	0,7
B-8	0,3	0,7	0,5



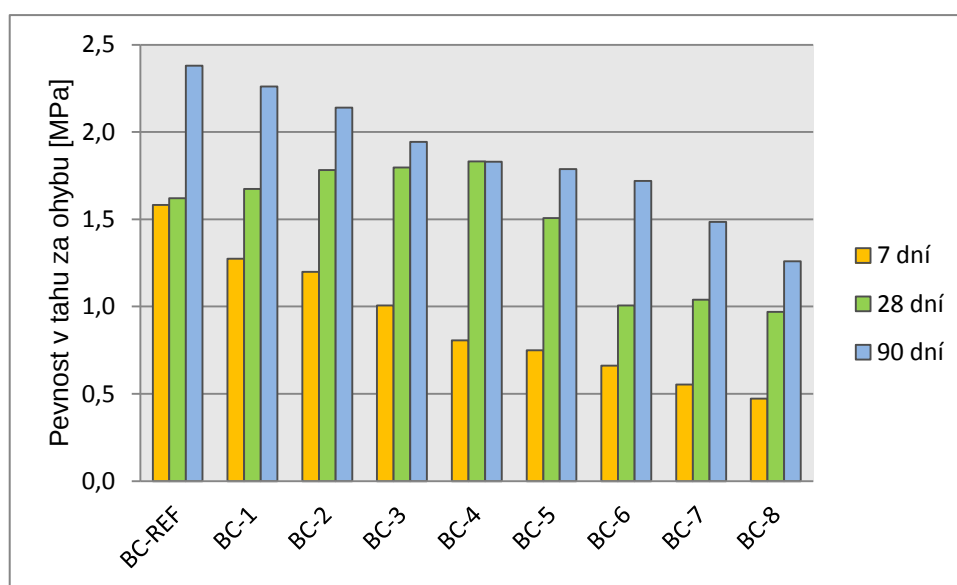
Obrázek 9.8 Pevnosti v tahu za ohybu v čase - receptura B

Malta B dosáhla nejvyšší pevnost v tahu za ohybu po 28 a 90 dnech u receptury B-7, která však představovala asi dvojnásobek pevností referenční malty. U malt receptur řady B v některých případech došlo k mírnému snížení pevnosti po 90 dnech.

Kolísání pevností může vyplývat z chyb stanovení (výsledek je průměr ze 3 stanovení).

Tabulka 9.9 Výsledky pevností v tahu za ohybu - receptura BC

Označení záměsi	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]		
	7 dní	28 dní	90 dní
BC-REF	1,6	1,6	2,4
BC-1	1,3	1,7	2,3
BC-2	1,2	1,8	2,1
BC-3	1,0	1,8	1,9
BC-4	0,8	1,8	1,8
BC-5	0,8	1,5	1,8
BC-6	0,7	1,0	1,7
BC-7	0,6	1,0	1,5
BC-8	0,5	1,0	1,3



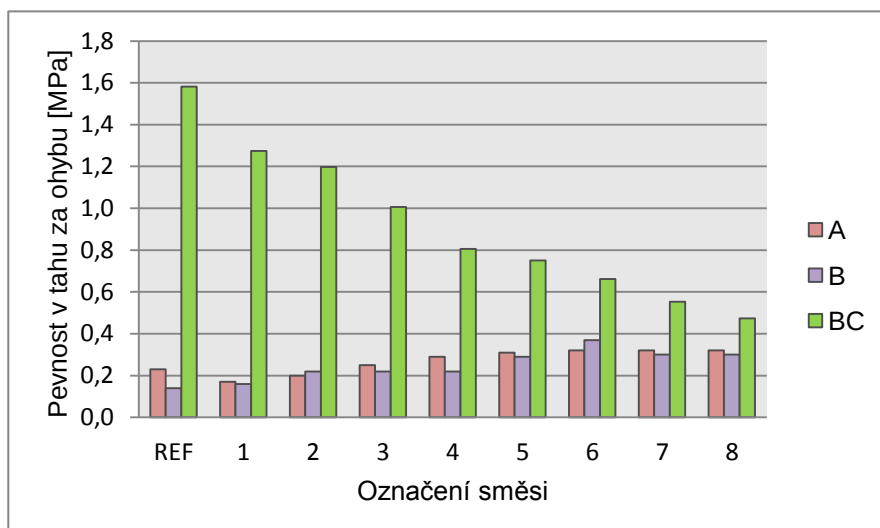
Obrázek 9.9 Pevnosti v tahu za ohybu v čase - receptura BC

U malt s označením BC se již projevila nedostatek hydroxidu vápenatého pro pucolánovou reakci. Náhrada poloviny množství vápenného hydrátu cementem vedlo ke snížení obsahu hydroxidu vápenatého zhruba o 40 %. To vedlo k možnosti reakce cihelného prachu pouze do poměru VH :CP 60:40, vyšší obsah CP již neměl dostatek hydroxidu pro reakci, a naopak jemný prach v maltě měl větší nároky na celkové množství pojiva.

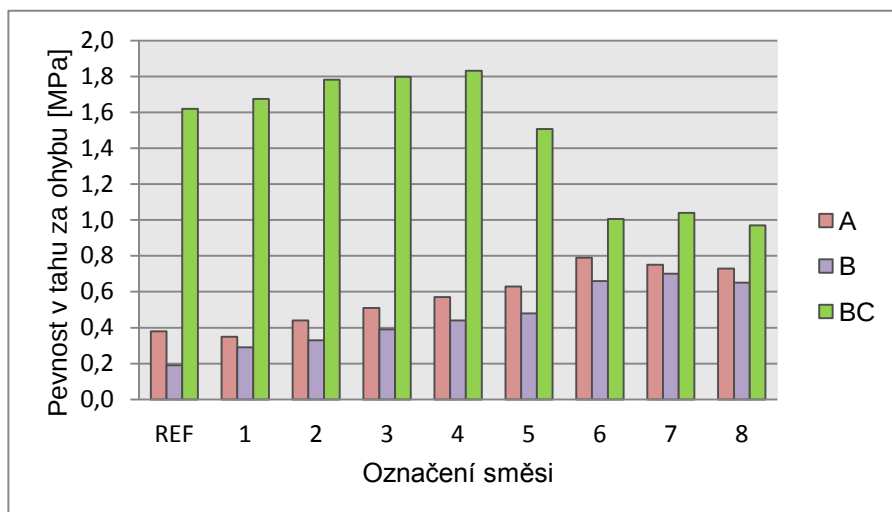
Díky pucolánové reakci je patrný mírný nárůst pevností do poměru VH:CP 60:40 ve stáří 28 dní. Ve stáří 90 dní pevnosti v tahu za ohybu oproti referenční směsi

klesají s rostoucím poměrem CP. U směsi s poměrem VH:CP 60:40 se pevnost ve stáří 28 a 90 dní v podstatě neliší.

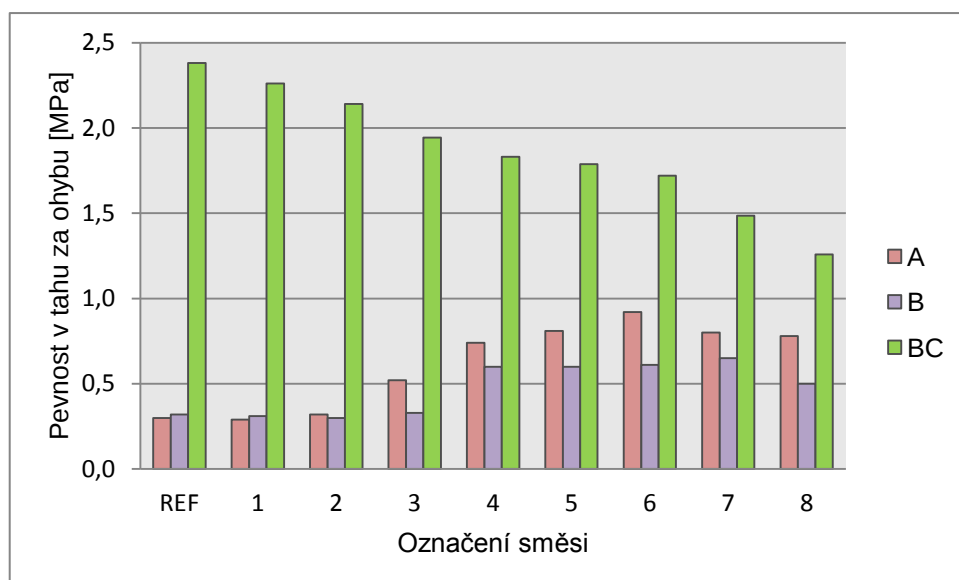
Vzájemné porovnání výsledků pevnost v tahu za ohybu mezi jednotlivými recepturami ve stáří 7, 28 a 90 dnů je uvedeno v grafech na obrázku 9.10, 9.11 a 9.12.



Obrázek 9.10 Porovnání pevností v tahu za ohybu ve stáří 7 dní - receptury A, B, BC



Obrázek 9.11 Porovnání pevností v tahu za ohybu ve stáří 28 dní - receptury A, B, BC



Obrázek 9.12 Porovnání pevností v tahu za ohybu ve stáří 90 dní - receptury A, B, BC

Ze vzájemného porovnání pevností v tahu za ohybu všech sledovaných malt je patrný přínos cementu k pevnostem malt. Ten se výrazně projevil po 7 dnech, kdy pevnosti malt BC převyšovaly pevnosti malt A a B, a to zejména při nižších obsazích CP. Po 28 dnech jsou výsledky podobné. Po 90 dnech rovněž vápenocementová malta pevnostmi výrazně převyšuje malty vápenné, opět zejména u malt s nižším obsahem CP. Receptura A s nižším obsahem písku vykazuje mírně vyšší pevnosti než receptura B.

Pevnost v tlaku byla stanovována na zlomcích trámečků ze zkoušky pevnosti v tahu za ohybu - celkem na 6 zlomcích z každé směsi pro dané stáří.

Pevnost tlaku byla vypočtena dle následujícího vztahu:

$$f = \frac{F}{40 \times 40} \text{ [MPa]}$$

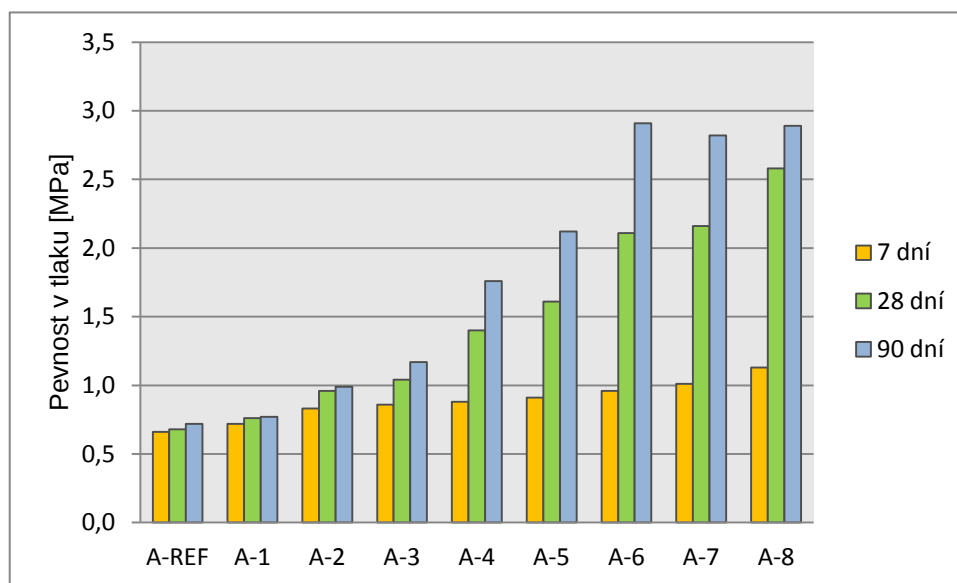
F ... maximální zatížení na zkušební těleso [N]

[26]

Výsledky stanovení pevností jsou uvedeny v tabulkách 9.10, 9.11 a 9.12 a znázorněny v grafech na obrázku 9.13, 9.14 a 9.15.

Tabulka 9.10 Výsledky pevností v tlaku - receptura A

Označení záměsi	Pevnost v tlaku [MPa]		
	7 dní	28 dní	90 dní
A-REF	0,7	0,7	0,7
A-1	0,7	0,8	0,8
A-2	0,8	1,0	1,0
A-3	0,9	1,0	1,2
A-4	0,9	1,4	1,8
A-5	0,9	1,6	2,1
A-6	1,0	2,1	2,9
A-7	1,0	2,2	2,8
A-8	1,1	2,6	2,9

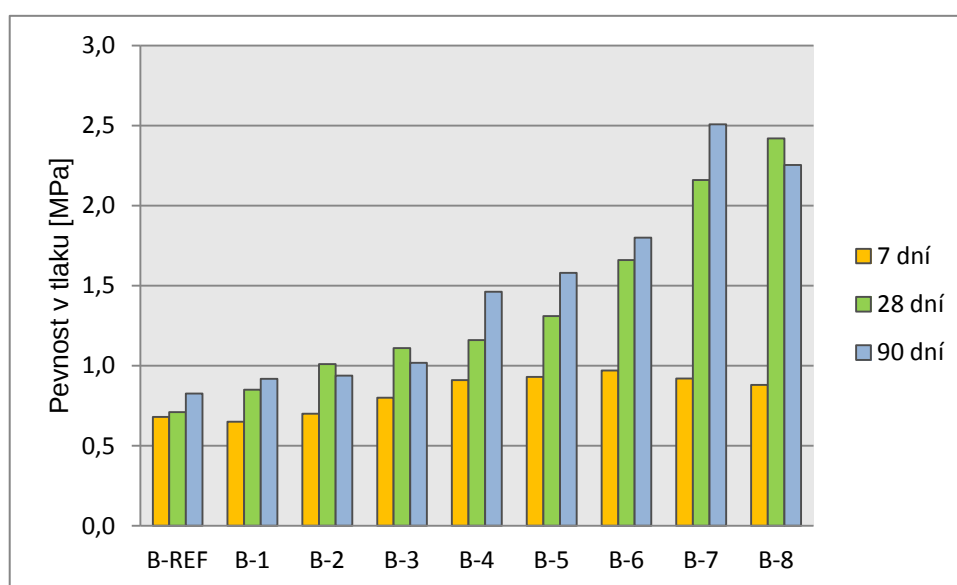


Obrázek 9.13 Porovnání pevností v tlaku - receptura A

U malt receptury A se pevnosti v tlaku po 7 dnech v závislosti na stoupající množství CP výrazně nelišily. Po 28 dnech došlo k výraznému nárůstu pevností se stoupajícím množstvím CP, a po 90 dnech ještě k mírnému zvýšení. Je tedy zřejmé, že CP hraje důležitou roli ve vápenné maltě a výrazně se podílí na zvýšení pevností. Malty A-6, A-7 a A-8 po 90 dnech mají stejné pevnosti v tlaku, které jsou 5krát vyšší než pevnosti referenční malty.

Tabulka 9.11 Výsledky pevností v tlaku - receptura B

Označení záměsi	Pevnost v tlaku [MPa]		
	7 dní	28 dní	90 dní
B-REF	0,7	0,7	0,8
B-1	0,7	0,9	0,9
B-2	0,7	1,0	0,9
B-3	0,8	1,1	1,0
B-4	0,9	1,2	1,5
B-5	0,9	1,3	1,6
B-6	1,0	1,7	1,8
B-7	0,9	2,2	2,5
B-8	0,9	2,4	2,3

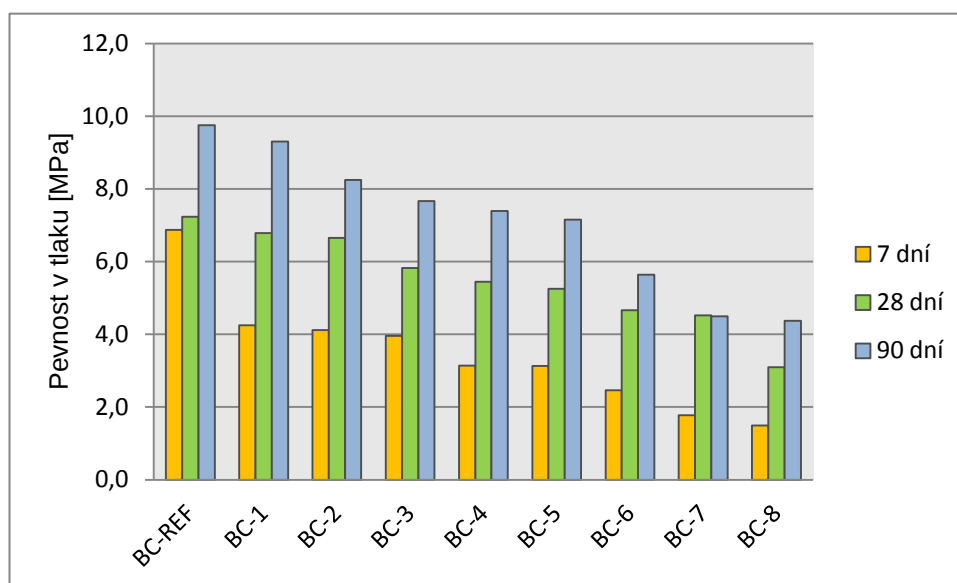


Obrázek 9.14 Porovnání pevností v tlaku - receptura B

U malt receptury B byl průběh pevností v tlaku podobný, jako u malt receptury A se pevnosti v tlaku po 7 dnech v závislosti na stoupajícím množství CP výrazně nelišily. U malt s označením B stoupaly pevnosti až do poměru VH:CP 30:70, u malty s poměrem VH:CP 20:80 se pevnosti již nezvyšovaly. Je to způsobeno tím, že u těchto malt je vyšší obsah kameniva v porovnání s maltami A.

Tabulka 9.12 Výsledky pevností v tlaku – receptura BC

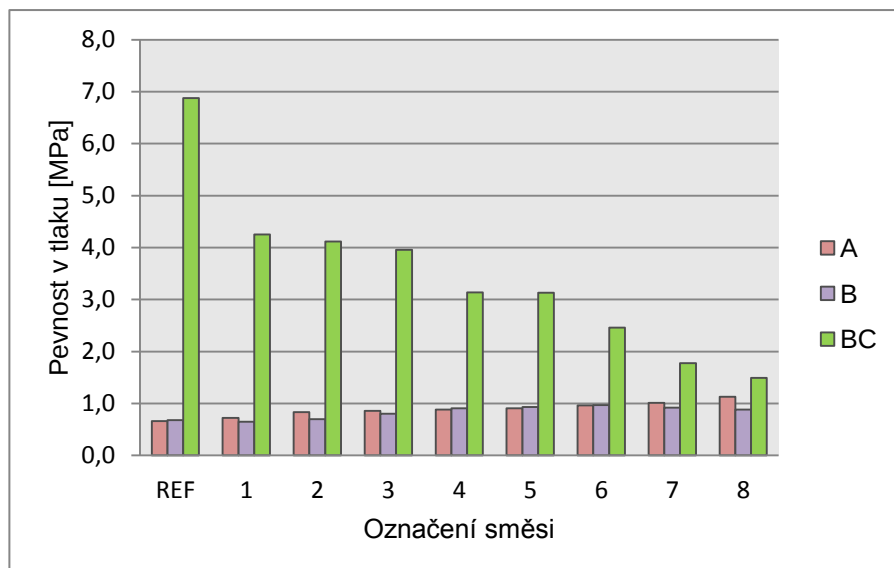
Označení záměsi	Pevnost v tlaku [MPa]		
	7 dní	28 dní	90 dní
BC-REF	6,9	7,2	9,8
BC-1	4,2	6,8	9,3
BC-2	4,1	6,7	8,2
BC-3	4,0	5,8	7,7
BC-4	3,1	5,5	7,4
BC-5	3,1	5,3	7,2
BC-6	2,5	4,7	5,6
BC-7	1,8	4,5	4,5
BC-8	1,5	3,1	4,4



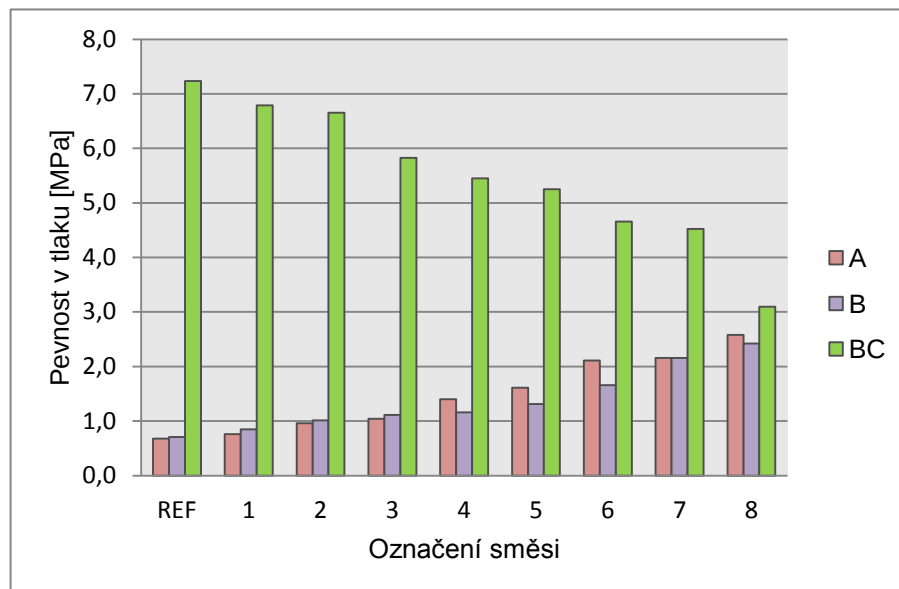
Obrázek 9.15 Porovnání pevností v tlaku – receptura BC

U malt s cementem s označením BC se pevnosti v tlaku postupně snižovaly s rostoucím množstvím CP. U těchto malt sice došlo ke snižování pevnosti v tlaku, ale vzhledem k dosaženým pevnostem je akceptovatelná receptura s poměrem VH :CP 30:70. I po 90 dnech probíhá nárůst pevností v čase vápenocementových malt s cihelným prachem.

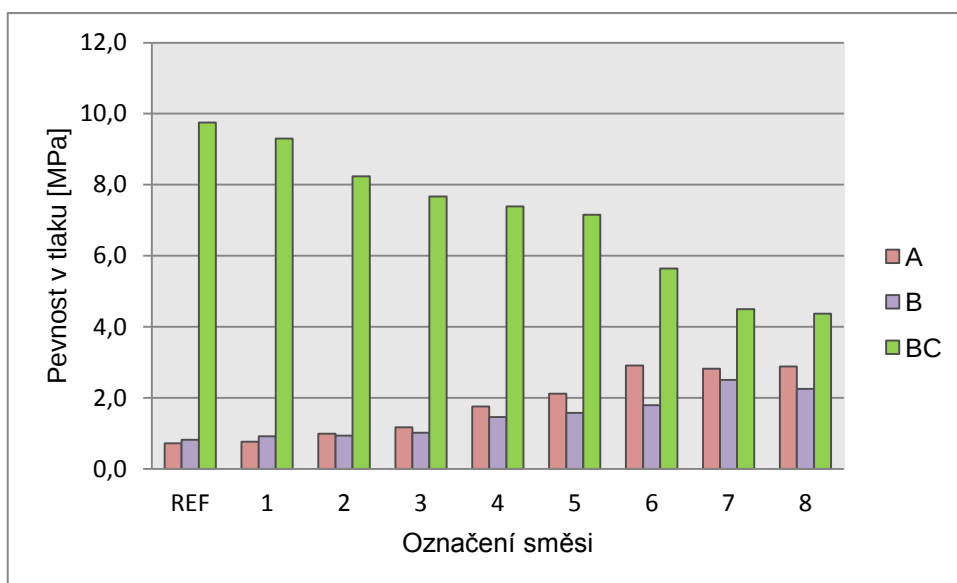
Vzájemné porovnání výsledků pevnost v tlaku mezi jednotlivými recepturami ve stáří 7, 28 a 90 dnů je uvedeno v grafech na obrázku 9.16, 9.17 a 9.18.



Obrázek 9.16 Porovnání pevností v tlaku ve stáří 7 dní pro receptury A, B, BC



Obrázek 9.17 Porovnání pevností v tlaku ve stáří 28 dní pro receptury A, B, BC



Obrázek 9.18 Porovnání pevností v tlaku ve stáří 90 dní pro receptury A, B, BC

Ze vzájemného porovnání pevností v tlaku všech sledovaných malt je patrný přínos cementu k pevnostem malt. Ten se výrazně projevil po 7 dnech, kdy pevnosti malt BC převyšovaly pevnosti malt A a B, kromě poměru pojivo:CP 30:70 a 20:80. Malty s označením A a B měly obdobné pevnosti v tlaku.

Podobné výsledky byly dosaženy po 28 dnech. Zatímco malty BC pevnost snižovaly, byl zaznamenán vzrůst pevností malt A a B. U poměru pojivo:CP 20:80 se pevnosti téměř vyrovnaly u všech malt.

Po 90 dnech docházelo k podobnému trendu pevností jako po 28 dnech. Malty s označením A mírně převyšují pevnosti malt B s vyšším zastoupením CP, pravděpodobně díky vyššímu obsahu VH a jeho reakci s CP. Vápenocementové malty BC vykazují vzestup pevností v čase a snižování pevností s rostoucím obsahem CP.

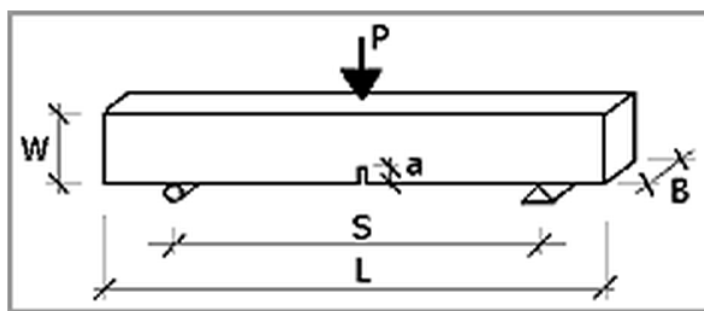
9.3.1 Vlastnosti vápenných malt pro vybrané směsi

Na základě výsledků pevností byly systematicky vybrány směsi, na nichž byly zkoušeny další vlastnosti – lomově-mechanické parametry, objemová hmotnost čerstvé a zatvrdlé malty, obsah vzduchu v čerstvé maltě, přidržnost k podkladu, mrazuvzdornost, difúzní odpor pro vodní páru a byla studována mikrostruktura rastrovací elektronovou mikroskopií (REM).

9.3.1.1 Lomově-mechanické parametry

Lomově-mechanické parametry umožňují kvantifikovat odolnosti proti šíření trhlin a křehkost (či naopak houževnatost) materiálů. Vápenné omítky obecně mají poměrně nízkou odolnost proti mechanickému namáhání. Ta se dá zvýšit právě přidávkou pucolánových přísad [32] [34].

Pro stanovení lomově-mechanických parametrů byly vybrány pouze některé malty z receptur A, B, BC, a to malty referenční, 1, 2, 3 a 4. Z každé směsi byla připravena 3 zkušební tělesa $40 \times 40 \times 160$ mm a ve stáří 28 dní byla podrobena zatěžovacím zkouškám tříbodovým ohybem. Zatěžovací zkoušky byly provedeny na Ústavu stavebního zkušebnictví Fakulty stavební VUT v Brně. Zkušební tělesa byla před samotnou zkouškou opatřena zářezem v dolních vláknech tělesa diamantovou okružní pilou.

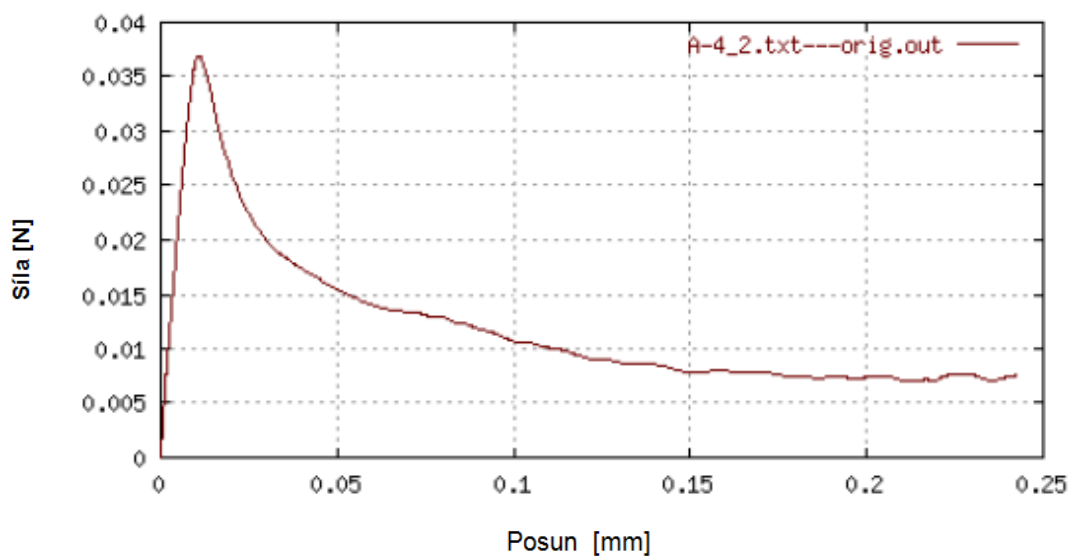


Obrázek 9.19 Schéma zatěžování zkušebního tělesa

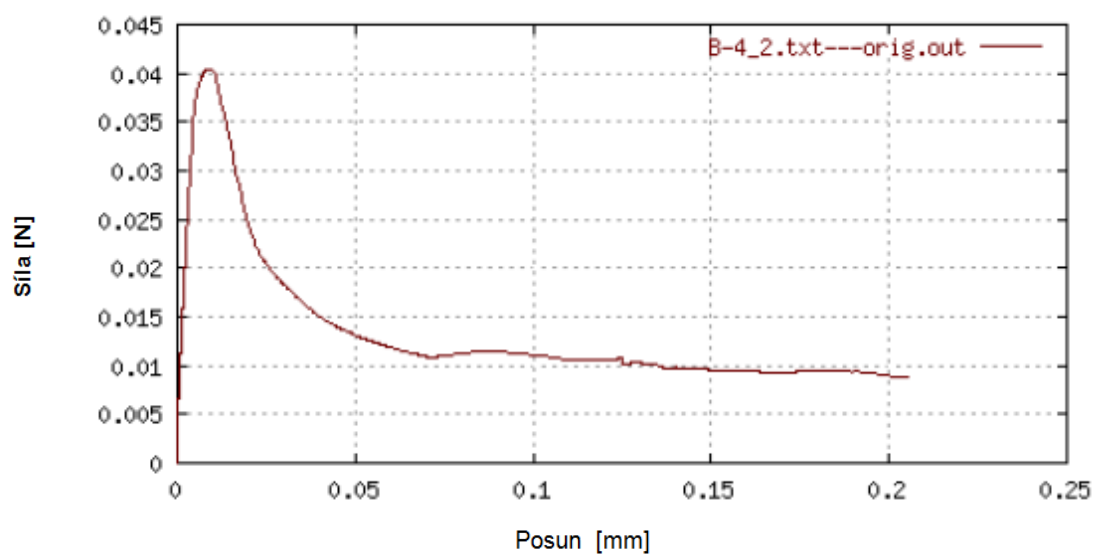
Ke zkouškám zatěžování sloužil mechanický lis Heckert FPZ 100/1. Zatěžování probíhalo spojitě za požadavku konstantního přírůstku průhybu uprostřed rozpětí. Výstupní diagramy síla-posun (I-d diagramy) uprostřed rozpětí byly zaznamenány pomocí měřící ústředny HBM SPIDER 8 [32].

Výstupní diagramy dále sloužily pro vyhodnocení lomových charakteristik – statického modulu pružnosti, efektivní lomové houževnatosti a specifické lomové energie. Vyhodnocování lomově-mechanických parametrů bylo konzultováno s prof. Ing. Zbyňkem Keršnerem, CSc. z Ústavu stavební mechaniky Fakulty stavební VUT v Brně. Výstupní I-d diagramy byly metodicky upraveny pro vyhodnocení v programu StCrack, který po zadání příslušných dat vyhodnotil lomové charakteristiky.

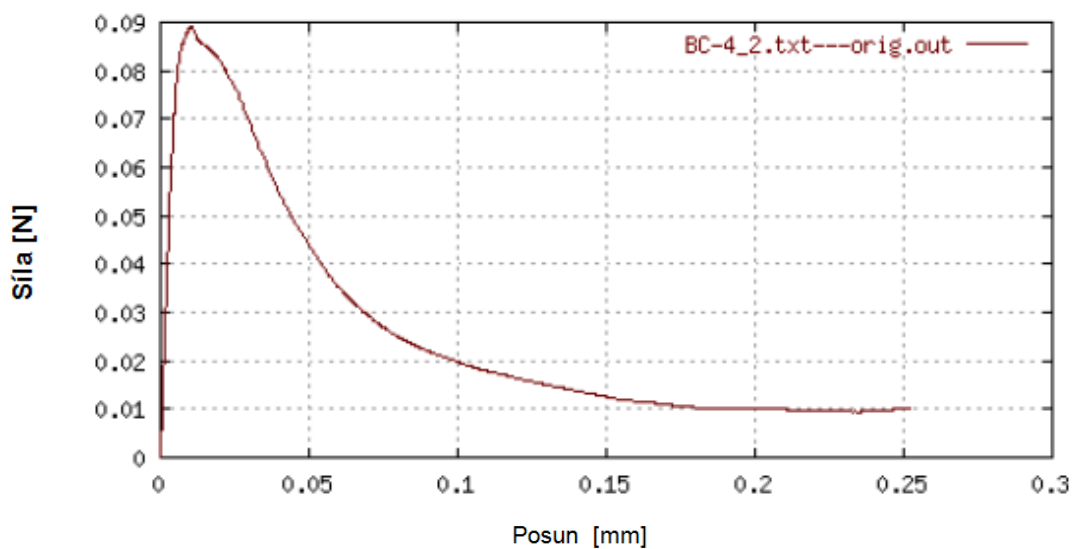
Pro názornost byly vybrány 3 výstupní I-d diagramy z programu StiCrack s průběhem síly a posunu, obrázek 9.20, 9.21 a 9.22. V tabulkách a grafech níže jsou zobrazeny výsledky a srovnání lomových charakteristik pro jednotlivé malty.



Obrázek 9.20 Výstupní I-d diagram pro vzorek A-4_2



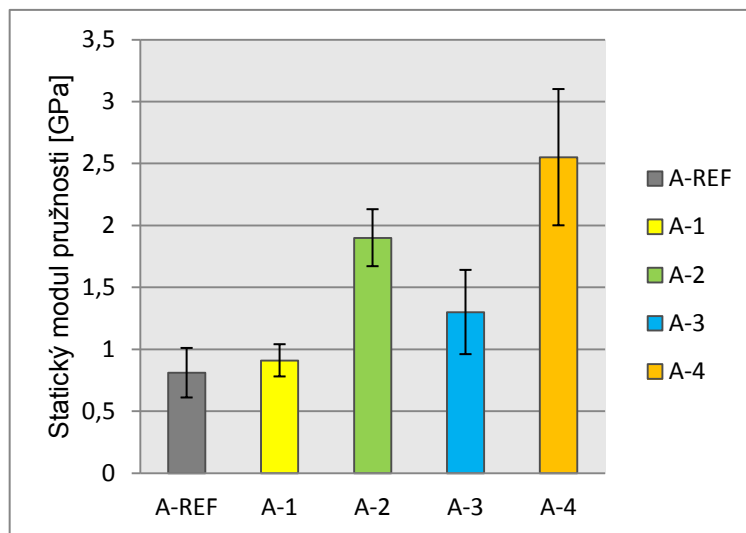
Obrázek 9.21 Výstupní I-d diagram pro vzorek B-4_2



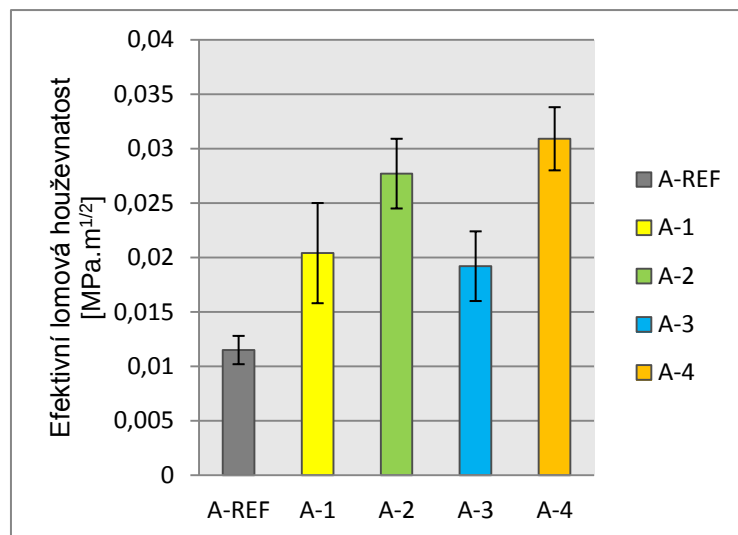
Obrázek 9.22 Výstupní I-d diagram pro vzorek BC-4_2

Tabulka 9.13 Výsledky lomových charakteristik pro směsi receptury A

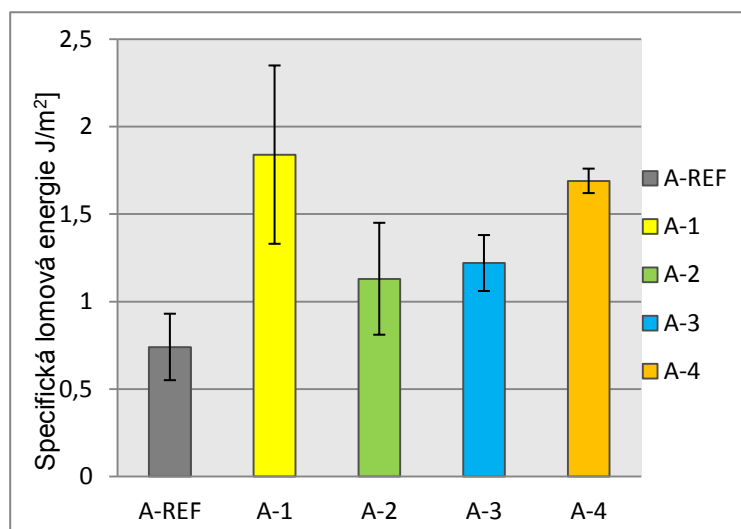
	Modul pružnosti E_c [GPa]	Efektivní lomová houževnatost K_{Ice} [MPa·m ^{1/2}]	Lomová energie G_f [J/m ²]
A-REF	0,81	0,0115	0,74
A-1	0,91	0,0204	1,84
A-2	1,90	0,0277	1,13
A-3	1,30	0,0192	1,22
A-4	2,55	0,0309	1,69



Obrázek 9.23 Statický modul pružnosti pro směsi receptury A: aritmetické průměry výsledků a jejich směrodatné odchylky



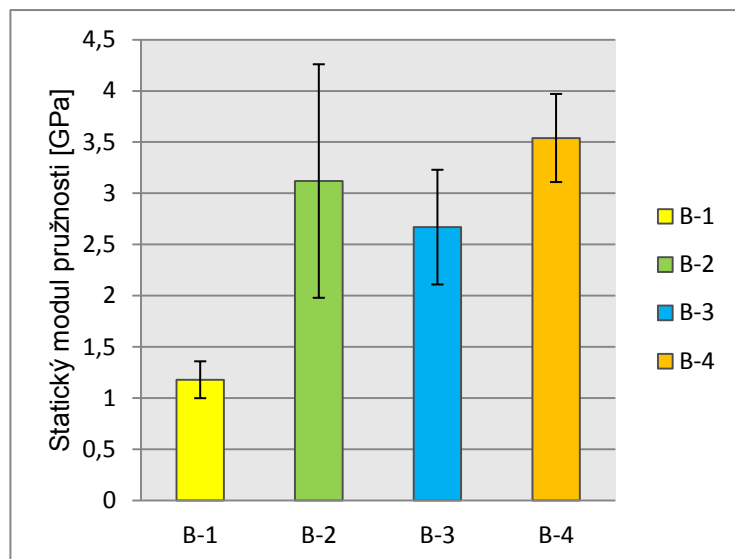
Obrázek 9.24 Efektivní lomová houževnatost pro směsi receptury A: aritmetické průměry výsledků a jejich směrodatné odchylky



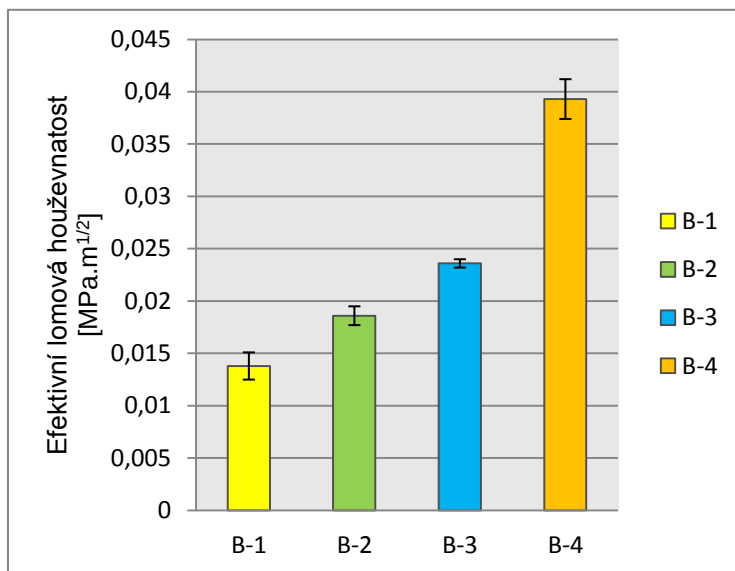
Obrázek 9.25 Specifická lomová energie pro směsi receptury A: aritmetické průměry výsledků a jejich směrodatné odchylky

Tabulka 9.14 Výsledky lomových charakteristik pro směsi receptury B

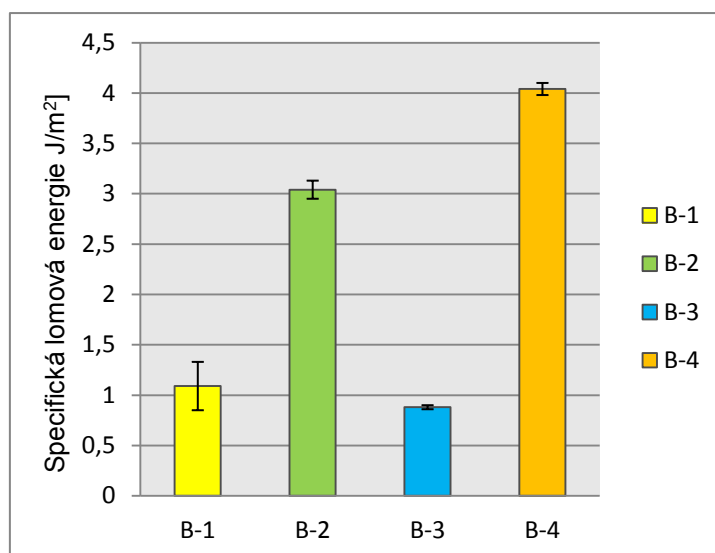
	Modul pružnosti E_c [GPa]	Efektivní lomová houževnatost K_{Ic} [MPa·m ^{1/2}]	Lomová energie G_f [J/m²]
B-REF	-	-	-
B-1	1,18	0,0138	1,09
B-2	3,12	0,0186	3,04
B-3	2,67	0,0236	0,88
B-4	3,54	0,0393	4,04



Obrázek 9.26 Statický modul pružnosti pro směsi receptury B: aritmetické průměry výsledků a jejich směrodatné odchylky



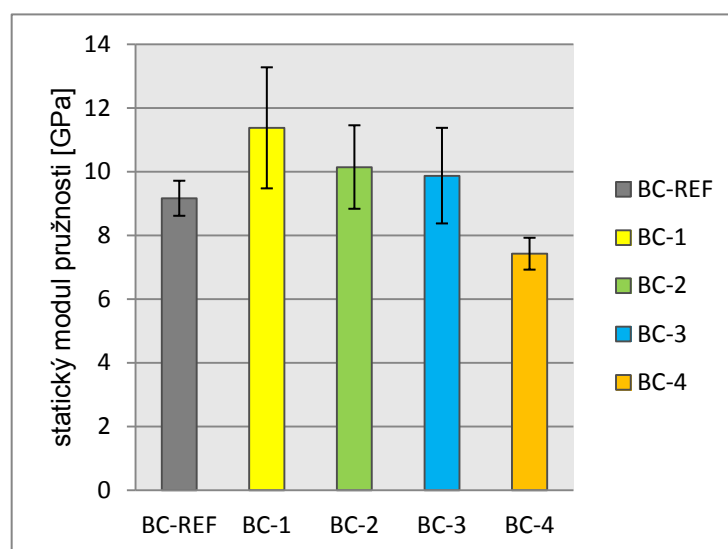
Obrázek 9.27 Efektivní lomová houževnatost pro směsi receptury B: aritmetické průměry výsledků a jejich směrodatné odchylky



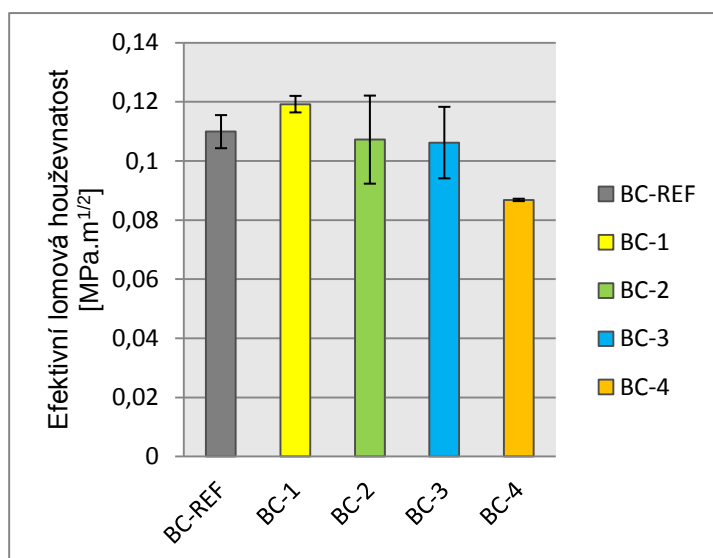
Obrázek 9.28 Specifická lomová energie pro směsi receptury B: aritmetické průměry výsledků a jejich směrodatné odchylky

Tabulka 9.15 Výsledky lomových charakteristik pro směsi receptury BC

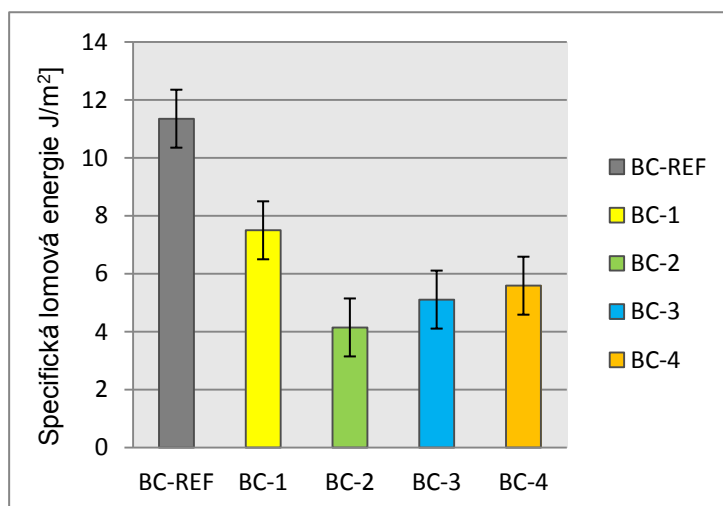
	Modul pružnosti E_c [GPa]	Efektivní lomová houževnatost $K_{I,ce}$ [MPa·m ^{1/2}]	Lomová energie G_f [J/m²]
BC-REF	9,16	0,1099	11,35
BC-1	11,37	0,1192	7,50
BC-2	10,14	0,1072	4,15
BC-3	9,87	0,1062	5,11
BC-4	7,42	0,0868	5,59



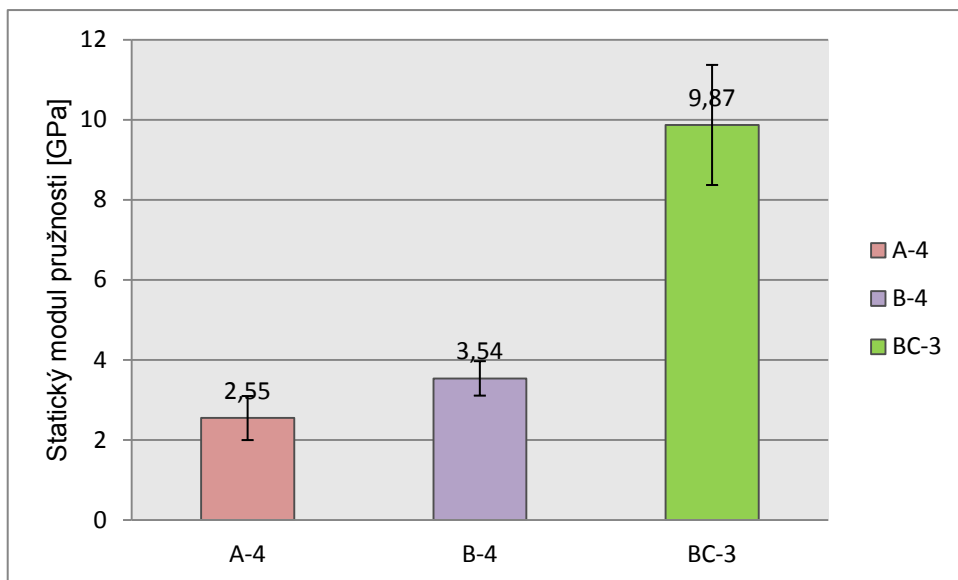
Obrázek 9.29 Statický modul pružnosti pro směsi receptury BC: aritmetické průměry výsledků a jejich směrodatné odchylky



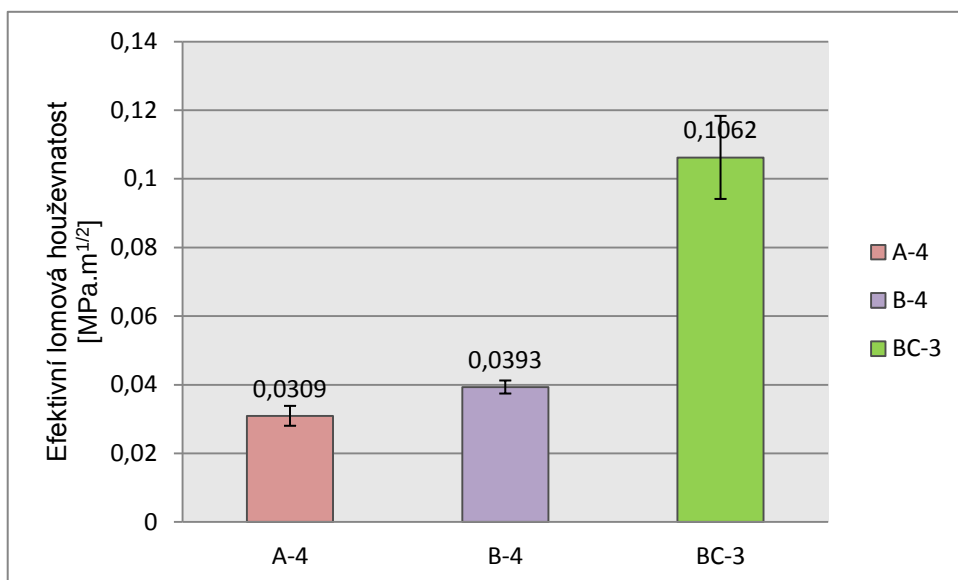
Obrázek 9.30 Efektivní lomová houževnatost pro směsi receptury BC: aritmetické průměry výsledků a jejich směrodatné odchylky



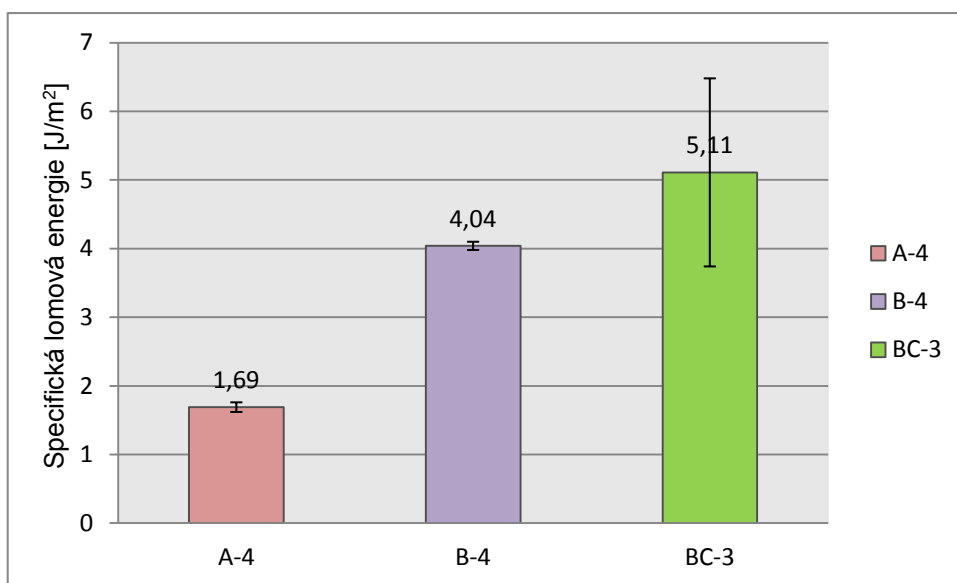
Obrázek 9.31 Specifická lomová energie pro směsi receptury BC: aritmetické průměry výsledků a jejich směrodatné odchylky



Obrázek 9.32 Statický modul pružnost: srovnání výsledků vybraných směsí - aritmetické průměry výsledků a jejich směrodatné odchylky



Obrázek 9.33 Efektivní lomová houževnatost: srovnání výsledků vybraných směsí- aritmetické průměry výsledků a jejich směrodatné odchylky



Obrázek 9.34 Specifická lomová energie: srovnání výsledků vybraných směsí- aritmetické průměry výsledků a jejich směrodatné odchylky

Před samotným vyhodnocením je nutno poznamenat několik aspektů, které mohly ovlivnit výsledky zkoušek. Zkušební tělesa receptur A a B ve stáří 28 dní vykazovaly nízké pevnosti (pevnosti v tlaku se pohybovaly kolem 1 MPa) a jejich křehkost negativně ovlivňovala již přípravu zkušebních těles pro zatěžování – zářezy vytvářené diamantovou okružní pilou nebylo možné tvořit s obvyklým chlazením vodou z důvodu rozplavení vzorků. Křehkost vzorků se rovněž projevila v manipulaci s tělesy. Některé výsledky proto byly průměrovány pouze ze 2 hodnot namísto 3, což se rovněž mohlo projevit na zkreslení výsledných hodnot. Nicméně, z výsledků lze vyvodit následující závěry:

Statický modul pružnosti se u malt receptur A a B zvyšoval se stoupajícím zastoupením CP oproti referenční směsi. Pro směs A-4 činil 2,55 GPa oproti A-REF 0,81 GPa. Pro směs B-4 činil 3,54 GPa, výsledky B-REF nebyly uvažovány. V porovnání vybraných směsí A-4 a B-4 byl modul pružnosti mírně vyšší ve prospěch B-4. Statický modul pružnosti u směsí z vápenocementové malty s CP se opět zvýšil oproti referenční směsi, avšak s přibývajícím množstvím CP postupně klesal a směs BC-4 již vykazovala nižší hodnotu než B-REF.

Efektivní lomová houževnatost vyjadřuje křehkost vzorků vzhledem k rozsahu nelinearity I-d diagramu před dosažením vrcholu zatížení. Tato vlastnost u směsí A a B poměrně strmě stoupala, což naznačuje „houževnatění“ vápenných malt se zvyšujícím se zastoupením CP, připisující se pucolánové reakci. V porovnání vybraných směsí A-4 a B-4 byla hodnota efektivní lomové energie, stejně jako

u modulu pružnosti, mírně vyšší ve prospěch B-4. U vápenocementové malty byl zaznamenán mírný nárůst u BC-1 oproti B-REF, u směsí se zvyšujícím se podílem CP však hodnota efektivní lomové houževnatosti klesala pod hodnotu referenční směsi.

Třetí monitorovanou vlastností lomových charakteristik byla specifická lomová energie, která kvantifikuje křehkost materiálu. Pro vápenné směsi A a B byl zaznamenán opět nárůst této hodnoty se zvyšujícím se zastoupením CP, avšak hodnoty pro jednotlivé směsi byly hodně proměnlivé a četnost vzorků nízká, proto tento parametr houževnatosti je spíše ilustrativní. Hodnota lomové energie u vápenocementových malt se snižuje oproti referenční maltě a nejnižší hodnotu vyjadřuje malta BC-2, tato hodnota pak u malt BC-3 a BC-4 opět mírně stoupá.

Z kompletních lomových zkoušek lze usoudit, že pucolán typu zkoušeného cihelného prachu zvyšuje houževnatost (snižuje křehkost) vápenných malt, zvyšuje odolnost proti šíření trhliny. Naproti tomu křehkost vápenocementových malt se zvyšuje s narůstajícím zastoupením CP v těchto maltách.

9.3.1.2 Objemová hmotnost čerstvé a ztvrdlé malty

Stanovení probíhalo v souladu s ČSN EN 1015-6 Zkušební metody malt pro zdivo – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty a dle ČSN EN 1015-10 Zkušební metody malt pro zdivo – Část 10: Stanovení objemové hmotnosti suché zatvrdlé malty.

Pro čerstvou maltu byla měřicí nádoba válcové tvaru naplněna maltou pomocí lopatky po okraj, umístěna na vibrační stolek a z vibrována. Během vibrování byla doplňována další malta. Následně byla přebytečná malta setřena špachtlí a povrch urovnán s horním okrajem nádoby a nádoba očištěna vlhkou tkaninou.

Objemová hmotnost ρ_m byla vypočtena dle následujícího vzorce po zjištění daných hodnot zvážením:

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V_v} \quad [\text{kg/m}^3]$$

m_1 ... hmotnost prázdné měřicí nádoby v g;

m_2 ... hmotnost měřicí nádoby naplněné maltou v g;

V_v ... objem měřicí nádoby v l.

[27]

Objemová hmotnost vysušené ztvrdlé malty se stanoví jako poměr hmotnosti ve vysušeném stavu a objemu, který toto těleso nasáklé vodou zaujímá při ponoření do vody.

Zkušební tělesa byla vysušena v sušárně při teplotě $(70 \pm 5)^\circ\text{C}$ do ustálené hmotnosti, a poté byla zvážena. Následně byla tělesa ponořena do vody o teplotě $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, dokud nepřestalo narůstání zdánlivé hmotnosti. Po vyjmutí z vody a otření přebytečné vody vlhkou tkaninou se tělesa zvážila a opět se zaznamenala jejich hmotnost. Objem těles byl stanoven vážením ve vodě. Vlhké zkušební těleso bylo uloženo na závěsné zařízení a zaznamenala se zdánlivá hmotnost při ponoření ve vodě. Objem zkušební tělesa byl vypočten ze vztahu:

$$V_s = \frac{m_{s,sat} - m_{s,i}}{\rho_w} [m^3]$$

$M_{s,dry}$... hmotnost zkušební tělesa ze ztvrdlé malty vysušeného v sušárně v kg;

$M_{s,sat}$... hmotnost zkušební tělesa ze ztvrdlé malty nasáklého vodou v kg;

$M_{s,i}$... zdánlivá hmotnost zkušební tělesa ze ztvrdlé malty nasáklého vodou; ponořeného do vody v kg;

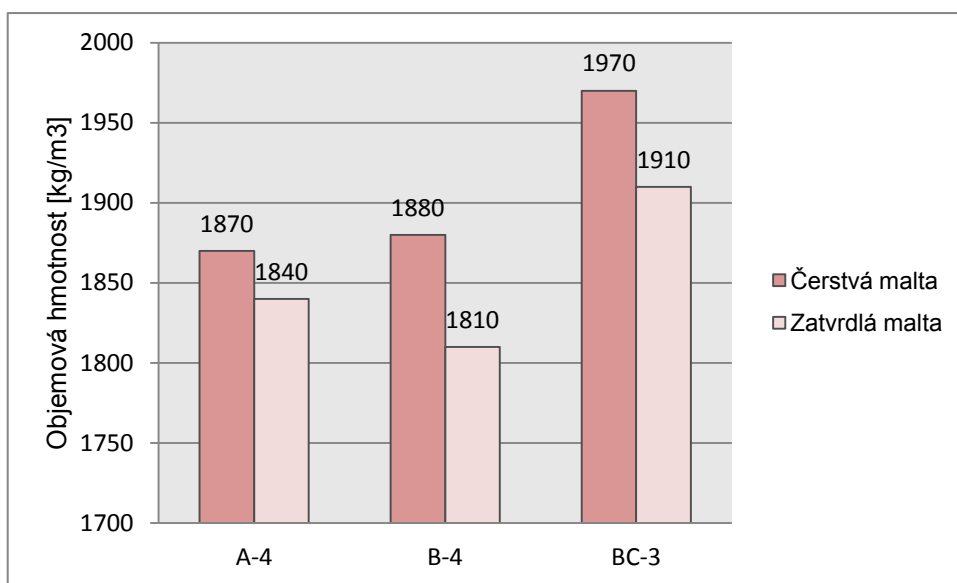
ρ_w ... hustota vody v kg/m³.

[28]

Objemová hmotnost pak byla vypočtena podílem hmotnosti zkušební tělesa ve vysušeném stavu a vypočteného objemu. Objemová hmotnost čerstvé malty a ztvrdlé malty byla prováděna pouze pro vybrané záměsi: A-4, B-4 a BC-3. Výsledky stanovení objemových hmotností jsou uvedeny v tabulce 9.16 a v grafu na obrázku 9.35.

Tabulka 9.16 Výsledné OH čerstvé a ztvrdlé malty

Označení směsi	OH čerstvé malty [kg/m ³]	OH ztvrdlé malty [kg/m ³]
A-4	1870	1840
B-4	1880	1810
BC-3	1970	1910



Obrázek 9.35 Objemové hmotnosti čerstvé a zatvrdlé malty pro vybrané směsi

9.3.1.3 Obsah vzduchu v čerstvé maltě

Stanovení obsahu vzduchu v čerstvé maltě bylo prováděno dle ČSN EN 1015-7 Zkušební metody malt pro zdivo – Část 7: Stanovení obsahu vzduchu v čerstvé maltě.

Stanovení bylo provedeno metodou B – alkoholovou metodou, což je metoda pro malty obsahující 20 % vzduchu a více. Tato metoda byla zvolena z důvodu nedostupnosti zařízení pro stanovení obsahu vzduchu v maltách s nižším obsahem než 20 %. Do kalibrovaného odměrného válce se vpravilo 200 ml malty tak, aby se zabránilo tvorbě dutin. Na válci se odečetl objem malty $V_{m,i}$. Odměrný válec se naplnil směsí alkoholu a vody až po značku 500 ml. Dále byl odměrný válec uzavřen pryžovou zátkou a 20x obrácen pro docílení rovnoměrného rozptýlení malty ve směsi alkoholu a vody. Vzniklá suspenze se nechala 5 minut sedimentovat a následně byla odečtena výsledná hladina $V_{m,f}$ a postup se opakoval třikrát [29].

Obsah vzduchu v čerstvé maltě byl vypočten dle následujícího vztahu:

$$L = \frac{(500 - V_{m,f})}{V_{m,i}} \times 100\%$$

V_1 ... obsah vzduchu v maltě v %;

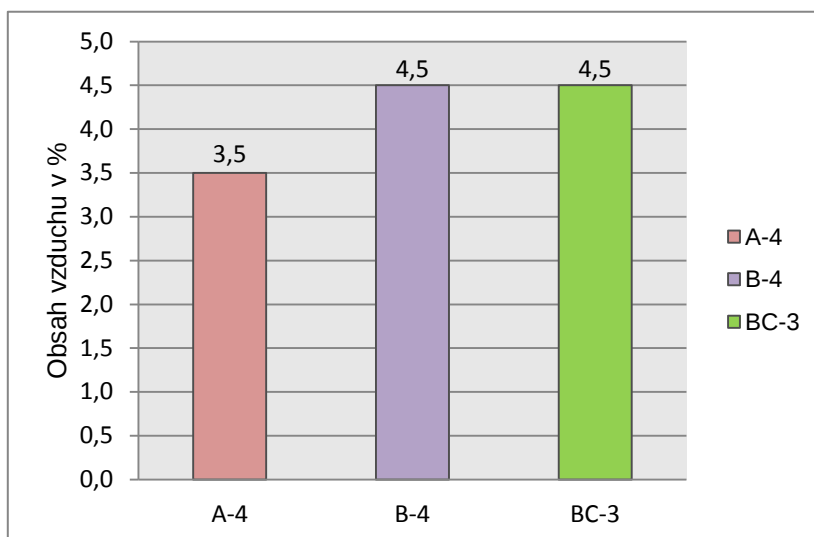
$V_{m,i}$... počáteční objem malty v ml;

$V_{m,f}$... konečný objem malty a alkoholu v ml.

Obsah vzduchu byl stanoven pro vybrané záměsi: A-4, B-4 a BC-3. Výsledky stanovení obsahu vzduchu jsou uvedeny v tabulce 9.17 a v grafu na obrázku 9.36.

Tabulka 9.17 Výsledný obsah vzduchu

Označení směsi	Obsah vzduchu [%]
A-4	3,5
B-4	4,5
BC-3	4,5



Obrázek 9.36 Obsah vzduchu v čerstvé maltě u vybraných směsí

9.3.1.4 Přídržnost k podkladu

Stanovení přídržnosti malt k podkladu bylo prováděno dle ČSN EN 1015-12 Zkušební metody malt pro zdivo – Část 12: Stanovení přídržnosti zatvrdlých malt pro vnitřní a vnější omítky k podkladu.

Přídržnost se stanovuje jako maximální napětí v tahu vyvozené zatížením působícím kolmo k povrchu malty pro vnitřní a vnější omítky, nanesené na podkladu. Tahové zatížení se vyvozuje prostřednictvím odtahového terče, přilepeného na zkoušenou kruhovou plochu povrchu malty. Zjištěná přídržnost se vyjádří jako podíl vyvozeného zatížení a zkoušené plochy.

Čerstvá malta byla nanesena na podklad – cihlu plnou pálenou (rozměr 290×140×65 mm), vysušenou v laboratorním prostředí – v celkové tloušťce 10 mm. Z vrstvy malty se vyřízly zkušební kruhové plochy o průměru 50 mm. Po dostatečném zatvrdnutí malty se omítnuté podklady umístily do polyetylenových pytlů na dobu 7 dní. Poté se tělesa uchovávala na vzduchu v laboratorním prostředí dalších 21 dní.

Kruhové terče byly přilepeny centricky na zkušební kruhové plochy. Pomocí zkušebního stroje se vyvolilo tahové zatížení kolmo na zkoušenou plochu pomocí kruhových terčů, rovnoměrně a bez nárazů [30].

Jednotlivé hodnoty přídržnosti se vypočítaly ze vztahu:

$$f_u = \frac{F_u}{A} \text{ [MPa]}$$

f_u ... přídržnost v MPa;

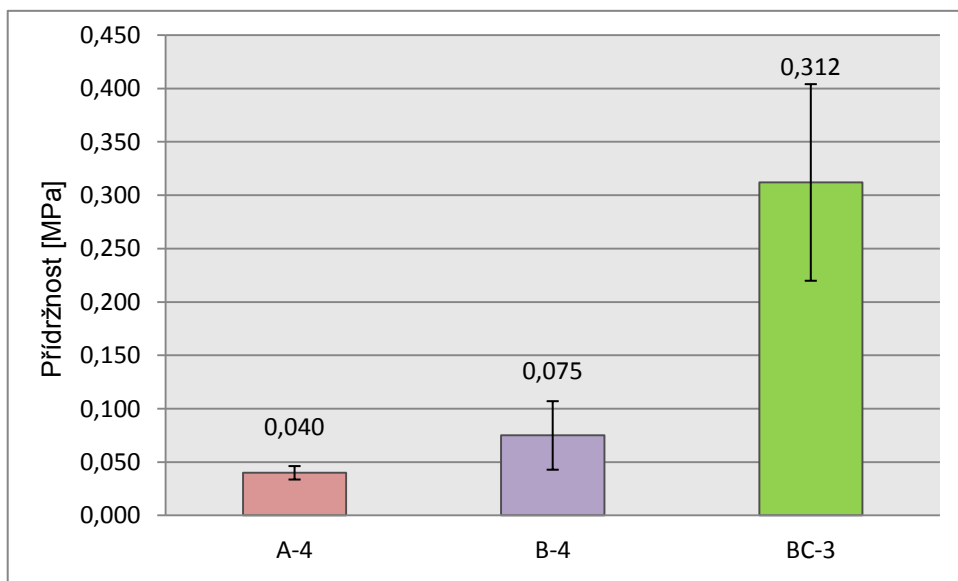
F_u ... vyvozené zatížení při porušení v N;

A ... kruhová zkušební plocha v mm.²

Výsledky přídržnosti k podkladu jsou uvedeny v tabulce 9.18 a v grafu na obrázku 9.37.

Tabulka 9.18 Přídržnost k podkladu

Označení směsi	Přídržnost k podkladu [MPa]
A-4	0,040
B-4	0,075
BC-3	0,312



Obrázek 9.37 Přídržnost k podkladu: aritmetické průměry výsledků jednotlivých vybraných směsí a jejich směrodatné odchylky

Malty A a B mají velmi nízkou přídržnost k podkladu, obsah cementu v maltě BC přídržnost zvyšuje.

9.3.1.5 Mrazuvzdornost

Stanovení mrazuvzdornosti bylo prováděno dle ČSN 72 2452 (722452) Zkouška mrazuvzdornosti malty.

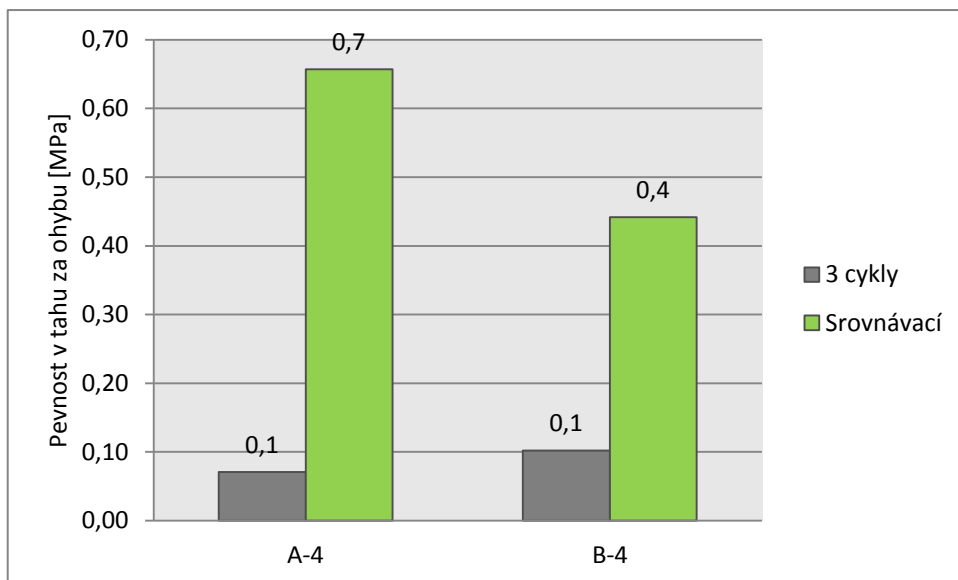
Mrazuvzdornost malty se zkouší střídavým zmrazováním a rozmrazováním zkušebních těles nasycených vodou, a to buď na požadovaný počet zmrazovacích cyklů, nebo na stanovení stupně mrazuvzdornosti, přičemž se zjišťuje míra jejich porušení.

Mrazuvzdornost byla zkoušena na zkušebních tělesech 40×40×160 mm ve stáří 28 dní. Pro zkoušku bylo připraveno 9 těles pro zmrazovací etapy a 3 tělesa srovnávací. Tělesa byla před zkouškou změřena a zvážena a byla vypočítána jejich objemová hmotnost. Zkušební tělesa byla sycena vodou po dobu 24 hodin ponořením do vodní lázně o teplotě 20 ± 3 °C. Ihned po nasycení se tělesa zmrazovala zmrazovacími cykly. Jeden zmrazovací cyklus trval 4 hodiny zmrazování a 2 hodiny rozmrazování. Zmrazování se dělo v mrazícím prostoru s regulovatelnou teplotou do -20 °C ± 3 °C a rozmrazování probíhalo ve vodní lázni s při $+20$ °C. Zkušební tělesa byla po ukončení etapy změřena a zvážena a určena jejich objemová hmotnost. Do 30 minut po vytažení těles z vody byla provedena zkouška pevnosti v tahu za ohybu, a následně v tlaku. Po ukončení byla provedena zkouška pevností srovnávacích těles [31].

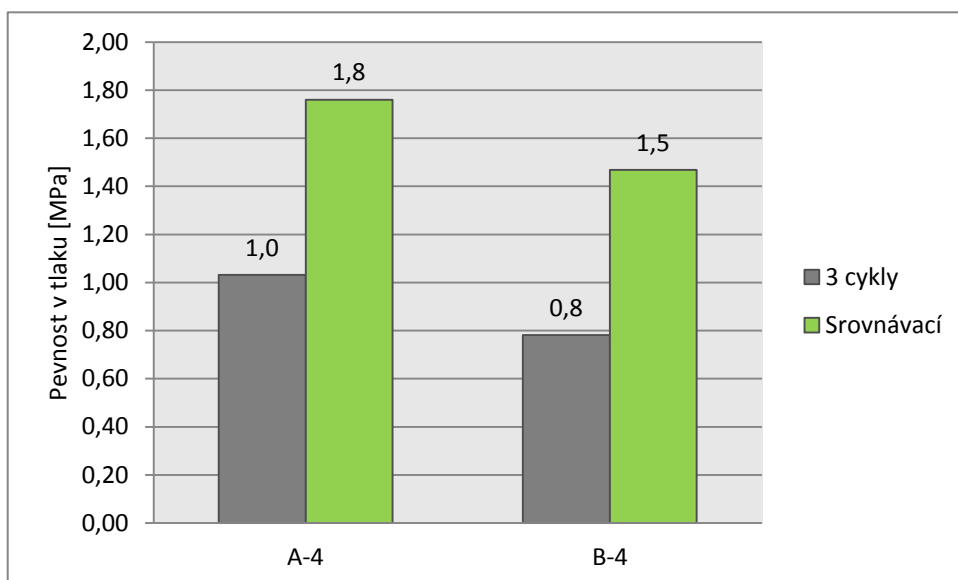
Na tělesech z malty A-4 a B-4 byly provedeny 3 zmrazovací cykly, po kterých došlo k porušení většiny zkoušených vzorků. Ze směsi A a B byla po těchto cyklech provedena zkouška pevnosti v tahu za ohybu na nerozpadnutém jednom tělese a zkouška pevnosti v tlaku na zlomcích. Výsledky jsou uvedeny v grafu na obrázku 9.38 a 9.39, rozpad je dokumentován na obrázku 9.40 a 9.41.

Tabulka 9.19 Výsledky stanovení pevností srovnávacích a zmrazovaných těles směsi A-4 a B-4

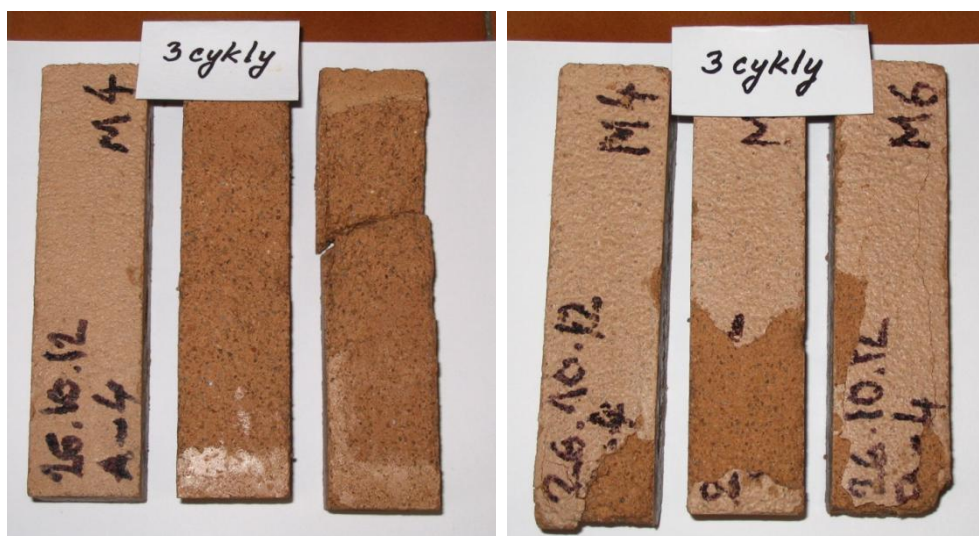
Parametr	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Pevnost v tlaku [MPa]
A-4	0,1	1,0
A-4 srovnávací	0,7	1,8
B-4	0,1	0,8
B-4 srovnávací	0,4	1,5



Obrázek 9.38 Pevnost v tahu za ohybu zmrazovaných a srovnávacích těles



Obrázek 9.39 Pevnost v tlaku zmrazovaných a srovnávacích těles

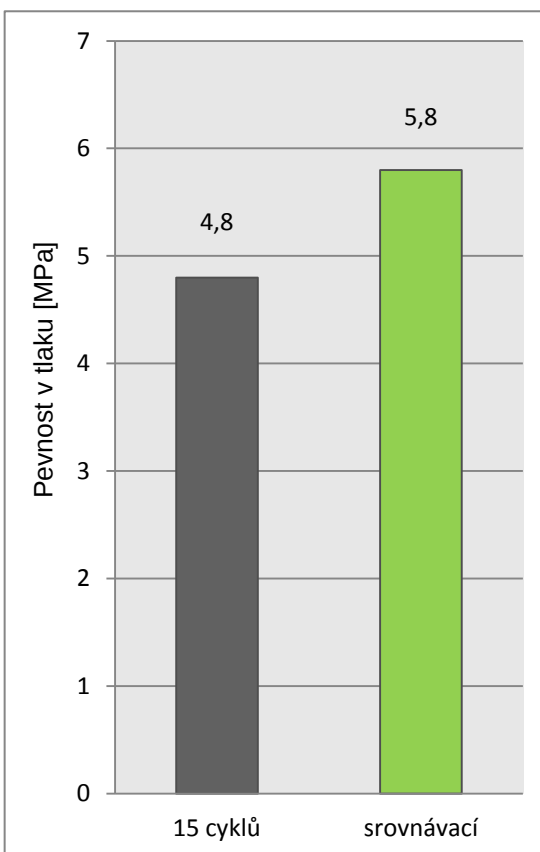
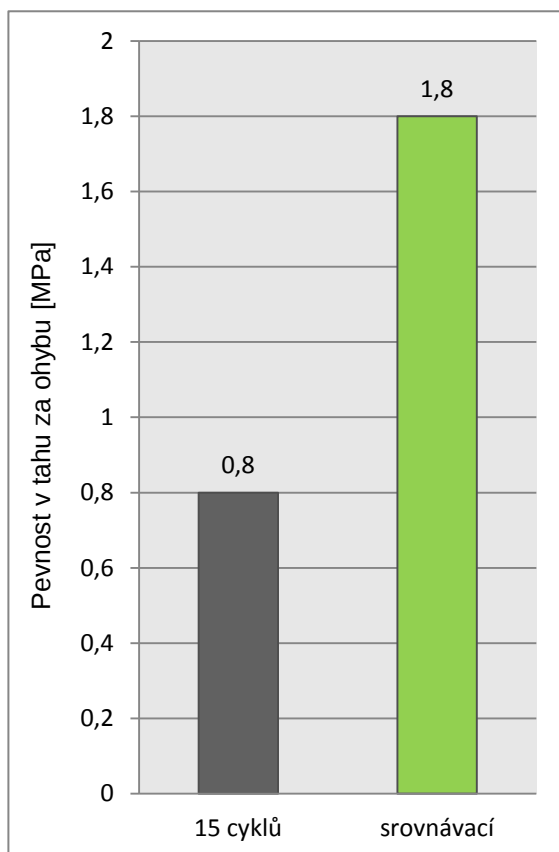


Obrázek 9.40, 9.41 Stav zkušebních těles po 3 zmrazovacích cyklech

Tělesa vyrobená z receptury BC-3 byla zkoušena po 15 zmrazovacích cyklech. Výsledky pevností zmrazovaných těles a těles srovnávacích je uvedeno v tabulce 9.20, v grafu na obrázku 9.42 a 9.43 a stav těles je dokumentován na obrázku 9.44.

Tabulka 9.20 Výsledky stanovení pevností srovnávacích a zmrazovaných těles BC-3

Parametr	Hodnota [MPa]	Koeficient mrazuvzdornosti [-]
Pevnost v tahu za ohybu BC-3 - srovnávací	1,8	
Pevnost v tahu za ohybu BC-3 – po 15 cyklech	0,8	0,45
Pevnost v tlaku BC-3 - srovnávací	5,8	
Pevnost v tlaku BC-3 – po 15 cyklech	4,8	0,82



Obrázek 9.42 a 9.43 Pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu zmrazovaných a srovnávacích těles BC-3



Obrázek 9.44 Stav zkušebních těles BC-3 po 15 zmrazovacích cyklech

Mrazuvzdornost je závislá na struktuře materiálu – konkrétně na jeho nasákavosti, distribuci a velikosti pórů. V pórech se při zmrazování voda mění v led, který má několikrát vyšší objem než voda, a tím dojde k porušení vzorku.

Zkoušená tělesa z vápenných malt s cihelným prachem s poměrem VH:CP 60:40 A-4 a B-4 se rozpadly po 3 zmrazovacích cyklech a pevnostní zkoušky byly provedeny pouze na 1 nerozpadnutém tělese od každé směsi. Tyto malty se dle klasifikace tedy označují jako nemrazuvzdorné.

Vápenné malty mají obecně i několikanásobně nižší pevnosti oproti maltám vápenocementovým a cementovým. Provedení zkoušky mrazuvzdornosti a jejich klasifikace dle normy ČSN 72 2452, kdy se zmrazuje malta plně nasycená vodou, je v tomto ohledu pro vápenné malty nerelevantní.

Malta s malým množstvím cementu, označená BC-3, vyhověla 15 zmrazovacím cyklům. Další počet cyklů bude následně proveden, výsledky již nebudou zahrnuty do diplomové práce. Koeficient mrazuvzdornosti, počítaný z pevností v tahu za ohybu hodnotou 0,45 nevyhověl požadavkům normy (0,75). Pokud by byl počítán z pevnosti v tlaku, pak dosáhl hodnoty 0,82.

9.3.1.6 Součinitel difúze pro vodní páru

Odděluje-li konstrukce dvě prostředí, mezi nimiž je rozdíl částečných tlaků vodní páry, dochází k difúzi z prostředí, kde je částečný tlak vodní páry vyšší [35].

Pro měření transportních parametrů vodní páry byla použita metoda „suché“ misky (dry cup), obrázku 9.45 a 9.46. Miska pod vzorkem byla naplněna silikagelem, který vytváří prostředí s relativní vlhkostí přibližně 5 %. Do misky byl umístěn kruhový vzorek malty a dobře utěsněn plastickým tmelem. Miska byla umístěna do exsikátoru, v němž byla udržována relativní vlhkost 50 %, teplota v místnosti byla 20 ± 2 °C. Vážení misky bylo prováděno 1× denně po dobu 2 týdnů. Konstantní přírůstek hmotnosti misky se vzorkem v čase byl vypočten po ustálení z posledních pěti hodnot lineární regresí. Vzorky s průměrem 100 mm byly po stranách izolovány epoxidem, jež měl zabránit průniku vodní páry po bočních stranách. Měření se provádělo na dvou vzorcích z každé směsi (ze směsí A-4, B-4 a BC-3) [33]. Ze směsí A-4, B-4 a BC-3 byla vyrobena 2 kruhová zkušební tělesa (z každé směsi) o průměru 100 mm a tloušťce 20 mm.



Obrázek 9.45 Vzorek vápnocementové malty s CP v měřicí misce



Obrázek 9.46 Vzorek vápenocementové malty s CP uložený v exsikátoru

Výpočtové vztahy pro stanovení součinitele difúze pro vodní páry:

$$\delta = \frac{\Delta m \times d}{S \times \tau \times \Delta p_p} \quad [s]$$

δ ... součinitel difúzní propustnosti vodní páry [s];

Δm ... množství vodní páry prošlé zkušebním tělesem [kg]

d ... tloušťka zkušebního tělesa [m]

τ ... čas odpovídající hmotnosti prošlé vodní páry [s]

δp_p ... rozdíl parciálních tlaků pod zkušebním tělesem a prostředí nad vzorkem [Pa]

$$D = \frac{\delta \times R \times T}{M} \quad [m^2/s]$$

D ... součinitel difúze vodní páry [$m \cdot s^{-1}$]

R ... univerzální plynová konstanta [$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$]

M ... molární hmotnost vody [$kg \cdot mol^{-1}$]

T ... absolutní teplota [K]

$$\mu = \frac{D_a}{D}$$

μ ... součinitel difúzního odporu pro vodní páru

D_a ... součinitel difúze vodní páry ve vzduchu [$m \cdot s^{-1}$]

[33]

Pro určení součinitele difúzního odporu pro vodní páru byly z časových důvodů testovány pouze 2 vzorky z malty A-4. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 9.21.

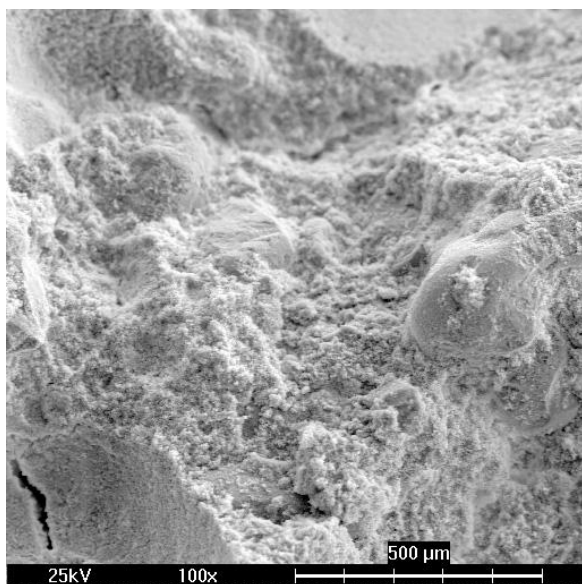
Tabulka 9.21 Výsledné hodnoty součinitele difúzního odporu pro vodní páru

Označení vzorku	δ [s]	D [m.s ⁻¹]	μ [-]	
A-4_1	$1,4389 \cdot 10^{-11}$	$7,5408 \cdot 10^{-7}$	30,50	28,82
A-4_2	$1,6202 \cdot 10^{-11}$	$8,4766 \cdot 10^{-7}$	27,13	

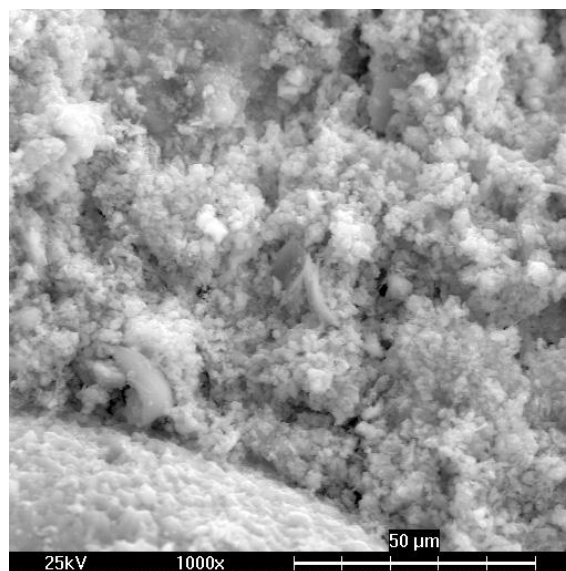
Hodnoty součinitele difúzního odporu pro vodní páru pro vápennou maltu s cihelným prachem A-4 vykazují poměrně vysoké hodnoty 28,82. Pro srovnání – běžně se tento součinitel pro vápenné omítky s pucolánovou příměsí pohybuje v rozmezí 10 až 25, lit. [37] uvádí pro vápennou maltu hodnotu 34,6, pro vápenopucolánovou maltu 24,5 až 30,2.

9.3.1.7 REM (rastrovací elektronový mikroskop)

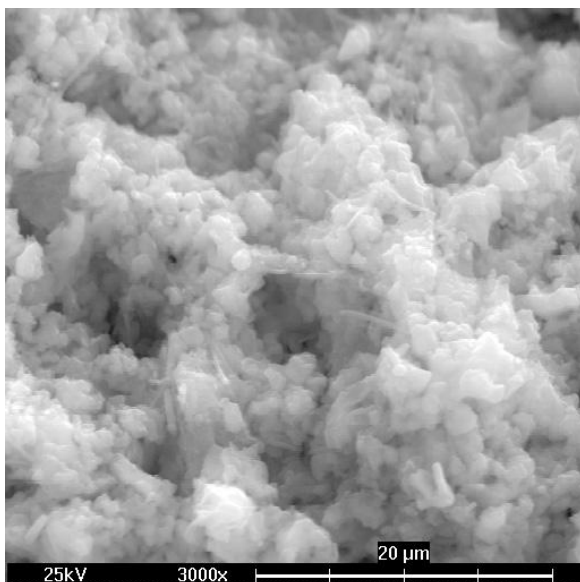
Rastrovací elektronový mikroskop se používá zvláště pro vysokou rozlišovací schopnost. Je výhodný pro pozorování materiálů s velmi členitým povrchem. Díky vysoké hloubce ostrosti lze z dvojrozměrných fotografií z REM nalézt jistý trojrozměrný aspekt [36]. Mikrostruktura a složení bylo sledováno u malt s označením A-4, B-4 a BC-3, obrázku 9.47 až 9.61.



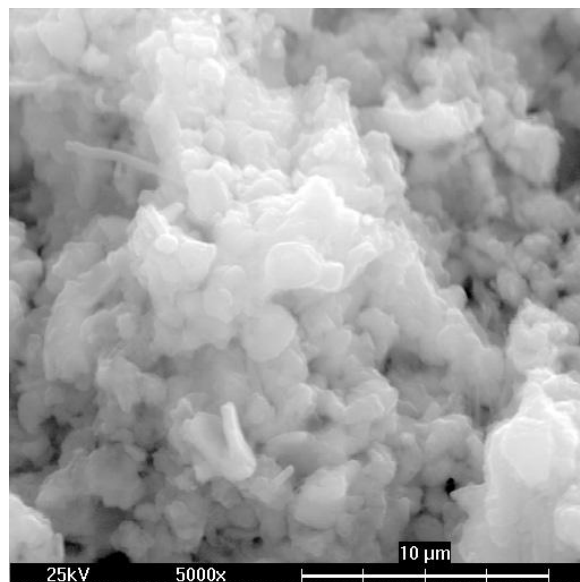
Obrázek 9.47 Mikrostruktura vápenné malty s CP A-4, zvětšeno 100x



Obrázek 9.48 Mikrostruktura vápenné malty s CP A-4, zvětšeno 1000x

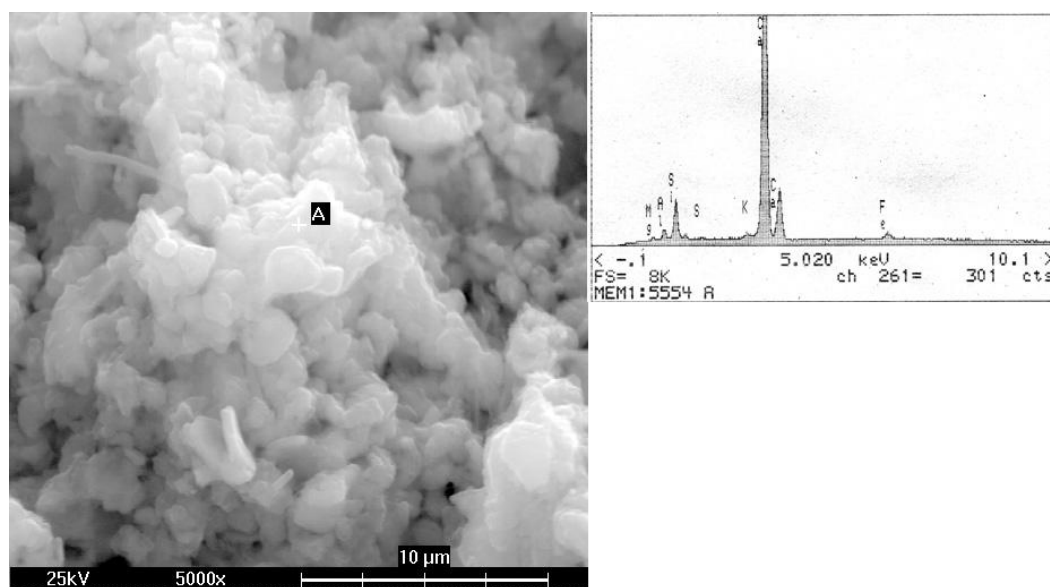


Obrázek 9.49 Mikrostruktura vápenné malty s CP A-4, zvětšeno 3000x

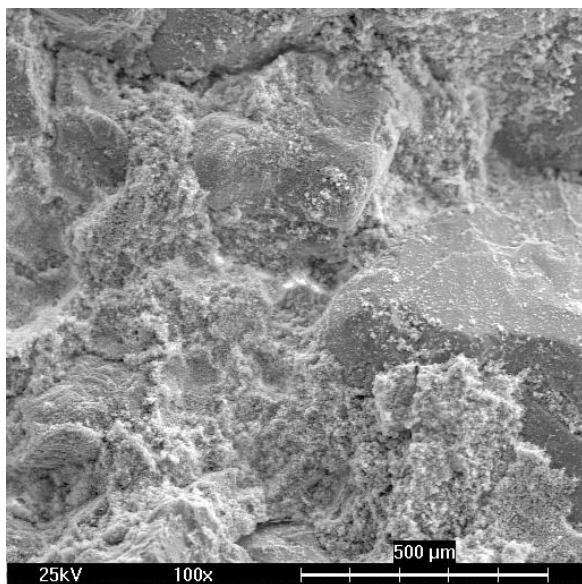


Obrázek 9.50 Mikrostruktura vápenné malty s CP A-4, zvětšeno 5000x

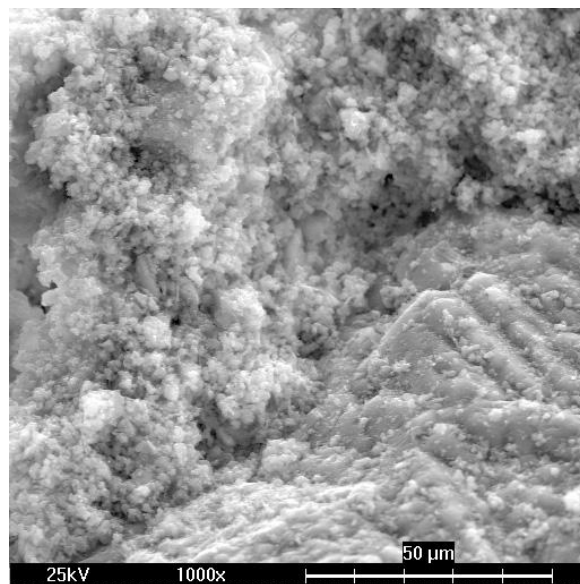
Na obrázku 9.47 je přehledný snímek malty A-4 při zvětšení 100x, na snímku jsou patrná zrna kameniva a pojivová fáze. Na snímcích 9.48, 9.49 a 9.50 jsou vidět krystaly kalcitu. Přítomnost kalcitu byla potvrzena i EDX analýzou, obrázek 9.51. Při zvětšení 5000x je vidět i amorfni fáze CSH sloučenin.



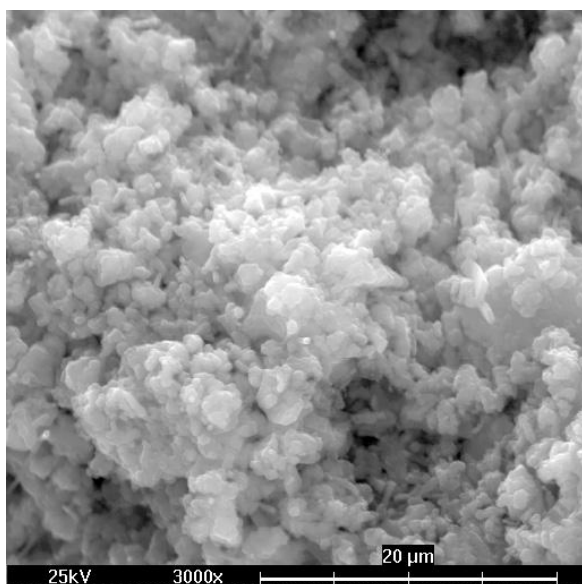
Obrázek 9.51 EDX analýza vápenné malty s CP A-4, zvětšeno 5000x



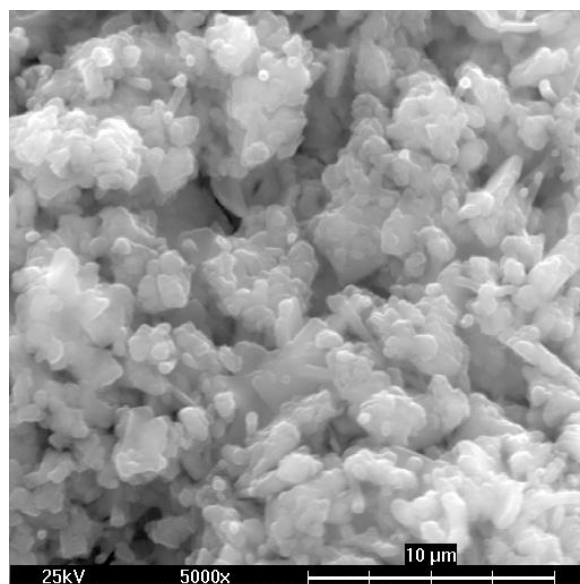
Obrázek 9.52 Mikrostruktura vápenné malty s CP B-4, zvětšeno 100x



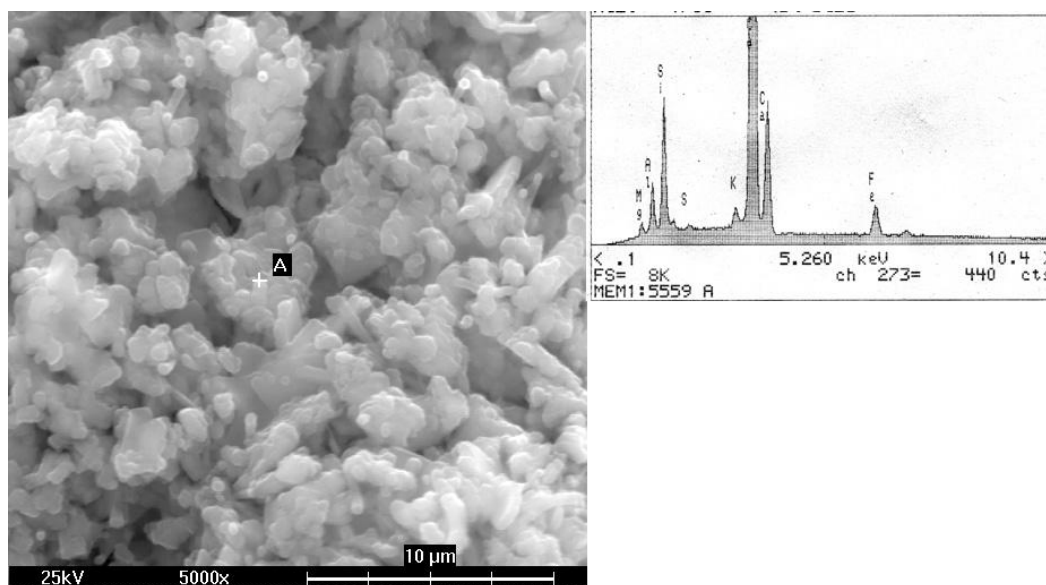
Obrázek 9.53 Mikrostruktura vápenné malty s CP B-4, zvětšeno 1000x



Obrázek 9.54 Mikrostruktura vápenné malty s CP B-4, zvětšeno 3000x

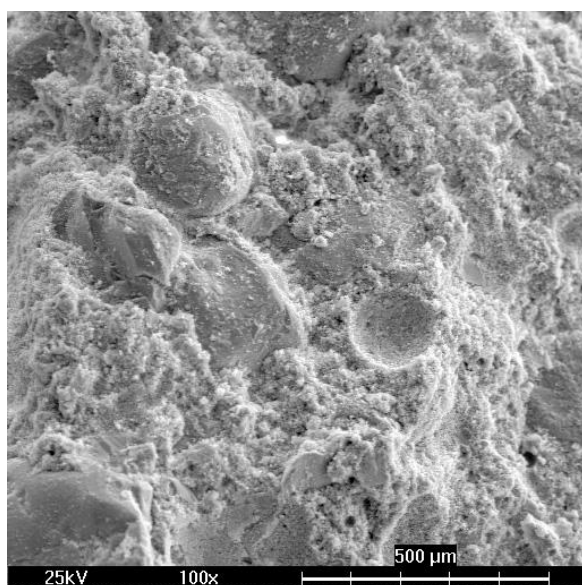


Obrázek 9.55 Mikrostruktura vápenné malty s CP B-4, zvětšeno 5000x

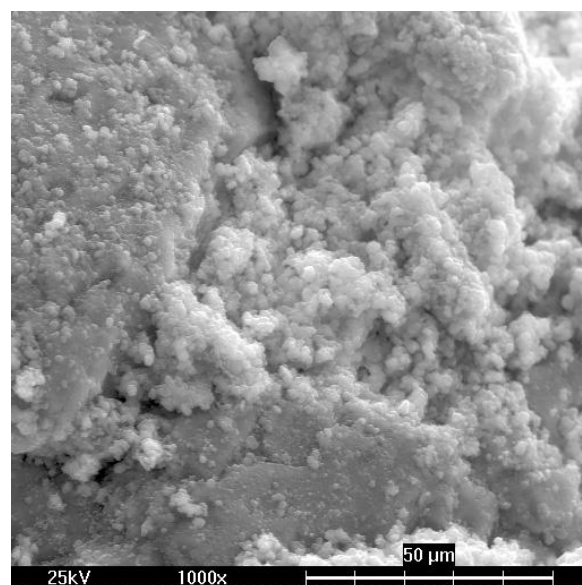


Obrázek 9.56 Mikrostruktura vápenné malty s CP B-4, zvětšeno 5000x

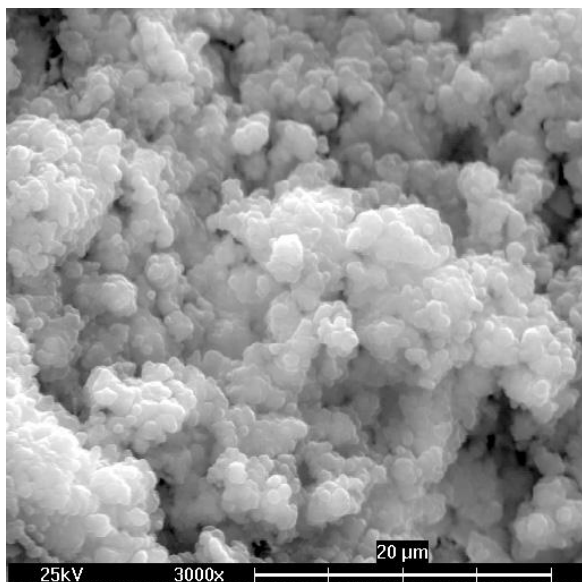
Na obrázku 9.52 je přehledný snímek malty B-4 při zvětšení 100x, na snímku jsou patrná zrna kameniva a pojivová fáze. Na snímcích 9.53, 9.54 a 9.55 jsou vidět vyvinuté krystaly kalcitu, jsou přítomny i útvary, které lze přičíst amorfni fázi CSH a CAH sloučenin. Přítomnost kalcitu byla potvrzena i EDX analýzou, obrázek 9.56, v bodě A byly identifikovány vápník, křemík, hliník, železo, malé píky na záznamu přísluší draslíku, hořčíku a síře.



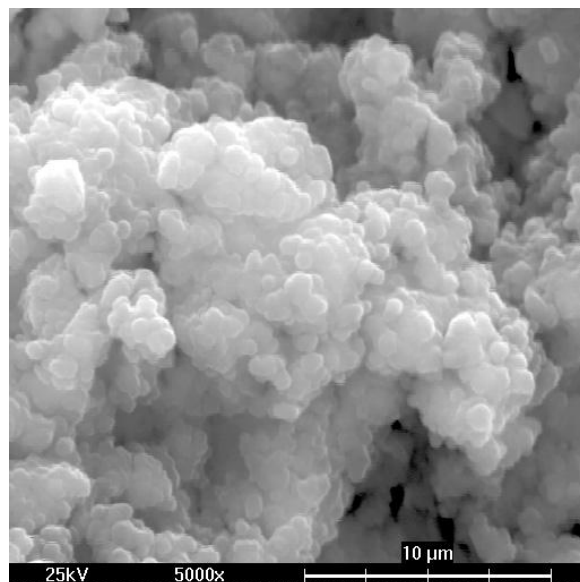
Obrázek 9.57 Mikrostruktura vápenné malty s CP BC-3, zvětšeno 100x



Obrázek 9.58 Mikrostruktura vápenné malty s CP BC-3, zvětšeno 1000x

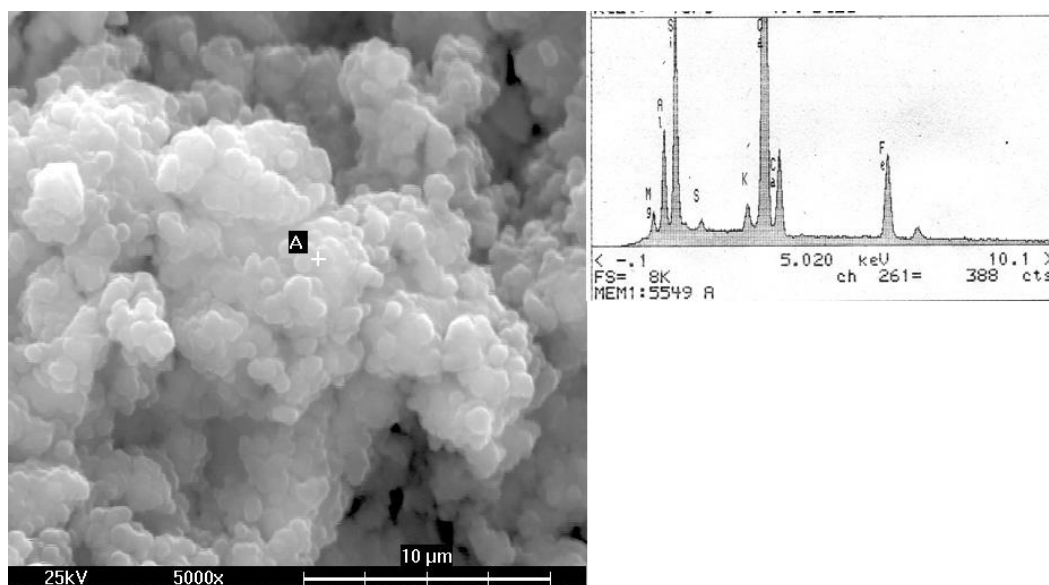


Obrázek 9.59 Mikrostruktura vápenné malty s CP BC-3, zvětšeno 3000x



Obrázek 9.60 Mikrostruktura vápenné malty s CP BC-3, zvětšeno 5000x

Na obrázku 9.57 je přehledný snímek malty BC-3 při zvětšení 100x, na snímku jsou patrná zrna kameniva a pojivová fáze. Na snímcích 9.58 až 9.60 je vidět spíše amorfní fáze než vyvinuté krystaly kalcitu. Amorfní útvary jsou CSH a CAH fáze, které se kromě pucolánové reakce tvoří také hydratací cementu. EDX analýzou byl zjištěn vápník křemík a hliník a železo, viz obrázek 9.61.



Obrázek 9.61 Mikrostruktura vápenné malty s CP BC-3, zvětšeno 5000x

10 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Experimentální část, která je zaměřena na vlastnosti vápenných malt modifikovaných cihelným prachem, je rozdělena na tři etapy.

První etapa se zabývá charakteristikou vstupních surovin pro koncipované malty. Nejvýznamnější charakteristikou bylo stanovení granulometrie a pucolánové aktivity použitého cihelného prachu. Byly použity 2 vzorky cihelného prachu s označením Heluz 3/12 a Heluz Family 13. 9. 2012, oba vzorky z výroby v Hevlíně. Granulometrie byla stanovena metodou laserové difrakce. Oba typy cihelného prachu měly nejvyšší zastoupení částic o velikosti mezi 5–40 μm . CP Heluz Family 13. 9. 2012. obsahoval více jemnějších částic a jeho měrný povrch byl 5× větší než u CP Heluz 3/12. Měrný povrch CP Heluz 3/12 je srovnatelný s měrným povrchem cementu.

Jemnost částic hraje spolu s chemickým a zejména mineralogickým složením CP zásadní roli v reaktivitě pucolánu.

Pro stanovení pucolánové aktivity použitého CP byla zvolena metoda stanovení zbytkového $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (upraveným Chapelleho testem). Vyšší pucolánová aktivita byla zaznamenána u CP Heluz 3/12 (422 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2$ / 1 g pucolánu), CP Heluz Family 13. 9. 2012 vykázal pucolánovou aktivitu 366 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2$ / 1 g pucolánu. Tyto hodnoty jsou v porovnání s jinými druhy pucolánů (vysokoteplotní popílků, metakaolin) poměrně nízké, ale nikoliv zanedbatelná.

Druhá etapa je zaměřena na sledování vlastností malt s přidavkem stoupajícího množství cihelného prachu ke konstantnímu množství vápna. S referenční směsí bez obsahu CP byly porovnávány 4 malty s poměrem VH : CP = 1 : 0,1; 0,25; 0,50; 1. Zde se projevila pozitivně pucolánová příměs – zaznamenán byl vzrůst tlakových pevností, zvyšující se s vyšším obsahem CP. Významným faktorem je zde čas – nárůst pevností byl poměrně výrazný ve stáří 112 dnů. Objemová hmotnost se zvýšila pouze nepatrně, u směsi s poměrem VH:CP 1:1 byl vzrůst objemové hmotnosti vyšší, a to o 80 kg/m^3 oproti referenční směsi o objemové hmotnosti 1630 kg/m^3 . Pucolánová příměs měla příznivý vliv na snížení nasákavosti malty – se stoupající příměsí klesala v důsledku tvorby CSH, resp. CAH sloučenin.

Ve třetí etapě byl vápenný hydrát procentuálně nahrazován stoupajícím množstvím cihelného prachu.

Na maltách byla zkoušena konzistence čerstvých malt, objemová hmotnost, nasákavost a pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu v čase. U vybraných vzorků byla dále stanovována mrazuvzdornost, difúze, lomově-mechanické parametry a přídržnost k podkladu.

Malty byly připravovány na konstantní konzistenci 160 ± 5 mm rozlití na střešacím stole. S přibývajícím zastoupením CP klesala pro dosažení této konzistence potřeba vody. Tento pokles byl dán především snižujícím se obsahem vápenného pojiva.

Na čerstvých maltách bylo pozorováno určité zvýšení „kompaktnosti,“ při míchání malt a jejich ukládání do forem. S přibývajícím zastoupením CP se při stejné konzistenci zvyšovala hutnost v čerstvém stavu. To bylo pravděpodobně způsobeno utěsňujícím charakterem jemných částic cihelného prachu.

S přibývajícím zastoupením cihelného prachu se měnila paleta zbarvení malt. Vápenné malty se zastoupením 60, 70, 80 % cihelným prachem mají již poměrně syté zbarvení do typicky cihlové barvy, odstín se výrazně nemění s rostoucím stářím malt. U malt, které obsahují vápenný hydrát, portlandský cement a cihelný prach je toto zbarvení díky cementu cihlově šedé.

Po 28 dnech stáří malt byla zkoušena nasákavost. Byl zaznamenán pokles nasákavosti s rostoucím zastoupením CP zejména u receptury A, která obsahovala nižší poměr pojiva vůči kamenivu. U receptury B byl zaznamenán mírný pokles a u receptury BC (pojivem je zde vápenný hydrát a portlandský cement) se nasákavost téměř neměnila.

Pevnosti v tahu za ohybu vápenných malt receptur A a B rostly v čase a se zvyšujícím se zastoupením CP, a to i díky snižujícímu se množství záměsové vody. U malty A se zvyšovala pevnost po 28 a 90 dnech až do poměru vápenný hydrát (VH) :CP 40:60. Z hlediska výsledků stanovení pucolánové aktivity bylo na 1 g CP spotřebováno 422 mg Ca(OH)_2 , tedy i pro poměr VH:CP 40:60 je množství hydroxidu vápenatého dostačující. Malta A-6 vykazala po 90 dnech 3krát vyšší pevnost v tahu za ohybu než malta referenční.

U vápenocementových malt s označením BC se již projevil nedostatek hydroxidu vápenatého pro pucolánovou reakci. Náhrada poloviny množství vápenného hydrátu cementem vedlo ke snížení obsahu hydroxidu vápenatého zhruba o 40 %. To vedlo k možnosti reakce cihelného prachu pouze do poměru VH :CP 60:40, vyšší obsah CP již neměl dostatek hydroxidu pro reakci, a naopak jemný prach v maltě měl větší

nároky na celkové množství pojiva. Pevnosti v tahu za ohybu u těchto malt klesaly se zvyšujícím s množstvím CP.

Pevnosti v tlaku vápenných malt jsou poměrně nízké. U malt s označením A a B se tyto pevnosti zvyšovaly s rostoucím zastoupením CP, a to zejména po 28 a 90 dnech a u směsí s vyšším zastoupením CP (60, 70, 80 %).

U vápenocementových malt se výrazně projevila úloha portlandského cementu nárůstem pevností. Z důvodu sníženého obsahu VH se zde dostatečně neprojevuje pucolánová reakce se stoupajícím zastoupením CP a pevnosti klesají.

Pro vybrané malty byly zkoušeny lomově-mechanické vlastnosti. U vápenných malt byl zaznamenán zvyšující se statický modul pružnosti oproti referenční maltě, naproti tomu u vápenocementové malty se ve vztahu k referenční maltě nejdříve zvýšil, ale se stoupajícím se zastoupením CP dále klesal a malta BC-4 již vykazovala nižší hodnotu než B-REF.

Efektivní lomová houževnatost vyjadřuje křehkost vzorků vzhledem k rozsahu nelinearity I-d diagramu před dosažením vrcholu zatížení.

Tato vlastnost u směsí A a B poměrně strmě stoupala, což naznačuje „houževnatění“ vápenných malt se zvyšujícím se zastoupením CP, připisující se pucolánové reakci. V porovnání vybraných směsí A-4 a B-4 byla hodnota efektivní lomové energie, stejně jako u modulu pružnosti, mírně vyšší ve prospěch B-4. U vápenocementové malty byl zaznamenán mírný nárůst u BC-1 oproti B-REF, u směsí se zvyšujícím se podílem CP však hodnota efektivní lomové houževnatosti klesala pod hodnotu referenční směsi.

Specifická lomová energie kvantifikuje křehkost materiálu. Z proměnlivých hodnot, jež jsou připsány také malé četnosti vzorků lze ilustrativně poukázat na rostoucí houževnatost vápenných malt se zvyšujícím se zastoupením CP. Hodnota lomové energie u vápenocementových malt se snižuje oproti referenční maltě a nejnižší hodnotu vykazuje malta BC-2, tato hodnota pak u malt BC-3 a BC-4 opět mírně stoupá.

Z kompletních lomových zkoušek lze usoudit, že pucolán typu zkoušeného cihelného prachu zvyšuje houževnatost (snižuje křehkost) vápenných malt a zvyšuje odolnost proti šíření trhliny. Naproti tomu křehkost vápenocementových malt se zvyšuje s narůstajícím zastoupením CP v těchto maltách.

U vybraných malt A-4, B-4, BC-3 byla zkoušena objemová hmotnost (OH) čerstvé a zatvrdlé malty. U vápenocementové malty BC-3 byly zaznamenány vyšší hodnoty OH než u vápenných malt A-4, B-4, jejichž OH byly srovnatelné.

Obsah vzduchu v čerstvé maltě byl stanoven u A-4 na 3,5, u malt B-4 a BC-3 pak 4,5 %.

Při zkoušce mrazuvzdornosti se vápenné malty s cihelným prachem s poměrem VH:CP 60:40 A-4 a B-4 rozpadly po 3 zmrazovacích cyklech a pevnostní zkoušky byly provedeny pouze na 1 nerozpadnutém tělese od každé směsi. Tyto malty se dle klasifikace tedy označují jako nemrazuvzdorné.

Vápenné malty mají obecně i několikanásobně nižší pevnosti oproti maltám vápenocementovým a cementovým. Provedení zkoušky mrazuvzdornosti a jejich klasifikace dle normy ČSN 72 2452, kdy se zmrazuje malta plně nasycená vodou, je v tomto ohledu pro vápenné malty nerelevantní.

Malta s malým množstvím cementu, označená BC-3, vyhověla 15 zmrazovacím cyklům. Další počet cyklů bude následně proveden, výsledky již nebudou zahrnuty do diplomové práce. Koeficient mrazuvzdornosti, počítaný z pevností v tahu za ohybu hodnotou 0,45 nevyhověl požadavkům normy (0,75). Pokud by byl počítán z pevnosti v tlaku, pak dosáhl hodnoty 0,82.

Výsledky určování hodnoty součinitele difúzního odporu pro vodní páru pro vápennou maltu s cihelným prachem A-4 vykazují poměrně vysoké hodnoty 28,82. Pro srovnání – běžně se tento součinitel pro vápenné omítky s pucolánovou příměsí pohybuje v rozmezí 10 až 25, lit. [37] však uvádí pro vápennou maltu hodnotu 34,6, pro vápenopucolánovou maltu 24,5 až 30,2.

Na snímcích z rastrovacího elektronového mikroskopu jsou pro maltu A-4 vidět především vyvinuté krystaly kalcitu, u malty B-4 patrné vyvinuté krystaly kalcitu i útvary amorfni fáze CSH a CAH sloučenin.

U malty BC-3 jsou na snímcích při vyšším zvětšení vidět spíše amorfni fáze CSH a CAH sloučenin než krystaly kalcitu.

11 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo provést rešerši v oblasti využití cihelného střepu do vápenných malt. Teoretická část popisuje funkci a použití vápenných malt se zdůrazněním jejich současné aplikace zejména pro opravy fasád historických objektů. Ve stručnosti je zde popsána charakteristika vápna a cementu. Dále je charakterizována pucolanita a popsán stručný přehled používaných pucolánových příměsí. Podrobně se dále charakterizuje pucolánová příměs typu cihelného střepu z hlediska surovin, výroby, přeměny jílových minerálů na pojivé složky střepu. Poslední oddíl teoretické části popisuje některé možnosti stanovení pucolánové aktivity.

Experimentální část je rozdělena do tří etap. V první etapě jsou charakterizovány vlastnosti vstupních surovin vápenných malt s cihelnou příměsí. Ve druhé etapě je experimentálně použit přídavek stoupajícího množství jemného cihelného střepu ke konstantnímu množství vápna a na maltách jsou sledovány pevnosti v tlaku v čase, objemová hmotnost a nasákavost malt. Ve třetí etapě je část vápna nahrazena stoupajícím množstvím jemného cihelného střepu. Navrženy byly tři receptury a v každé receptuře je dále celkem 9 směrů, v nichž stoupá náhrada vápna cihelným prachem od 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 a 80 %.

Jako pucolánová příměs byl použit cihelný prach, který je vedlejším produktem při výrobě kalibrovaných cihel. Vyznačuje se právě vysokou jemností a známou technologií výroby a složení.

Na základě experimentů lze učinit následující závěry:

- Metodou stanovení zbytkového $\text{Ca}(\text{OH})_2$ byla prokázána pucolánová aktivita cihelného prachu, vyjádřena množstvím $\text{Ca}(\text{OH})_2$ v mg vázaného jedním gramem cihelného prachu s hodnotou pro cihelný prach Heluz 3/12 – 422 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2$ / 1 g pucolánu a pro Heluz Family 13. 9. 2012 – 366 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2$ / 1 g pucolánu. Ve srovnání s některými jinými druhy pucolánových příměsí jsou to hodnoty nižší, ale ne zanedbatelné (např. u metakaolinu se tato hodnota pohybuje kolem 1000 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /1g).
- Přídavek stoupajícího množství jemného cihelného střepu ke konstantnímu množství vápna v navržené vápenné maltě má příznivý vliv na zvýšení

pevností v tlaku v čase, snížení nasákavosti. Uplatňuje se zde reakce pucolánu s Ca(OH)_2 . Cihelný prach zde figuruje jako aktivní příměs.

- Nahrazení vápna stoupajícím množstvím jemného cihelného střepu ve vápenné maltě vede ke snížení potřeby záměsové vody, což má za následek zvýšení pevností a snížení nasákavosti malt. Pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu se dále mírně zvyšují díky pucolánové reakci s Ca(OH)_2 , kterou se tvoří amorfní fáze CSH, CAH sloučenin. Použitá cihelná příměs ve vápenných maltách má také za následek mírné zvýšení houževnatosti (snížení křehkosti) malt i odolnosti proti šíření trhlin.

K dobrým výsledkům dochází i u vápenných malt s poměrem pojivo : kamenivo 1 : 3 se zastoupením vápna cihelným prachem 60, 70 i 80 %. Ve stáří 90 dní zde dochází k 2,5–3 násobnému nárůstu jak pevností v tahu za ohybu, tak pevností v tlaku.

U vápenocementové malty se pucolánová reakce se zvyšujícím se zastoupením uplatňuje méně z důvodu nižšího množství Ca(OH)_2 . Náhradou poloviny množství vápenného hydrátu cementem vedlo ke snížení obsahu hydroxidu vápenatého zhruba o 40 %. Reakce cihelného prachu byla možná pouze do poměru VH :CP 60:40, vyšší obsah CP již neměl dostatek hydroxidu pro reakci, a naopak jemný prach v maltě měl větší nároky na celkové množství pojiva. Mechanické vlastnosti se zvyšujícím se zastoupením cihelného prachu klesají.

- Použitím pucolánu typu tohoto cihelného prachu jako náhrady vápna ve vápenných maltách má tyto výhody:
 - využití vedlejší suroviny, eliminace jejího skládkování,
 - okamžité využití vedlejší suroviny bez dalších energeticky náročných úprav (při srovnání s jinými používanými pucolány),
 - úspora vápenného pojiva,
 - snížení ekonomických nároků úsporou vápenného pojiva,
 - mírné zlepšení mechanických vlastností malt,

- přijatelnost materiálu pro použití do vápenných malt používaných pro obnovu fasád historických objektů,
 - dosažení specifického barevného odstínu.
-
- Zlepšení vlastností vápenných malt závisí na pucolánové aktivitě cihelného prachu (na jemnosti částic, podmínkách výroby a chemickém složení).
 - Cihelný prach jako vedlejší produkt při broušení cihel se dle výše uvedených poznatků jeví jako poměrně perspektivní ve vztahu k jeho využitelnosti ve vápenných pojivech.

12 LITERATURA

- [1] MICHOLINOVÁ, D. *Vytváření pevné struktury vápenných malt s nehydraulickým pojivem*. Zprávy památkové péče, ročník 69, 2009, číslo 3.
- [2] MICHOLINOVÁ, D. *Příprava vápenných malt v péči o stavební památky*. 1.vydání, Praha: Informační centrum ČKAIT, s.r.o., 2006.76 s. ISBN 80-86769-81-X.
- [3] HOŠEK, J., LOSOS, L. *Historické omítky*. 1. vydání, Praha: Grada Publishing a.s., 2007, 168 s. ISBN 978-80-247-1395-3.
- [4] ROVNANÍKOVÁ, P. *Omítky*. 1. vydání, Praha: Společnost pro technologie ochrany památek, 2002. 89 s. ISBN 80-86657-00-0.
- [5] KOUTNÍK, P. a kol. Vlastnosti a aplikace vápenných malt s obsahem pucolánu na bázi metakaolinitu. In *Sborník příspěvků semináře METAKAOLIN 2010*. 1. Vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010, 41-53. ISBN 978-80-214-4064-7.
- [6] BOKE, H et al. Characteristics of brick used as aggregate in historic brick-lime mortars and plasters. *Construction and buildings material*, Vol. 36, No. 6, 2006, 1115-1122.
- [7] UGURLU, E., BOKE, H. The Use of brick-lime plasters and their relevance to climatic conditions of historic bath buildings. *Construction and buildings material*, Vol. 23, No. 6, 2009, 2442–2450.
- [8] BARONIO, G.; BINDA, L. Study of the pozzolanicity of some bricks and clays. *Construction and buildings material*, Vol. 11, No. 1, 2007, 41-46.
- [9] HELA, R. *Technologie betonu II Modul 01*. Brno: VUT FAST v Brně, 2008. 148 s.
- [10] BYDŽOVSKÝ, J. *Vybrané statě z technologie stavebních hmot Modul 01*. Brno: VUT FAST v Brně, 2008. 228 s.
- [11] ŠMERDOVÁ, L. *Využití cihelného střepu pro malty a betony*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2011, 65 s., vedoucí bakalářské práce prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc.
- [12] ROVNANÍKOVÁ, P., CHROMÁ, M., KRMÍČKOVÁ, N. Vlastnosti vápenných malt modifikovaných metakaolinem. In *Sborník konference Metakaolin 2007*, Brno: FAST VUT v Brně, 2007, 78-87.

- [13] PYTLÍK, P. *Cihlářství*. Brno: CERM Akademické nakladatelství, 1995, 264 stran, ISBN: 80-214-0612-7
- [14] SOKOLÁŘ, R. *Speciální keramika. BJ14_M01 Cihlářská výroba*. Brno: VUT FAST Brno, 67 s.
- [15] HANKÝŘ, V., KUTZENDORFER, J. *Technologie keramiky*. 1. vydání. Praha: Silikátový svaz, 2008. 387 s. ISBN 978-80-86821-48
- [16] PYTLÍK, P., SOKOLÁŘ, R. *Stavební keramika*. 1. Vydání. Brno: CERM Akademické nakladatelství, 2002, 287 s., ISBN 80-7204-234-3.
- [17] SOKOLÁŘ, R. *Keramika. BJO1 M01*. Brno: VUT FAST v Brně, 179 s.
- [18] Francouzská norma NF P 18-513, příloha A
- [19] ČSN EN 196-5 *Metody zkoušení cementu – Část 5: Zkouška pucolanity pucolánových cementů*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 10 stran.
- [20] Technická příručka pro projektanty a stavitele. 2012. HELUZ cihlářský průmysl v.o.s.
- [21] Malvern [online]. 2012 [cit. 2012-12-23] Dostupné na WWW: <www.malvern.com>
- [22] LACH, V., DAŇKOVÁ, M. *Mikrostruktura stavebních látek*. 2. vydání, Nakladatelství VUT Brno, 1991. 178 s. ISBN 978-80-214-0309-3.
- [23] ČSN EN 1015-3 *Zkušební metody malt pro zdivo – Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)*. Praha: Český normalizační institut, 2000. 12 s.
- [24] ČSN EN 1015-4 *Zkušební metody malt pro zdivo – Část 4: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím přístroje pro stanovení hodnoty penetrace)*. Praha: Český normalizační institut, 1999. 12 s.
- [25] ČSN EN 13755 *Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení nasákavosti vodou za atmosférického tlaku*. Praha: Český normalizační institut, 2002. 12 s.
- [26] ČSN EN 1015-11 *Zkušební metody malt pro zdivo – Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku*. Praha: Český normalizační institut, 2000. 16 s.

- [27] ČSN EN 1015-6 *Zkušební metody malt pro zdivo – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty*. Praha: Český normalizační institut, 1999. 12 s.
- [28] ČSN EN 1015-10 *Zkušební metody malt pro zdivo – Část 10: Stanovení objemové hmotnosti suché zatvrdlé malty*. Praha: Český normalizační institut, 2000. 8 s.
- [29] ČSN EN 1015-7 *Zkušební metody malt pro zdivo – Část 7: Stanovení obsahu vzduchu v čerstvé maltě*. Praha: Český normalizační institut, 1999. 12 s.
- [30] ČSN EN 1015-12 *Zkušební metody malt pro zdivo – Část 12: Stanovení přidržnosti zatvrdlých malt pro vnitřní a vnější omítky k podkladu*. Praha: Český normalizační institut, 2001. 12 s.
- [31] ČSN 72 2452 (722452) *Zkouška mrazuvzdornosti malty*. Praha: Vydavatelství úřadu pro normalizaci a měření, 1970. 5 s.
- [32] KERŠNER, Z., ROVNANÍKOVÁ, P. a kol. Lomově-mechanické parametry. In *Vlastnosti modifikované sádry*. 1. vydání, Brno: CERM Akademické nakladatelství, 2009, 134 stran, ISBN 978-80-214-3988-7
- [33] KERŠNER, Z., ROVNANÍKOVÁ, P. a kol. Tepelné a vlhkostní vlastnosti upravených variant sádry. In *Vlastnosti modifikované sádry*. 1. vydání, Brno: CERM Akademické nakladatelství, 2009, 73-94, ISBN 978-80-214-3988-7
- [34] KERŠNER, Z., ROVNANÍKOVÁ, P., SCHMID, P., KOUTNÍK, P. Porovnání hodnot lomově-mechanických parametrů přírodního a umělého pískovce. In *Sborník příspěvků semináře METAKAOLIN 2010*. 1. vydání. Brno: VUT v Brně, 2010, 35-40. ISBN 978-80-214-4064-7.
- [35] ŠŤASTNÍK, S. *Fyzika stavebních látek. Modul M01*. Brno: VUT FAST v Brně, 2006, 98 s.
- [36] DUFKA, A., NOVÁK, J. *Laboratorní experimentální metody*. Brno: VUT FAST v Brně, 2007, 155 s.
- [37] VEJMELOVÁ, E., KOŇÁKOVÁ, D., ČÁCHOVÁ, M., KEPPERT, M., ČERNÝ, R. Effect of hydrophobization on the properties of lime–metakaolin plasters. *Construction and Building Materials*, Volume 37, December 2012, Pages 556-561

13 SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

CP	cihelný prach
VH	vápenný hydrát, $\text{Ca}(\text{OH})_2$
PC	portlandský cement 42,5 R
OH	objemová hmotnost [kg/m^3]
REM	rastrovací elektronový mikroskop

14 SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ

14.1 TABULKY

Tabulka 2.1	Mezní vlastnosti vzdušného vápna
Tabulka 3.1	Obecné chemické složení cementu
Tabulka 4.1	Obecné složení vysokoteplotního popílku
Tabulka 4.2	Obecné složení vysokopecních strusek
Tabulka 5.1	Jílovité zeminy
Tabulka 5.2	Granulometrie jílovitých zemin
Tabulka 7.1	Chemické složení CEM 42,5 R
Tabulka 7.2	Velikost a zastoupení částic v CP Heluz 3/12
Tabulka 7.3	Velikost a zastoupení částic v CP Family 13. 9. 2012
Tabulka 7.4	Minerály nalezené na záznamu z XRD analýzy
Tabulka 7.5	Množství $\text{Ca}(\text{OH})_2$ v mg vázaného jedním gramem pucolánu
Tabulka 7.6	Použité frakce zkušebního písku
Tabulka 8.1	Složení směsí
Tabulka 8.2	Pevnosti v tlaku ve stáří 28, 56, 84 a 112 dní
Tabulka 8.3	Objemové hmotnosti ve stáří 28 dní
Tabulka 8.4	Nasákavost ve stáří 28 dní
Tabulka 9.1	Receptura A
Tabulka 9.2	Receptura B
Tabulka 9.3	Receptura BC
Tabulka 9.4	Penetrace válečku do malty pro jednotlivé receptury
Tabulka 9.5	Množství vody pro jednotlivé receptury
Tabulka 9.6	Nasákavost pro jednotlivé receptury
Tabulka 9.7	Výsledky pevností v tahu za ohybu - receptura A

Tabulka 9.8 Výsledky pevností v tahu za ohybu - receptura B
 Tabulka 9.9 Výsledky pevností v tahu za ohybu - receptura BC
 Tabulka 9.10 Výsledky pevností v tlaku - receptura A
 Tabulka 9.11 Výsledky pevností v tlaku - receptura B
 Tabulka 9.12 Výsledky pevností v tlaku – receptura BC
 Tabulka 9.13 Výsledky lomových charakteristik pro směsi receptury A
 Tabulka 9.14 Výsledky lomových charakteristik pro směsi receptury B
 Tabulka 9.15 Výsledky lomových charakteristik pro směsi receptury BC
 Tabulka 9.16 Výsledné OH čerstvé a zatvrdlé malty
 Tabulka 9.17 Výsledný obsah vzduchu
 Tabulka 9.18 Přídržnost k podkladu
 Tabulka 9.19 Výsledky stanovení pevností srovnávacích a zmrazovaných těles směsi A-4 a B-4
 Tabulka 9.20 Výsledky stanovení pevností srovnávacích a zmrazovaných těles BC-3
 Tabulka 9.21 Výsledné hodnoty součinitele difúzního odporu pro vodní páru

14.2 OBRÁZKY

Obrázek 1.1 Vápenná povrchová úprava fasády městského domu v Nice
 Obrázek 2.1 Karbonatace vápenné omítky
 Obrázek 4.1 Srovnání pucolánové aktivity vybraných pucolánů
 Obrázek 5.1 Modifikační přeměny křemene v závislosti na teplotě a příslušné objemové změny během výpalu
 Obrázek 6.1 Tlakové nádoby o objemu 80 ml
 Obrázek 6.2 Křivka nasycenosti oxidu vápenatého
 Obrázek 7.1 Zdění broušených cihel Heluz
 Obrázek 7.2 Cihelný prach s označením Heluz Family 13. 9. 2012
 Obrázek 7.3 Křivka zrnitosti CP Heluz 3/12
 Obrázek 7.4 Křivka zrnitosti CP Heluz Family 13. 9. 2012
 Obrázek 7.5 Granulometrie zkušebních písků po smísení v poměru PG1+PG2+PG3 = 1:1:1
 Obrázek 8.1 Porovnání pevností v tlaku ve stáří 28, 56, 84 a 112 dní
 Obrázek 8.2 Porovnání objemových hmotností jednotlivých
 Obrázek 8.3 Porovnání nasákavosti jednotlivých směsí ve stáří 28 dní

Obrázek 9.1 Zkušební tělesa receptury B

Obrázek 9.2 Měření rozlití malty na střešacím stolku

Obrázek 9.3 Detail ponoření penetračního válečku do nádoby s maltou

Obrázek 9.4 Odečítání hodnoty penetrace

Obrázek 9.5 Porovnání potřebného množství vody pro konzistenci rozlití 160 ± 5 mm

Obrázek 9.6 Porovnání nasákavosti zkušebních těles ve stáří 28 dní

Obrázek 9.7 Pevnosti v tahu za ohybu v čase - receptura A

Obrázek 9.8 Pevnosti v tahu za ohybu v čase - receptura B

Obrázek 9.9 Pevnosti v tahu za ohybu v čase - receptura BC

Obrázek 9.10 Porovnání pevností v tahu za ohybu ve stáří 7 dní - receptury A, B, BC

Obrázek 9.11 Porovnání pevností v tahu za ohybu ve stáří 28 dní - receptury A, B, BC

Obrázek 9.12 Porovnání pevností v tahu za ohybu ve stáří 90 dní - receptury A, B, BC

Obrázek 9.13 Porovnání pevností v tlaku - receptura A

Obrázek 9.14 Porovnání pevností v tlaku - receptura B

Obrázek 9.15 Porovnání pevností v tlaku – receptura BC

Obrázek 9.16 Porovnání pevností v tlaku ve stáří 7 dní pro receptury A, B, BC

Obrázek 9.17 Porovnání pevností v tlaku ve stáří 28 dní pro receptury A, B, BC

Obrázek 9.18 Porovnání pevností v tlaku ve stáří 90 dní pro receptury A, B, BC

Obrázek 9.19 Schéma zatěžování zkušebního tělesa

Obrázek 9.20 Výstupní I-d diagram pro vzorek A-4_2

Obrázek 9.21 Výstupní I-d diagram pro vzorek B-4_2

Obrázek 9.22 Výstupní I-d diagram pro vzorek BC-4_2

Obrázek 9.23 Statický modul pružnosti pro směsi receptury A: aritmetické průměry výsledků a jejich směrodatné odchylky

Obrázek 9.24 Efektivní lomová houževnatost pro směsi receptury A: aritmetické průměry výsledků a jejich směrodatné odchylky

Obrázek 9.25 Specifická lomová energie pro směsi receptury A: aritmetické průměry výsledků a jejich směrodatné odchylky

Obrázek 9.26 Statický modul pružnosti pro směsi receptury B: aritmetické průměry výsledků a jejich směrodatné odchylky

Obrázek 9.27 Efektivní lomová houževnatost pro směsi receptury B: aritmetické průměry výsledků a jejich směrodatné odchylky

Obrázek 9.28 Specifická lomová energie pro směsi receptury B: aritmetické průměry výsledků a jejich směrodatné odchylky

Obrázek 9.29 Statický modul pružnosti pro směsi receptury BC: aritmetické průměry výsledků a jejich směrodatné odchylky

Obrázek 9.30 Efektivní lomová houževnatost pro směsi receptury BC: aritmetické průměry výsledků a jejich směrodatné odchylky

Obrázek 9.31 Specifická lomová energie pro směsi receptury BC: aritmetické průměry výsledků a jejich směrodatné odchylky

Obrázek 9.32 Statický modul pružnosti: srovnání výsledků vybraných směsí - aritmetické průměry výsledků a jejich směrodatné odchylky

Obrázek 9.33 Efektivní lomová houževnatost: srovnání výsledků vybraných směsí - aritmetické průměry výsledků a jejich směrodatné odchylky

Obrázek 9.34 Specifická lomová energie: srovnání výsledků vybraných směsí - aritmetické průměry výsledků a jejich směrodatné odchylky

Obrázek 9.35 Objemové hmotnosti čerstvé a zatvrdlé malty pro vybrané směsi

Obrázek 9.36 Obsah vzduchu v čerstvé maltě u vybraných směsí

Obrázek 9.37 Přídržnost k podkladu: aritmetické průměry výsledků jednotlivých vybraných směsí a jejich směrodatné odchylky

Obrázek 9.38 Pevnost v tahu za ohybu zmrazovaných a srovnávacích těles

Obrázek 9.39 Pevnost v tlaku zmrazovaných a srovnávacích těles

Obrázek 9.40 Stav zkušebních těles po 3 zmrazovacích cyklech

Obrázek 9.41 Stav zkušebních těles po 3 zmrazovacích cyklech

Obrázek 9.42 Pevnost v tlaku zmrazovaných a srovnávacích těles BC-3

Obrázek 9.43 Pevnost v tahu za ohybu zmrazovaných a srovnávacích těles BC-3

Obrázek 9.44 Stav zkušebních těles BC-3 po 15 zmrazovacích cyklech

Obrázek 9.45 Vzorek vápenocementové malty s CP v měřicí misce

Obrázek 9.46 Vzorek vápenocementové malty s CP uložený v exsikátoru

Obrázek 9.47 Mikrostruktura vápenné malty s CP A-4, zvětšeno 100x

Obrázek 9.48 Mikrostruktura vápenné malty s CP A-4, zvětšeno 1000x

Obrázek 9.49 Mikrostruktura vápenné malty s CP A-4, zvětšeno 3000x

Obrázek 9.50 Mikrostruktura vápenné malty s CP A-4, zvětšeno 5000x

Obrázek 9.51 EDX analýza vápenné malty s CP A-4, zvětšeno 5000x

Obrázek 9.52 Mikrostruktura vápenné malty s CP B-4, zvětšeno 100x

Obrázek 9.53 Mikrostruktura vápenné malty s CP B-4, zvětšeno 1000x

Obrázek 9.54 Mikrostruktura vápenné malty s CP B-4, zvětšeno 3000x

Obrázek 9.55 Mikrostruktura vápenné malty s CP B-4, zvětšeno 5000x

Obrázek 9.56 Mikrostruktura vápenné malty s CP B-4, zvětšeno 5000x

Obrázek 9.57 Mikrostruktura vápenné malty s CP BC-3, zvětšeno 100x

Obrázek 9.58 Mikrostruktura vápenné malty s CP BC-3, zvětšeno 1000x

Obrázek 9.59 Mikrostruktura vápenné malty s CP BC-3, zvětšeno 3000x

Obrázek 9.60 Mikrostruktura vápenné malty s CP BC-3, zvětšeno 5000x

Obrázek 9.61 Mikrostruktura vápenné malty s CP BC-3, zvětšeno 5000x