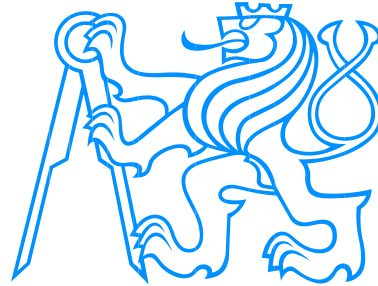


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**Fakulta stavební
Katedra mechaniky**



**Využití odpadního mramoru na bázi odprašků
ve stavebnictví**

Use of Waste Marble Dust in Civil Engineering

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Zdeněk Prošek

Doktorský studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Fyzikální a materiálové inženýrství

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

Praha 2021

Prohlášení

Jméno doktoranda: Zdeněk Prošek

Název disertační práce: Využití odpadního mramoru na bázi odprašků ve stavebnictví

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně pod vedením školitele doc. Ing. Pavla Tesárka, Ph.D., a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 30. prosinec 2020

podpis

Poděkování

Za neocenitelnou pomoc, cenné rady a připomínky při vypracování této práce a i v průběhu studia děkuji svému vedoucímu doc. Ing. Pavlu Tesárkovi, Ph.D. Za obětavou pomoc při zpracování podkladů dále děkuji Ing. Václavu Nežerkovi, Ph.D., Ing. Jaroslavu Topičovi, Ing. Tereze Nedvědové a Ing. Janu Trejbalovi, Ph.D. Nakonec mé poděkování patří Ing. Georgi Karra'a, Ph.D., z firmy LAVARIS, spol. s r.o., jemuž děkuji především za poskytnutí testovaných vstupních surovin, za jejich zpracování ve formě vysokoenergetického mletí a za aktivní spolupráci při celém vývoji aplikace odpadní mramorové moučky.

Abstrakt

Předložená disertační práce je souhrnem experimentálního výzkumu zaměřeného na charakterizaci a využití odpadního materiálu na bázi mramoru ve stavebnictví. Pro úpravu mramorového odpadu byla zvolena recyklace pomocí vysokoenergetického mletí. V rámci provedené práce byly využity experimenty pro stanovení souboru materiálových parametrů, které charakterizují vstupní materiál před a po vysokoenergetickém mletí, především pomocí elektronové mikroskopie. Následně byly vytvořeny vzorky, jež obsahovaly mikromletou mramorovou moučku, která redukovala množství použitého cementu, přírodního plniva a mikroplniva. Na vzorcích byly následně stanoveny charakteristiky popisující fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti výsledného kompozitu. Materiálové vlastnosti tvořily následně podklady pro vytvoření mikromechanického modelu a aplikaci ve formě malt, lepidel, omítacích směsí a plných i lehčených zdících bloků.

Klíčová slova: odpadní mramorová moučka, recyklace, mechanické vlastnosti, elektronová mikroskopie, komplexní stavební systém

Abstract

The dissertation is a summary of experimental research, which was designed to describe and use marble-based waste material in civil engineering. Recycling using high-energy milling was chosen for the treatment of marble waste. The work used experiments to determine a set of material parameters that characterize the input material before and after high-energy milling, especially using electron microscopy. Subsequently, samples were made that contained micronized marble powder, which reduced the amount of cement, natural filler and microfiller used. The samples were then characterized by characteristics that describe the physical, chemical and mechanical properties of the resulting composite. The material properties subsequently formed the basis for the creation of a micromechanical model and application in the form of mortars, plaster and solid and lightweight masonry blocks.

Keywords: waste marble powder, recyklation, mechanical properties, electron microscopy, complex building system

Obsah

1	Úvod	1
2	Mramorové odpady	3
2.1	Druhy mramoru	3
2.2	Produkce odpadního mramoru	5
2.3	Chemické složení mramorových odpadů	9
2.4	Možnosti zpracování mramorových odpadů	10
2.5	Technologie recyklace pro využití ve stavebnictví	11
2.6	Vliv odpadní mramorové moučky na vlastnosti čerstvého betonu	17
2.7	Vliv odpadní mramorové moučky na fázové složení a mikrostrukturální charakteristiky cementových kompozitů	18
2.8	Vliv odpadní mramorové moučky na pevnostní charakteristiky cementového kompozitu	25
3	Možnosti testování na nano či mikroúrovni	29
3.1	Zjišťování mikrostrukturálních vlastností	29
3.2	Stanovení mikromechanických vlastností	35
4	Experimentální metody	39
4.1	Charakterizace vstupních surovin	39
4.2	Stanovení fyzikálních vlastností cementových kompozitů	41
4.3	Stanovení vlastností na nano či mikroúrovni	45
5	Použité materiály a vzorky	49
5.1	Specifikace vstupních surovin	49
5.2	Vysokorychlostní mletí mramorové moučky	56
5.3	Vzorky pro zkoumání na makroúrovni	59
5.4	Vzorky pro mikroskopickou analýzu a nanoindentaci	62
6	Výsledky a diskuze	63
6.1	Využití odpadního materiálu jako náhrady za běžně využívané přírodní plnivo	63
6.2	Využití odpadního materiálu jako náhrada za Portlandský cement	66
7	Praktická aplikace	83
7.1	Využití dat pro vytvoření mikromechanického modelu	83
7.2	Nízkonákladový stavební systém s vysokým obsahem druhotných surovin .	87
7.3	Ekonomická analýza	95
7.4	Zhodnocení ekologických aspektů	97

8 Závěr	98
Seznam obrázků	100
Seznam tabulek	104
Reference	105
Příloha A - Užité vzory	123
A1 - Cementová malta	123
A2 - Vápenocementová malta	129
A3 - Tenkovrstvá cementová malta	135
A4 - Tenkovrstvá vápenocementová malta	141
A5 - Tvarovka pro výplňové zdivo	147
A6 - Lehčený kompozitní stavební prvek	153

1 Úvod

Práce se zabývá využitím recyklátu na bázi mramorového odpadu ve stavebnictví. Jedná se především o mramorové odprašky a kaly, které vznikly v průběhu těžby a zpracování mramoru. Mramor je jeden z nejdéle využívaných materiálů ve stavebnictví, jehož těžba probíhá od 6. století před Kristem až do současnosti. Za dlouhá staletí těžby a zpracování mramoru docházelo ke skládkování mramorového odpadu v okolí těžby a tím bylo postupem času vytvořeno vážné enviromentální riziko z důvodu výskytu velkého množství jemných částic, které znečišťují ovzduší. Dalším velkým rizikem jsou ekonomické aspekty, neboť skládky brání v rozvoji průmyslu a jeho udržitelnosti.

Celosvětová produkce mramoru každým rokem stoupá a s ní také množství vyprodukovaného odpadu, které je závislé na míře vyspělosti technologie těžení a zpracování mramoru. V dnešní době je více než 50 % celosvětové produkce mramoru v rozvojových zemích, kde není brán ohled na způsob těžby a množství vyprodukovaného odpadu. I přes snahu využít nově vzniklý odpadní materiál a snížit jeho produkci dochází ročně ke vzniku více než 10 miliónů tun odpadu a toto číslo se za posledních 10 let každoročně zvyšuje. Čísla o produkci odpadu v závislosti na vytěženém množství kamene, která platí celosvětově, jsou podobná i pro Českou republiku. Rešeršní část se zabývá hlavně třemi oblastmi, jimiž jsou Česká republika, Itálie a Egypt.

Česká republika byla vybrána z důvodu tuzemského uplatnění výsledků, Itálie představuje zástupce vyspělé země s vysokou produkcí mramoru a Egypt byl vybrán z důvodu srovnatelné produkce jako Itálie s tím, že se jedná o rozvojovou část světa. Navíc v Egyptě a jemu podobných oblastech (Střední východ) je takřka nulové využití recyklátu na bázi mramoru.

Disertační práce se zabývá využitím odpadu produkovaného mramorovým průmyslem v cementových kompozitech. Jedná se o nejlogičtější a nejekologičtější možnost, jak nakládat se vzniklým odpadem, protože růst produkce mramoru je přímo spjatý z rozvojem stavebnictví, v němž je mramor jako produkt nejčastěji užíván. Mramorové odpady lze využít v cementových kompozitech jako náhradu za plnivo nebo za pojivo. V dnešní době je všeobecně kladen velký důraz na ekologii, kdy došlo za posledních deset let k velkému vývojovému skoku. Novým způsobem zpracování (recyklace) odpadních materiálů je vysokoenergetické mletí, které se jeví ekonomicky výhodné, a díky tomu je možné ho využít v praxi. Navíc je možné pomocí vysokoenergetického mletí získat jemnozrné materiály (mikromleté materiály), které jsou jemnější než klasický cement nebo vápno. Jemnější zrna mají vyšší měrný povrch, a tím také vyšší aktivitu v kompozitu.

Aby bylo možné mikromleté odpadní materiály na bázi mramoru efektivně využít, je nutné podrobně zmapovat jejich vlastnosti na mikroúrovni (měrný povrch, velikost a tvar zrn, chemické složení, mechanické vlastnosti atd.). Z uvedeného důvodu se v práci zabýváme některými novými experimentálními metodami, jež se používají pro zkoumání

materiálů od nano po makro oblast s ohledem na využití poznatků k hlubšímu pochopení chování materiálů, a to především s ohledem na mikromletí. Metody popisující materiál na nano či mikroúrovni jsou důležité a slouží ke zjištění možností recyklátu a jeho zapojení v mikrostruktuře materiálu.

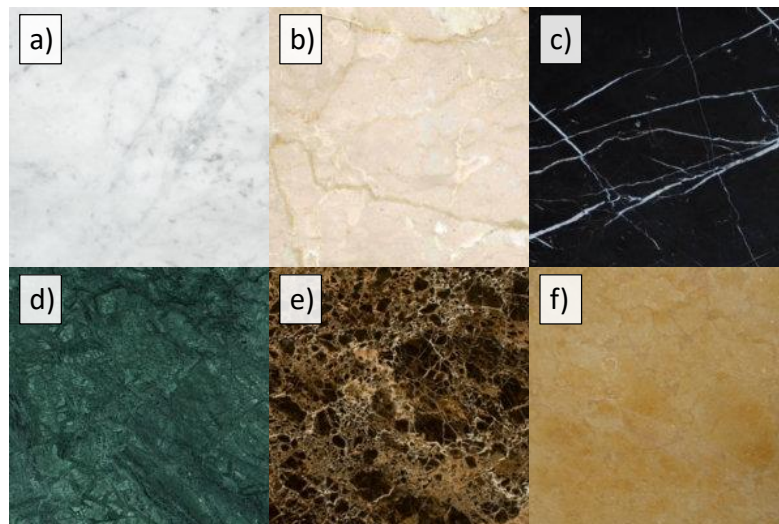
Cílem disertační práce bylo vyvrátit předpoklady o nevhodnosti řešení recyklace a aplikace materiálu na bázi odpadního mramoru ve stavebnictví. V předloženém textu byl provázán základní výzkum s aplikovaným výzkumem, kde byly nejprve provedeny experimenty popisující chování materiálu na nano, mikro a makroúrovni, a poté byl vytvořen model predikující vlastnosti cementového kompozitu pro rozdílné okrajové podmínky. Z důvodu rozdílných výsledků napříč řešerší byly vlivy mramorové moučky na výsledné mechanické a fyzikální vlastnosti vzorků testovány v rámci základního výzkumu na cementových pastách.

Následně byly získané výsledky (v rámci základního výzkumu) použity v aplikovaném výzkumu, v němž výsledný materiál musí splňovat důležité aspekty, jako jsou ekologická a ekonomická kritéria. Naším záměrem bylo zvýšit využití recyklátu, který pozitivně ovlivňuje ekologii a snížení množství použité stavební chemie, jež negativně ovlivňuje výslednou cenu materiálu. Navíc by měl být materiál tvořen z lokálních surovin pro danou oblast. Výsledky výzkumu by měly být prakticky uplatněny ve stavebnictví při spolupráci s firmou LAVARIS, spol. s r.o.

2 Mramorové odpady

2.1 Druhy mramoru

Mramor je vytvářen přeměnou minerálů za působení vysokých teplot a intenzivních tlaků. Existuje mnoho různých druhů mramorů (jen na území ČR se nachází přes 70 druhů), jejich nejčastější rozdělení je podle specifické barvy, a tím i místa těžby nebo podle druhu horniny. Specifická barva mramoru vzniká přeměnou minerálů v kombinaci s dalšími složkami. Mezi tyto složky patří pigmenty, příměsi, nerosty, jílové hmoty nebo organické látky, které původní bílý mramor rozmanitě zbarvují. Nejčastějšími původci zbarvení jsou oxidy nebo hydroxidy železa (hnědý mramor), chlorit (zelený mramor) a grafit (šedý až černý mramor). Nejoblíbenější barvou na globálním trhu s mramorem je béžová a bílá, následovaná černou, zelenou, hnědou, žlutou a šedou (Obrázek 1).

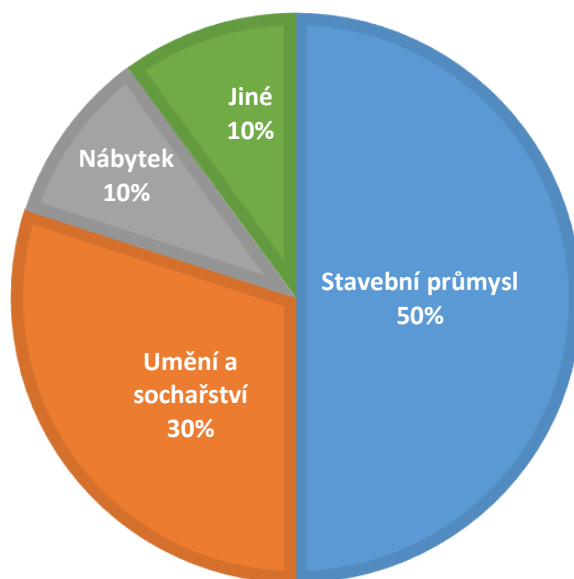


Obrázek 1: Barevné druhy mramoru: a) bílý mramor Bianco Carrara (Itálie), b) béžový mramor Botticino Classico (Itálie), c) černý mramor Nero Marquina (Španělsko), d) zelený mramor Verde Guatemala (Indie), e) hnědý mramor Emperador (Turecko), f) žlutý mramor Giallo Atlantide (Egypt) [1].

Podle druhu horniny rozlišujeme:

- Sedimentogenní mramor – důležitým rysem je pestrost a barevnost. Sedimentogenní mramory jsou dobře opracovatelné, často i leštitelné, ale mají vyšší obrusnost a také menší odolnost k vnějším vlivům. Z uvedených důvodů je jejich nejčastější aplikace v sochařství.
- Metamorfogenní mramor – má opačné vlastnosti než sedimentogenní. Metamorfogenní mramory mají vysokou pevnost, odolnost vůči povětrnostním podmínkám a nejsou tak pestré. Díky těmto vlastnostem se používají především na dlažby a obklady [2].

Nejčastěji těženými druhy jsou, dle aplikace, metamorfovenní mramory, neboť se nejčastěji užívají ve stavebním průmyslu jako dekorativní kámen (Obrázek 2).



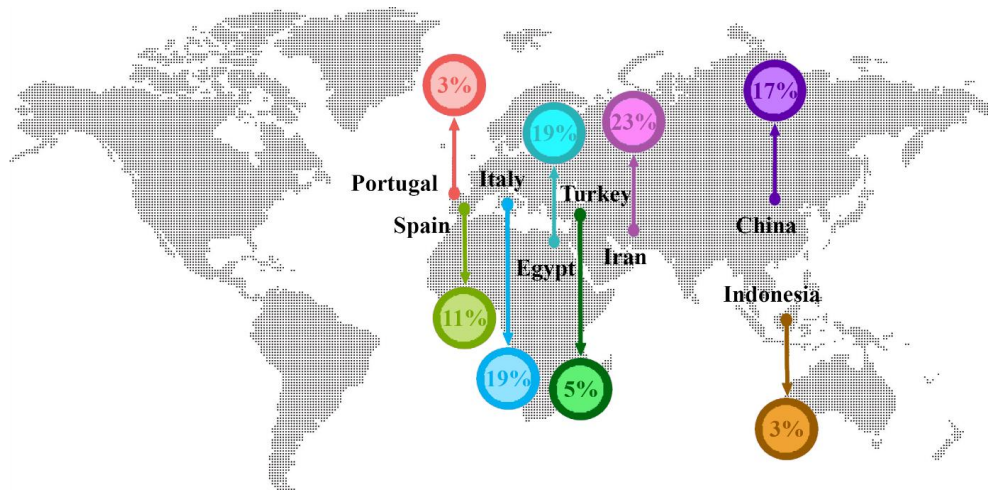
Obrázek 2: Aplikační odvětví pro mramor [3].

Fyzikálně-mechanické vlastnosti mramoru v závislosti na druhu

Mezi nejčastěji měřené fyzikálně-mechanické vlastnosti dekorativního kamene patří objemová hmotnost, nasákavost, odolnost proti mrazu, obrusnost, leštitelnost a pevnost v tahu za ohybu. Z důvodu zmapování fyzikálně-mechanických vlastností mramoru provedly laboratoře Zkušebny kamene a kameniva, a.s., a Hornického inženýrství VŠB – TU Ostrava testy několika druhů mramorů [4]. Mezi testovanými materiály byly mramory dovážené z Itálie (travertin Travertino romano classico, bílé mramory Carrara a Statuario, zelený ofikalcit Verde Guatemala), z Řecka (karbonátová breccie Kokinovrachos, světlé mramory Janina, černé mramory s charakteristickým bílým žilkováním Levadia Black, šedobílý Kavaljotiko, zelený Weria green a světle šedý Kavala semi white), ze Španělska (červený mramor Rosso alicante, černý s bílými žilkami Nero marquina), z Portugalska (růžový Rosa portogalo), z Bulharska (šedý mramor Sandanski) a z Chorvatska (světlý Kanfanar) a z České republiky (sněžníkovské, lipovské a supíkovičské mramory). Mezi výsledky jednotlivých druhů mramorů lze pozorovat jen minimální rozdíly. Výsledné hodnoty poukazují na přibližně stejné fyzikálně-mechanické vlastnosti. Jmenovitě průměrná objemová hmotnost byla $2670 \pm 16 \text{ kg/m}^3$, nasákavost $0,12 \pm 0,05 \%$, pórovitost $0,31 \pm 0,10 \%$, obrusnost $6,14 \pm 0,87 \text{ mm}$ a pevnost v tahu $11,82 \pm 2,32 \text{ MPa}$ [4].

2.2 Produkce odpadního mramoru

Množství odpadního mramoru je závislé na globální poptávce trhu. Celosvětová roční těžba v lomech každým rokem roste, mezi lety 2004 a 2009 dokonce vzrostla asi o 20 % (z 89 mil. tun v roce 2004 na 107 mil. tun v roce 2009) [3]. Předpokládá se, že v roce 2025 bude produkce až dvojnásobná [5,6]. Více než 60 % celosvětové produkce je tvořeno béžovým a bílým mramorem [6], a proto z tohoto důvodu je rešerše přímo zaměřena na tento mramor a odpad z něj vzniklý. Na Obrázku 3 lze vidět přehled celosvětové produkce nejčastěji těženého béžového mramoru. Množství vyprodukovaného odpadu roste s těžbou (produkcí) a je závislé na technologické vyspělosti daného státu [7]. Z grafu (Obrázek 3) je také patrné, že více než 50 % celosvětové produkce připadá na rozvojové země.



Obrázek 3: Celosvětová produkce těžby béžového mramoru [3].

Během těžby a zpracování mramoru vznikají dva druhy odpadu. Prvním je pevný odpad vzniklý během těžby hornin a druhým je odpad vzniklý zpracováním hornin. Mezi odpady vzniklé během těžby hornin řadíme šterky, kamenivo, písky, jíly a další materiály (zrna větší než $500 \mu\text{m}$), které jsou zpravidla používány jako kamenivo do betonu, do hutněných asfaltových vrstev, pro stabilizované podklady, nestmelené vrstvy a pro zemní práce. Mezi odpady vzniklé zpracováním hornin řadíme brusné kaly a jiné odpady z řezání a broušení kamene a odprašky vzniklé při drcení a mletí (zrna menší než $500 \mu\text{m}$).

Rostoucí produkce mramoru může způsobit vážné problémy pro životní prostředí. Jedná se především o degradaci půdy, znečištění ovzduší, znečištění vody, zvýšení výskytu prachu, poškození flóry a fauny. Z uvedených důvodů je proto důležité vytvořit aplikaci těchto odpadů, díky níž by došlo ke zlepšení bezpečnosti a ochrany zdraví snížením prachových částic ve vzduchu, k minimalizaci nákladů za skladování, dopravu a manipulaci s odpady a zvýšení možnosti produkce příjmu z prodeje recyklátů [8].

Studie množství odpadního materiálu na bázi mramoru byla provedena pro tři oblasti, a to:

- Egypt (rozvojová země s velkou produkcí béžového mramoru),
- Itálii (vyspělá země s velkou produkcí béžového mramoru),
- Česká republika (tuzemský průmysl s nižší produkcí mramoru).

I když se na první pohled zdá, že podobným problémům s odpadním mramorem je Evropa a Česká republika „ušetřena“, není tomu tak, tudíž je vhodné najít aplikaci odpadních materiálů na bázi mramoru i v tuzemsku.

Množství odpadního materiálu na bázi mramoru v Egyptě

Kamenný průmysl zaznamenal v Egyptě za posledních 16 let extrémní vývoj. Investice v tomto odvětví činily více než 1,5 miliardy dolarů a výsledkem je, že Egypt zaujímá pátou příčku mezi zeměmi produkující kámen a čtvrté místo v produkci mramoru a žuly [9]. Dokonce podle výroční zprávy vydané roku 2011 je Egypt celosvětově na druhém místě společně s Itálií v těžbě béžového mramoru (Obrázek 3). Většina této těžby pochází z průmyslové zóny Shaq El Thoaban, nacházející se východně od Káhiry [3].

Velká poptávka po mramoru na vývozních trzích vedla ke zvýšení produkce bez ohledu na způsob (kvalitě) těžby a dopadů na životní prostředí. Zvýšení produkce bylo docíleno použitím odstřelu, který má destruktivní vliv na kamenolom a způsobuje obrovské množství odpadu (> 66 %). Odhadované množství pro Egypt je 6,4 milionů tun ročně [10], tj. pro představu více než 1,5 násobek vzniklého stavebního odpadu v Egyptě [9]. Uvedený odpad se skladuje v oblastech poblíž míst, kde dochází k těžbě, a tak brání dalšímu rozšiřování kamenolomů a má negativní vliv na udržitelný rozvoj těchto oblastí (Obrázek 4). Další velké množství odpadu produkují tovární linky zpracovávající mramor, které se nacházejí v okolí kamenolomů. Výrobní linky tvoří dva druhy odpadů. První je ve formě pevných odpadů, jež vznikají vyřazením mramorových bloků z linky kvůli jejich špatnému tvaru v souvislosti s poškozením struktury mramorového bloku (rozbití, popraskání apod.). Druhou formu odpadů představuje mramorový kal, který vzniká během řezání bloku nebo při procesu broušení a leštění. Odpad, jenž je produkován továrními linkami, se odhaduje pro egyptskou oblast na jeden milion tun ročně. Většina tohoto odpadu je ukládána v blízkosti továren bez ohledu na jejich další možné využití [10].

Množství odpadního materiálu na bázi mramoru v Itálii

V Itálii se nachází jedno z nejstarších nalezišť mramoru Carrara. Uvedená oblast obsahuje víc než 54 lomů pokrývající oblast 69 km² [12]. Jedná se o ložisko mramoru, které je zpracováváno po dobu více než 2 000 let. Zdejší lomy vykazují roční produkci kolem 6,5 milionů tun materiálu, z toho tvoří 2 485 tisíc tun odpadní materiál, tj. přibližně



Obrázek 4: Ukládání mramorového kalu v okolí továren [10, 11].

40 % [13]. Stejně jako v předchozím případě je odpad ukládán v okolí průmyslu na těžbu a zpracování mramoru (Obrázek 5).

Itálie vykazuje jedno z nejnižších podílů odpadního mramoru na produkci ve světě. V minulosti však tomu tak nebylo. V minulém století tvořil odpad 75 hm. % a pouze 25 hm. % bylo komerčně využito [14]. Díky tomu je v současnosti uloženo na skládkách víc než 66 miliónů tun odpadu [15]. Itálie investovala v posledních letech mnoho finančních zdrojů do projektů, které se věnují snižování množství odpadu nebo jeho případnému zpětnému využití. Výsledkem těchto investic bylo snížení produkce odpadu a zpětného využití přibližně 15 hm. % odpadu.

Množství odpadního materiálu na bázi mramoru v ČR

Množství odpadního materiálu na bázi mramoru je pro oblast České republiky těžké určit, a to z důvodu existence pouze souhrnných statistik pro dekorativní kamen. Podle informačního systému spravovaného Ministerstvem životního prostředí bylo na území České republiky za rok 2017 vytěženo a zpracováno 58 mil. tun materiálu ve formě šterkopísků, dekoračního a stavebního kamene [17]. Podíl odpadů vzniklý při zpracování hornin na primární surovině vytěžené v lomech se u nás pohybuje v nižších desítkách procent. Podle evidence odpadů Českého ekologického ústavu by množství odpadů, z úpravy a dalšího zpracování veškerých hornin, mělo činit něco přes 500 tisíc tun. Udávaný údaj je však patrně podhodnocený. Vavruška odhaduje roční produkci tohoto odpadního materiálu na 2,5 milionů tun [18]. Množství tohoto odpadu každým rokem stoupá a jeho využití je nedostatečné. Z těchto důvodů roste každoročně množství odpadu uloženého na skládkách či odvalech (Obrázek 6). V roce 2010 se množství odpadu odhadovalo na 20 miliónů tun [19]. Dříve stavěla řada provozovatelů u lomů malé drtičky, které zpracovávaly odpa-



Obrázek 5: Lom Carrara v Toskánsku, Itálii [16].

dový materiál z těžby bloků a drobný odpad z ruční kamenické výroby. Roční produkce se při tehdejších objemech těžby pohybovala kolem 5 tisíc tun drceného kameniva. Způsob zpracování se udržel až do 50. let minulého století, kdy zanikl. V 70. letech pak byly provedeny pokusy o znovuobnovení toho procesu na lomech těžících dekorační kámen v žulových oblastech, avšak kvůli nerentabilitě zanikly [19].



Obrázek 6: Odkrytá skládka v západním svahu odvalu dolu Emanuel – vlevo, severní svah „Buštěhradská haldy“ – vpravo [20].

2.3 Chemické složení mramorových odpadů

Díky chemickému složení je možné předběžně určit potenciální možné využití recyklovatelného odpadního mramoru, kde je odpad tvořen z původního materiálu (mramoru) a dalšího znečištění v podobě brusných kalů a jiných látek na skládkách. Samotný mramor je majoritně tvořen z nerostů kalcitu a dolomitu. Někdy také mramor obsahuje v malém množství další nerosty, jako například křemen, tremolit, albit, plagioklas, aktinolit, muskovit, diopsid, flogopit, granát, spinel či diopsid. Celkově tedy obsahuje vysoký podíl vápníku, potažmo CaCO_3 (uhličitan vápenatý), a hořčíku, tedy MgCO_3 (uhličitan hořečnatý).

Existuje několik odborných pramenů, v nichž se jejich autoři zabývají chemickým složením mramorového odpadu na skládkách v různých oblastech:

- A. O. Mashaly a kol. [10] provedl chemickou analýzu vzorků mramorových kalů. Vzorky pocházely z 25 různých továren z oblasti Shaq El Thoaban (Egypt). Pro zjištění množství CaCO_3 a MgCO_3 byla použita gravimetrická metoda. Obsah CaCO_3 ve vzorcích mramorového kalu se nacházel v rozmezí od 82,58 hm. % do 98,84 hm. %, s průměrem 91,53 hm. %. Množství MgCO_3 nebylo dominantní a pohybovalo se v rozmezí od 0 do 11,44 hm. %, s průměrem 1,48 hm. %. Ostatní látky byly přítomny od 1,15 hm. % do 22,27 hm. %, s průměrem 7,34 hm. %. Uvedený zbytek zastupuje všechny jíly a písky vyskytující se v mramoru a také všechny nečistoty, které byly přidány do kalu v průběhu zpracování mramoru.
- V roce 2015 byl proveden výzkum zaměřený na charakterizaci odpadního mramoru na skládkách v oblasti Caravara Ravanetiho (Itálie) [15]. Pro účely vzorkování byly vybrány dvě skládky, a to: Calocara a Lorano. Na základě granulometrie byl materiál rozdělen do těchto tří skupin: 0,5 – 4 mm, 0 – 25 mm, 0 – 150 mm. Na uvedených třech skupinách byly provedeny mineralogické a geochemické analýzy. Výsledkem těchto zkoušek bylo zjištění, že odpadní mramor se skládá téměř z čistého CaCO_3 (od 97,5 hm. % do 99,5 hm. %). Ostatní látky (od 0,5 hm. % do 2,5 hm. %) tvořily nečistoty a další minerály. Oproti závěrům z předchozí studie je čistota odpadního materiálu vyšší, neboť se jednalo především o odpadní materiál vzniklý z těžby a nikoliv ze zpracování mramoru (leštění, řezání).
- Další studie od N. Ural a kol. [21] byla uskutečněna pro oblast Bilecik (Turecko) pomocí rentgenové difrakce. Odběr vzorků byl proveden ze tří skládek, přičemž každá se nacházela v jiné oblasti. Jednalo se o centrální oblast Gölpazari a Yenipazar. Odebraný materiál byl frakce od 0 do 25 mm. Výsledky studie byly obdobné jako ve dvou předchozích případech. Majoritní část tvořil kalcit (CaCO_3) od 98 hm. % do 99 hm. % a ostatní látky byly složeny především z karbidu křemíku (brusné médium).

Z výsledků je patrné, že základní složka mramoru ukládaného na skládky je CaCO_3 , v závislosti na krystalické mřížce se může jednat o kalcit, aragonit nebo vaterit. Znečištění v průběhu zpracování mramoru je minimální a obsahuje křemík.

2.4 Možnosti zpracování mramorových odpadů

Je zřejmé, že mramorový průmysl vytváří až několik milionů tun odpadu ročně (blíže viz podkapitola 2.2). Skladování těchto odpadních materiálů je možné, ale značně zatěžuje životní prostředí a má negativní vliv na udržitelný rozvoj oblastí, v nichž dochází k těžbě a zpracování kamene. Z těchto důvodů by měl být mramorový odpad řádně použit bez znečištění životního prostředí. Nejvhodnější metodou se v dnešní době jeví použití recyklace, která poskytuje některé výhody, jako je ochrana přírodních zdrojů a úspora energie, což přispívá k lepší ekonomice a snižování odpadních materiálů.

V současné době spočívá nejrozšířenější možný způsob, jak využít recyklovaný mramorový odpad, v aplikaci do kompozitních materiálů na bázi cementu. Kompozitní materiály na bázi cementu (ve formě monolitických železobetonů, prefabrikátů, tvarovek atd.) představují v současné době patrně nejrozšířenější a nejpoužívanější stavební materiál. Z pohledu udržitelného rozvoje jsou pro výrobu cementového kompozitu potřeba tři základní složky (cement, písek a voda). Jejich těžba, úprava a zpracování jsou však zátěží pro přírodu a okolní prostředí [22]. Konkrétně výroba cementu představuje 7 % celosvětové produkce CO_2 a dále velké množství NO_x . Existují oblasti (Indie, Saudská Arábie, část Číny a jiné) s fyzickým nedostatkem vody, a proto spotřeba vody není také žádoucí, resp. by bylo vhodné ji snížit. V mnoha lokalitách (např. na Středním východě) dochází stavební písek. Původní ložiska jsou vyčerpána a problém je řešen dopravou ze vzdálených lokalit, např. Saudská Arábie dováží vhodný písek z Austrálie [23]. Využitím mramorového recyklátu dojde k výraznému snížení nákladů na vstupní surovinu do betonu [24]. Například použití odpadní mramorové moučky v cementovém kompozitu vede ke snížení emisí CO_2 o 12 % a snížení nákladů na kompozit ze 40 USD/m³ na 33 USD/m³ [25]. Konkrétními příklady aplikace mramorového kalu jsou samozhutnitelný beton [26, 27], beton pro nosné konstrukce [28–32], v lehčených tvárnících v kombinaci s dřevěným prachem [33], při výrobě cihel [34], v průmyslu pálené hlíny [35], ve zdících kompozitních materiálech s popílky nebo se skelným prachem [36], při výrobě betonových dlažebních bloků [37], ke snížení pórovitosti v zeleném betonu [38], ve výrobě dutých betonových tvárníc [39], při zvyšování kvality cihel [29, 40, 41].

Základní složkou mramoru je CaCO_3 (blíže viz podkapitola 2.3). Z tohoto důvodu se mohou mramorové kalové odpady používat i v aplikacích přímo nesouvisejících s pozemními stavbami. Jedná se o následující aplikace: v odsiřovacích procesech [42], k čištění odpadních vod [43], ve výrobě keramiky [35, 44–48], v sanaci půdy kontaminované kovy prvky [49], jako nadouvadlo ve výrobě pěn slitiny Al-Mg-Si [50].

2.5 Technologie recyklace pro využití ve stavebnictví

Před samotnou recyklací odpadních mramorů v cementových kompozitech je důležitá jejich úprava. Podle české Asociace pro rozvoj recyklace stavebních odpadů je celkový proces rozdělen na tři základní procesy, a to: předtřídění, zpracování odpadu a následné třídění.

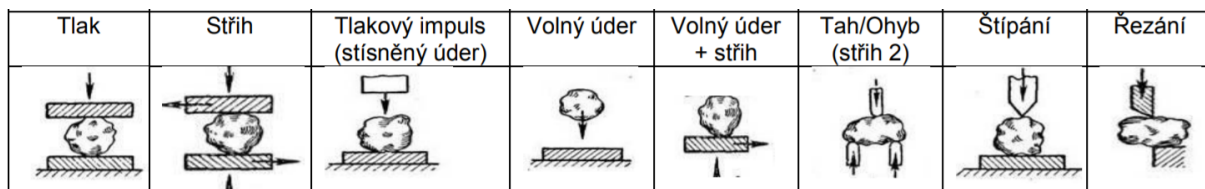
Předtřídění a třídění není v rámci zpracování odpadního materiálu z kamenného průmyslu potřeba, jelikož odpady z kamenného průmyslu nejsou kontaminovány jinými materiály jako v případě demoličních odpadů, kde látky tvořící odpad vždy závisí na konkrétní stavbě a v ní použitých materiálech. V případě brusných kalů může mramorový odpad obsahovat menší množství brusného média s vyšším obsahem křemíku. Křemík nelze považovat za kontaminaci, neboť je obsažen v samotném mramoru ve formě jílových minerálů.

V dnešní době je zpracování mramorových odpadů rozděleno do dvou skupin v závislosti na druhu odpadu (blíže viz podkapitola 2.2). První skupinu představuje zpracování a recyklace pevného odpadu (zrna větší než 0,5 mm), kde se efektivita zpracování blíží ke 100 %, tedy odpadní materiál je zcela využit, zrecyklován a netvoří enviromentální riziko. Recyklace probíhá pomocí drcení. Větší kusy mramoru jsou drceny a tříděny do různých frakcí pro použití jako plniva v betonu. Drcení je provedeno za použití drtiče. Jedná se o stroj sloužící k rozmělnění materiálu do formy zrn, nikoliv však až na prach. Největší nevýhodou je, že při drcení dochází ke vzniku dalšího odpadu, a to odprašků. Konstrukce drtiče vychází z fyzikálních vlastností drceného materiálu. Rozeznáváme tři základní druhy drtičů [51]:

- čelistové drtiče, které jsou určeny pro primární drcení skoro všech materiálů, kromě železobetonu, vyrábějí se v řadách o výkonu od několika tun až po více než 1000 tun/h,
- kuželové drtiče, jež mají výkon od několika desítek až po 800 tun podrceného materiálu za hodinu,
- odrazové drtiče, které mají vertikální i horizontální hřídel rotoru. Materiál se rozpojuje pomocí rotujících lišt a odrazem od pevných desek. Odrazové drtiče se vyrábějí v řadách o výkonu od několika tun po více než 1800 tun/h.

Druhou skupinu tvoří odpady vzniklé při zpracování mramoru (mramorové kaly a odprašky), tj. zrna menší než 0,5 mm, kde je v dnešní době zrecyklováno od 10 do 20 hm. % vzniklé mramorové moučky. Zbylá část odpadu se ukládá na skládkách [52]. Recyklace probíhá za využití mletí a výsledný produkt může tvořit mikroplnivo v cementových kompozitech a nebo také náhradu za pojivo. Mletí je proces, v jehož průběhu dochází k zjemňování zrnitosti a zvětšování měrného povrchu materiálu [53]. Působením na materiál se dosahuje požadovaných efektů, a to prostřednictvím několika základních mechanismů.

(Obrázek 7) [54]. K procesu mletí dochází obecně tehdy, je-li zrnů upravovaného materiálu dodávaná energie dostatečně vysoká k překonání jeho vnitřní soudržnosti [55]. Nejčastější způsob předávání energie je mechanický, tedy předávání kinetické energie. Existují ale i jiné způsoby předávání energie upravované látky, které se používají pouze v omezené míře. Jedná se o ultrazvukové, šokové termické, elektrické a elektrohydraulické mechanismy.



Obrázek 7: Základní mechanismy mletí [53].

Klasické mlýny, jako jsou kulový, prstencový, tyčový, kolový, válcový, kotoučový či vibrační mlýn, využívají kombinaci mechanismů mletí pomocí tlaku, střihu a tlakového impulsu a v průběhu mletí je působeno na částice či na vrstvu částic mezi pracovními tělesy. Uvedené tři mechanismy jsou málo efektivní, a to hlavně z energetického hlediska. K menší efektivnosti dochází proto, že před rozmělněním částic upravované látky musí být překonána adheze mezi mlecím tělesem a částicemi. Další nevýhodou je, že k procesu mletí dochází při relativně malých rychlostech. Energie použitá pro mletí se změnila v plastickou deformaci nebo dojde ke změně vnitřní struktury (dvojčatění) a nedochází k úpravě zrnitosti [54]. Při těchto procesech se převážná většina vložené energie přemění na teplo. Z uvedeného důvodu se mramorové kaly tradičně nemelou a jsou využívány ve svém surovém stavu.

Novou možností recyklace je využití vysokoenergetického mletí, které se vyznačuje tím, že dochází k předání velkého množství energie na jednotku upravovaného materiálu [56]. V průběhu mletí také převládají tři základní mechanismy dezintegrace částic (tlak, střih a tlakový impuls), ale k procesům dochází za vysokých rychlostí, a tedy i s vyšší energetickou účinností. Pro popsání energetické účinnosti existují dvě základní teorie, a to Rittingerova teorie a Kickova teorie. Podle první z nich je práce potřebná na zjemnění úměrná velikosti nově vytvořených povrchů. Oproti tomu u Kickovy teorie je práce úměrná k hmotnosti zrn [57]. Všeobecně platí, že vysokoenergetické mletí je výhodné pro zjemňování materiálů v oblastech zrnitosti okolo 0,05 mm. Z těchto důvodů je tato technologie recyklace vhodná pro úpravu mramorových kalů, jež mají střední velikost zrna okolo 0,02 mm [58].

Vysokoenergetické mletí se také osvědčilo ke zpracování betonových odprašků vzniklých během drcení odpadního materiálu [58, 59]. Na mletí se používá vysokorychlostní mlýn, který je vybaven patentovanými břity s extrémní tvrdostí a dlouhou životností. Výhodou řešení je nastavení různého stupně jemnosti mletí. Nevýhodou je naopak nižší

produktivita, jež se pohybuje od 20 kg/h do 1,2 tun/h [60]. Vzniklý recyklovaný materiál je mechano-chemicky aktivovaný. Právě efekt mechano-chemické aktivace umožňuje mnohem efektivnější využití energie vynaložené na úpravu – mletí materiálu a to díky akumulaci její části v podobě zvýšené entalpie upravovaného materiálu. Efekt mechano-chemické aktivace umožňuje ve vysokorychlostních mlecích zařízeních [53]:

- uskutečňování chemických reakcí v pevném stavu při mletí (např. oxidace či výměnné reakce),
- iniciaci fázových změn (ne pouze amorfizace) v různých látkách,
- průběh katalytických reakcí v procesu mletí.

Především z důvodu efektivnímu využití pevného odpadu z mramoru (ve formě kameniva do betonu) se dále rešerše bude zabývat využitím mramorové moučky, kterou lze v cementových kompozitech využít dvěma způsoby, a to jako náhradu za jemné kamenivo nebo jako náhradu za pojivo.

Recyklace odpadní mramorové moučky formou náhrady jemného kameniva v betonu

Corinaldesi a kol. [26] zkoumali vliv mramorového prachu použitého v betonu a maltě jako náhradu za písek. Výsledný cementový kompozit dosahoval vyšších pevností v tlaku a v tahu za ohybu než referenční materiál. Dále měl mramorový prášek ve všech testovaných směsích pozitivní vliv na mechanické vlastnosti v počátečním stadiu hydratace.

Hebhoub a kol. [32] se zabývali možnostmi nahradit přírodní kamenivo pomocí odpadního mramoru v cementovém kompozitu. Pro experimentální výzkum byly použity tři různé betonové směsi, v níž bylo 25, 50, 75 a 100 hm. % přírodního písku nahrazeno mramorovým kamenivem. Výsledky ukázaly, že použití odpadního mramorového kameniva mělo pozitivní vliv na pevnost v tlaku, kdy nejvyšší pevnost v tlaku vykazovaly směsi se 75 hm.% substitucí.

Uygunoglu a kol. [61] použili odpadní mramor, odpadní beton a drcený pískovec jako náhradu kameniva v prefabrikovaných betonových blocích. Závěry jejich studie ukázaly, že nejvhodnější materiál pro plnivo byl odpadní mramor vzhledem k jeho pozitivnímu vlivu na mechanické vlastnosti, jako je pevnost v tlaku a pevnost v příčném tahu.

Autoři Omar a kol. [62] se ve své studii zaměřili na použití odpadního vápencového kameniva jako náhrady za jemné kamenivo v kombinaci s příměsí ve formě mramorového prášku v betonových směsích. Příměs do betonu ve formě mramorového prášku byla použita v 5 hm. %, 10 hm. % a 15 hm. % a substituce kameniva byla 25 hm. %, 50 hm. % a 75 hm. %. Sledovanými vlastnostmi výsledného materiálu byly pevnosti v tahu za ohybu, pevnosti v tlaku, pevnosti v příčném tahu, modul pružnosti a testy propustnosti. Zjiš-

tění naznačila, že použití vápence zlepšilo zpracovatelnost čerstvé směsi a v kombinaci s mramorovým práškem došlo ke zlepšení mechanických vlastností betonových směsí.

Mishra a kol. [63] pro změnu testovali mramorový kal vzniklý z procesu broušení mramoru. Ke sledovaným vlastnostem patřily mikrostruktura a pevnost betonu v tlaku. Výsledky ukázaly, že při zvýšení náhrady za běžně využívané přírodní kamenivo došlo ke zvýšení pevnosti v tlaku bez toho, aby došlo ke změně v mikrostruktuře cementového kompozitu.

Khyaliya a kol. [64] zkoumali mechanické vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu, který obsahoval náhradu jemného kameniva v různých poměrech. Odpadní mramorové odprašky nahradily kamenivo z 0 hm. %, 20 hm. %, 50 hm. % a 100 hm. %. Zlepšení v mechanických vlastnostech betonu bylo pozorováno ve směsích s náhradou do 50 hm. %. Důležité aspekty i poznatky využití mramorového kalu se zaměřením na aplikaci v cementových kompozitech jsou shrnuty v Tabulce 1.

Recyklace odpadní mramorové moučky formou náhrady pojiva v betonu

Aruntas a kol. [80] se věnovali vlivu odpadního mramorového prachu použitého jako přísada při výrobě kompozitních betonů. Ve studii byl zkoumán vliv odpadního mramorového prášku, který nahradil cement v množství 2,5 hm. %, 5 hm. %, 7,5 hm. % a 10 hm. %. Testovány byly mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti betonů s dvěma druhy cementu, a to CEM I a CEM II. Výsledky ukázaly, že 10 hm. % náhrada splnila všechny normové požadavky a měla pozitivní vliv na mechanické vlastnosti.

Ergun [81] zkoumal použití odpadního mramorového prachu a břidlice jako částečné náhrady cementu v betonových směsích. Poměr w/c byl mezi 0,50 a 0,63 v závislosti na zpracovatelnosti čerstvé směsi. V závislosti na pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku byl stanoven optimální poměr použití mramorového prášku a břidlice pro nahrazení cementu. Pevnost v tlaku a v tahu za ohybu byla měřena pro různou dobu zrání betonu (7., 28. a 90. den). Výsledky ukázaly, že vzorky betonu obsahující 10 hm. % břidlice a 5 hm. % odpadního mramorového prachu vykazovaly optimální hodnoty pevností v tlaku a v tahu za ohybu.

Sheike a kol. [82] se zabývali vlivem použití mramorového prachu v kombinaci s křemičitým úletem jako náhrady za cement na pevnost v tlaku betonu. Studie byla realizována na trámcích o rozměrech $150 \times 150 \times 300$ mm a válci o průměru 150 mm. Výsledky testů naznačují, že nejvyšší pevnost v tlaku měla směs s 8 hm. % mramorového prášku a 8 hm. % křemičitého úletu, a to jak pro vzorky ve formě trámů, tak pro válcové vzorky.

V jiné studii, jejímž autorem je Soliman [83], byl zkoumán vliv mramorového prášku na železobetonové prefabrikáty. Výsledky ukázaly, že použití mramorového prášku, jako náhrady za cement, zlepšuje zpracovatelnost a zvyšuje pevnost v tlaku a v tahu za ohybu. Jednotlivé poznatky z této kapitoly jsou shrnuty v Tabulce 2.

Tabulka 1: Souhrnná tabulka publikovaných studií na téma: Náhrada kameniva mramorovou moučkou v betonu.

Ref.	Testované náhrady [hm. %]	Doporuč. náhr. [hm. %]	Měřené vlastnosti
[65]	5; 25; 50; 100	100	fc, P, S, Edin
[66]	od 0 do 80 po 10	80	XRD, DTA, SEM
[26]	0; 10; 20	10	XRD, DTG, fc
[67]	0; 5; 10; 15; 20	10	fc, W, ft
[68]	0; 10; 20; 30; 40	40	XRF, Fc, A
[32]	0; 25; 50; 75; 100	75	P, W, fc, fb
[61]	0; 10; 20; 30; 40	40	Ab, fc, fp, P, A, F
[62]	0; 5; 10; 15	15	fc, ft, A, Edin
[69]	0; 20	20	XRF, fc, fp, W
[63]	0; 2,5; 5; 7,5; 10	10	fc, SEM
[70]	0; 20; 50; 100	0	W, f,c fp, Edin, Ab
[11]	0; 5; 7,5; 10; 15	15	TGA, XRD, SEM, fc, fp, P, W
[71]	0; 20; 50; 100	50	W, fc, A
[72]	0; 20; 50; 100	20	W, fc, fp
[73]	od 0 do 15	10	fc, fp, A
[74]	0; 20; 40; 50	50	P, fc
[75]	0; 20; 50; 100	20	W, A, CHRL, smršt.
[76]	od 0 do 50 po 5	45	fc, fp
[77]	0; 20; 40; 60; 80; 100	100	W, fc, XRD
[78]	0; 25; 50; 75; 100	75	fc, A, W, smrštění
[79]	0; 10; 15; 20; 30	20	W, fc

Pozn. fc – pevnost v tlaku, fb – pevnost v tahu za ohybu, fp – pevnost v příčném tahu,
P – porozita, W – zpracovatelnost, A – absorpce vody, Ab – abrazivní test,
Edin – modul pružnosti, F – mrazuvzdornost

Tabulka 2: Souhrnná tabulka publikovaných studií na téma: Náhrada cementu mramorovou moučkou v betonu.

Ref.	Testované náhrady [hm. %]	Doporuč. náhr. [hm. %]	Měřené vlastnosti
[80]	0; 2,5; 5; 7,5; 10	10	fc, fb, W
[26]	0; 10; 20	10	XRD, DTG, fc
[67]	0; 5; 10; 15; 20	5	fc, W, ft
[81]	0; 5; 7,5; 10	5	fc, fb
[84]	0; 5; 10; 15; 20	10	fc
[85]	0; 10; 15; 20	10	fc, fp
[82]	0; 8; 12; 16	8	W, fc
[83]	od 0 do 20 po 2,5	5	A, fc, Edin, fp
[86]	0; 5; 10; 20	5	fc, Edin, A
[11]	0; 5; 7,5; 10; 15	5	TGA, XRD, SEM, fc, fp, P, W
[87]	0; 5; 10; 15; 20; 25	0	fc, fb, A
[88]	0; 7,5	0	fc
[89]	0; 5; 10; 20	10	W, fc, fp, Edin
[90]	0; 10; 20; 30; 40	10	XRD, W, fc
[91]	0; 10; 15; 20; 25	15	fc, W, SEM, TGA, XRD, smršt.
[92]	0; 5; 10; 20	5	W, fc, fp

Pozn. fc – pevnost v tlaku, fb – pevnost v tahu za ohybu, fp – pevnost v příčném tahu, P – porozita, W – zpracovatelnost, A – absorpce vody, Ab – abrazivní test, Edin – modul pružnosti, F – mrazuvzdornost

Z Tabulky 1 a 2 jsou patrné rozdílné závěry jednotlivých autorů. Jedná se především o důsledek to, že v příslušných pracích byla použita rozdílná zrnitost odpadní mramorové moučky, různé složení betonových směsí za využití stavební chemie, různé způsoby ošetřování vzorků a rozdílné způsoby testování. Z uvedeného důvodu je z pohledu další části práce problematika výsledků řešena podrobněji ve třech různých podkapitolách, a to s ohledem na vlastnosti čerstvé betonové směsi, na fázové složení výsledného cementového tmelu a na pevnostní charakteristiky.

2.6 Vliv odpadní mramorové moučky na vlastnosti čerstvého betonu

Tvar, měrný povrch a struktura jemných částic má nejvýznamnější dopad na výsledné vlastnosti čerstvého betonu. Jedná se především o zpracovatelnost a s tím spojené množství záměsové vody. Mramorová moučka svou strukturou a rovností povrchu napomáhá zlepšení zpracovatelnosti betonu. Měrný povrch mramorové moučky se většinou pohybuje od 150 do 300 m²/kg, což je velmi podobný měrný povrch jako v případě běžně využívaných jemných filerů. Velkou nevýhodou je tvar zrna, který je závislý na hornině, kde mramor krystalizoval. Zrna mramorové moučky mají tvar ostrohranných šupinek, jež mají vysoký poměr stran a nízkou hodnotu kruhovitosti [93].

Siddique a kol. [94] zkoumali zpracovatelnost čerstvé betonové směsi s využitím mramorové moučky (od 0 hm. % do 20 hm. %) jako náhrady cementu. Mramorová moučka vznikla jako odpad z procesu broušení a řezání mramoru. Použitá mramorová moučka byla frakce 0 – 90 mikronů a z 99 hm. % byla tvořena CaCO₃. Všechny testované směsi betonu měly stejný vodní součinitel, a to 0,42. Zpracovatelnost čerstvé směsi byla měřena pomocí sednutí kužele, kde referenční směs (bez mramorové moučky) dosahovala hodnoty sednutí 88 mm, a směs s největším obsahem mramorové moučky (20 hm. %) měla hodnotu 74 mm, tj. zhoršení zpracovatelnosti o 15 %. Autoři přisuzují zhoršenou zpracovatelnost vlivu tvaru zrn.

Obdobný efekt lze nalézt v dalších experimentálních pracích [32, 82, 92]. Oproti tomu lze také najít práce dalších autorů, kteří dosahovali stejné [11] nebo lepší zpracovatelnosti čerstvé směsi [80, 90]. Munir a kol. [90] se věnovali zpracovatelnosti čerstvé betonové směsi s náhradou cementu až 40 hm. % mramorové moučky. Oproti předchozí studii byla mramorová moučka mleta pomocí kulového mlýnu pro úpravu tvaru zrn a dezintegraci shluků v mramorovém kalu. Výsledná mramorová moučka dosahovala obdobného měrného povrchu jako referenční cement, a to 269 m²/kg. Výsledky experimentu ukázaly zlepšení konzistence čerstvé směsi u směsi s 40% náhradou o 5 %.

2.7 Vliv odpadní mramorové moučky na fázové složení a mikrostrukturální charakteristiky cementových kompozitů

Před stanovením samotného vlivu odpadního mramoru na složení a mikrostrukturální charakteristiky cementového kompozitu je nutné přiblížit mikrostrukturu, fázové složení a průběh hydratace samotné cementové pasty. Dle ČSN EN 197-1 rozeznáváme několik druhů cementů v závislosti na jejich složení, respektive množství příměsí [95]:

- CEM I – Portlandský cement obsahuje pouze Portlandský slínek,
- CEM II – Portlandský cement směsný obsahuje Portlandský slínek a až 35 hm. % příměsí ve formě mikromletého popílku, strusky nebo vápence,
- CEM III – Vysokopeční cement obsahuje Portlandský slínek a vysokopeční strusku v množství až 95 hm. %,
- CEM IV – Pucolánový cement, jenž se v současné době v ČR nevyrábí,
- CEM V – Směsný cement obsahuje Portlandský slínek a až 60 hm. % příměsí v podobě strusky, popílku a vápence.

Hydratace Portlandského slínku

Po smísení vody s Portlandskými slínky dochází k hydrataci cementu, kompozit tuhne a postupně nabývá na pevnostních charakteristikách. V průběhu reakcí s vodou dochází ke vzniku jemných krystalů a původní minerální fáze cementu se přeměňují za uvolňování tepla na hydratační produkty, tzv. C-S-H gel. Nově vzniklé hydratační produkty (vzniklé pomocí hydrolyzy) jsou nerozpustné ve vodě a obsahují chemicky vázanou vodu. Základními slínkovými minerály jsou trikalciurní aluminát – $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (dále jen C_3A), trikalciurní silikát – $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (dále jen C_3S), kalcium aluminát ferit – $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (dále jen C_4AF) a dikalcium silikát – $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (dále jen C_2S), kde C_3A reaguje v cementu jako první a C_2S jako poslední [96]. Reakce jednotlivých slínkových minerálů lze popsat následovně:

- C_3S je díky svému největšímu objemovému zastoupení v cementu nejdůležitější složkou. V průběhu hydrolyzy C_3S vznikají dva typy C-S-H gelu současně s přesycením roztoku $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – portlandit (dále jen CH). CH se vylučuje v jemných krystalcích, nejčastěji destičkovitého tvaru [97,98]. Celý průběh hydrolyzy je popsán podle rovnice [99]:



kde typ vzniklého C-S-H gelu je závislý na parametrech x , y a z . C-S-H gel s vyšší hustotou (dále HD C-S-H gel) má parametry $x = 0,5 - 1,5$; $y = 1$ a $z = 0,5 - 2,5$.

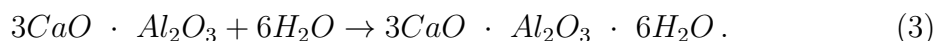
C-S-H gel s nižší hustotou (dále LD C-S-H gel) má parametry $x = 1,5 - 2,0$; $y = 1$ a $z = 1,0 - 4,0$.

- C_2S mívá v cementu druhé největší objemové zastoupení a jeho reakce je pomalá s menším množstvím uvolněného tepla. C_2S díky své delší a pozdější hydrataci přispívá spíše ke dlouhodobé pevnosti [98–100]. Hydratací C_2S vzniká spíše LD C-S-H gel a jeho průběh vzniku je popsán stechiometricky takto [100]:

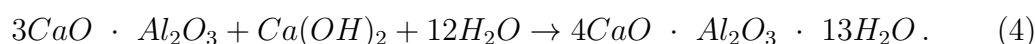


kde hodnota x se pohybuje okolo 4.

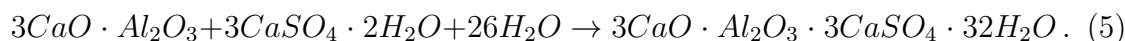
- C_3A má obdobné objemové zastoupení jako C_2S , ale v průběhu reakce má sklon vytvářet hydroalumináty výrazně krystalického charakteru. C_3A reaguje velmi rychle a v průběhu reakce se uvolňuje velmi mnoho hydratačního tepla. Z uvedeného důvodu se k C_3A přidává sádrovec ($CaSO_4$) jako zpomalovač tuhnutí. Konečným stabilním produktem dlouhodobé hydratace C_3A , bez přítomnosti sádrovce, je kubický, který vzniká přes některé meziprodukty. Uvedenou reakci lze vyjádřit rovnicí [100]:



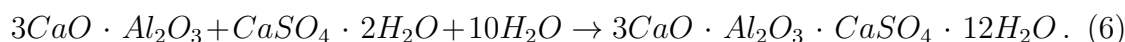
Při přechodu na finální produkt dochází k uvolňování vody a tím se ve struktuře vytváří póry snižující výsledné mechanické vlastnosti cementu. V přítomnosti CH vznikají při hydrataci C_3A hexagonální kalciumhydroalumináty, což lze vyjádřit takto:



Při reakci cementu s obsahem sádrovce dochází ke vzniku ettrignitu. V počátečních fázích reakce tak vzniká především trisulfát (dále jen jako AFt) ve tvaru hexagonálních prismatic. Vznik AFt lze popsat následovně:

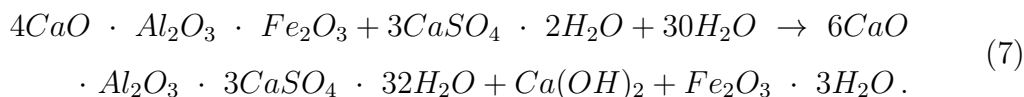


AFt se pak při dostatku C_3A přeměňuje v pozdní fázi hydratace na monosulfát (dále jen jako AFm) mající tvar pseudohexagonálních destiček. Vznik AFM lze popsat následující rovnicí:



V případě nedostatku sádrovce v pozdějších fázích hydratace reaguje přebytečný C_3A stejně, jako bylo popsáno v rovnici 3 a 4 [98–101].

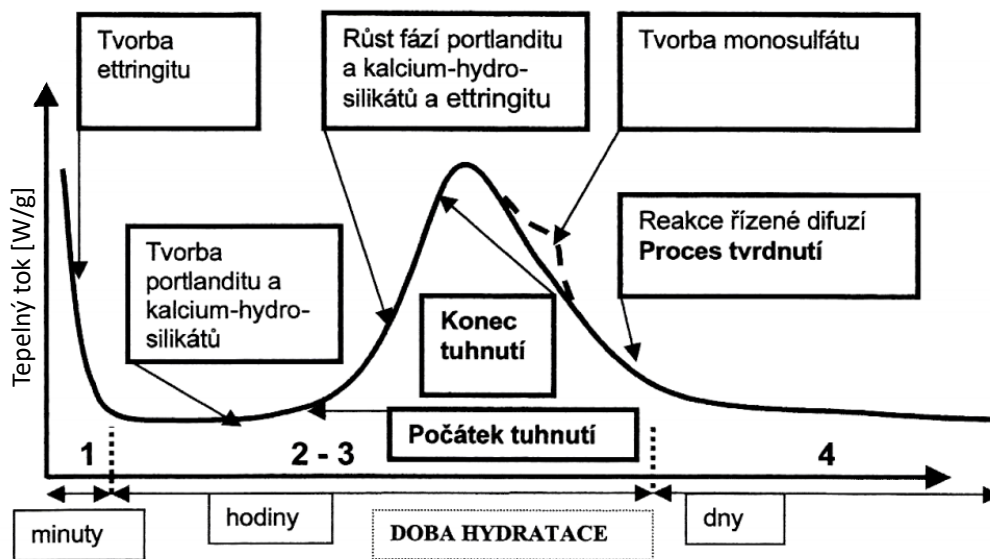
- Hydrolýza C_4AF je ovlivněna ferity, a proto je reakce mnohem pomalejší než reakce C_3A . V průběhu hydratace vznikají stálé produkty $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$ a $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot 6H_2O$, kde přebytek Al_2O_3 utváří amorfni hydroxid. Pokud je v průběhu hydratace přítomen sádrovec, tak dochází ke vzniku AFt [98–100]:



Uvedené hydratační procesy lze shrnout do celkové, zjednodušené představy o tuhnutí a tvrdnutí cementu, podle níž C_3A odštěpuje CH a C_3S přechází do hydrosilikátové fáze (C-S-H gel), která se tvoří na rozhraní Portlandského slínku. Hydrosilikáty tvoří jehlicovité útvary, jež vyplňují prostor mezi zrny cementu, a tím spojují jednotlivé vrstvy C-S-H gelu. Krystalizující hydroalumináty a etringity vznikají hydratací z roztoku. Oba uvedené procesy, tj. vznik hydrosilikátové a hydroaluminátové fáze, probíhají souběžně v kombinaci s krystalizací destičkových CH krystalů, které vznikají z přesyceného roztoku. S pokračujícími reakcemi se další voda chemicky váže, takže gelová hmota postupně tuhne a nabývá pevnostních charakteristik. Typický vývoj hydratačního tepla je znázorněn na Obrázku 8. Finální mikrostruktura je složena z hydrosilikátu, hydroaluminátu, krystalů CH a dosud nezreagovaných slínkových minerálů. Celý vznik finální mikrostruktury cementu lze rozdělit do tří fází v závislosti na čase od smísení s vodou:

- První fáze se nejčastěji nazývá indukční fází a rozděluje se na dvě období. První (předindukční) období je velmi krátké, trvá přibližně od 10 do 15 minut a probíhá v ní smáčení zrn cementu. Vyznačuje se velkou rychlostí uvolněného hydratačního tepla, které trvá krátkou dobu. V tomto období dochází k rozpouštění aluminátů a síranů a vzniku CH a AFt. Druhé (dormantní) období již zdaleka neuvolňuje tolik hydratačního tepla jako první. V průběhu dormantního období vzrůstá viskozita suspenze (dochází k počátku tuhnutí směsi), ale navíc nastává úbytek silikátů a tvoří se zárodky krystalů CH a C-S-H gelu. Druhé období indukční periody je ukončeno asi za 1 – 2 hodiny od zamíchání a pevnost v tlaku cementového tmele je menší než 100 kPa [98, 100].
- Druhá fáze hydratace (akcelerační) probíhá přibližně od 1 až 2 hodin do 12 až 24 hodin po smíchání slínku a vody. V průběhu této fáze dochází k hydrataci C_3S za vzniku dlouhovláknitého silikátu C-S-H gelu a krystalů CH. Zrna cementu se k sobě přibližují tak, že prorůstají krystaly hydratačních produktů. V průběhu této fáze také přetrvává formování AFt. Díky hydrataci, a to zejména C_3S , se tato fáze vyznačuje nejvýraznějším vývojem hydratačního tepla. Po jejím skončení je cementová pasta již ve formě tuhé látky s pevností v tlaku od 1 do 20 MPa [98, 100].

- Třetí fázi hydratace (decelerační) lze opět rozčlenit do dvou etap. První z nich trvá přibližně do 28 dnů od smíchání slínku s vodou a dochází v ní k hydrataci C_2S , postupné přeměně ettringitu z formy AFt do formy AFm a ke vzniku drobnovláknitého C-S-H gelu. Hydratační reakce jsou řízeny difuzí a dochází ke snížení vývinu hydratačního tepla. Druhá etapa obecně trvá až několik let, kdy v průběhu dochází k rekrystalizaci fází v prostoru mezi zrny cementu, tzv. dozrávání [98, 100].



Obrázek 8: Vývoj hydratačního tepla v čase [100].

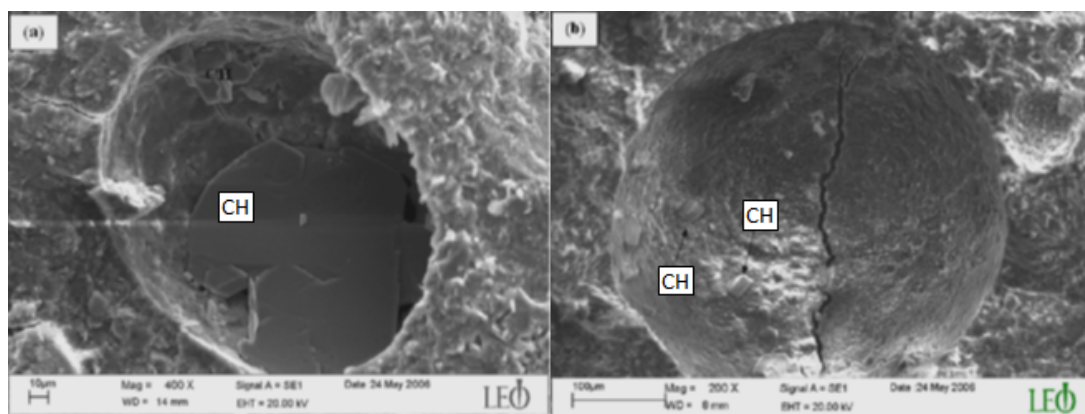
Vliv mramorové moučky

Dle normy ČSN EN 206 je mramorová moučka brána jako inertní příměs, která se nepodílí na hydrataci cementu. V případě bílého a béžového mramoru se jedná o minerální plnivo, jež obsahuje více než 75 % $CaCO_3$ [102]. Chemickým složením je velmi podobný vápenci, který se nechová zcela inertně v průběhu hydratace cementu [103]. Jemná zrna vápence působí v cementu jako nukleační centra pro krystaly CH a urychlují hydrataci silikátových a aluminátových fází. Díky tomu ovlivňuje počáteční nárůst pevností cementového kompozitu a urychluje dobu tuhnutí a tvrdnutí. Navíc se i jemně mletý vápenec dokáže účastnit hydratačních procesů. Jedná se zejména o hydrataci C_3S ze slínku za vzniku kalciumkarbonátaluminát hydrátu ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaCO_3 \cdot 32H_2O$) v cementech s vyšším obsahem C_3A . Trikarbonát může v pozdějších fázích transformovat na stabilnější monokarbonát [104]. Největší nevýhodou vápence, a tedy sedimentu tvořeného z $CaCO_3$, je jeho síranová koroze v kombinaci se silikáty v C-S-H gelu. V průběhu síranové koroze za nižších teplot vzniká krystalický thaumasit ($CaSiO_3 \cdot CaCO_3 \cdot CaSO_4 \cdot 15H_2O$), který

svými objemovými změnami narušuje strukturu, a čímž zhoršuje mechanické vlastnosti a celistvost cementového kompozitu [105].

Existuje několik experimentálních prací, v nichž se jejich autoři snaží uvedené vlivy vápence potvrdit také v případě užití mramoru. Výsledkem studií jsou dvě hlavní proti-čůdná zjištění. Pro ukázkou jsou zde zmíněny reprezentativní studie těchto dvou tvrzení. První tvrzení je popsáno ve studii, kterou napsal Demirel z Technické univerzity Firat v Turecku [65]. Ve výzkumu nahradil jemný písek frakce 0 – 4 mm mramorovým prachem v množství 0 hm. %, 25 hm. %, 50 hm. % a 100 hm. %. Mramorový kal byl frakce 0 – 0,25 mm. Jednalo se o betonovou směs složenou z 25 hm. % cementu CEM I 42,5R, z hrubého říčního písku frakce 4 – 16 mm (35 hm. %) a frakce 0 – 4 mm (40 hm. %). Vzorky o rozměrech 100 × 100 × 100 mm byly před testováním uloženy ve vodě nasycené vápnem.

Z experimentu bylo zjištěno, že pevnost betonu v tlaku rostla se zvyšujícím se hmotnostně procentuálním podílem náhrady mramorovým kalem za plnivo. Dokonce největší hodnota pevnosti betonu v tlaku a dynamického modulu pružnosti byla u betonu se 100 hm. % náhražkou mramorového kalu za jemný písek, zejména v počáteční době tvrdnutí. Podle autora se jedná o vliv vysokému podílu CaCO_3 v mramoru (víc než 50 hm. %), který tvořil nukleační centra pro růst CH krystalů, a tím zvýšil počáteční mechanické vlastnosti betonu. Jako důkaz tvrzení použil snímky z elektronového mikroskopu, z nichž je patrné, že CH ve vzorcích s mramorovým prachem, a bez něho, se od sebe navzájem neliší. CH krystaly se lišily tak, že ve směsi bez náhrad s jemným pískem vznikaly velké CH krystaly, zatímco u směsi, v níž byl jemný písek nahrazen mramorovým kalem, vznikaly velmi malé CH krystaly, které byly rozptýlené přes celou matici (Obrázek 9). Vyšší pevnosti v tlaku betonu 28 dní starých vzorků přisuzoval snížení porozity tomu, že mramorový kal plnil funkci mikroplniva [65].



Obrázek 9: Snímky z elektronové mikroskopie 0 hm. % směs s mramorovým kalem – vlevo, 100 hm. % směs mramorovým kalem – vpravo [65].

Druhé tvrzení je popsáno v práci od autora Aliabdo a kol. [11]. Ti ve studii nahrazovali mramorovým kalem pojivo i plnivo. Jednotlivé testované směsi se mezi sebou lišily ve

velikosti náhrady pojiva a plniva, a to: 0 hm. %, 5 hm. %, 7,5 hm. %, 10 hm. %, 15 hm. %. Střední velikost zrna mramorového kalu byla $8 \mu\text{m}$ a maximální velikost zrna byla $52 \mu\text{m}$. Referenční směs byla složena z 20 hm. % CEM I 42,5R, 30 hm. % jemného písku a 50 hm. % drceného vápence frakce 0 – 19 mm o vodním součiniteli 0,4 a 0,5. Vzorky o rozměrech $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ a $70 \times 70 \times 70 \text{ mm}$ byly před testováním uloženy ve vodní lázni. Použitý mramorový prach byl složen z 98 hm. % CaCO_3 a zbylá dvě procenta obsahovala jílové minerály. Jednalo se o mramorový kal, který byl čistší (větší objemové zastoupení CaCO_3) a ještě jemnější, než v případě předchozí studie [65]. Díky těmto vlastnostem by měl být mramorový kal aktivnější v průběhu hydratace.

Pro získání reprezentativního množství dat bylo použito více experimentálních metod oproti předcházející studii. Výsledkem bylo zjištění, že počáteční doba tuhnutí a konečná doba tuhnutí cementové pasty nebyla ovlivněna použitým obsahem mramorového prachu. Hodnota velikosti smrštění také nebyla ovlivněna přítomností mramorové moučky. Z pohledu na vzniklé fáze bylo z výsledků zkoušek termogravimetrie zjištěno, že nedochází k žádné chemické změně v cementové kaši modifikované s mramorovým prachem v porovnání s referenčním vzorkem, který tvořila cementová kaše. Pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu autoři ukázali, že morfologie vnitřních struktur cementových past s mramorovým kalem, a bez něho, není navzájem od sebe výrazně odlišná (Obrázek 10) a mramorový kal neměl žádnou znatelnou roli během procesu hydratace. Nakonec byly ve studii testovány mechanické vlastnosti, kde pevnost v tlaku cementové malty s mramorovým prachem jako náhražkou za cement byla větší nebo shodná s referenčním vzorkem. Přímo pevnost v tlaku u směsi s 15,0 hm. % náhražkou cementu za mramorový prach byla stejná jako u referenčního vzorku. Pokud šlo o náhradu za jemné plnivo, tak nahrazením 15 hm. % plniva za mramorový prach mělo za následek zlepšení pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu přibližně o 10 %. Mezi testovanými mechanickými vlastnostmi byla i soudržnost cementové matrice s ocelovou výztuží, kde použití mramorového prachu až do množství 15,0 hm. % jako náhrady pojiva nebo plniva pozitivně ovlivňovalo vazby mezi ocelovou výztuží a betonem. Nejvyšší hodnotu soudržnosti mezi ocelí a betonem měla směs s 10,0 hm. % náhrady pojiva mramorovým kalem. Všechny pozitivní vlivy na mechanické vlastnosti betonu a cementových kompozitů autoři vysvětlovali snížením porozity betonu, kde došlo k jejímu snížení ze 14 % na 11 %.

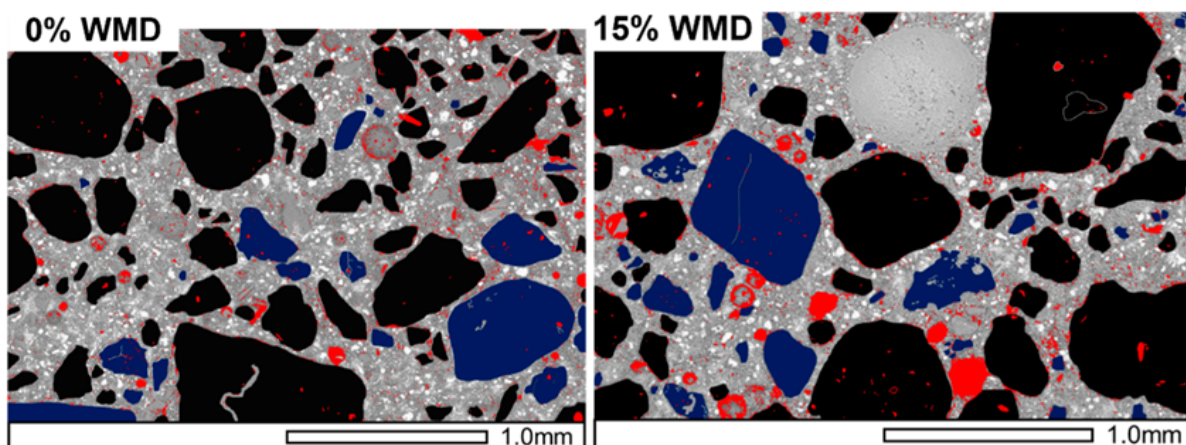
Na stranu druhého tvrzení se staví ve své studii Seghir a kol. [106]. V této práci byl použit odpadní mramorový prach s maximální velikostí zrna $110 \mu\text{m}$ a objemové zastoupení CaCO_3 bylo 99 %. Testované směsi cementových kompozitů obsahovaly 25 hm. % pojiva a zbylé množství tvořilo plnivo ve formě písku frakce od 0 do 2 mm. Jako pojivo bylo použit Portlandský cement CEM I 42,5R s 0 hm. %, 5 hm. %, 10 hm. % a 15 hm. % náhradou ve formě mramorového kalu. Vodní součinitel všech testovaných směsí byl $w/b = 0,5$. Oproti předchozím studiím byly testované vzorky skladovány v přirozeném prostředí na vzduchu při teplotě $22 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti $20 \pm 1 \text{ } \%$. Studie byla vybrána pro



Obrázek 10: Mikroskopická analýza cementové matrice v betonu [11].

porovnání především ze tří důvodů. Prvním důvodem jsou rozdílné podmínky ošetřování cementového kompozitu, druhým důvodem je zaměření práce na určování fází pomocí elektronové mikroskopie a poslední důvod je rozdílný vliv na porozitu, potažmo pevnost v tlaku oproti dvěma předchozím studiím.

Výsledkem studie bylo zjištění, že makromechanické vlastnosti malty byly negativně ovlivněny vlivem mramorového prachu, jenž zvyšoval porozitu výsledného kompozitu. Zvýšení porozity autoři přisuzují volné vodě, která byla zapotřebí na obalení zrn mramoru. Dále autoři přikládají snížení pevnosti v tlaku nejen zvýšením porozity, ale také vlivu mramorové moučky, jež brání přístupu vody k Portlandskému slínku. Se zvyšujícím hm. % zastoupením mramorového prachu docházelo ke zvyšování množství CH krystalů. Pro zjištění jednotlivých fází a jejich hm. % zastoupení byly využity snímky z elektronového mikroskopu (Obrázek 11).



Obrázek 11: Snímek z elektronové mikroskopie, referenční malta bez mramorové moučky – vlevo, malta s 15 hm. % mramorové moučky – vpravo: CH (modré částice); póry (červené částice); kamenivo písku (černé částice); částečně zreagované cementové zrno a mramorový kal (bílé částice); C-S-H gel (šedá barva) [106].

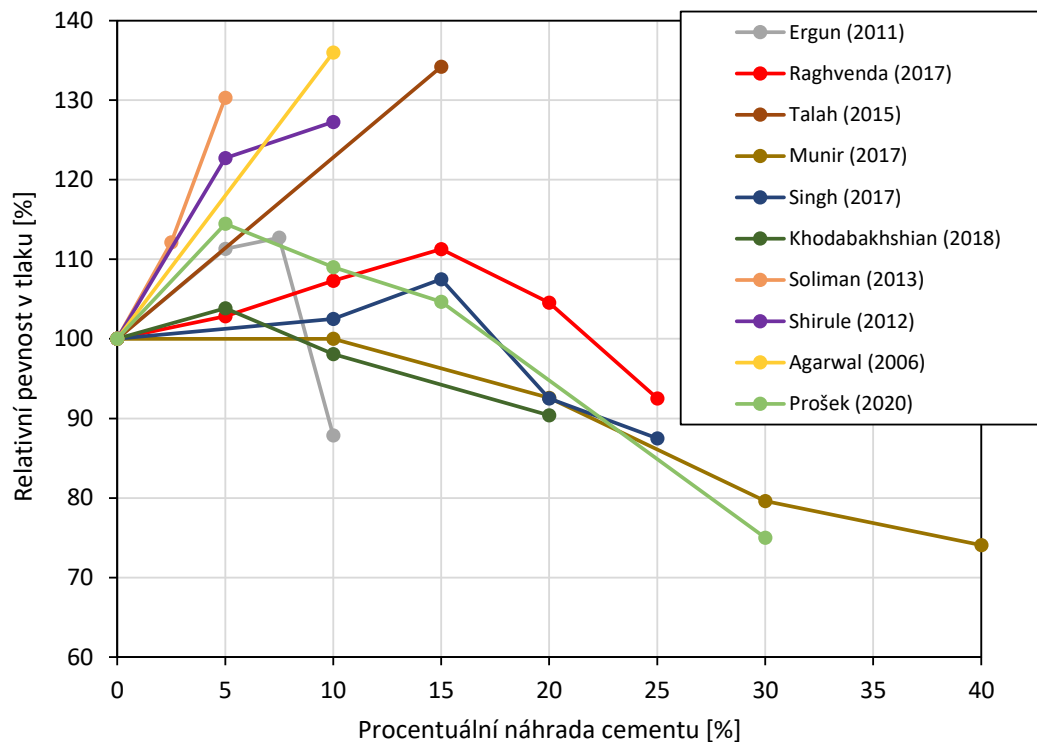
V experimentální studii, jejímž autorem je M. Uysal a kol. [107], je řešena síranová koroze cementového kompozitu. Jedná se především o vytváření thamnazitu ve struktuře betonu. Testovány byly vzorky krychlí o délce strany 100 mm, kde suchá směs byla složena ze 75 hm. % plniva a 25 hm. % pojiva. Pojivo se skládalo z CEM I 42,5N s procentuální náhradou (až do 60 hm. %) ve formě úletového popílku, vzduchem chlazené vysokopevnostní strusky, mramorové moučky a vápencové moučky. Použitá mramorová moučka byla z 99 hm. % složena z CaCO_3 a měla zrnitost 0 až 100 mikronů. Pro síranovou korozi byly využity dva roztoky, a to 10% roztoky Na_2SO_4 a Mg_2SO_4 . Vliv síranové koroze byl sledován úbytkem pevnosti v tlaku po dobu 400 dnů.

Výsledkem experimentů byla procentuální ztráta pevnosti v tlaku, kde největší ztrátu pevnosti měly vzorky obsahující referenční cement a vzorky s vápencovým a mramorovým směsným cementem, a to 13 %. Nejlépe dopadly vzorky, v nichž byl použit směsný cement s obsahem 60 hm. % vzduchem chlazené vysokopevnostní strusky (ztráta pevnosti v tlaku 5 %). Zajímavý výsledek vykazovaly vzorky s 30 hm. % mramorové moučky jako náhrady za cement, které měly lepší mechanické vlastnosti než referenční vzorky. Ztráta pevnosti u této směsi byla přibližně 9 %. Zlepšení odolnosti vůči síranové korozi autoři přikládali snížené porositě a hlavně propustnosti cementového kompozitu.

2.8 Vliv odpadní mramorové moučky na pevnostní charakteristiky cementového kompozitu

Pro posouzení vlivu mramorové moučky na pevnost v tlaku bylo vybráno 21 experimentálních studií, v nichž byly použity obdobné rozměry vzorků a také jejich ošetřování po výrobě. Na Obrázku 12 lze vidět vliv mramorové moučky jako náhrady za cement na pevnost cementového kompozitu v tlaku a na Obrázku 13 vliv mramorové moučky při náhradě za jemné kamenivo. Výsledky ukázaly, že pevnost v tlaku se pohybovala mezi 20 až 80 MPa (většinou mezi 30 až 50 MPa). Při použití 10 hm. % odpadní mramorové moučky jako náhrady za cement došlo ve většině případů ke zvýšení hodnoty pevnosti v tlaku. Zvýšení hodnoty pevnosti v tlaku bylo od 3 % do 35 % [81, 83, 84, 88, 90–92, 108]. V případě náhrady za přírodní kamenivo bylo zvýšení hodnoty pevnosti v tlaku minimální, tj. přibližně do 10 % [28, 32, 62, 65, 67, 72, 74, 79, 109–111].

Výsledky ukazují v případě využití mramorové moučky jako náhrady za plnivo napříč různými studii vyšší možnost procentuálních náhrad (Obrázek 12). Prokázané hodnoty naznačují, že i při 100 hm. % nahrazení kameniva mramorovou moučkou dochází ke stálému zvyšování pevnosti v tlaku. Výsledky dále ukázaly, že zvýšení pevnosti v tlaku bylo významné až do 20 hm. % náhrady. Bylo zjištěno, že zvýšení hodnoty pevnosti v tlaku může být až o 40 % oproti referenční směsi bez mramorové moučky. Navýšení pevnosti ve většině studiích přisuzují vysokému obsahu CaCO_3 v mramoru a snížení pórovitosti výsledného cementového kompozitu [28, 62, 65, 109, 110].



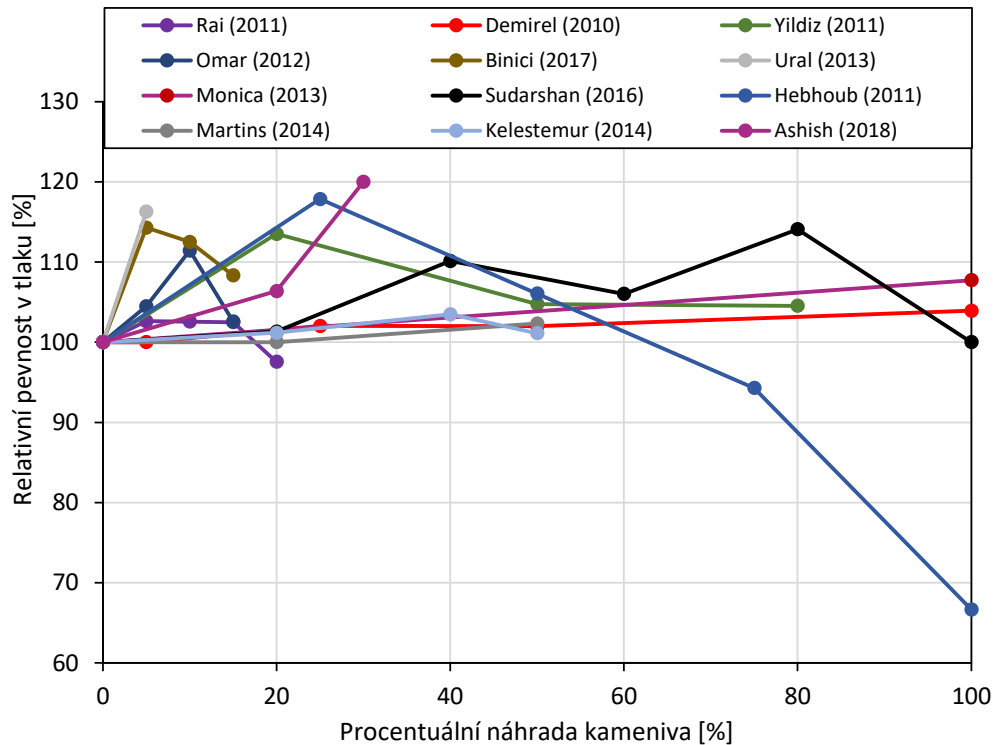
Obrázek 12: Změny pevnosti v tlaku v důsledku využití mramorové moučky jako náhrady za cement.

Výsledky pevností v tlaku vykazují trend závislý na množství náhrady ve formě mramorové moučky, vodnímu součiniteli a ostatních složkách betonu. Popsáním pomocí nelineárních rovnic se zabývá práce od Turgula z Technické univerzity Firat v Turecku [112]. V jeho studii byla srovnávána experimentální data s daty získanými ze softwaru Statistica 8.0 (StatSoft Inc., USA) a byly navrženy nelineární rovnice pro určení pevnosti v tlaku.

Nelineární rovnice pro popsání pevnosti betonu v tlaku při náhradě za cement

Pro verifikaci nelineární rovnice byly využity poznatky z prací, v nichž se odrážely různé procentuální zastoupení jednotlivých složek betonu s různým vodním součinitelem [81, 83, 113]. Ve všech případech byla mramorová moučka použita jako náhrada za cement. Výsledky experimentů ukazují, že pevnost betonu v tlaku byla v rozmezí od 25,6 do 45,4 MPa. Ve všech případech došlo k poklesu pevnosti v tlaku, když mramorová moučka překročila 10 hm. % náhrady cementu. Další aspekt, který měl vliv na výslednou pevnost v tlaku, byl vodní součinitel (w/c), tedy poměr vody a cementu, množství plastifikátoru a poměr písku a štěrku. Výslednou nelineární rovnici popisující tlakovou pevnost v závislosti na složení lze vyjádřit následovně [112]:

$$f_c = -0,084 \cdot C - 0,26 \cdot MP + 45,8 \cdot (w/c) + 15,07 \cdot sp + 0,016 \cdot G + 0,035 \cdot S, \quad (8)$$



Obrázek 13: Změny pevnosti v tlaku v důsledku využití mramorové moučky jako náhrady za přírodní kamenivo.

kde:

f_c je pevnost v tlaku v MPa,

C je obsah cementu v kg/m^3 ,

MP je obsah mramorové moučky v kg/m^3 ,

w/c je poměr vody a cementu,

sp je procentuální množství plastifikátoru v závislosti na cementu v %,

G je obsah štěrku v kg/m^3 ,

S je obsah písku v kg/m^3 .

Nelineární rovnice pro popsání pevnosti betonu v tlaku při náhradě za plnivo

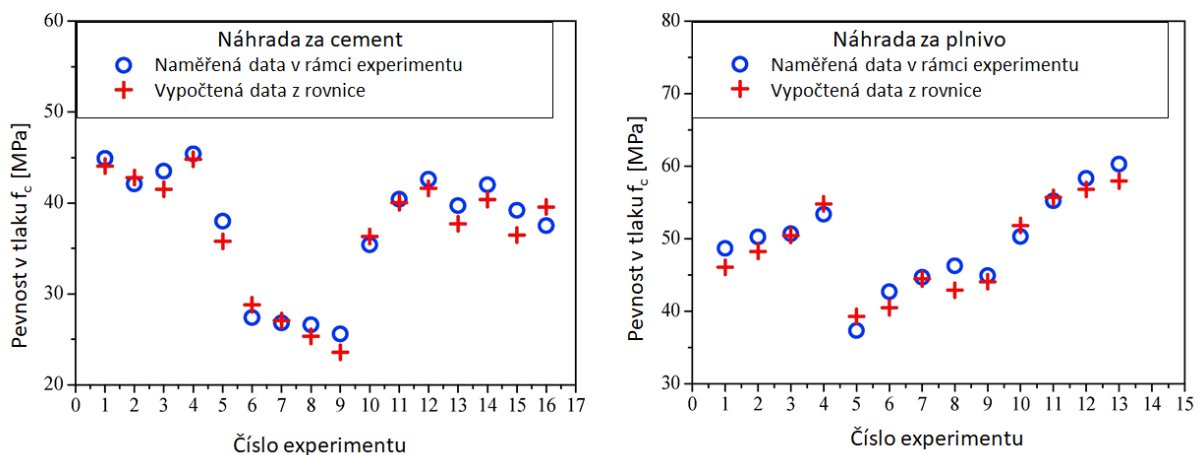
U nelineárních rovnic pro popsání pevnosti betonu v tlaku při náhradě za plnivo byly, a to stejně jako v případě náhrady za cement, využity pro verifikaci různé výsledky a závěry různých experimentálních studií [65, 109]. U uvedených prací dochází k nárůstu pevnosti s procentuální náhradou za jemné plnivo. Výsledné pevnosti v tlaku byly v rozmezí od 37,3 do 60,3 MPa. Vstupními parametry jsou, stejně jako v případě rovnice (8), jednotlivé složky betonu a vodní součinitel. Výsledná nelineární rovnice vypadá následovně:

$$f_c = -0,674 \cdot C + 2,781 \cdot MP + 1430 \cdot (w/c) + 0,1 \cdot sp - 0,55 \cdot G + 2,725 \cdot S, \quad (9)$$

kde:

- f_c je pevnost v tlaku v MPa,
- C je obsah cementu v kg/m^3 ,
- MP je obsah mramorové moučky v kg/m^3 ,
- w/c je poměr vody a cementu,
- sp je procentuální množství plastifikátoru v závislosti na cementu v %,
- G je obsah šterku v kg/m^3 ,
- S je obsah písku v kg/m^3 .

Na Obrázku 14 lze vidět verifikaci použitých rovnic. Průměrná maximální odchylka mezi naměřenými hodnotami pevností v tlaku a hodnotami pevnosti v tlaku vypočítanými pomocí rovnic byla 3 % v případě náhrady za cement a 4 % v případě náhrady za jemné kamenivo. Koeficient korelace R2 byl v prvním případě 0,96 a ve druhém případě 0,93.



Obrázek 14: Změna pevnosti betonu v tlaku pro jednotlivé experimenty s vypočtenou pevností v tlaku z nelineárních rovnic: náhrada za cement – vlevo, náhrada za jemné kamenivo – vpravo [112].

3 Možnosti testování na nano či mikroúrovni

Experimentální metody sloužící ke zkoumání materiálů na nano či mikroúrovni jsou důležité a slouží k určení možností recyklátu a jeho zapojení ve struktuře materiálu. Uvedené metody slouží k popsání přechodové zóny mezi maticí a plnivem a slouží k charakterizování materiálu na nano či mikroúrovni. Chování materiálu na této úrovni má značný vliv na výsledné vlastnosti cementového kompozitu na makroúrovni. Z tohoto důvodu je znalost těchto vlastností důležitá. Jedná se především o velikost a tvar částic, rozhraní mezi jednotlivými fázemi a jejich vazby a procentuální zastoupení jednotlivých fází s definovanými mechanickými vlastnostmi. Uvedené aspekty mají přímý vliv na vlastnosti betonu, jako jsou zpracovatelnost čerstvé směsi, doba tuhnutí a tvrdnutí, porozita, propustnost, mechanické vlastnosti atd.

3.1 Zjišťování mikrostrukturálních vlastností

Mikrostrukturální vlastnosti se zkoumají pomocí mikroskopu. Existuje několik druhů mikroskopů využívajících odlišné zdroje k vytváření obrazu. Zdroj pro vytváření obrazu má zásadní vliv na rozlišovací schopnosti mikroskopu. Rozlišovací schopnosti mikroskopu se rozumí vzdálenost dvou bodů, které mikroskop zobrazí jako dva samostatné body, a je vyjádřena podle vztahu, který odvodil Abbe [114] jako:

$$a = \frac{0,61 \cdot \lambda}{n \cdot \sin(\alpha)}, \quad (10)$$

kde:

- a je rozlišovací schopnost mikroskopu v nm,
- λ je vlnová délka záření v nm,
- n je index lomu prostředí,
- α je polovina otvorového úhlu kužele paprsků.

Rovnici (10) je možné zjednodušit, bez dopuštění se výrazné chyby, dosazením jedničky za součin $n \cdot \sin \alpha$, který je označován jako numerická apertura a je optickou konstantou daného objektivu. Potom z něj vyplývá, že mezní rozlišovací schopnost je zhruba polovinou vlnové délky použitého záření. Pro zelené světlo, jež je zhruba uprostřed viditelného spektra, je λ okolo 550 nm a tedy rozlišovací schopnost mikroskopu pracujícího s tímto světlem je okolo 300 nm. Na rozdíl od toho vlnová délka elektronu urychleného napětím 30 kV je 7 pm, což už teoreticky stačí dokonce na zobrazení atomu.

Optická mikroskopie

Optický mikroskop pracuje na principu zvětšování obrazu dvěma sadami spojných čoček: objektivem a okulárem. Celkově se skládá z osvětlovací části (zdroj světla, kondenzor,

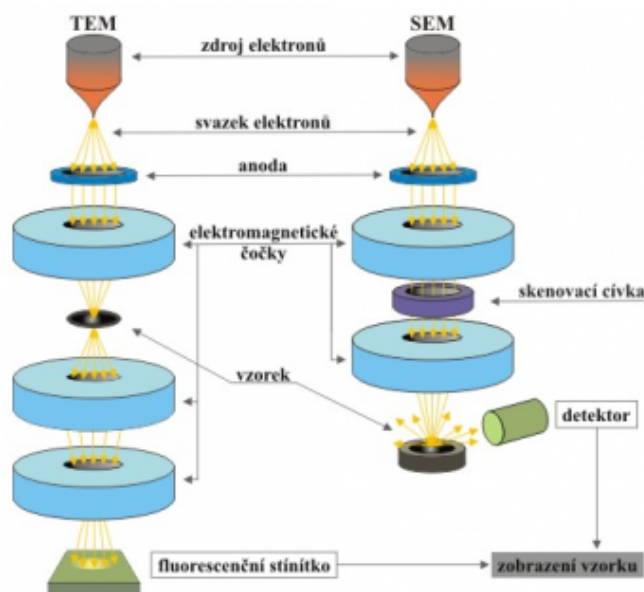
clona), mechanické části (podstavec, stojan a stolek s křížovým posunem) a optické části – objektivů a okulárů (monokulár nebo binokulár). Optické mikroskopy mají objektivy různé síly, a tak díky nim mohou dosahovat různých zvětšovacích schopností. Největší zvětšení, kterého jde docílit v obyčejném světle, je $1000\times$, a teoretické zvětšení optického mikroskopu je $2000\times$. K zobrazení se využívá viditelná část spektra (o vlnové délce 420 – 760 nm) [114]. Světelný mikroskop umožňuje rozlišit detaily až na úrovni $0,2\ \mu\text{m}$. Při použití nejsilnějších objektivů je nutno vložit mezi frontální čočku a krycí sklíčko mikroskopického preparátu kapku cedrového oleje, a to se stejným lomem světla jako má sklo, aby nedocházelo ke ztrátě světla. Optický mikroskop umožňuje měřit několika různými kontrastními metodami, přičemž mezi základní patří [115]:

- Světlé pole: zobrazení mikroskopických vzorků ve světlém poli patří mezi základní a nejjednodušší zobrazovací metody. Světlo prochází pozorovaným objektem nebo je od něj odraženo a soustava dvou spojných čoček vytváří skutečný, zvětšený a převrácený obraz, který pozorujeme přes okulár. Používá se u barevných nebo přirozeně pigmentovaných preparátů s vysokým kontrastem.
- Tmavé pole: Při pozorování v tmavém poli nedopadá světlo procházející rovinou vzorku přímo do objektivu, a proto je zorné pole tmavé. Zobrazování vzorků v tmavém poli zvyšuje kontrast snímaného objektu, a proto je vhodné pro průhledné nebarevné preparáty a je ideální pro zobrazení obrysů, hran, hranic a gradientu indexu lomu.
- Ultrafialová mikroskopie: ultrafialová mikroskopie využívá jako světelný zdroj UV záření, jež se vyznačuje kratší vlnovou délkou, než má viditelné světlo v rozsahu přibližně 100 – 400 nm, což zvyšuje rozlišovací schopnost mikroskopu.
- Infračervená mikroskopie: základní charakteristika je ve využití infračerveného záření o vlnové délce v intervalu 760 nm – 1 mm pro zobrazení mikroskopického vzorku. Infračervené záření je pro lidské oko neviditelné a má výrazné tepelné účinky. Některými objekty proniká snadněji než viditelné světlo, a proto ho lze využít i pro studium silnějších preparátů.
- Polarizátor: polarizační mikroskopie využívá optické aktivity zkoumaného preparátu. Polarizátor vytváří polarizované světlo, které prochází pozorovaným objektem a následně druhým polarizačním filtrem (analyzátozem). Jestliže má pozorovaný objekt ležící mezi polarizátorem a analyzátozem polarizační vlastnosti, dojde po průchodu světla preparátem ke stočení polarizační roviny a vznikne obraz v černém poli a barevný obraz předmětu. Uvedeného efektu je využíváno pro zjištění informací o struktuře a složení materiálu.

Elektronová mikroskopie

Elektronový mikroskop využívá k zobrazení předmětu vlnových vlastností elektronu. Elektron se chová podobně jako světlo, ale jeho vlnová délka je výrazně kratší. Díky tomu můžeme sledovat menší předměty, než za pomoci světla. Rozlišujeme dva základní druhy elektronových mikroskopu, a to řádkovací elektronový mikroskop a transmisní elektronový mikroskop [116].

Obraz u transmisního mikroskopu (Obrázek 15) se vytváří pomocí proudu svazku elektronů, které projdou daným vzorkem. Proud elektronů prochází elektronovou čočkou, jež je tvořena elektrickým polem kondenzátoru nebo magnetickým polem cívky a soustřeďuje elektrony na pozorovaný preparát. Poté prochází proud elektronů další elektronovou čočkou a vytváří první elektronový obraz. Část tohoto obrazu se elektronovou čočkou – projektilem zvětší a výsledný obraz se promítne na stínítko pokryté vrstvou luminoforu, nebo se zachytí na fotografické desce či filmu. Veškeré součásti mikroskopu musí být uloženy v komoře, z níž je vyčerpán vzduch, a to proto, aby se nezeslaboval proud elektronu. Urychlovací napětí elektronů je vysoké a pohybuje se v rozmezí od 50 do 400 kV. Největší nevýhodou transmisního elektronového mikroskopu jsou požadavky na vzorky, protože použité vzorky musejí mít maximální tloušťku v desítkách nanometrů [117].

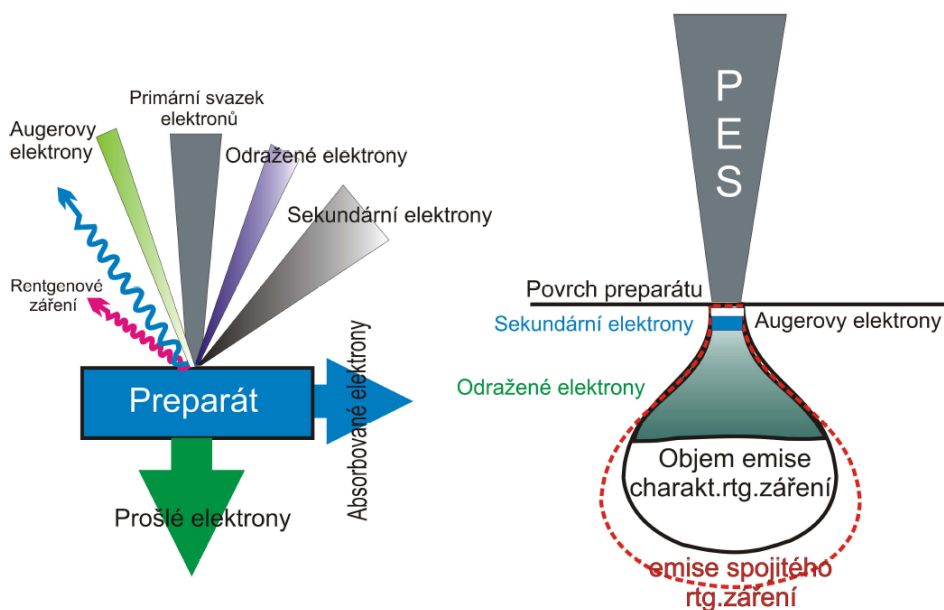


Obrázek 15: Schematické znázornění principu transmisního (vlevo) a řádkovacího (vpravo) elektronového mikroskopu [118].

V rastrovacím mikroskopu (Obrázek 15) je velmi tenký paprsek elektronu nucen vychylovacím zařízením přejíždět povrch daného preparátu. Dopadající elektrony se rozptylují do okolí a mohou také vyrážet elektrony z povrchu preparátu. Energie primárních elektronů, která je určena velikostí urychlovacího napětí a proudu, ovlivňuje excitační objem. Excitační objem je oblast pod povrchem vzorku, ve níž se uvolňují jednotlivé signály (Ob-

rázek 16). Hloubka excitačního objemu se s klesající hodnotou urychlovacího napětí stává menší co do hloubky a větší co do šířky. Zvětšení šířky oblasti excitačního objemu je pak příčinou snížení rozlišovací schopnosti mikroskopu [119]. Vlastní detekce probíhá pomocí senzorů citlivých na elektrony a signál se převádí na obrazovku počítače. Urychlovací napětí se pohybuje u rastrovacích elektronových mikroskopů v rozmezí od 0,1 do 30 kV. Rozlišujeme několik detektorů v závislosti na zkoumaných elektronech a jejich energiích (Obrázek 16) [117]:

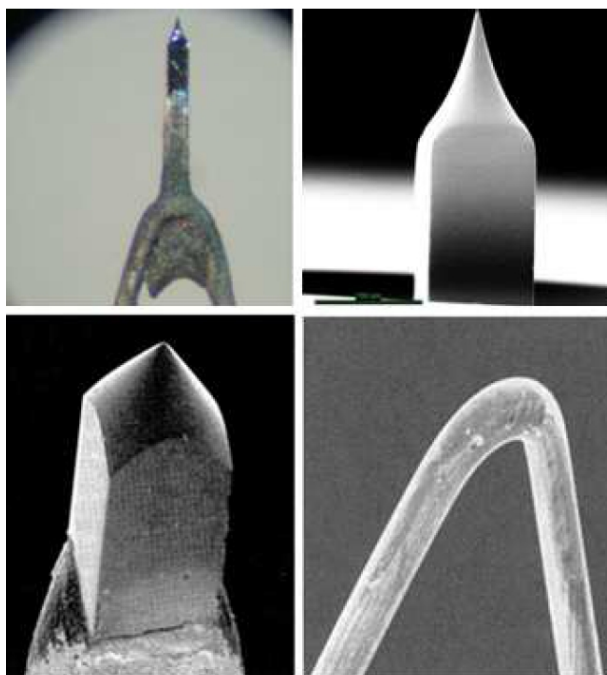
- Detektor sekundárních elektronů (SE) je prostředníkem mezi dějem odehrávajícím se při interakci primárních elektronů s povrchem vzorku, při kterém dochází k uvolnění sekundárních elektronů. Informace získané zachycením sekundárních elektronů nám dávají topografický kontrast vzorku.
- Zpětně odražené elektrony (BSE) mají energii srovnatelnou s energií primárního elektronového svazku. Vystupují z větší hloubky (řádově desítky mikrometrů) a přinášejí tedy informaci o lokálních změnách materiálu. Jedná se tedy o materiálový kontrast. Materiály s vyšším středním atomovým číslem odrážejí elektrony více než látky s nižším atomovým číslem. Proto se na stínítku jeví prvně jmenované fáze jako světlejší. Z uvedeného důvodu je možné snadno odlišit jednotlivé fáze.
- Augerovy elektrony jsou vyráženy z elektronového obalu jednotlivých atomů, z nichž je materiál složen. Díky zjištěním jejich energie lze provádět prvkovou (kvalitativní) analýzu.



Obrázek 16: Excitační objem a signály uvolněné ze vzorku po dopadu primárních elektronů [119].

Zdrojem proudu elektronu je kovová katoda. Elektrony jsou získávány z atomů tak, že jím je dodáváno větší množství energie, než je výstupní energie elektronu. Rozeznáváme tři základní druhy zdrojů (Obrázek 17), a to:

- Termoemisní elektronové zdroje, kde se zdroj skládá z katody, záporně polarizovaného Wehneltova válce a uzemněné katody. Termoemisní katoda je tvořena buď z wolframového vlákna, nebo z hexaboridu lanthalu (LaB_6). Wolfram se jako materiál používá pro svou nízkou výstupní energii 4,5 eV a vysokému bodu tání 3653 K. Hexaborid lanthalu má oproti wolframu nižší výstupní energii 2,5 eV a tím podstatně vyšší emisi elektronů.
- Autoemisní (studené) elektronové zdroje mají hrotovou katodu z monokrystalu wolframu. K emisi elektronů dochází působením silného elektrického pole za pomoci tunelového jevu.
- Schottkyho katoda je na rozhraní termoemisí a autoemisí elektronů. Termoemise i autoemise se podílejí na emisním proudu zhruba stejným dílem, ale s výhodou vyšší životnosti než v případě termoemisního zdroje a větší intenzitou svazku než v případě autoemisního zdroje. Hlavní výhodou použití tohoto zdroje je stabilita proudu elektronového svazku. Schottkyho katoda se nejčastěji používá u rastrovacích mikroskopů.



Obrázek 17: Ukázka: Schottkyho katody (nahore) a detail jejího hrotu, LaB_6 krystalu (vlevo dole) a wolframového vlákna (vpravo dole) [120].

Při použití mikrosondy (analyzátoru) může být elektronová mikroskopie použita ke stanovení chemického složení vzorku pomocí elektronové mikroanalýzy. Mikroanalýza využívá principu, kdy elektron primárního svazku po dopadu na vzorek vyrazí elektron z některé z vnitřních hladin atomu vzorku. Vzniklá elektronová vakance se zaplní přeskokem elektronu z vyšší energetické hladiny. Rozdíl energií se vyzáří v podobě RTG záření, jehož energie odpovídá rozdílu energií obou energetických hladin. Uvedený rozdíl energie je dán druhem atomu, a proto ho lze použít k identifikaci prvku, z něhož byl uvolněn. Rozlišujeme dva druhy analyzátorů dle detekce RTG záření [117]:

- Energiově disperzní analyzátor (EDS), kde vybuzené RTG záření vyhodnocuje polovodičový spektrometr. Jeho základem je monokrystal křemíku, dopovaný stopovým množstvím Li v mřížce (aby nedošlo k difuzi Li je křemíkový krystal udržován trvale při teplotě varu kapalného dusíku – 196 °C). Energií RTG záření mění Si-krystal na elektrický náboj, který je zesilován a registrován v řídicím počítači. Získané spektrum se pak vyhodnotí a přepočítá na obsahy jednotlivých prvků. Všechny prvky se měří v jedné operaci (z jednoho záznamu). Analýza je proto velmi rychlá (cca 1 až 2 minuty). Nevýhodou měření je překryv energií jednotlivých prvků a nepřesnost zapříčiněná brzděním RTG zářením.
- K detekci vybuzeného RTG záření se používá vlnově disperzní spektrometr (WDS). Jeho podstatou je analyzující krystal, jenž je vhodně natočen vůči dopadajícímu RTG záření. Analyzující krystal difraktuje RTG záření do detektoru, v němž se mění záření na elektrické impulsy. Difraktuje se jen záření s takovou vlnovou délkou, která odpovídá aktuální pozici (natočení) krystalu. Z toho vyplývá časová náročnost analýzy (každý prvek je potřeba analyzovat zvlášť), jenž je závislá na počtu stanovovaných prvků (desítky minut až několik hodin).

3.2 Stanovení mikromechanických vlastností

V současné době je nanoindentace nejčastěji používanou experimentální technikou pro hodnocení mechanických vlastností (např. modulů pružnosti a tvrdosti) široké škály materiálů, jako jsou kovy, sklo, keramika a tenké vrstvy na mikroměřítku, a to za využití velmi malého objemu materiálu.

Statická nanoindentace

Statická nanoindentace využívá jednoduchého principu, při němž se vtlačuje velmi malý diamantový hrot do materiálu, přičemž jsou měřeny dva základní parametry: zatěžovací síla a deformace materiálu. Běžně dosahovaná hloubka vpichů je v nanometrech. Hloubka v nanometrech vyvodí síly v měřítku mili až mikronevtonů. Výstupem je pak závislost kontaktní hloubky vpichu, resp. deformace materiálu na zatěžovací síle. Existuje mnoho typů hrotů, které mohou být použity pro testování, a to: sférický, Vickersův, Knoopův a Bekrovichův [121]. Výsledkem z experimentálních dat jsou obvykle dvě elastické konstanty: tvrdost a modul pružnosti. Tvrdost (H) je definována jako střední hodnota kontaktního tlaku při maximálním zatížení:

$$H = \frac{P_{\max}}{A}, \quad (11)$$

kde:

H je tvrdost v Pa,

A je kontaktní plocha hrotu při maximální síle v m,

P_{\max} je maximální síla v N.

Při procesu zatěžování se materiál pod hrotem deformuje jak elasticky, tak i plasticky. Při odtěžování lze ve většině případů předpokládat pouze pružnou deformaci. To umožňuje výpočet redukovaného modulu pružnosti E_r . Z experimentálních dat získáme hodnoty maximální síly P_{\max} , maximální deformace h_{\max} a sklon tečny při maximální síle $dP/dh|_{P_{\max}}$ (Obrázek 18). Redukovaný modul se poté stanoví z počáteční části odlehčovací křivky jako:

$$E_r = \frac{1 \cdot \sqrt{\pi} dP}{2 \cdot \sqrt{A} dH}, \quad (12)$$

kde:

E_r je redukovaný modul pružnosti v Pa,

$\frac{dP}{dH}$ je sklon tečny odlehčovací křivky.

Vztah redukovaného a elastického modulu E je:

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}, \quad (13)$$

kde:

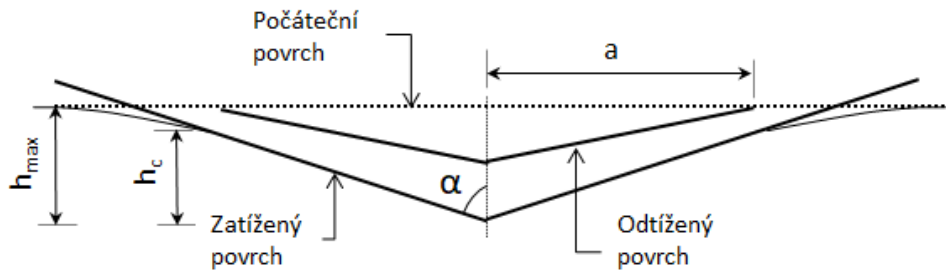
E je elastický modul v GPa,

E_r je redukovaný modul pružnosti v GPa,

ν je Poissonovo číslo testovaného materiálu,

E_i je elastický modul hrotu (v případě diamantového hrotu 1140 GPa),

ν_i je Poissonovo číslo hrotu (v případě diamantového hrotu 0,07).



Obrázek 18: Schéma situace pod hrotem.

Vzhledem k velkému rozdílu tuhostí materiálu a měřícího zařízení lze poslední člen v rovnici (13) zanedbat. Pravděpodobně nejčastěji používaná metodika pro analýzu experimentálních dat z nanoindentace je podle Olivera a Pharra [122], ve které je kontaktní hloubka dána vztahem:

$$h_c = h_{\max} = \frac{\epsilon \cdot P_{\max}}{\frac{dP}{dH}}, \quad (14)$$

kde:

h_c je kontaktní hloubka v m,

ϵ je konstanta, která závisí na geometrii hrotu ($\epsilon = 0,726$ pro hrot Berkovich),

P_{\max} je maximální síla v N,

$\frac{dP}{dH}$ je sklon tečny odlehčovací křivky.

Tvrдость lze vypočítat podle rov. (11) a redukovaný modul jako:

$$E_r = \frac{1 * \sqrt{\pi} dP}{2\beta * \sqrt{A} dH}, \quad (15)$$

kde:

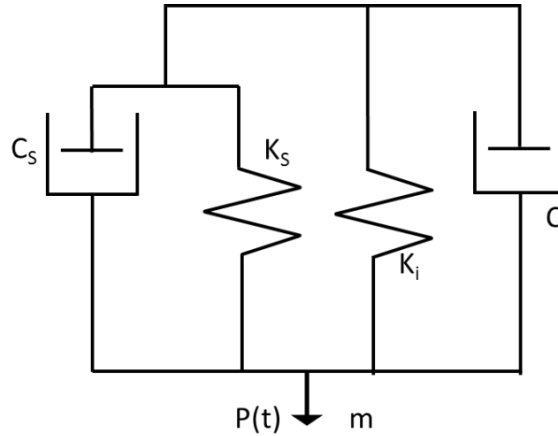
E_r je redukovaný modul pružnosti v GPa,

$\frac{dP}{dH}$ je sklon tečny odlehčovací křivky,

β je geometrický faktor pro korekci nesymetrického tvaru hrotu (pro hrot Berkovich je $\beta = 1,034$ a pro sférický hrot je $\beta = 1,0$).

Dynamická nanoindentace

Dynamická nanoindentace (nanoDMA) je založena na dynamickém modelu systému indentoru a zkoumaného vzorku o jednom stupni volnosti. Tento model zahrnuje jak tuhost K_s a tlumení C_s vzorku, tak tuhost K_i a tlumení C_i systému indentoru, jak je ukázáno na Obrázku 19.



Obrázek 19: Dynamický model systému indentoru v kontaktu se vzorkem, kde m je hmotnost systému indentoru, C_i je koeficient tlumení systému indentoru, C_s je koeficient tlumení materiálu vzorku, K_s je kontaktní tuhost, K_i je konstanta tuhosti listové pružiny, na níž je upevněn hrot [123].

V dynamické metodě nanoDMA je dynamická síla $P(t) = P_0 \sin \omega t$ s amplitudou P_0 a frekvencí $f = \omega/2\pi$ superponovaná na kvazi-statické zatížení P_{\max} . Pohybová rovnice hrotu indentoru je dána vztahem:

$$\ddot{m}h + \dot{C}h + Kh = P_0 \sin \omega t E_r, \quad (16)$$

kde ω je úhlová frekvence. Řešením výše uvedené rovnice ustálené kmitání o stejné frekvenci jako byla budící frekvence je:

$$h = h_0 \sin(\omega t - \phi), \quad (17)$$

kde:

- ω je úhlová frekvence v Hz
- h_0 je amplituda deformace v m,
- ϕ je fázové zpoždění deformace vůči budící síle.

Amplituda a fázový posun může být použit pro výpočet kontaktní tuhosti dynamického modelu na Obrázku 19. Za předpokladu, že tuhost rámu K_F je nekonečná, lze amplitudu h_0 a fázové zpoždění ϕ vyjádřit jako [123]:

$$h_0 = \frac{P_0}{\sqrt{(K_s + K_i - m\omega^2)^2 + (C_i + C_s)\omega^2}}, \quad \phi = \tan^{-1} \frac{(C_i + C_s)\omega}{K_s + K_i - m\omega^2}. \quad (18)$$

Vypočítané hodnoty tuhosti a tlumení vzorku jsou postupně použity pro stanovení viskoelastických vlastností, které jsou definovány pomocí redukovaného „storage“ modulu (\dot{E}_r), „loss“ modulu (\ddot{E}_r):

$$\dot{E}_r = \frac{K_s \sqrt{\pi}}{2 \sqrt{A}}, \quad \ddot{E}_r = \frac{\omega C_s \sqrt{\pi}}{2 \sqrt{A}}, \quad (19)$$

kde A je kontaktní plocha získaná z kalibrace tvaru hrotu v závislosti na kontaktní hloubce při kvazistatickém zatěžování.

„Storage“ a „loss“ modul vzorku lze získat z odpovídajících redukovaných „storage“ a „loss“ modulů ze stejných vztahů (viz rov. 15) podobně jako při statické indentaci. Velikost „storage“ modulu odpovídá elastickému zotavení vzorku, což je množství energie obnovené zpět ze vzorku následující po zatěžovacím cyklu (tuhost materiálu). „Loss“ modul odpovídá tlumení materiálu a je znázorněn časovou prodlevou mezi maximální silou a maximální deformací. Při kombinaci nanoDMA zobrazovacími metodami může být nanoDMA rozšířena na větší plochu vzorku. Během procesu zobrazování systém nepřetržitě monitoruje „storage“ a „loss“ modul vzorku jako funkce polohy na vzorku. Uvedená metoda, jež rozšiřuje dynamickou metodu, se nazývá „modulus mapping“ [124].

4 Experimentální metody

Experimentální metody a výzkum byly rozděleny do tří úrovní pro efektivní využití času a materiálu. V první úrovni byly charakterizovány vstupní suroviny (podkapitola 4.1). V druhé úrovni byly makroskopicky testovány sady vzorků pro zjištění mechanických a fyzikálních vlastností (podkapitola 4.2). V poslední fázi byla provedena fázová analýza na mikroúrovni pro zjištění, popsání a vysvětlení vlivu mikromleté mramorové moučky (podkapitola 4.3).

4.1 Charakterizace vstupních surovin

Laserová granulometrie a Blainova metoda

Pro určení velikosti a tvaru zrn byl použit laserový granulometr Fritsch Analysette 22 MicroTec plus. Přístroj Analyssete 22 detekuje částice o velikosti 0,08 až 1800 mikronů. Měřicí jednotka je vybavena zdrojem červeného a zeleného laserového záření o vlnové délce 532 a 940 nm. Zkoušený vzorek byl postupně dávkován do ultrazvukové vodní lázně s frekvencí 40 Hz, kde došlo k jeho dispergování a rozrušení aglomerátů. Dále byla suspenze přesunuta do měřicí cely, kde je snímán difrakční obraz laserových paprsků. Pro vyhodnocení a kalkulaci difrakčních obrazů byl použit Fraunhoferův difrakční model. Hledanými parametry popisující velikost částic byly propady d_{10} , d_{50} , d_{90} , což představuje průměry sítí takové, aby propadlo 10, 50 a 90 hmotnostních procent materiálu. Dalším parametrem popisující jemnost částic byl tzv. Sauterův průměr. Jedná se o klíčový parametr popisující budoucí možnou aktivitu recyklátu. Jedná se o parametr, který zohledňuje nejen povrch zrn, ale i průměrný objem. Sauterův průměr (Rovnice 31) se označuje jako $D_{[3,2]}$, kde 3 představuje třetí rozměr (objem) a 2 označuje druhý rozměr (povrch). Jemnost mletí recyklátu definuje měrný povrch, jenž byl změřen vzdušnou permeabilní metodou (Blainova metoda) přístrojem Matest E009.

$$D_{[3,2]} = \frac{\sum_{i=0}^n D_i^3 \cdot \nu_i}{D_i^2 \cdot \nu_i}, \quad (20)$$

kde:

- D je rozměr i -té částice v μm ,
- ν je početnost této částice.

Rentgenová fluorescence – XRF

Pro zjištění prvkového složení testovaných materiálů byla provedena XRF analýza na vlnově-disperzním rentgenovém spektrometru SPECTRO XEPOS s 50 W / 60 kV X-ray zářiči. Měření XRF analýzy bylo provedeno dle ČSN EN 196-2 [125]. Výsledkem XRF analýzy je hmotnostní zlomek z oxidu ve vzorku. Následné fázové složení bylo dopočítáno

pomocí kalkulace Bogue [126] dle rovnice 21 až 24 pro cement. Pro ostatní materiály bylo využito stechiometrie.

$$C_3S = (4,071 \times \%CaO) - (7,6 \times \%SiO_2) - (6,718 \times \%Al_2O_3) - (1,43 \times \%Fe_2O_3) - (2,852 \times \%SO_3), \quad (21)$$

$$C_2S = (3,075 \times \%CaO) + (8,608 \times \%SiO_2) + (5,703 \times \%Al_2O_3) + (1,071 \times \%Fe_2O_3) + (2,154 \times \%SO_3), \quad (22)$$

$$C_3A = (2,65 \times \%Al_2O_3) \times (1,692 \times \%Fe_2O_3), \quad (23)$$

$$C_4AF = (3,043 \times \%Fe_2O_3), \quad (24)$$

kde %CaO, % SiO₂, %Al₂O₃, %Fe₂O₃, %SO₃ jsou výsledky procentuálního zastoupení jednotlivých prvků v oxidech.

Rentgenová difrakce – XRD

XRD prášková difrakce využívá krátkovlnné elektromagnetické spektrum z oblasti $0,1 \cdot 10^{-10}$ až $100 \cdot 10^{-10}$ m ke studiu uspořádání stavebních částic v pevných látkách. Vlnová délka tohoto ionizujícího záření (označuje se jako „rentgenové“) odpovídá meziatomovým vzdálenostem ve většině struktur pevných látek, a tak může při jeho dopadu docházet k difrakci (ohybu) na elektronech jednotlivých atomů. Analýzou difraktovaného záření lze následně stanovit některé strukturální charakteristiky a tím určit fázové složení.

XRD analýza byla provedena pomocí difraktometru PANalytical X'Pert Pro pracujícího při 30 mA a 40 kV. Měření bylo realizováno pro úhlové rozmezí od 3 do $60^\circ 2\theta$ s krokem $0,05^\circ 2\theta$ a kumulačním časem 300 s [127]. Následná analýza dat byla uskutečněna pomocí softwaru HighScorePlus.

Stanovení vlhkosti

Vlhkost testovaných materiálů byla zjištěna pomocí analyzátoru vlhkosti KERN DLB 160-3A dle ČSN EN 1097-5 [128]. Minimální hmotnost zkušební navážky byla 100 g. K sušení vzorků byl použit halogenový zářič o příkonu 400 W a sušení probíhalo při teplotě $110 \pm 5^\circ C$ až do ustálení hmotnosti vzorku.

4.2 Stanovení fyzikálních vlastností cementových kompozitů

Kalorimetrie

Sledování průběhu hydratace probíhalo zkoumáním vývinu hydratačního tepla, kdy jeho měření bylo prováděno na kalorimetru TAM Air. Jedná se o isothermní kalorimetr pro přesné stanovení tepelného toku (produkce i spotřeby) a množství vyprodukovaného tepla. Pro měření bylo použito celkem 8 komor. Směsi byly podrobeny sedmidennímu měření vývinu hydratačního tepla při výchozí stabilní teplotě temperované na 20 °C. Směsi byly uloženy v plastových (PE) uzavíratelných ampulích, které byly před vložením do kalorimetru popsány, zváženy a nakonec ztuhněny. Každá nádobka obsahovala přibližně 25 až 38 g směsi. Výsledkem experimentu je specifický tepelný tok $q(t)$, z něhož je počítáno kumulativní hydratační teplo $Q(t)$. Výsledky z kalorimetrického měření byly na základě hmotností směsí v nádobce převedeny na hodnoty vztahené na 1 g pojiva. Kumulativní hydratační teplo je dáno vztahem:

$$Q_t = \int q dt, \quad (25)$$

kde:

$q(t)$ je tepelný tok v W,

$Q(t)$ je teplo v J.

Stanovení začátku a konce tuhnutí

Stanovení doby tuhnutí a tvrdnutí bylo provedeno dle ČSN EN 196-3 [129] pomocí automatického Vicatova přístroje Vicamatic 2. Měření bylo realizováno při minimální relativní vlhkosti prostředí $50 \pm 2 \%$ a teplotě $20 \pm 1 \text{ °C}$. Počátek tuhnutí se rozumí doba, která uplynula od smíchání vody s cementem až po okamžik, kdy došlo ke vnoření Vicatovy jehly až do vzdálenosti 5 mm od podkladní desky. Konec doby tuhnutí byl stanoven obdobným způsobem jen s tím rozdílem, že jehla pronikla do zatvrdlé kaše do hloubky 0,5 mm.

Zkouška rozlití

Zkouška rozlití slouží ke zjištění konzistence čerstvé směsi. Zkouška probíhá na střešacím stroji dle ČSN EN 1015-3 [130], kde na jeho vodorovnou skleněnou kruhovou plochu je umístěna forma ve tvaru seříznutého kuželu. Forma se naplní směsí ve dvou vrstvách, přičemž každá vrstva je ztuhněná deseti údery dusadlem o hmotnosti 250 g. Po uplynutí 15 sekund se forma odebere. Vzniklý vzorek má na výšku 60 mm, spodní průměr je 100 mm a horní průměr 70 mm. Následně dojde ke střešání, kde po 10, 15 nebo 20 střešení se odečte průměr spodní podstavy kužele ve dvou navzájem kolmých směrech a spočítá se aritmetický průměr hodnot. Pro malty na bázi cementu byly měřeny hodnoty:

d,10 – průměr po deseti rázech a d,20 – průměr po dvaceti rázech a pro cementové pasty hodnota d,15 – průměr po patnácti rázech.

Rezonanční metoda

Rezonanční metoda je velmi efektivní nedestruktivní metoda k určení vlastních frekvencí pro podélné, ohybové i torzní kmitání zkušebních vzorků. Na základě této metody je možné sledovat změny materiálových vlastností stavebních materiálů v čase. Za pomoci nedestruktivní rezonanční metody lze určit materiálové vlastnosti jako dynamický modul pružnosti a dynamický smykový modul. Měření bylo prováděno dle norem ČSN 73 1372 [131] a ASTM E1876-01 [132] na přístrojovém vybavení od firmy Brüel & Kjær, kde měřicí sestava byla tvořena měřicí ústřednou typ 3560-B-120, snímačem zrychlení typ 4519-003, rázovým kladívkem typu 8206 a řídicím notebookem. Vzorec pro výpočet dynamického modulu pružnosti ($E_{d,l}$) z podélného kmitání byl:

$$E_{d,l} = \frac{4 \cdot l \cdot m \cdot f_l^2}{b \cdot t}, \quad (26)$$

kde:

- $E_{d,l}$ je dynamický modul pružnosti v Pa,
- l je délka vzorku v metrech,
- m je hmotnost vzorku v kilogramech,
- f_l je základní vlastní frekvence podélného kmitání v Hz,
- b je šířka vzorku v metrech,
- t je výška vzorku v metrech.

Výsledky dynamického modulu pružnosti z podélného kmitání byly kontrolovány s výsledky měření základní vlastní frekvence ohybového kmitání, kde dynamický modul pružnosti ($E_{d,p}$) se vypočítal podle:

$$E_{d,p} = \frac{0,9465 \cdot l^3 \cdot m \cdot f_p^2 \cdot T_1}{b \cdot t^3}, \quad (27)$$

kde:

- $E_{d,p}$ je dynamický modul pružnosti v Pa,
- l je délka vzorku v metrech,
- m je hmotnost vzorku v kilogramech,
- f_p je základní vlastní frekvence příčného kmitání v Hz,
- T_1 je korekční součinitel zahrnující vliv délky vzorku a Poissonova čísla (určen podle ASTM 1876-01 [132]),
- b je šířka vzorku v metrech,
- t je výška vzorku v metrech.

Dynamický smykový modul (G_d) byl vypočten ze základní vlastní frekvence krouživého kmitání podle vzorce:

$$G_d = \frac{4 \cdot l \cdot m \cdot f_t^2}{b \cdot t} \cdot \frac{B}{1 + A}, \quad (28)$$

kde:

- G_d je dynamický smykový modul v Pa,
 l je délka vzorku v metrech,
 m je hmotnost vzorku v kilogramech,
 b je šířka vzorku v metrech,
 t je výška vzorku v metrech,
 f_p je základní vlastní frekvence krouživého kmitání v Hz,
 A je empirický součinitel poměru šířky a výšky vzorku,
 B se vypočítá podle vzorce:

$$B = \frac{\frac{b}{t} + \frac{t}{b}}{4 \cdot \frac{t}{b} - 2,52 \cdot (b \cdot t)^2 + 0,2 \cdot l \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^6}. \quad (29)$$

Zkouška pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu byla měřena dle ČSN EN 1015-11 [133] pro vzorky malt na bázi cementu a podle ČSN EN 196-1 [134] pro vzorky cementových past. Podle způsobu zatížení se jednalo o zkoušku s tříbodovým uspořádáním. Z tohoto důvodu se jedná o kombinaci ohybového a smykového namáhání. Pevnosti v tahu za ohybu byla stanovena za použití zařízení (hydraulického lisu) Heckert, model FP100. Testování bylo řízeno posunem při konstantní rychlosti 0,5 mm/min. Vzdálenost mezi podpěrami během tříbodové ohybové zkoušky byla rovna 100 mm. Vzorec použitý pro výpočet pevnosti v tahu za ohybu byl:

$$f_t = \frac{3F_{b,\max} \cdot L_s}{2ab^2}, \quad (30)$$

kde:

- f_t je pevnost v tahu za ohybu v Pa,
 $F_{b,\max}$ je maximální dosažená síla v průběhu testování vzorku v N,
 L_s je vzdálenost mezi podpěrami v m,
 a je šířka vzorku v m,
 b je výška vzorku v m.

Zkouška pro stanovení pevnosti v tlaku

Pevnost v tlaku byla stanovena za použití zařízení (hydraulického lisu) Heckert, model FP100. Pevnost v tlaku byla stanovena jednoosou tlakovou zkouškou. Testování bylo řízeno posunem při konstantní rychlosti 3 mm/min. Zkouška se prováděla na vhodném kusu zlomeného trámce ze tříbodové ohybové zkoušky s účinnými rozměry 40 × 40 × 40 mm. Pevnost v tlaku byla určena stejně jako v případě pevnosti v tahu za ohybu dle ČSN EN 1015-11 [133] a ČSN EN 196-1 [134]. Pevnost v tlaku materiálu je velikost napětí dosaženého v místě porušení při zániku celistvosti materiálu. Pevnost v tlaku byla vypočtena z dosažené maximální síly v průběhu testu $F_{c,max}$ jako:

$$f_c = \frac{F_{c,max}}{ab}, \quad (31)$$

kde:

f_c je pevnost v tlaku v Pa,

$F_{c,max}$ je maximální dosažená síla v průběhu testování vzorku v N,

a je šířka vzorku v m,

b je výška vzorku v m.

Stanovení porozity a velikosti pórů

Porozita a distribuce velikosti pórů u vzorků cementových kompozitů byla určena pomocí rtuťové porozimetrie. Z vnitřního prostoru vysušeného vzorku při teplotě 105 ± 5 °C byl odebrán fragment o hmotnosti 1 g. Fragment byl vložen do skleněného dilatometru a celá sestava byla umístěna do přístroje Pascal 140, jenž umožňuje detekci pórů o průměru 10 – 500 mikronů. Po evakuaci byl dilatometr naplněn rtutí (cca 500 mm³) a dále postupně pneumaticky zatěžován do tlaku 100 kPa. Po dokončené analýze byla sestava zvážena a vložena do ocelové komory hydraulického zařízení Pascal 440, který disponuje zatěžovacím tlakem až 400 MPa (detekce pórů o velikosti 0,003 – 10 mikronů). Maximální hodnota tlaku pro měření byla 350 MPa.

Stanovení odolnosti proti síranové korozi

V závislosti na složení recyklovaného materiálu byla také řešena odolnost proti síranové korozi. K tomuto účelu byla poupravena norma ASTM C1012-04 [135]. Vzorky byly uloženy v 10% roztoku Na₂SO₄. Z důvodu možné tvorby thaumasitu byla teplota prostředí nastavena na 5 ± 1 °C a relativní vlhkost byla 85 ± 5 %. Postup pro urychlenou síranovou korozi byl převzat od Nielsena a kol. [136]. Postup využívá cyklu střídavého saturování a vysoušení vzorků, kde jeden cyklus je tvořen ze sedmi dní saturování vzorku roztokem a následně dalších sedm dnů jeho přirozeného vysoušení. Vzorky byly v průběhu cyklování vizuálně kontrolovány, posuzovány a po padesáti šesti dnech byly destruktivně otestovány pro zjištění pevnosti v tlaku.

4.3 Stanovení vlastností na nano či mikroúrovni

Použité metody a postupy pro stanovení mikrostrukturálních vlastností

Pro mikroskopickou strukturální a prvkovou analýzu byl použit optický mikroskop s trans-fokátorem a možností 3D zobrazení ZEISS Axio Zoom.V16 a rastrovací elektronový mikroskop se Schottkyho katodou FEG SEM Merlin ZEISS. Mikroskopy jsou umístěny v Laboratoři elektronové mikroskopie a mikroanalýzy na Univerzitním centru energeticky efektivních budov ČVUT v Praze. Kvalitativní a kvantitativní analýza chemického složení vzorků byla provedena pomocí rentgenové mikroanalýzy, a to přímo energiově-disperzním spektrometrem (EDS) od firmy Oxford Instruments. Přímé postupy mikrostrukturální analýzy nejsou stanoveny normami, a proto byly vytvořeny dle řešerše vlastní postupy pro charakterizaci zrn a vstupních surovin, stanovení fázového složení a popsání vzniklé tranzitní zóny. Každý jednotlivý postup měl specifické nastavení elektronového mikroskopu pro co největší věrohodnost získaných dat s ohledem na informace, viz podkapitola 3.1.

Struktura jednotlivých zrn byla určena pomocí parametrů popisujících tvar částic v softwaru ImageJ. Na Obrázku 20 je znázorněn postup charakterizace zrna, při němž jsou jednotlivá zrna nahrazena elipsou, která popisuje jejich tvar. Software byl nastaven tak, aby charakterizoval pouze částice větší než 3×3 pixely z důvodu eliminace artefaktů vzniklých rušením při snímání. Mezi sledovanými parametry byly kruhovitost, kulatost a poměr stran. Kruhovitost popisuje podobnost částice ke kružnici, hodnota 1,0 označuje ideální kružnici. Kruhovitost se vypočte podle rovnice:

$$Circ. = 4\pi \frac{A}{P^2}, \quad (32)$$

kde:

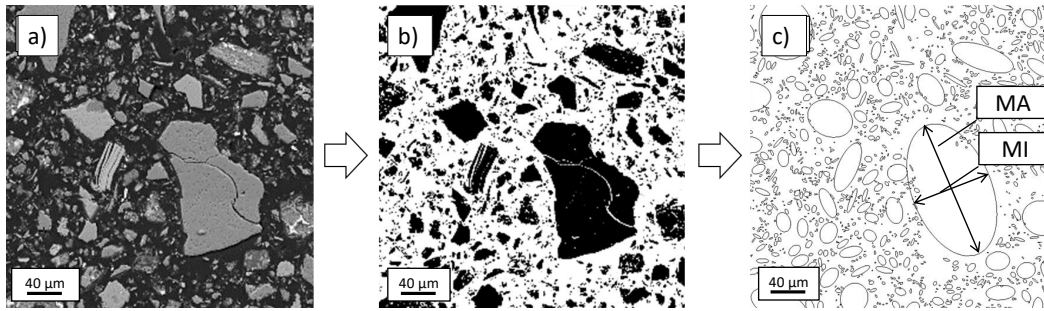
Circ. je kruhovitost zrn,
A je plocha zrna v μm^2 ,
P je obvod zrna v μm .

Poměr stran (33) je definován pomocí elipsy, která nejlépe vystihuje tvar částice. Jedná se o poměr nejdelší strany ku nejkratší straně elipsy.

$$AR = \frac{MA}{MI}, \quad (33)$$

kde:

AR je poměr stran částice,
MA je vzdálenost nejdelší strany v μm ,
MI je vzdálenost nejkratší strany v μm .



Obrázek 20: Obrazová analýza: a) snímek z elektronového mikroskopu s viditelným fázovým kontrastem (zvětšení 1000×), b) označení jednotlivých zrn, c) nahrazení zrn elipsou.

Kulatost (34) je dalším parametrem popisujícím podobnost částice ke kruhu. Na rozdíl od kruhovitosti se kulatost vypočítává bez vlivu drsnosti hran zrn. Kulatost je tvarový parametr, který má maximální hodnotu 1 pro drsné částice podobné kruhu a nižší hodnoty pro podlouhlé elipsovité tvary. Pro obrazovou analýzu použitou v tomto experimentu je kulatost definována jako:

$$Round. = 4 \frac{A}{\pi MA^2}, \quad (34)$$

kde:

- Round.* je kulatost částice,
A je plocha zrna v μm^2 ,
MA je vzdálenost nejdelší strany v μm .

Pro charakterizaci tvaru zrn bylo nastavení mikroskopu následující: urychlovací napětí 5 kV, proud 500 pA, pracovní vzdálenost 8,5 mm a analýza byla vyhotovena ze 64 snímků při zvětšení 1000× a rozlišení 1024 × 768 pixelů. Uvedený počet snímků pokrývá plochu 2,05 mm × 2,05 mm, tj. 4,2 mm².

Stanovení fázového složení bylo provedeno pomocí obrazové analýzy snímků z elektronového mikroskopu za použití detektoru zpětně odražených elektronů (BSE). Jejich rozlišovací schopnost byla 50 – 200 nm, tedy v našem případě dostatečná. V rámci dizertace byl ve spolupráci s Václavem Nežerkou vytvořen zmíněný software PyPAIS v Pythonu 3 [137]. Pomocí tohoto softwaru byla určena procentuální zastoupení jednotlivých fází. Nekorektnost výsledků ostatních běžně používaných softwarů byl zásadním podnětem pro vytvoření tohoto softwaru. Běžně dostupné softwary vyhodnocují zastoupení jednotlivých fází podle stupňů šedi. V případě kompozitu obsahující odpadní materiál na bázi mramoru je tento způsob nedostačující, protože CaCO₃ a CH krystaly mají stejný stupeň šedi. Z uvedeného důvodu byl vytvořen software PyPAIS, u něhož se určování fází skládá ze dvou základních kroků: nastavení stupně šedi, která je závislá na středním atomárním

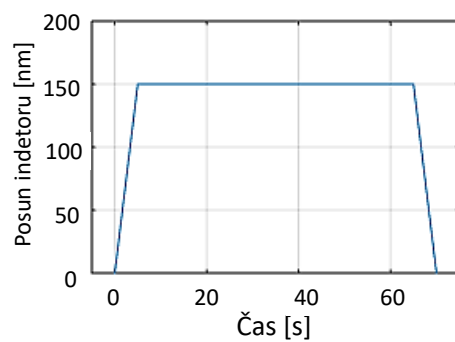
čísla, a stanovení drsnosti textury pro odlišení fází s obdobným odstínem šedi. Textura CH je v celé jeho ploše hladší, protože artefakt vzniklý v procesu přípravy vzorku zapříčiní mírné mechanické poničení povrchu. K uvedenému efektu dojde v průběhu broušení a leštění vzorku, protože mechanické vlastnosti odpadního materiálu z mramoru jsou horší než CH.

Pro procentuální zjištění jednotlivých fází bylo provedeno 10 snímků při zvětšení $300\times$ a $500\times$. Následně byla použita mikroanalýza na každou fázi určenou pomocí obrazové analýzy, přímo byla použita kombinace metod point ID, která určuje prvkové složení v daném místě a prvkové mapy. Pro každou fázi bylo vyhotoveno pět mikroanalýz metodou point ID pro určení váhových a atomových zastoupení jednotlivých prvků v procentech. Následně ze stechiometrie byla dopočítána vzniklá fáze. Pro fázové složení bylo nastavení mikroskopu následující: urychlovací napětí 15 kV, proud 2 nA, pracovní vzdálenost 8,5 mm a rozlišení 1024×768 pixelů. Rentgenové záření bylo načítáno pro každý pixel po dobu 1 s v případě prvkové mapy a pro metodu point ID bylo rentgenové spektrum načítáno po dobu 35 s. Vyšší proud a napětí bylo zvoleno z důvodu zvýšení odezvy materiálu a vzniklé emise.

Pro řešení tranzitní zóny v okolí zrna mramoru bylo využito metody line scan přes zrno mramoru. V rámci line scanu byla vyhodnocena váhová a atomární procentuální zastoupení jednotlivých prvků. Celkově bylo testováno pět různě velkých zrn mramoru o velikosti od 10 do 30 mikronů a na každém zrně byly provedeny tři line scany. Pro line scan bylo nastavení mikroskopu obdobné jako v případě fázové analýzy, avšak s tím rozdílem, že line scan byl tvořen z 500 měřených bodů a pro každý bod bylo rentgenové spektrum načítané po dobu 15 s.

Použité metody a postupy pro stanovení mikromechanických vlastností

Další metodou pro určení fyzikálních vlastností na mikroúrovni byla statická indentace na přístroji T750 Hysitron TriboIndenter[®]. Standardní test pro jednotlivé indenty se skládal ze tří částí: zatížení, držení na vrcholu a odtížení. Zatížení a odtížení této lichoběžníkové zatěžovací funkce trvalo 5 sekund, část držení na vrcholu trvalo 60 sekund (Obrázek 21). Maximální přípustná hloubka indentu byla 150 nm. Statická indentace byla použita ve formě line scanu, kde jednotlivé vpichy byly od sebe vzdáleny $5 \mu\text{m}$, aby se jednotlivé výsledky neovlivňovaly. Line scan byl tvořen maticí o velikosti 8×100 vpichů. Indentační modul pružnosti byl hodnocen u jednotlivých indentů s použitím standardní metodiky používané Oliverem a Pharrrem [122].



Obrázek 21: Ukázka zatěžovací funkce pro jeden indent.

5 Použité materiály a vzorky

Níže jsou specifikovány použité suroviny v surové podobě (podkapitola 5.1), tedy použitý cement, přírodní plnivo a odpadní materiály na bázi mramoru v původní a v upravené podobě pomocí vysokoenergetického mletí pro zvýšení užitných vlastností odpadního materiálu (podkapitola 5.2). Nakonec jsou specifikována složení jednotlivých testovaných kompozitů (podkapitola 5.3 a 5.4).

5.1 Specifikace vstupních surovin

Jednotlivé vstupní suroviny byly analyzovány pro určení chemického složení, granulometrie velikosti a tvaru zrn. Uvedené parametry napomáhají upřesnit možnosti vstupních surovin v aplikaci do cementového kompozitu. Testovány byly materiály pocházející z různých oblastí, a to:

- Portlandský cement CEM I 42,5R z výroby Radotín, společnosti Českomoravský cement, a.s.,
- mramorový kal z oblasti Západního břehu Jordánu, který vznikl během řezání, broušení a leštění mramoru,
- mramorové odprašky z výrobního závodu na území České republiky od firmy Jež, a.s. se sídlem ve městě Beroun. Mramorové odprašky vznikly v procesu drcení a třídění odpadního mramoru na kamenivo,
- drcený mramor frakce 0 – 2 mm z České republiky, přičemž se jedná o stejný zdroj jako v případě mramorových odprašků,
- písek z oblasti Gazy frakce 0 – 2 mm, přičemž se jedná o běžně využívaný stavební písek v dané oblasti okolo západního břehu Jordánu,
- písek z oblasti Zálezlice 0 – 2 mm, přičemž se jedná o běžně využívaný stavební písek na území České republiky.

Chemické složení

V prvním stádiu charakterizace surovin bylo zjištěno chemické složení testovaných materiálů pomocí XRF analýzy. Výsledky XRF analýzy (Tabulka 3) byly stanoveny s nepřesností do 1 %. Jednotlivé prvky jsou vyjádřeny v oxidech prvků a LOI ukazuje ztrátu žíháním. Z výsledků XRF analýzy lze stanovit tyto závěry:

- Příslušné oxidy byly pomocí metody Bogueho kalkulace [132] přepočteny na jednotlivé slídkové minerály. Výsledky ukazují, že použitý cement CEM I 42,5R má

vysoký obsah C_3S (okolo 74,6 hm. %). Jedná se tedy spíše o alitický cement s vysokým nárůstem pevnostních charakteristik v prvních dnech. Použitý cement naproti tomu obsahuje malé množství zbylých slínekových minerálů, jako je C_2S 7,2 hm. %, C_3A 8,1 hm. % C_4AF 8,5 hm. % a MgO 1,6 hm. %.

- Mramorový kal z oblasti Západního břehu Jordánu je velmi čistý a obsahuje minimum příměsí. Obsah $CaCO_3$ ve vzorcích mramorového kalu byl 98,3 hm. %. Ostatní látky měly zastoupení okolo 1 hm. % a obsahují všechny jíly a písky, vyskytují se v mramoru a také všechny nečistoty, které by mohly být přidány do kalu v průběhu zpracování. Největší procentuální zastoupení ostatních látek představují $MgCO_3$ a jílové minerály.
- Mramorové odprašky měly nižší čistotu než v případě mramorového kalu. Množství $CaCO_3$ je přibližně 95 hm. %, zbylé množství tvoří převážně jílové minerály.
- Drcený mramor měl obdobné výsledky jako mramorové odprašky, protože se jedná o stejný zdroj. Největší rozdíl je v zastoupení Fe_2O_3 , protože v průběhu drcení dochází k opotřebování drtících elementů, které kontaminují odprašky.
- V případě obou písků se jedná o křemičitý písek s menším množstvím živců.

Tabulka 3: Chemické složení testovaných materiálů, vyjádřených v oxidech.

Váhová procentuální zastoupení [hm. %]						
Elementární oxidy	CEM I 42,5R	Mramorový kal	Mramorový odprašky	Drcený mramor	Písek Gaza	Písek Zálezlice
CaO	65,50	62,30	57,50	58,20	0,07	0,15
SiO ₂	20,10	1,02	5,02	5,56	90,40	97,81
Al ₂ O ₃	4,40	0,12	0,14	0,13	5,48	1,17
Fe ₂ O ₃	2,50	0,98	1,22	0,54	0,12	0,05
SO ₃	3,00	0,03	0,06	0,06	0	0
MgO	1,51	1,10	0,40	0,40	0	0
Na ₂ O	0,12	0,55	0,73	0,64	0,36	0,06
K ₂ O	0,75	0	0	0	3,45	0,45
Zbylé prvky	0,21	0,20	0,13	0,37	0,03	0,06
LOI	1,91	33,70	34,80	34,10	0,09	0,25

Granulometrie

Distribuční křivky velikosti zrn (Obrázek 22) poukazují na rozdíl mezi použitými materiály do velikosti zrn, kde je jemnost odpadních mramorových mouček vyšší než u Portlandského cementu. Rozdíl mezi mramorovým kalem a mramorovými odprašky je minimální. Průměrná velikost zrna mramorového kalu byla 7,73 mikronů a všechna zrna byla menší než 60 mikronů. Průměrná velikost zrna mramorového odprašku představovala 9,35 mikrometrů a všechna zrna byla také menší než 60 mikrometrů. Písek ze Zálezlic a písek z Gazy měl stejný charakter distribučních křivek zrnitosti. Hlavním rozdílem byla průměrná velikost zrna, a to v případě písku z Gazy 0,26 mm a písku ze Zálezlic 0,51 mm. Oproti dvou referenčním pískům se projevil drcený mramor atypickou křivkou zrnitosti, která v nižších velikostech zrn kopírovala křivku písku z Gazy a v těch větších velikostech zrn zase křivku zrnitosti Písku ze Zálezlic. Zásadní parametry popisující velikost zrn jsou shrnuty v Tabulce 4.

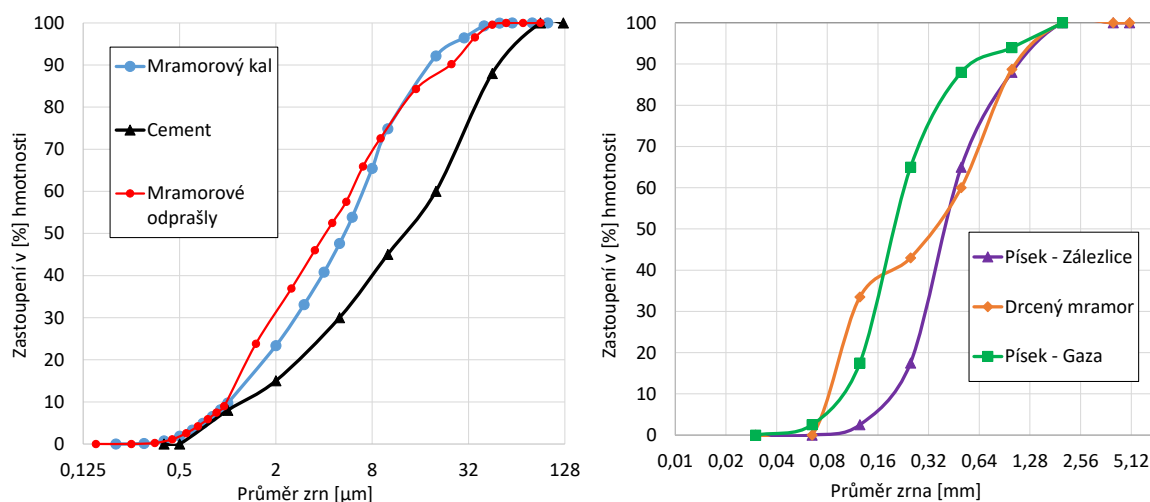
Tabulka 4: Granulometrické složení.

Materiál	Parametry popisující velikost zrna				
	Frakce [mm]	d_{10} [μm]	d_{50} [μm]	d_{90} [μm]	$D_{[3,2]}$ [μm]
Cement	0 – 0,10	1,06	11,94	42,79	1,17
Mramorový kal	0 – 0,06	1,05	5,37	16,87	2,30
Mramorové odprašky	0 – 0,06	1,19	4,59	29,67	2,03
Drcený mramor	0 – 2	85	340	990	-
Písek – Gaza	0 – 2	110	240	530	-
Písek – Zálezlice	0 – 2	220	410	1010	-

Mikroskopická analýza

Charakter jednotlivých zrn použitých materiálů byl stanoven pomocí elektronového mikroskopu (materiály s velikostí do desítek mikronů) a optické mikroskopie (velikost zrn v řádek milimetrů). Výsledek je znázorněn na Obrázku 23. Ze snímků pořízených pomocí mikroskopu bylo zřejmé, že zrnka písku (Zálezlice a Gaza) a mramorového odpadu (kal, odprašky a drcený mramor) mají ostrohranné tvary.

V dalším kroku byla provedena mikroskopická prvková analýza pomocí SEM-EDS pro dva nejdůležitější zkoumané materiály, kterými jsou mramorový kal a mramorové odprašky. Výsledky z mikroskopické prvkové analýzy (Obrázek 24) jsou prezentovány v Tabulce 5. Uvedené hodnoty jsou mírně zkreslené z důvodu nutného poprášení vzorků 30 nm vrstvou uhlíku proto, aby mohla být provedena mikroskopická prvková analýza. S přihlédnutím k těmto zkreslením, jež se projeví jak ve váhových, tak i v atomových procentech zastoupení uhlíků, lze konstatovat, že přibližně z 98 % je mramorový kal



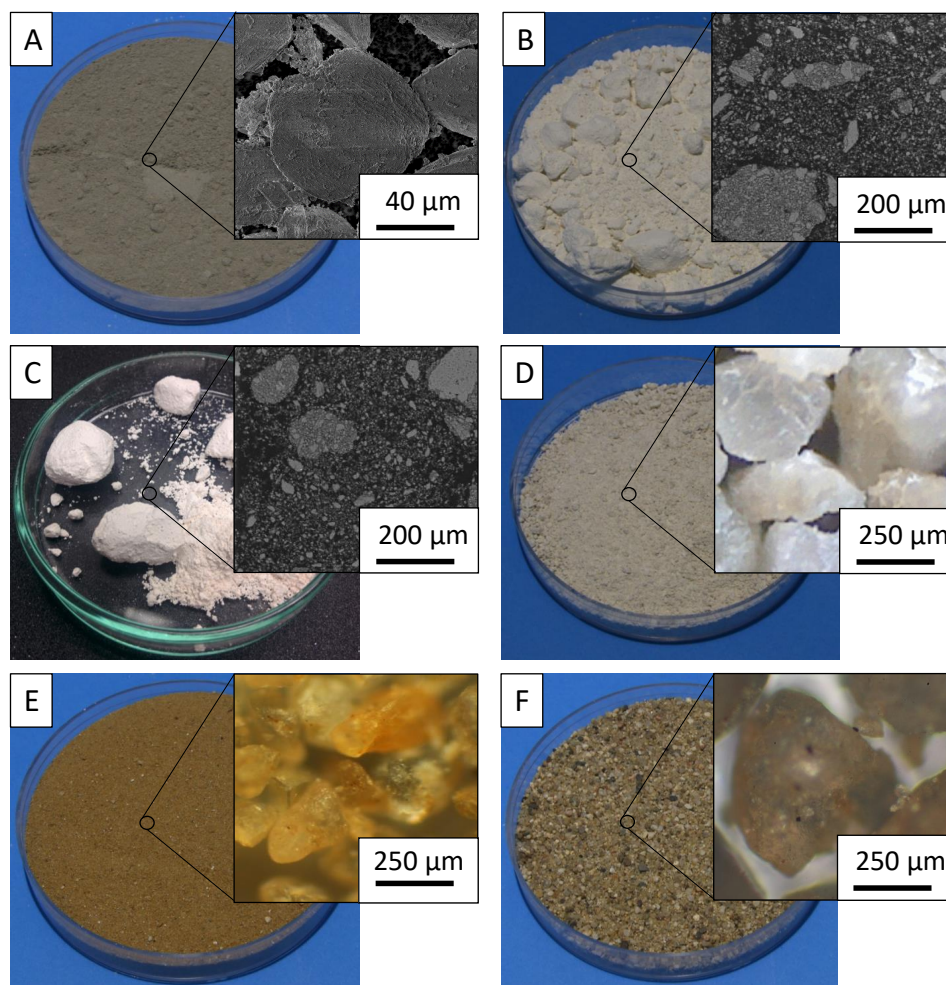
Obrázek 22: Křivky zrnitosti testovaných materiálů: jemné kamenivo a pojivo (vlevo), hrubé kamenivo (vpravo).

tvořen z CaCO_3 . Z prezentovaných hodnot je zřejmé, že mramorové odprašky z České republiky mají obdobné složení jako mramorový kal ze západního břehu Jordánska (z 98 % jsou složeny z CaCO_3 a zbylé 2 % tvoří minoritní složky, z nichž má největší zastoupení MgCO_3). Rozdíl oproti výsledkům z XRF se projevuje v řádu několika procent, což lze považovat za rozdíl v rámci chyby měření. Výsledky zjištěné pomocí mikroskopické prvkové analýzy jsou ve shodě s výsledky ze spektrometrické analýzy.

Ze snímků pořízených během mikroskopické analýzy je patrné, že zrna se skládají z jedné fáze. U bíle označených bodů (značek) v zrně (Obrázek 25) byla provedena prvková analýza. Bylo zjištěno, že se nejedná o inkluze, ale pouze místa, která nebyla řádně naprášena uhlíkem v rámci přípravy vzorku. V těchto místech dochází pouze k nabíjení povrchu vzorku dopadajícími elektrony, a proto se tato místa jeví jako výraznější.

Tabulka 5: Vyhodnocení prvkové analýzy.

Vzorek	Prvek	Váhová Wt. [%]	Wt. [% Sig]	Atomová [%]
Mramorový kal	C	19,29	0,31	32,04
	O	37,02	0,43	46,15
	Mg	0,23	0,04	0,18
	Ca	43,46	0,32	21,63
Mramorový odprašky	C	18,37	0,25	29,81
	O	41,54	0,33	50,60
	Mg	0,28	0,03	0,23
	Ca	39,81	0,25	19,36

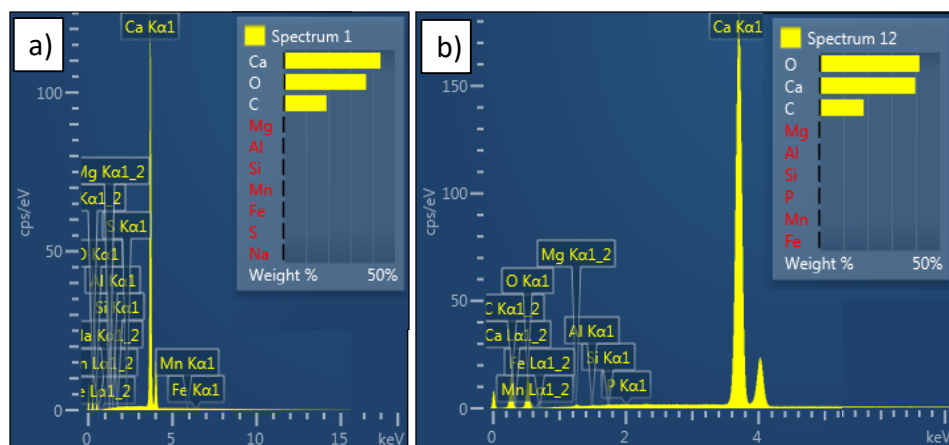


Obrázek 23: Vstupní materiály a jejich mikrostruktura: a) Cement CEM I 42,5 R – elektronová mikroskopie (zvětšení 1500×), b) Mramorový kal – elektronová mikroskopie (zvětšení 100×), c) Mramorové odprašky – elektronová mikroskopie (zvětšení 100×), d) Drcený mramor – optická mikroskopie (zvětšení 80×), e) Písek z Gazy – optická mikroskopie (zvětšení 80 k×), f) Písek ze Zálezlic – optická mikroskopie (zvětšení 80×).

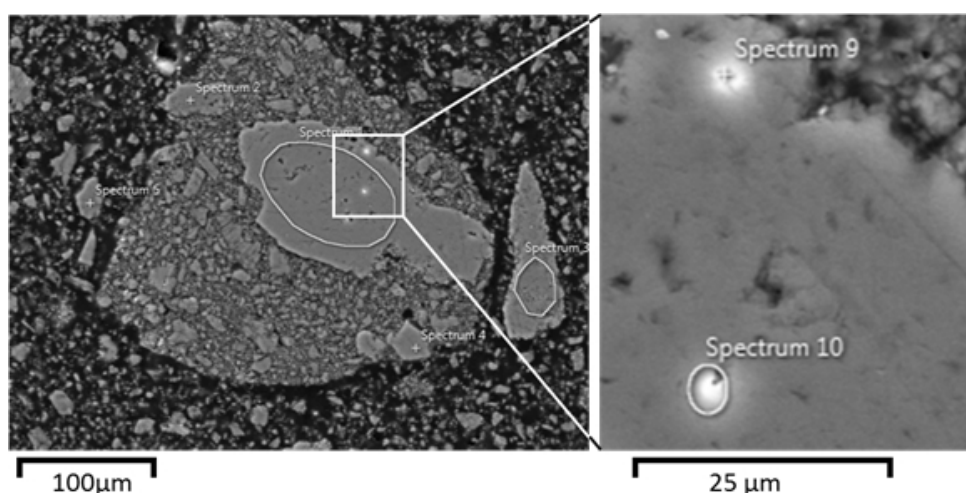
Fázové složení

Na spřátelené univerzitě Birzeit v Turecku byla provedena analýza mramorového kalu. Zjištěné výsledky ukazují, že se mramorový kal skládá z 97 hm. % CaCO_3 , 1 hm. % MgCO_3 a 2 hm. % SiO_2 [138]. Pro porovnání byla provedena XRD analýza mramorových odprašek z ČR. Difraktogram je znázorněn na Obrázku 26. V rámci námi provedeného XRD byly analyzovány mramorové odprašky (pro porovnání s mramorovým kalem) a Portlandský cement (pro stanovení přesnosti Bogueho kalkulaci).

Vrcholy rentgenového spektra (peaky) jednotlivých slínkových minerálů se navzájem překrývají, a proto bylo zkoumáno pouze celkové zastoupení slínek. Pro výpočet množství slínkových minerálů z výsledků XRD byl použit peak na 32,65. Bylo prokázáno, že v cementu je přibližně 90 ± 5 hm. % slínkových minerálů. Jednalo se o semikvantitativní



Obrázek 24: Záznam z prvkové analýzy s průběhem rentgenového spektra: a) mramorový kal, b) mramorové odprašky.



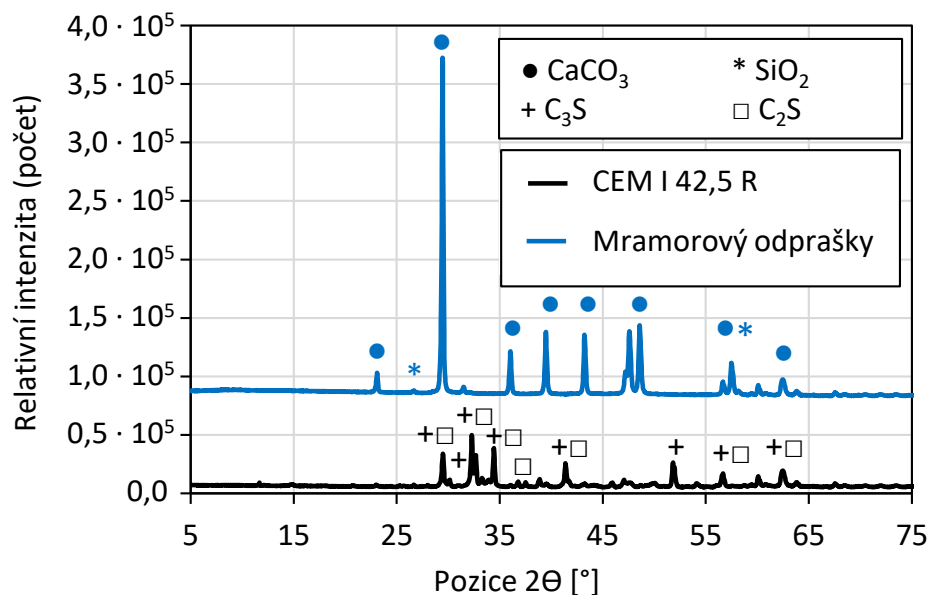
Obrázek 25: Snímek mikromleté mramorové moučky – zkoumané oblasti pomocí analýzy.

analýzu (s přesností přibližně 5 hm. %), a tak lze konstatovat, že zjištěné hodnoty jsou ve shodě s výsledky z XRF.

Difraktogram z mramorových odprašků značí na peaku 29,42 vysoký obsah CaCO_3 (přibližně 98 hm. %). Pomocí XRD byly určeny ostatní jílové minerály. Jedná se především o křemen na peaku 26,66 (2 hm. %). Výsledné hodnoty jsou jako v případě cementu ve shodě s XRF a SEM mikroskopické prvkové analýzy. Výsledky dále ukazují na obdobné mineralogické složení mramorového kalu a mramorových odprašků.

Stanovení vlhkosti

Jemný odpadní materiál z mramoru může mít, a to podle rešerše (podkapitola 2.6), pozitivní vliv na zpracovatelnost čerstvé směsi. Může se jednat o vlivy chemické nebo fyzikální. Mramorová moučka se nejčastěji odebírá z odkaliště, a proto může obsahovat zbytkovou vlhkost. Z tohoto důvodu byla měřena vlhkost jemnozrnných materiálů se záměrem, aby



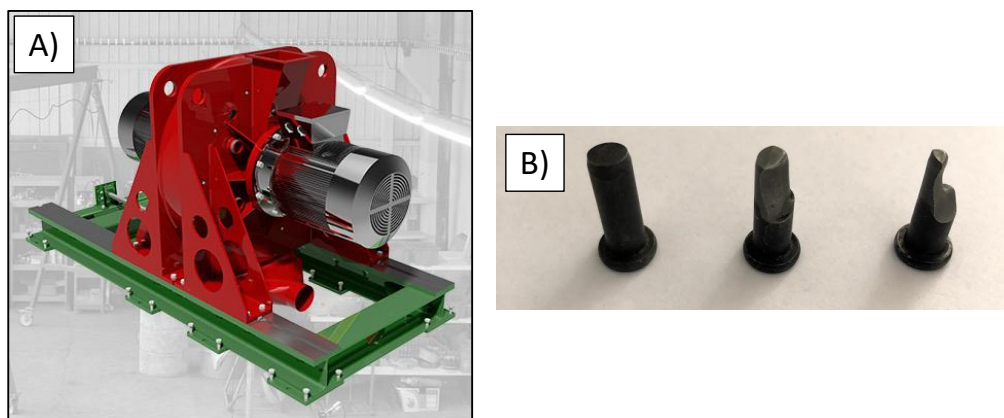
Obrázek 26: Difraktogram Portlandského cementu a mramorových odprašků.

byl co nejpřesněji popsán vliv mramorové moučky na zpracovatelnost čerstvé směsi. Vlhkost materiálu se měřila u cementu, mramorového kalu a mramorových odprašků. Vlhkost byla stanovena pomocí procentuálního úbytku hmotnosti v průběhu vysoušení. Úbytek hmotnosti u testovaných materiálů činil v případě Portlandského cementu CEM I 42,5R 0,38 hm. %, mramorového kalu 0,22 hm. % a mramorových odprašků 0,01 hm.%. S přihlédnutím k přesnosti vah a dalších okolních vlivů lze konstatovat, že všechny jemnozrnné materiály obsahovaly procentuální vlhkost blížící se k nule.

5.2 Vysokorychlostní mletí mramorové moučky

Z výsledků charakterizace vstupních surovin (podkapitola 5.1) lze usuzovat, že mramorový kal a mramorové odprašky mají totožné fyzikální vlastnosti, a proto nebudou dále v práci děleny. Mramorový kal a mramorové odprašky byly sjednoceny pod název mramorová moučka. Vzorek mramorové moučky byl upraven za použití vysokoenergetického mletí, a to přímo pomocí vysokorychlostního mlýnu. Uvedená úprava mramorové moučky (hlavně z pohledu velikosti částic) byla provedena ve firmě LAVARIS, s. r. o. (Libčice, Česká republika) na mlýnu jejich vlastní konstrukce a výroby (Obrázek 27). Obdobně jako u jiných mlýnů vzniká uvnitř vysokorychlostních mlýnů teplo. Vzniklé teplo způsobí vysušení mramorové moučky s nízkou vlhkostí. K vysokorychlostnímu mletí bylo přistoupeno především ze dvou důvodů. Prvním z nich byl fakt, že samotná mramorová moučka byla hrudkovitá, a tak by díky tomu nedošlo k homogennímu rozmístění ve směsi. Druhým důvodem bylo zvýšení měrného povrchu, jehož větší hodnota značí vyšší aktivitu příměsi v cementu, díky čemuž lze jednoznačně určit vliv moučky v průběhu hydratace.

Použitý vysokorychlostní mlýn představuje typ SBD 800 (Obrázek 27) s výkonem 2×30 kW a byl vybaven patentovanými břitvy. Dále byl aplikován dvouúrovňový režim mletí s volbou dvou typů upravených rotorů s variantami osazených mlecích elementů. V prvním případě se jednalo o element ve formě patentovaných pinů o průměru 400 mm a v druhém se jednalo o patentované zuby o průměru 150 mm. V prvním případě byla rychlost mletí nastavena na hodnotu 100 m/s pro oddělení shluků zrn. V druhém případě byly použity tři různé rychlosti mletí pro zvýšení měrného povrchu, a to: 100 m/s, 200 m/s a 300 m/s. Ke třem rychlostem bylo přistoupeno z důvodu co nejmenší ekonomické zátěže nového materiálu, protože v průběhu mletí dochází ke spotřebě velkého množství energie a také k opotřebování mlecích elementů (Obrázek 27). Výsledkem vysokorychlostního mletí byla mikromletá mramorová moučka, která je popsána níže v textu.

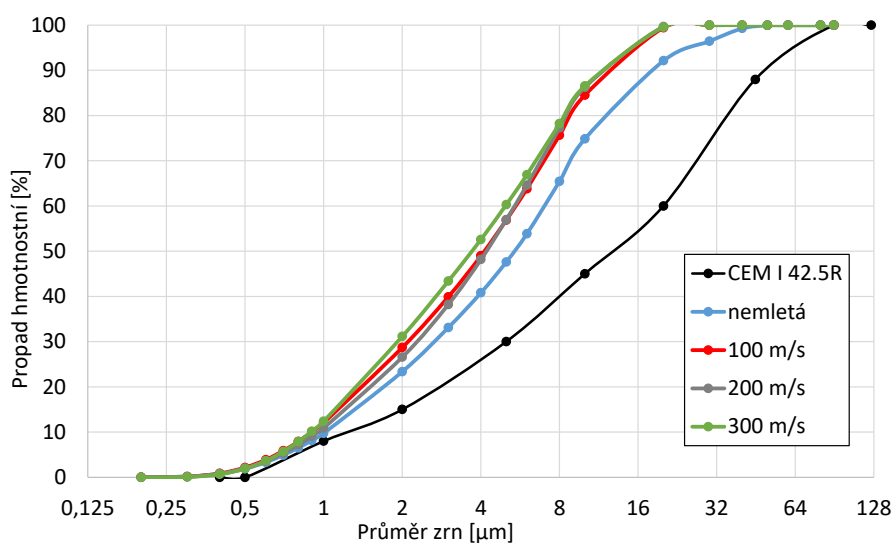


Obrázek 27: a) vysokorychlostní mlýn firmy Lavaris, s. r. o. [60], b) pin (vlevo) a příklad opotřebení pinů (uprostřed a vpravo).

V Tabulce 6 a na Obrázku 28 jsou porovnány vlastnosti cementu, mramorové moučky a různě mikromleté mramorové moučky z pohledu velikosti částic a jejich distribuce. Z dosažených hodnot je patrný nízký vliv rychlosti mletí na výsledný tvar křivky zrnitosti a celkovou velikost zrn, protože střední velikost zrna se mezi jednotlivými mikromletými materiály liší do velikosti $0,5 \mu\text{m}$. Přihlédneme-li i k Sauterově hodnotě, která je nepřímou závislá na měrném povrchu zrn, tedy pokud je hodnota nižší, znamená to, že objem částic je menší a specifický povrch částic naopak vyšší. Lze tedy konstatovat, že co do velikosti zrn nemá různá rychlost mikromletí zásadní vliv na velikost částic.

Tabulka 6: Granulometrické složení – mikromletí.

Parametry popisující velikost zrna					
Materiál	Frakce [μm]	d_{10} [μm]	d_{50} [μm]	d_{90} [μm]	$D_{[3,2]}$ [μm]
Cement	0 – 100	1,06	11,94	42,79	11 749
Mramorová moučka	0 – 60	1,05	5,37	16,87	23 032
Mikromletá mramorová moučka 100 m/s	0 – 40	0,94	4,19	11,15	25 965
Mikromletá mramorová moučka 200 m/s	0 – 40	0,88	4,12	11,73	27 006
Mikromletá mramorová moučka 300 m/s	0 – 30	0,87	3,70	11,12	27 931



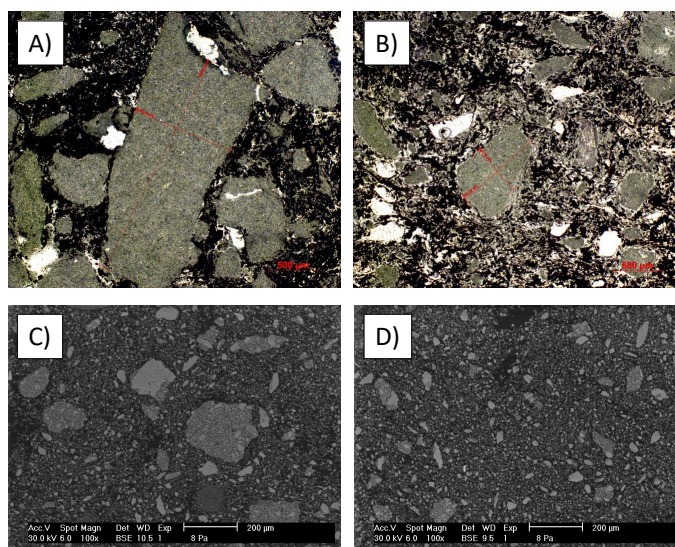
Obrázek 28: Křivka zrnitosti použitého cementu, mramorové moučky a mikromleté mramorové moučky.

Dále byly řešeny tvarové parametry zrn. Do Tabulky 7 byly zaznamenány výsledky z analýzy, jichž bylo dosaženo měření na elektronovém mikroskopu. Celkem bylo analyzováno více než 91 000 zrn z každého recyklátu. Hodnoty kruhovitosti a kulatosti jsou nejdůležitější z hlediska mechanických vlastností výsledného kompozitu. Pro použití do cementového kompozitu se jeví jako nejvhodnější částice podobné kruhu bez drsných okrajů [139]. Nejlepší hodnota kruhovitosti a kulatosti byla prokázána u moučky mleté rychlostí 100 m/s a 200 m/s. Její hodnota činila 0,84 v případě kruhovitosti a 0,88 v případě kulovitosti. Rozdíly mezi jednotlivými mletými materiály jsou natolik malé, že lze z tohoto pohledu konstatovat, že tvar je obdobný a zrna mají mírně podlouhlý ostrohranný tvar. V závislosti na výsledcích je dále v práci řešena pouze jedna mikromletá moučka, která byla mleta rychlostí 100 m/s. Na Obrázku 29 jsou porovnány ilustrační snímky z optické a elektronové mikroskopie mikrostruktury mikromletých vzorků, jež poukazují optický rozdíl mezi mramorovou moučkou v surové podobě a po vysokorychlostním mletí. Snímky jsou důkazem toho, že pomocí vysokorychlostního mletí došlo k dezintegraci shluků zrn v mramorové moučce. Uvedený efekt napomáhá rovnoměrnému rozmístění mikromleté mramorové moučky v cementovém kompozitu.

Nakonec byla použita Blainova permeabilní metoda pro potvrzení vyšší aktivity mikromleté mramorové moučky. Referenční cement měl měrný povrch roven $380 \text{ m}^2/\text{kg}$, mramorová moučka $436 \text{ m}^2/\text{kg}$ a mikromletá mramorová moučka $455 \text{ m}^2/\text{kg}$. Z dosažených výsledků lze usoudit, že došlo ke zvýšení měrného povrchu, a díky tomu má mikromletá mramorová moučka vyšší aktivitu.

Tabulka 7: Výsledky obracové analýzy tvaru zrn v závislosti na rychlosti mikromletí.

Parametry popisující tvar zrna			
Materiál	Kruhovitost [-]	Kulatost [-]	Poměr stran [-]
Mramorová moučka	$0,73 \pm 0,17$	$0,78 \pm 0,21$	$2,03 \pm 0,41$
Mikromletá mramorová moučka 100 m/s	$0,84 \pm 0,13$	$0,85 \pm 0,18$	$1,93 \pm 0,38$
Mikromletá mramorová moučka 200 m/s	$0,80 \pm 0,13$	$0,88 \pm 0,17$	$1,95 \pm 0,30$
Mikromletá mramorová moučka 300 m/s	$0,78 \pm 0,15$	$0,79 \pm 0,20$	$1,95 \pm 0,44$



Obrázek 29: a) mramorová moučka, zvětšení $80\times$ z optického mikroskopu, b) mikromletá mramorová moučka, zvětšení $80\times$ z optického mikroskopu, c) mramorová moučka zvětšení, $100\times$ pomocí elektronové mikroskopie, d) mikromletá mramorová moučka, zvětšení $100\times$ pomocí elektronové mikroskopie.

5.3 Vzorčky pro zkoumání na makroúrovni

Cementové kompozity obsahovaly jemnozrnné materiály s maximální velikostí zrna 2 mm, a proto všechny testované vzorky měly nominální rozměry $40 \times 40 \times 160$ mm. Vzorky byly vyrobeny v ocelových trojformách dle ČSN EN 196-1 [134] a ČSN EN 1015-11 [133]. Od každé sady (směsi) bylo vyhotoveno 6 vzorků. Druhý den po výrobě byla zkušební tělesa odformována a uložena volně v laboratorním prostředí při teplotě 22 ± 1 °C a relativní vlhkosti vzduchu 50 ± 2 %.

Návrh testovaných směsí pro náhradu za běžně využívané přírodní plnivo

Testované materiály byly složeny z 10 hm. % Portlandského cementu CEM I 42,5R Rado-tín (podkapitola 5.1) a zbylých 90 hm. % tvořilo plnivo. Jako plniva použitá ve směsích posloužily tyto materiály, suroviny: přírodní těžný písek z oblasti Zálezlic v České republice frakce 0 – 2 mm (podkapitola 5.1), přírodní těžný písek z oblasti Gazy frakce 0 – 2 mm (podkapitola 5.1), drcený mramor frakce 0 – 2 mm (podkapitola 5.1), nemletý mramorový kal (podkapitola 5.1) a mikromletá mramorová moučka (podkapitola 5.2). Vodní součinitel byl navržen tak, aby byla zachována stejná zpracovatelnost směsí při zkoušce rozlití kužele. Rozliv se lišil pro jednotlivé směsi maximálně do velikosti 5 mm. Jmenovitě byl rozliv stanoven po 10 rázech na hodnotu 105 mm a po 20 rázech na hodnotu 190 mm. Složení jednotlivých směsí je zobrazeno v Tabulce 8. Popis jednotlivých směsí (materiálů) je ve formátu Y_Z , kde Y značí druh plniva (SZ – písek Zálezlice, SP – písek z Gazy, LS – drcený mramor, M – mramorový kal, MM – mikromletá mramorová moučka) a Z hmotnostní procentuální zastoupení v plnivu.

Tabulka 8: Složení testovaných malt s náhradou běžně využívaného přírodního plniva odpadním mramorem.

Ozn.	Množství [kg]						Voda
	CEM I 42,5R	Písek Železlice (0–2 mm)	Písek Gaza (0–2 mm)	Drcený vápenec (0–2 mm)	Mramo- rový kal (0–0,06 mm)	Mik- romletá mramo- rová moučka	
SZ ₁₀₀	0,275	2,475	-	-	-	-	0,502
SP ₁₀₀	0,275	-	2,475	-	-	-	0,502
LS ₁₀₀	0,275	-	-	2,475	-	-	0,489
M ₁₀₀	0,275	-	-	-	2,475	-	0,990
MM ₁₀₀	0,275	-	-	-	-	2,475	0,990
LM ₂₅ /MM ₇₅	0,275	-	-	0,619	-	1,856	0,968
LM ₅₀ /MM ₅₀	0,275	-	-	1,238	-	1,238	0,825
LM ₇₅ /MM ₂₅	0,275	-	-	1,856	-	0,619	0,605
M ₂₅ /MM ₇₅	0,275	-	-	-	0,619	1,856	0,990
M ₅₀ /MM ₅₀	0,275	-	-	-	1,238	1,238	0,990
M ₇₅ /MM ₂₅	0,275	-	-	-	1,856	0,619	0,990

Návrh testovacích směsí pro náhradu za Portlandský cement

Směsi použité pro jednotlivé zkoušky byly složeny z Portlandského cementu CEM I 42,5R (podkapitola 5.1) a z mikromleté mramorové moučky (podkapitola 5.2). První směs byla referenční a obsahovala pouze Portlandský cement. U dalších směsí byla část cementu nahrazena mikromletou mramorovou moučkou v různých hmotnostních procentech, a to od 5 do 95 % (Tabulka 9). Poměr vody k celkové hmotnosti suché směsi (vodní součinitel w/b) byl navržen tak, aby byla zachována stejná zpracovatelnost směsí při zkouškách rozlití kužele. Rozliv se lišil pro jednotlivé směsi maximálně do velikosti 5 mm. Konkrétně byl rozliv stanoven po 15 rázech na hodnotu 180 mm.

Tabulka 9: Složení testovaných cementových past s náhradou Portlandského cementu mikromletou mramorovou moučkou.

Ozn.	Procentuální náhrada [%]	Množství [kg]			
		CEM I 42,5R [kg]	Mikromletá mramorová moučka [kg]	Vodní součinitel w/b	Vodní součinitel w/c
M0	0	3,00	0,00	0,35	0,35
M5	5	2,85	0,15	0,32	0,34
M10	10	2,70	0,30	0,32	0,35
M15	15	2,55	0,45	0,32	0,38
M30	30	2,10	0,90	0,32	0,46
M50	50	1,50	1,50	0,32	0,64
M70	70	0,90	2,10	0,32	1,07
M75	75	0,75	2,25	0,32	1,28
M80	80	0,60	2,40	0,32	1,60
M85	85	0,45	2,55	0,32	2,13
M90	90	0,30	2,70	0,32	3,20
M95	95	0,15	2,85	0,32	6,40

5.4 Vzorky pro mikroskopickou analýzu a nanoindentaci

Testování cementových kompozitů na nano či mikroúrovni bylo provedeno na mikroskopických nábrusech. Před vytvořením nábrusů bylo nutné vyplnit prostor pórů vhodnou látkou tak, aby nedocházelo k uvolňování zrn materiálů během přípravy vzorků. Pro tento účel byla využita metoda vakuové impregnace vzorků epoxidovou pryskyřicí (Epofix Kit). Nábrusy byly připraveny na stroji Tegramin od firmy Struers. Vzorky byly broušeny a leštěny ve více krocích za účelem dosažení co nejlepší kvality povrchu vzorků. Kvalita povrchu vzorku je přímo závislá na přesnosti dat, protože s nižší kvalitou vzorku se zvyšuje množství absorbovaných elektronů vzorkem. Tím vznikají místa, pro která nejsou dostupná data. Vzorek cementového kompozitu je tvořen z více fází, a proto byly pro broušení využity pláty s diamanty, které zabraňují selektivnímu odbrušování materiálu v závislosti na tvrdosti. Nezhydratovaný slínek reaguje s vodou, takže byl aplikován lubrikant na bázi alkoholu. V prvním se jednalo o plát MD-Piano 500 (odpovídající drsnosti smirkového papíru 500 zrn/cm²) a v dalších krocích MD-Piano 1200, MD-Piano 2000, MD-Piano 4000. Každý krok trval od 15 do 30 minut a přítlak na vzorek byl 5 N. V posledním kroku byly vzorky ručně leštěny za použití 1/4 μm emulze s obsaženými nanodiamanty po dobu pěti minut. Z důvodu elektrické nevodivosti cementových kompozitů byly oba vzorky naprášeny vrstvou platiny v tloušťce 3 nm pro zlepšení povrchové vodivosti a kvality analýzy.

6 Výsledky a diskuze

Kapitola je rozdělena v závislosti na provedené rešerši a budoucí aplikaci. V rámci podkapitoly 6.1 je řešena náhrada přírodního plniva recyklovaným materiálem na bázi mramorových odpadů a vliv náhrady na mechanické vlastnosti. Obsah podkapitoly 6.2 je zaměřen na možnost náhrady za Portlandský cement a její vliv na mechanické, strukturální a fyzikálně-chemické vlastnosti.

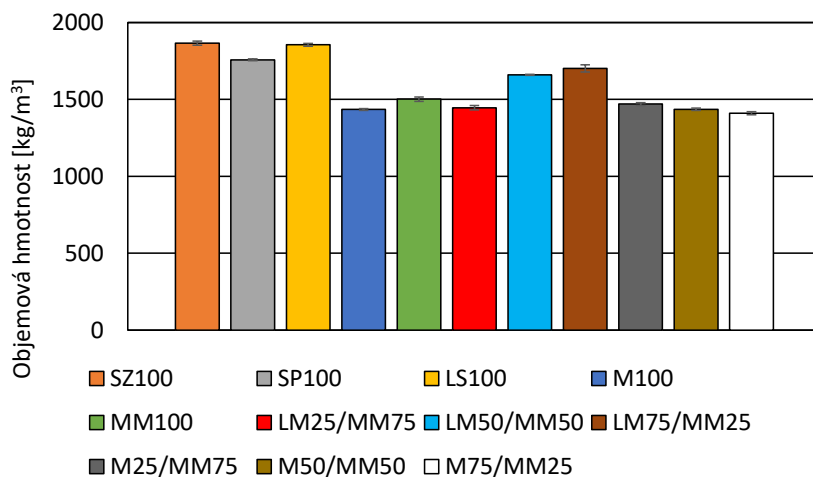
6.1 Využití odpadního materiálu jako náhrady za běžně využívané přírodní plnivo

V první fázi experimentu bylo snahou potvrdit závěry ostatních autorů, kteří popisovali pozitivní vlivy odpadního mramoru na výsledné vlastnosti. Mezi sledovanými parametry byla objemová hmotnost, dynamický modul pružnosti, dynamický smykový modul, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku.

Objemová hmotnost 28 dní starých testovaných směsí je zobrazena na Obrázku 30. Směsi obsahující písek ze Zálezlic (SZ₁₀₀), písek z oblasti Gazy (SP₁₀₀) a drcený mramor (LS₁₀₀) mají přibližně stejnou objemovou hmotnost. Oproti tomu směsi obsahující ze 100 % jen plnivo ve formě jemného mramorového prachu, jako je mramorová moučka (M₁₀₀) nebo mikromletá mramorová moučka (MM₁₀₀), mají hodnotu objemové hmotnosti přibližně o 200 kg/m³ nižší. Jedná se o vliv měrného povrchu jednotlivých plniv a tím i potřebné množství vody pro požadovanou zpracovatelnost. Vodní součinitel w/c (Tabulka 8) u prvních tří zmíněných směsí se pohyboval v rozmezí od 1,77 do 1,82. Oproti tomu směsi s jemnozrnným mramorovým prachem měly vodní součinitel w/c roven 3,27, tj. skoro dvojnásobné množství záměsové vody, která následně způsobí větší porozitu výsledného kompozitu. Jedná se o efekt, jenž byl popsán několika autory [65,99]. S vyšším množstvím drceného mramoru dochází také ke snížení množství záměsové vody a ke zvýšení objemové hmotnosti, přičemž se jedná o běžně pozorovaný efekt [69,83,140].

Výsledky z mechanických zkoušek jsou zobrazeny na Obrázku 31 (nedestruktivní testování) a na Obrázku 32 (destruktivní testování). Zkoušky byly provedeny pro vzorky staré 7 a 28 dní a obě metody poukazují na obdobný trend. Mezi nejdůležitější mechanické vlastnosti z pohledu praktického využití materiálu ve stavebnictví se jeví pevnosti. Z uvedeného důvodu jsou dále v textu diskutovány zejména hodnoty pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku.

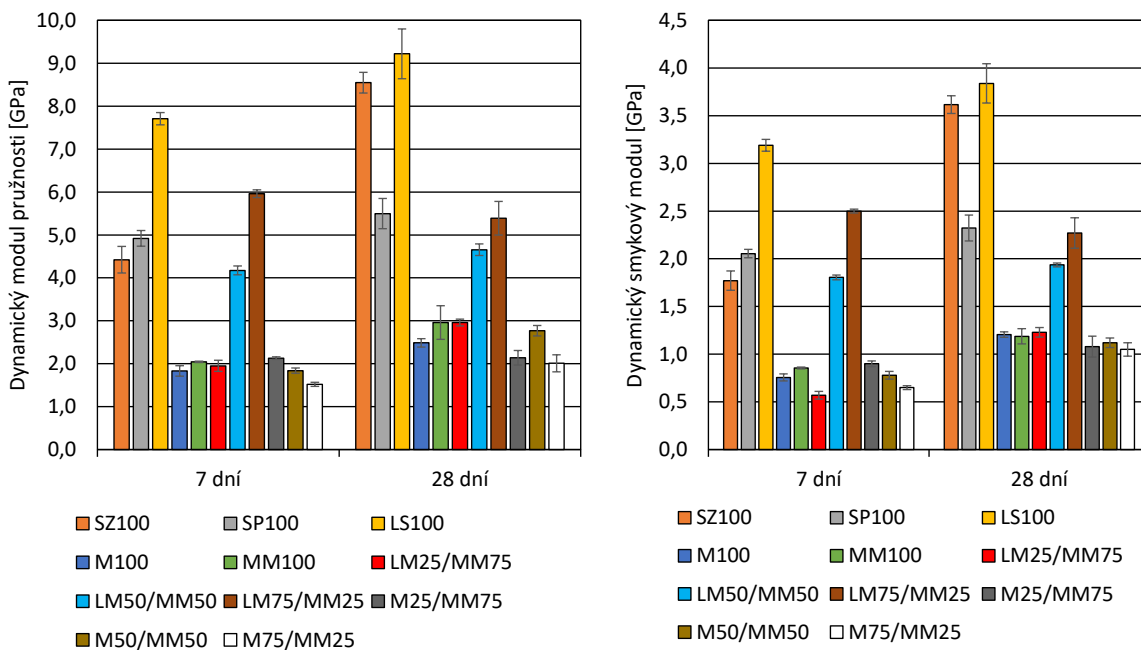
Z výsledků je patrné, že referenční směsi obsahující písek mají horší mechanické vlastnosti než směsi s drceným mramorem. Konkrétně pro 7 a 28denní pevnosti v tlaku je hodnota nižší o 2,5 MPa (7denní pevnosti), respektive 2 MPa (28denní pevnosti) v případě písku ze Zálezlic (SZ₁₀₀) a 2,0 MPa (7denní pevnosti), respektive 4 MPa (28denní pevnosti) v případě písku z oblasti Gazy (SP₁₀₀). Tyto výsledky jsou ve shodě se závěry



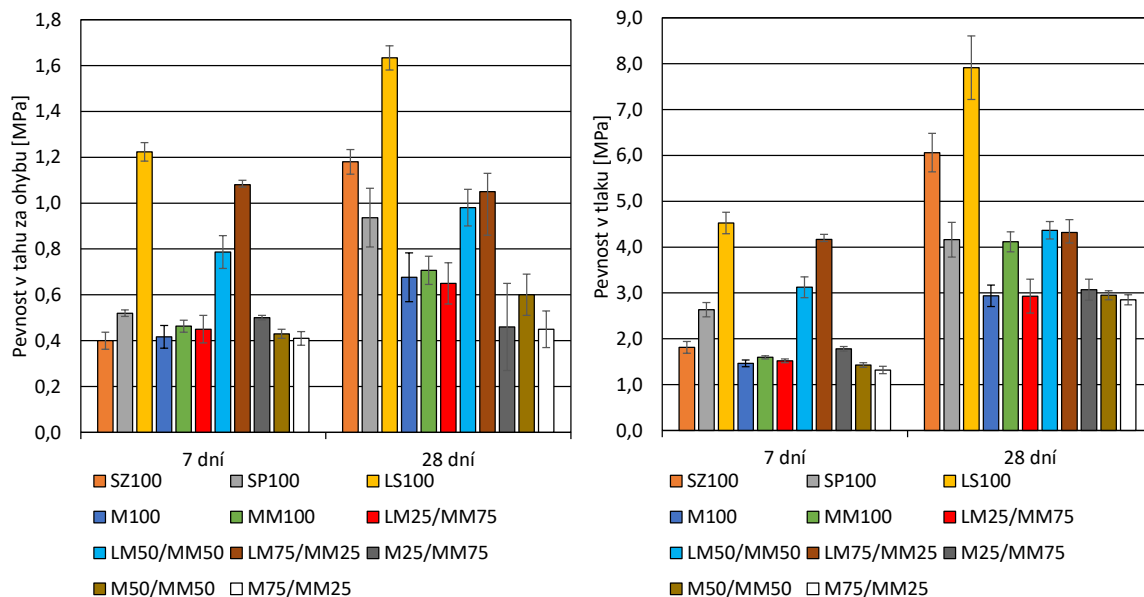
Obrázek 30: Objemová hmotnost testovaných materiálů s vnesenými směrodatnými odchylkami.

dalších prací (studií) [26, 75]. Rozdíl mezi referenčními vzorky je zapříčiněn např. i tím, že písek z oblasti Gazy obsahoval 80 hm. % zrn menších než 1 mm. Zásadní je konfrontace pevností v tlaku směsí obsahujících referenční písek z oblasti Gazy a mikromleté mramorové moučky, kde díky využití procesu mikromletí bylo dosaženo obdobných hodnot pevností v tlaku 28 dní starých vzorků, a to $4,12 \pm 0,20$ MPa, tj. nárůst oproti nemleté mramorové moučce o 1 MPa (25 %). Bylo tedy dosaženo 100 % náhrady jako v práci od Demirela a Kore a kol. [65, 77]. Dosažené hodnoty potvrzují, že technologie mletí měla pozitivní vliv na mechanické vlastnosti pomocí desintegrace shluků a úpravou křivky zrnitosti. Stejných hodnot pevností tlaku bylo dosaženo i s nepříznivým účinkem vyšší porozity, tedy nižší objemové hmotnosti. Pokud jde o pevnost v tahu za ohybu, tak vyšší průměrné pevnosti v tahu za ohybu měly směsi s drceným mramorem a přírodním plnivem. Nejvyšší průměrná hodnota pevnosti v tahu za ohybu byla prokázána u směsi LM_{100} , a to $1,20 \pm 0,04$ MPa pro 7denní pevnost a $1,63 \pm 0,05$ MPa pro 28denní pevnost. Uvedené vzorky představovaly také vysoké hodnoty objemové hmotnosti. Závislost těchto dvou parametrů je ve shodě s prací od Taylora [99].

V poslední fázi experimentu byly zkoumány jednotlivé poměry recyklovaných plniv. Směsi, které byly složeny z drceného mramoru a mikromleté mramorové moučky v poměru 50/50 a 75/25 (LM_{50}/MM_{50} , LM_{75}/MM_{25}), vykazovaly obdobné 28denní pevnosti v tlaku jako směs složená z mikromleté mramorové moučky (MM_{100}). Uvažujeme-li velikost směrodatné odchylky, byl rozdíl poměrně malý. To je však v rozporu s daty získanými od několika autorů, jimž poměr hrubé a jemné frakce vychází mechanicky nejlépe v poměru 1:1 nebo 2:1 [32, 70]. Pokud jde o poměr mikromleté mramorové moučky a nemleté mramorové moučky, tak se získané hodnoty blíží směsi s nemletou mramorovou moučkou (M_{100}) a jednotlivé rozdíly jsou opět ve velikosti směrodatné odchylky.



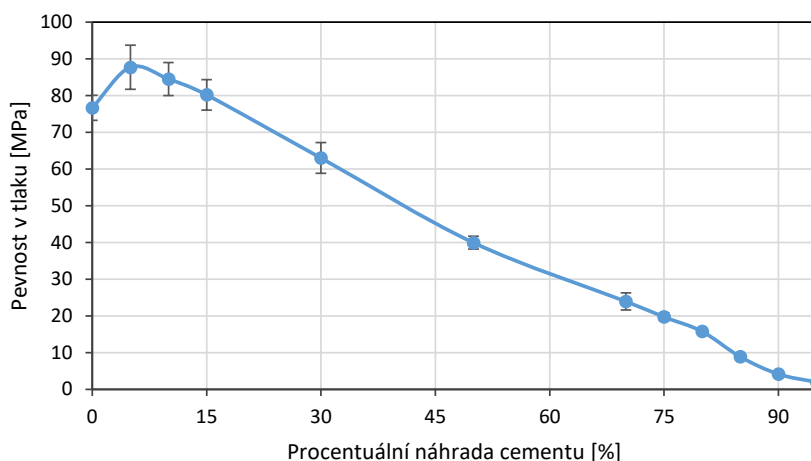
Obrázek 31: Dynamický modul pružnosti a dynamický smykový modul testovaných materiálů s vnesenými směrodatnými odchylkami.



Obrázek 32: Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku testovaných materiálů s vnesenými směrodatnými odchylkami.

6.2 Využití odpadního materiálu jako náhrada za Portlandský cement

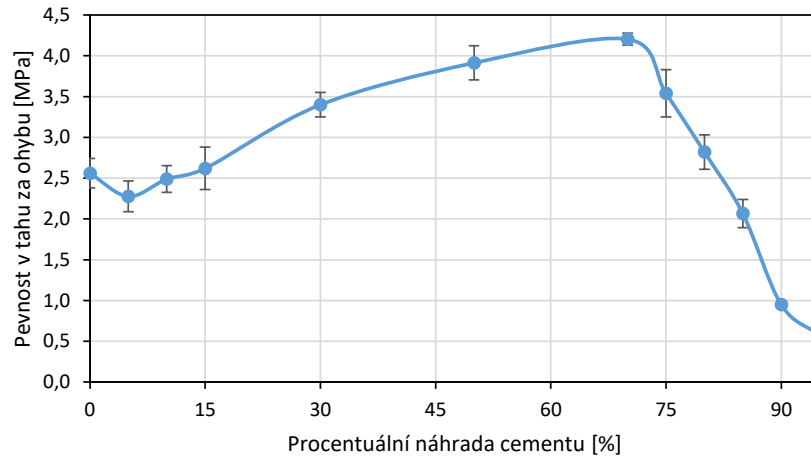
U směsných cementů je vždy hledána aktivita příměsí v průběhu hydratace cementu. Aktivita mikromletého mramoru byla měřena nepřímo pomocí výsledných mechanických vlastností cementových past, kde část Portlandského cementu byla nahrazena mikromletou mramorovou moučkou. V prvním fázi výzkumu byla vytvořena sada vzorků s náhradou až 95 hm. % a byly sledovány základní pevnostní charakteristiky, jako je pevnost v tlaku (Obrázek 33) a pevnost v tahu za ohybu (Obrázek 34). Výsledky prvotní fáze výzkumu sloužily k výběru perspektivních náhrad. Jako perspektivní náhrady se jeví 5 hm. %, 10 hm. % a 15 hm. % (z důvodu vyšších pevností v tlaku) a 50 hm. % (z důvodu vysoké pevnosti v tahu za ohybu při zachování dostatečných pevností v tlaku), tedy směs M5, M10, M15 a M50. Uvedené perspektivní náhrady byly dále podrobněji testovány na vývoj mechanických vlastností a byly sledovány další materiálové charakteristiky v porovnání s referenční směsí.



Obrázek 33: Pevnost v tlaku testovaných směsí v rámci prvotní fáze výzkumu s vynesnými směrodatnými odchylkami.

Vývoj dynamického modulu pružnosti

Výsledky nedestruktivního měření (Obrázek 35 a 36) ukazují to, že referenční směs dosahovala nejvyšší hodnoty dynamického modulu pružnosti, konkrétně $18,7 \pm 0,1$ GPa pro 28 dní staré vzorky. Druhou nejvyšší hodnotu dynamického modulu pružnosti měla směs s 10 hm. % náhradou cementu (M10), která dosahovala o 1 GPa nižší průměrnou hodnotu než referenční směs. Jedná se o výsledky, které jsou srovnatelné s ostatními závěry studií (prací), v nichž modul pružnosti u směsí s náhradami byl nejvyšší v případě 10 hm. % náhrady [89]. Dále lze z Obrázku 35 pozorovat, že nejvyšší nárůst dynamického modulu pružnosti a dynamického smykového modulu je v prvních pěti dnech stáří vzorku.

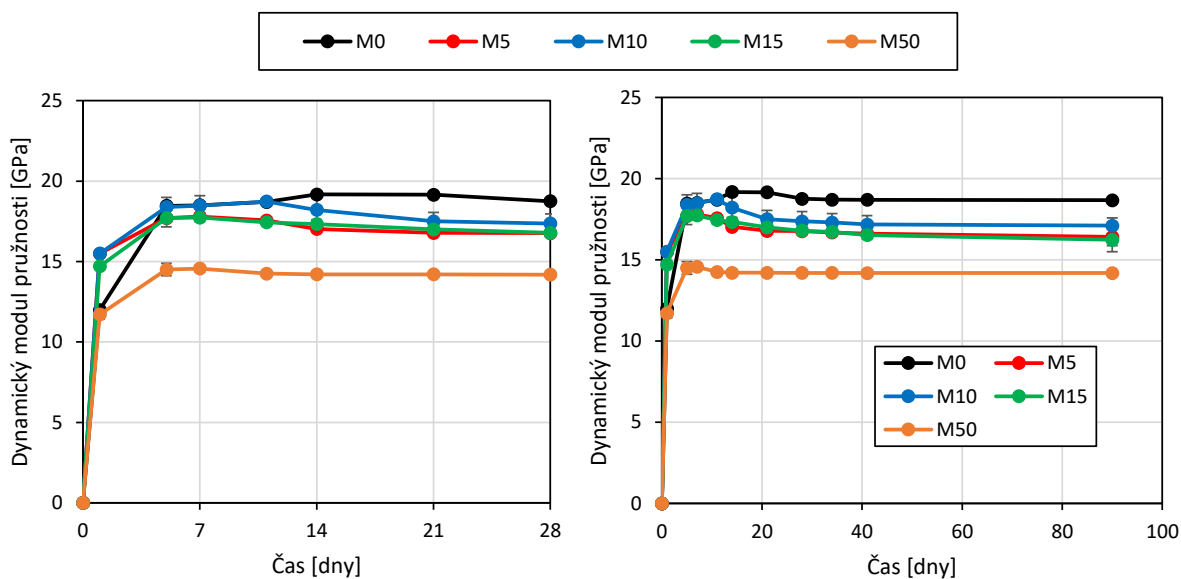


Obrázek 34: Pevnost v tahu za ohybu testovaných směsí v rámci prvotní fáze výzkumu s vynesnými směrodatnými odchylkami.

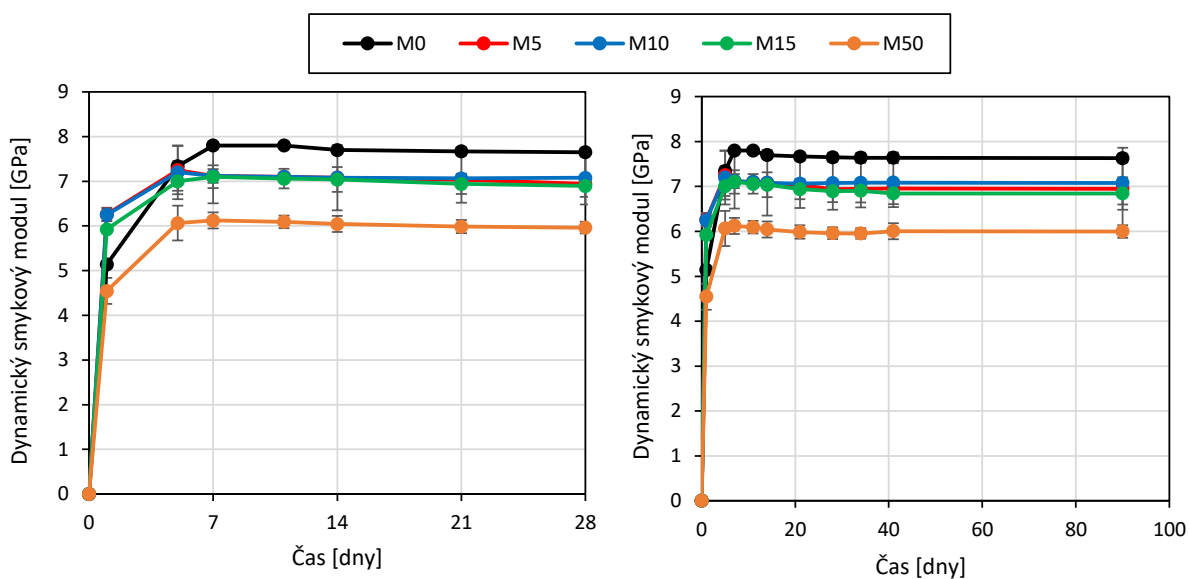
Od sedmého dne dochází k mírnému poklesu dynamického smykového modulu a dynamického modulu pružnosti. Uvedený jev vznikl vlivem vysychání vzorků, protože mezi 7. a 28. dnem došlo k poklesu objemové hmotnosti, a to přibližně o 80 kg/m^3 . Přenosová frekvence měřená pomocí rezonanční metody je ovlivněna vzniklým porézním systémem, čímž dochází k poklesu dynamických modulů, což potvrdily závěry práce od Bacarji a kol. [86]. Dosažené výsledky jsou ve shodě s dalšími autory, neboť pro sady vzorků s různou náhradou cementu od 5 do 20 hm. % se jako optimální množství jeví z pohledu dynamického modulu pružnosti 5 nebo 10 hm. %. [83, 86, 89]. Je však nutné poznamenat, že uvedení autoři využívali nedestruktivní testování na betonových vzorcích s kamenivem do 16 mm a pro měření použili ultrazvukovou metodu. Dynamický smykový modul (Obrázek 36) je ve shodě s výsledky dynamického modulu pružnosti. Rozdíly hodnot mezi jednotlivými vzorky směsí představují co do velikosti směrodatné odchylky.

Pevnostní charakteristiky

Výsledky destruktivních zkoušek jsou zobrazeny na Obrázku 37. U pevností v tahu za ohybu lze pozorovat malé rozdíly v hodnotách, u nichž se projeví rozdíly mezi jednotlivými druhy směsí okolo 0,2 MPa. Rozdíly jsou však do velikosti směrodatné odchylky, a proto lze konstatovat, že mikromletá mramorová moučka nemá, a to v malých procentuálních náhradách za cement, vliv na pevnost v tahu za ohybu. Oproti tomu u náhrady 50 hm. % (směs M50) lze sledovat až dvojnásobný nárůst pevnosti v tahu za ohybu. Uvedený nárůst je způsoben přimícháním více inertních částic, což vede ke vzniku nižších objemových změn, díky nimž byly vytvářeny mikrotrhliny. Obdobný efekt sledovali v případě prostého tahu Khodabakhshian a kol. [92]. Průměrná hodnota pevnosti v tlaku referenčních vzorků byla 76,6 MPa u 28 dní starého vzorku, zatímco směs M10 s 10 % hm. náhradou za cement měla pevnost 87,7 MPa. Nárůst pevnosti v tlaku u 10 hm. %



Obrázek 35: Vývoj dynamického modulu pružnosti s vnesenými směrodatnými odchylkami.

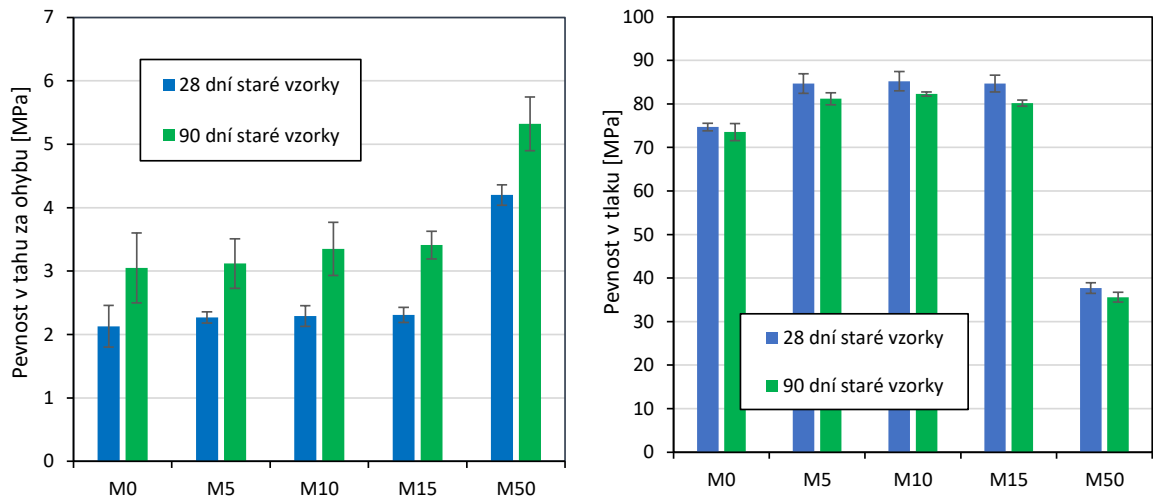


Obrázek 36: Vývoj dynamického smykového modulu s vnesenými směrodatnými odchylkami.

náhrady byl pozorován ve většině případů, v nichž byla část cementu nahrazena mramorovou moučkou. Z pohledu množství náhrady za cement se jako optimální jeví 5 až 10 hm. %. Tyto výsledky jsou v souladu s experimentálními závěry několika dalších autorů, ale opět je nutné poznamenat, že tito výzkumníci prováděli experiment na betonech [26, 80, 84, 85, 89, 90].

Vlivem zrání cementové pasty po dobu 90 dní došlo k nárůstu pevnosti v tahu za

ohybu u všech testovaných směsí přibližně o 1 MPa. Nejvyšší pevnost v tahu za ohybu 90 dní starého vzorku byla prokázána u sady M50, a to $5,3 \pm 0,4$ MPa. Tlaková pevnost vzorků starých 90 dnů byla srovnatelná v porovnání s 28denní pevností. Rozdíly tlakových pevností představovaly co do velikosti směrodatné odchylky. U většiny testovaných případů docházelo v čase k růstu pevnosti, ale ve všech testech byly vzorky uloženy ve vodní lázni, takže díky tomu mohlo docházet k další hydrataci C_2S [81].

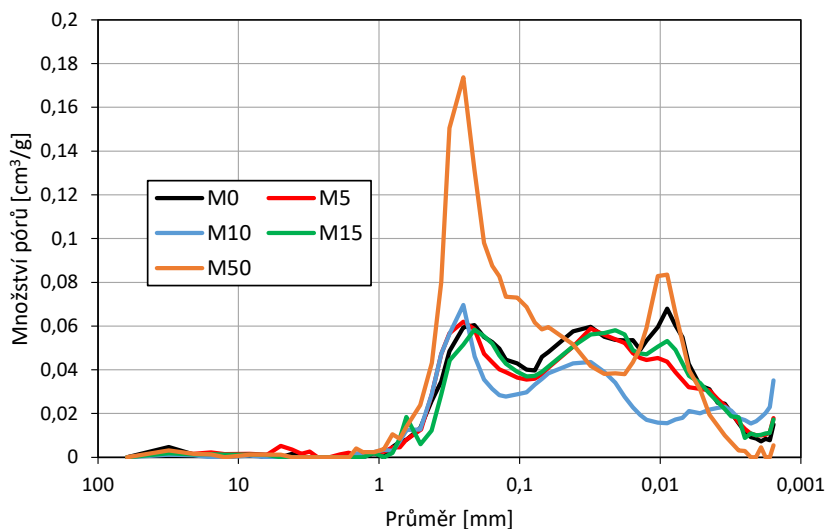


Obrázek 37: Pevnost v tahu za ohybu – vlevo, pevnost v tlaku, s vyneseními směrodatnými odchylkami – vpravo.

Porozimetrie

Prezentované výsledky destruktivních testů jsou ve shodě s distribuční křivkou pórů, kterou lze vidět na Obrázku 38. Je vědecky dokázáno, že pevnost v tlaku cementových kompozitů je přímo závislá na porozitě [96]. Cementové kompozity s nižší porozitou dosahují díky vyšší kompaktnosti lepších mechanických vlastností. V Tabulce 10 je z distribuční křivky pórů spočtena celková porozita, kde vzorky M5, M10 a M15 mají nižší porozitu a zároveň vyšší pevnost v tlaku. Z těchto výsledků lze usoudit, že mikromletá mramorová moučka v menším množství plní v kompozitu funkci mikroplniva, a to zejména v oblasti pórů ve velikosti okolo 10 mikronů. Obdobný efekt mramorové moučky byl pozorován dalšími autory [11, 65]. U vzorku M50 došlo vlivem velkého množství jemných částic k navyšení porozity o 5 % hlavně v oblasti pórů o velikost 500 mikronů a 10 mikronů. Uvedený efekt vznikl větším množstvím volné vody, respektive vodního součinitele w/c (Tabulka 9). Závěry z této kapitoly korespondují s experimentálními výsledky první části těch autorů, kteří použili mramorovou moučku s podobnou charakteristikou zrna (frakce 0 – 40 mikronů, obdobný tvar křivky zrnitosti, velikost středního zrna 5 mikronů a měrný povrch $400 \text{ m}^2/\text{kg}$). U této první skupiny autorů se jeví jako optimální množství náhrady, z pohledu porozimetrie, mezi 5 – 15 hm. % v závislosti na složení betonové směsi [11, 32, 61].

Naproti tomu druhá část odborníků dospěla ke zcela odlišným závěrům, neboť negativně hodnotí vliv mramorové moučky na výsledné vlastnosti betonové směsi. V tomto případě byla použita mramorová moučka vyšší frakce 0 – 90 mikronů [87, 88, 106]. Pravděpodobnou příčinou je nevhodně zvolená křivka zrnitosti a množství pórů vzniklých při tvorbě struktury.

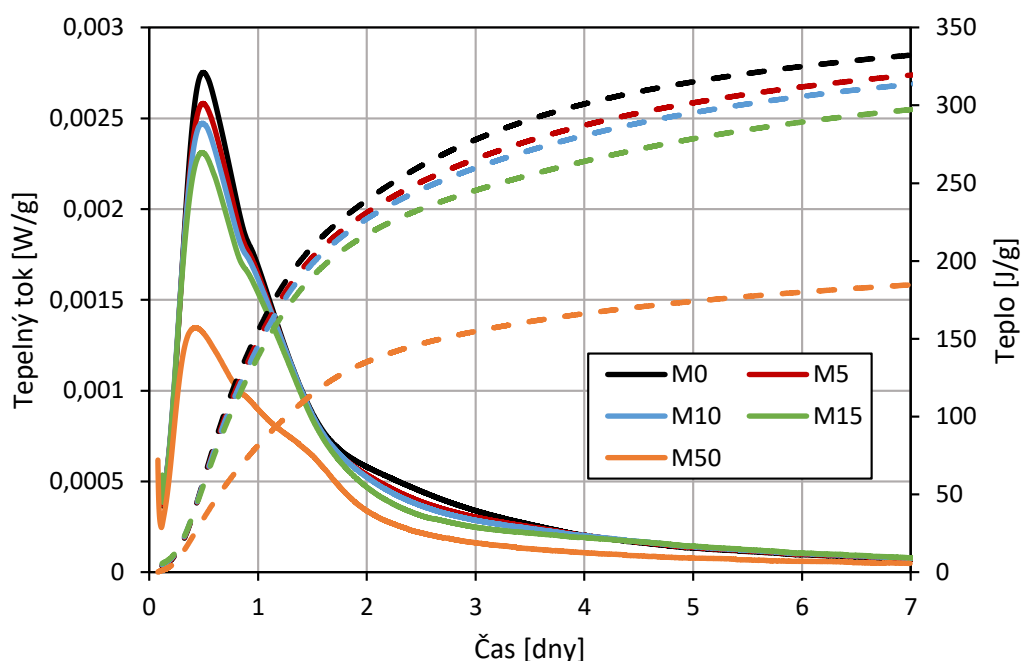


Obrázek 38: Distribuční křivka pórů testovaných směsí.

Vývoj hydratačního tepla

Průběh kalorimetrického měření (Obrázek 39) poukazuje na to, jaký vliv měla mikromletá mramorová moučka na průběh hydratace směsi, protože množství vyprodukovaného tepla je přímo závislé na hydrataci cementu. U směsi s mikromletou mramorovou moučkou lze pozorovat, že po 18 hodinách od začátku míchání cementu s vodou došlo ke snížení tepelného toku oproti referenčnímu cementu. K tomuto jevu došlo vlivem snížení cementu s vysokým obsahem C_3S , které v této periodě produkují největší množství tepla [100]. Další rozdíl nastává v období od 20 do 40 hodin, kdy ve směsi s mikromletou mramorovou moučkou dochází k nárůstu tepelného toku. Často je tento jev přisuzován tvorbě monosulfátu [100]. V našem případě je toto vysoce nepravděpodobné, protože pro přechod na monosulfát je využíván sádrovec, který referenční cement obsahuje pouze v malém množství (viz výsledky XRF analýzy v Tabulce 3). S největší pravděpodobností se jedná o opožděnou reakci některých slínekových minerálů, nebo lze vysvětlení hledat ve velikosti částic [99, 103]. Směsi s mikromletou mramorovou moučkou jsou jemně mleté, tudíž mají větší specifický povrch a tedy i kinetickou energii oproti referenčnímu cementu. Celkové množství vyprodukovaného tepla lze vidět v Tabulce 10 i v případě přepočtení na 1 g cementu. Pomocí uvedeného přepočtu tepelného toku na 1 g cementu (nikoliv celé směsi s mikromletou mramorovou moučkou) se podařilo zdůraznit rozdíly v hydratačním procesu, tedy jestli je moučka zcela inertní, nebo zda má nějaký vliv na hydrataci. Z výsledků

lze pozorovat malý nárůst tepla, a to přibližně o 18 J/g směsi při náhradě 15 hm. % cementu. Při 50 hm. % náhradě je nárůst přibližně dvojnásobný, neboť činí 37 J/g směsi. Uvedený efekt může být způsoben buď přímo mramorovou moučkou, nebo vlivem přidání jemně mletých částic, jemnějších než cement. Obdobný efekt zvýšení uvolněného tepla po přidání mramoru je popsán v práci Jeana Péra [141], který zkoumal vliv přísady ve formě CaCO_3 na hydrataci C_3S . Z jeho experimentálních výsledků bylo zjištěno, že dochází ke vzniku kalcium karbosilikáty. Ale v našem případě nepoužíváme slínek C_3S a CaCO_3 , ale Portlandský cement s vysokým obsahem C_3S (74,6 hm. %) a mramorovou moučku s vysokým obsahem CaCO_3 (95 hm. %).



Obrázek 39: Křivka vývoje hydratačního tepla pro testované materiály (plná čára), kumulativní křivka vyprodukovaného tepla (čárkovaná čára).

Stanovení doby tuhnutí a tvrdnutí

Z výsledků zjištěných pomocí Vicatova přístroje lze vidět, že přidáním malého množství mikromleté mramorové moučky dochází k prodloužení doby tuhnutí. Nejdelší doba tuhnutí byla prokázána u směsi s 10 hm. % náhradou cementu, a to o víc jak 20 minut oproti referenčnímu cementu. S vyšší náhradou dochází ke zkrácení doby tuhnutí, což je důsledkem většího množství příměsi, která je z větší části inertní. Doba tuhnutí a tvrdnutí koresponduje s vývojem hydratačního tepla a lze pozorovat, že dochází ke zpoždění reakce některých slínkových minerálů vlivem mikromleté mramorové moučky.

Navíc také výsledky korespondují s daty z předcházejících měření mechanických vlastností, protože po delší dobu hydratace bylo vyprodukováno menší množství hydratačního

Tabulka 10: Strukturální vlastnosti testovaných směsí se stanovením doby tuhnutí.

Ozn.	Teplo přepočtené na 1 g pojiva [J]	Teplo přepočtené na 1 g cementu [J]	Počátek tuhnutí [min]	Konec tuhnutí [min]	Doba tuhnutí [min]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Porozita [%]
M0	332,5 ± 3,1	332,5 ± 3,1	207	303	96	1942 ± 4	26,6 ± 0,5
M5	319,7 ± 4,5	336,5 ± 4,7	197	292	95	1950 ± 10	25,8 ± 0,4
M10	313,8 ± 4,8	348,6 ± 5,3	191	310	119	1960 ± 9	25,1 ± 0,7
M15	297,5 ± 3,2	350,0 ± 3,8	193	272	79	1920 ± 10	26,0 ± 1,0
M50	184,6 ± 4,4	369,2 ± 8,8	204	271	67	1760 ± 8	30,4 ± 0,4

tepla, a tedy také došlo k nižším objemovým změnám od teplotní kontrakce a dilatace vzorku. Uvedený fakt přispěl k menšímu množství vzniklých mikrotrhlin, a tím také k lepším strukturálním vlastnostem, jež se projevily zvýšením hodnoty pevnosti v tahu za ohybu [141]. K obdobným závěrům dospěl Demirel [65] ve své studii, kde po přidání mramorové moučky byl urychlen počátek tuhnutí, ale konec zůstal stejný, čímž byla prodloužena doba tuhnutí. Podle Demirela je tento efekt způsobem přidavkem CaCO₃ k cementu, který vytváří nukleační centra pro růst portlanditu, čímž urychlí počátek tuhnutí.

Fázová analýza

Pro popsání změn v struktuře byla provedena fázová analýza cementových past za použití elektronového skenovacího mikroskopu v kombinaci s XRF a XRD analýzou. V prvním kroku byla realizována XRF analýza. Výsledky XRF analýzy cementových past jsou uvedeny v Tabulce 11. Ze srovnání obsahu oxidů hlavních prvků je zřejmá především výrazná odlišnost vzorku M50 od ostatních cementových past. Jedná se o vliv použité velké náhrady za cement. Dále lze vidět postupné snižování hmotnostního zlomku SO₃ (z 8,4 % na 6,0 %) a zvyšování obsahu CaO. Všechny tyto změny jsou způsobeny náhradou cementu ve formě mikromleté mramorové moučky, neboť ta má zásadně odlišné chemického složení (viz kapitolu 4). Informace získané z XRF analýzy byly dále použity pro XRD analýzu, a to především s ohledem na možné vzniklé fáze.

V dalším kroku určení fázového složení byla provedena XRD analýza. Difraktogram je znázorněn na Obrázku 40. U slabých peaků je problém se stanovením pozadí, od něhož se peak odečítá díky překryvu se sousedním peakem. Vzhledem k tomu pak fáze, které jsou stanoveny s koncentrací 5 hm. % a menší, nejsou jisté, a proto se jedná o semi-kvalitativní analýzu. Jednotlivé peaky použité pro výpočet podílu zastoupení krystalických fází jsou označeny na Obrázku 40.

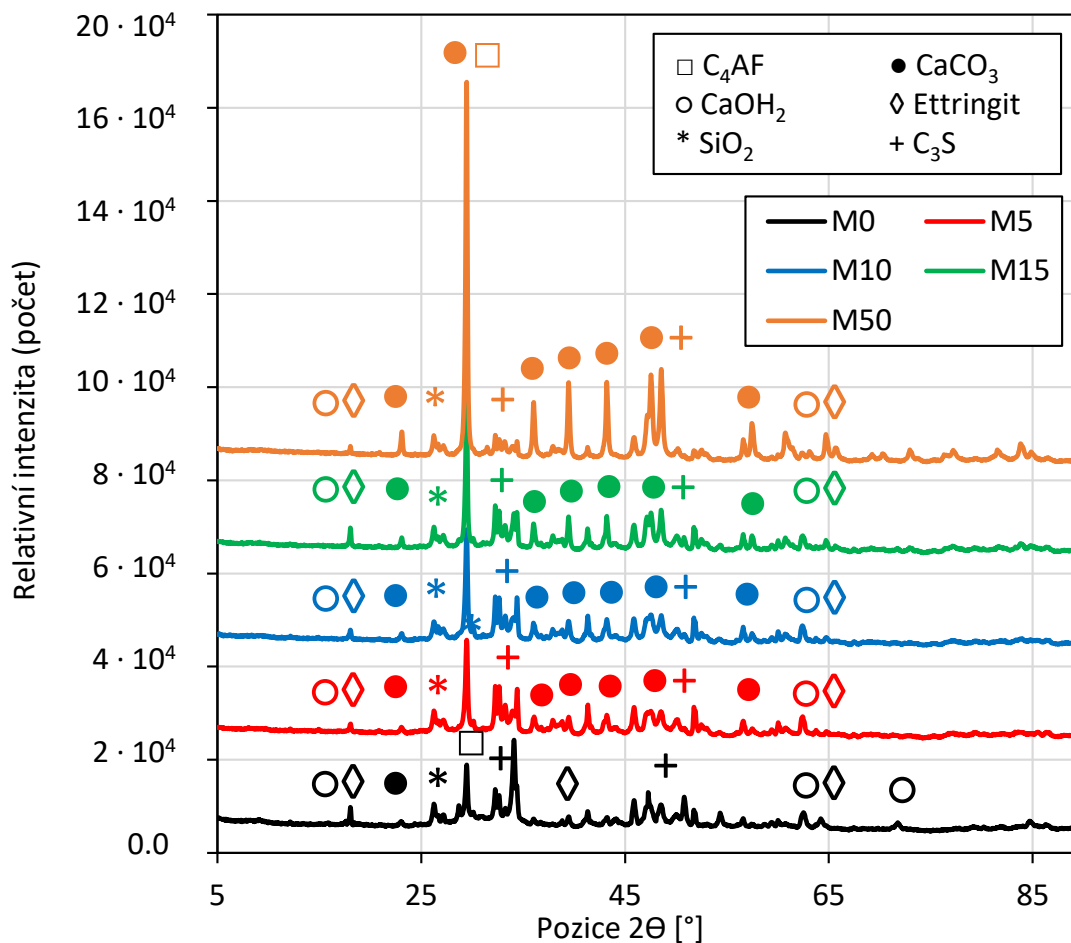
Tabulka 11: Výsledky XRF analýzy.

Oxid	Obsah oxidů hlavních prvků [hm %]				
	M0	M5	M10	M15	M50
MgO	0,72	0,55	0,66	0,78	0,56
Al ₂ O ₃	4,12	3,88	3,92	3,93	3,05
SiO ₂	23,31	20,72	20,16	20,44	14,79
SO ₃	8,44	8,00	7,63	7,69	6,02
K ₂ O	0,72	0,88	0,87	0,86	0,66
CaO	59,94	62,92	63,80	63,47	72,53
Fe ₂ O ₃	2,26	2,50	2,43	2,28	1,88

Fázové složení krystalického podílu je uvedeno v Tabulce 12. Hlavními přítomnými fázemi ve vzorcích byly hatrurit (trikalciumpilikát), brownmillerit (kalcium aluminoforit), kalcit, aragonit, portlandit, křemen a vaterit. V některých vzorcích byly zjištěny malé podíly ettringitu, příp. sádrovce, přičemž určení těchto fází však není spolehlivé. Přes relativně vysoký obsah SO₃ ve vzorcích (z XRF analýzy – Tabulka 11) nebyla nalezena odpovídající krystalická fáze. Z výsledků je patrný vliv na krystalické složení výsledné cementové pasty a dosažené hodnoty jsou ve shodě s ostatními autory, kteří použili XRD analýzu pro určení fázového složení cementového kompozitu [11, 26, 90, 91]. S ohledem na přesnost analýzy však tyto odborní pracovníci neřešili vliv na procentuálně hmotnostní zastoupení jednotlivých fází. V jejich případě byla XRD analýza použita pro charakterizaci krystalických fází.

V posledním kroku byla provedena SEM BSE-EDS analýza pomocí elektronového řádovacího mikroskopu. Na Obrázku 41 jsou znázorněny snímky mikrostruktury testovaných cementových past a v Tabulce 13 je uvedeno jejich vyhodnocení, tedy zastoupení všech fází pomocí SEM BSE-EDS analýzy. Výsledné hodnoty jsou ve shodě s daty, která byla získána z XRD analýzy, neboť po přepočtu podílu krystalických fází (bez C-S-H gelu, pórů a trhlin) detekovaných pomocí SEM-BSE odpovídají množství slínky, mramorové mikromleté moučky a portlanditu XRD s přesností do 5 hm. %.

Ze snímků (Obrázek 41) není patrný rozdíl v mikrostruktuře. Směs M50 (Obrázek 41 E) vykazuje vyšší porozitu, což je ve shodě s dalšími provedenými analýzami. Množství nezhydratovaných slínek v mikrostruktuře klesá s množstvím náhrady cementu. Například u směsi M10 došlo k poklesu nezhydratovaných slínek o 18 %. Přihlédneme-li k faktu, že bylo použito jen 90 hm. % cementu, došlo i v takovém případě k poklesu množství nezhydratovaných slínek o 9 %. Jedná se o vliv inertního zrna mramoru, který nespoteřebává volnou vodu na hydrataci a odděluje jednotlivé slínky v průběhu hydratace od sebe, díky čemuž mají slínky více vody pro hydrataci. Navíc jejich okolí je méně zasa-



Obrázek 40: Difraktogram cementových past.

ženo ostatními slínky, takže voda má snazší přístup k ještě nezhydratované části slínku. Pozorovaný efekt je v rozporu se závěry práce Seghira, jemuž objemové zastoupení nezhydratovaných slínek roste s procentuální náhradou za cement [106]. V rámci jeho výzkumu byla testována cementová malta a tento negativní vliv byl v největším případě způsoben dalšími přidanými aditivy. Navíc lze na Obrázku 41 F sledovat mapu rozložení vápníku. Je patrné, že v referenční směsi (Obrázek 41 Fa) vznikají větší krystaly (50 – 80 mikronů) s vysokým obsahem vápníku, než je u vzorku M10 (20 – 40 mikronů, Obrázek 41 Fb). Podle prvkové analýzy se jedná o krystaly portlanditu CH, přičemž náhrada cementu mikromletou mramorovou moučkou má vliv na velikost portlanditů. Mikromletá mramorová moučka má vysoký obsah vápníku a díky tomu tvoří nukleační centra pro růst portlanditu. Následně pak vznikne větší množství menších krystalů portlanditu. Stejný efekt vlivu mramorové moučky na hydrataci cementu zjistil Demirel [65], ale jen v jeho případě byla moučka použita jako náhrada za kamenivo a vzorky byly uloženy ve vodní lázni. Tyto výsledky ukázaly, že chování mikromleté mramorové moučky v průběhu hydratace není zcela inertní, jak předpokládali Aliabdo a kol. [11]. I když autor použil celou řadu sofistikovaných metod pro určení fázového složení, nebyl schopen určit strukturální

Tabulka 12: Výsledky fázové složení z XRD.

Minerál	Vzorec	Obsah krystalických fází [%]				
		M0	M5	M10	M15	M50
Trikalciumsilikát	$\text{Ca}_3(\text{SiO}_4)\text{O}$	40	35	29	23	5
Kalcium aluminoforit	$\text{Ca}_2\text{FeAlO}_5$	7	6	7	<5	<5
Portlandit	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	39	24	22	21	20
Kalcit	CaCO_3	<5	20	26	33	69
Aragonit	CaCO_3	7	6	6	10	<5
Vaterit	CaCO_3	<5	<5	<5	<5	<5
Křemen	SiO_2	<5	<5	5	<5	<5
Ettringit	$\text{Ca}_6\text{Al}_2((\text{SO}_4)_{2.81}(\text{CO}_3)_{0.51})(\text{OH})_{12}(\text{H}_2\text{O})_{24.4}$	<5	<5	<5	<5	<5
Sádra	$\text{Ca}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})_2$	<5	<5	<5	<5	<5

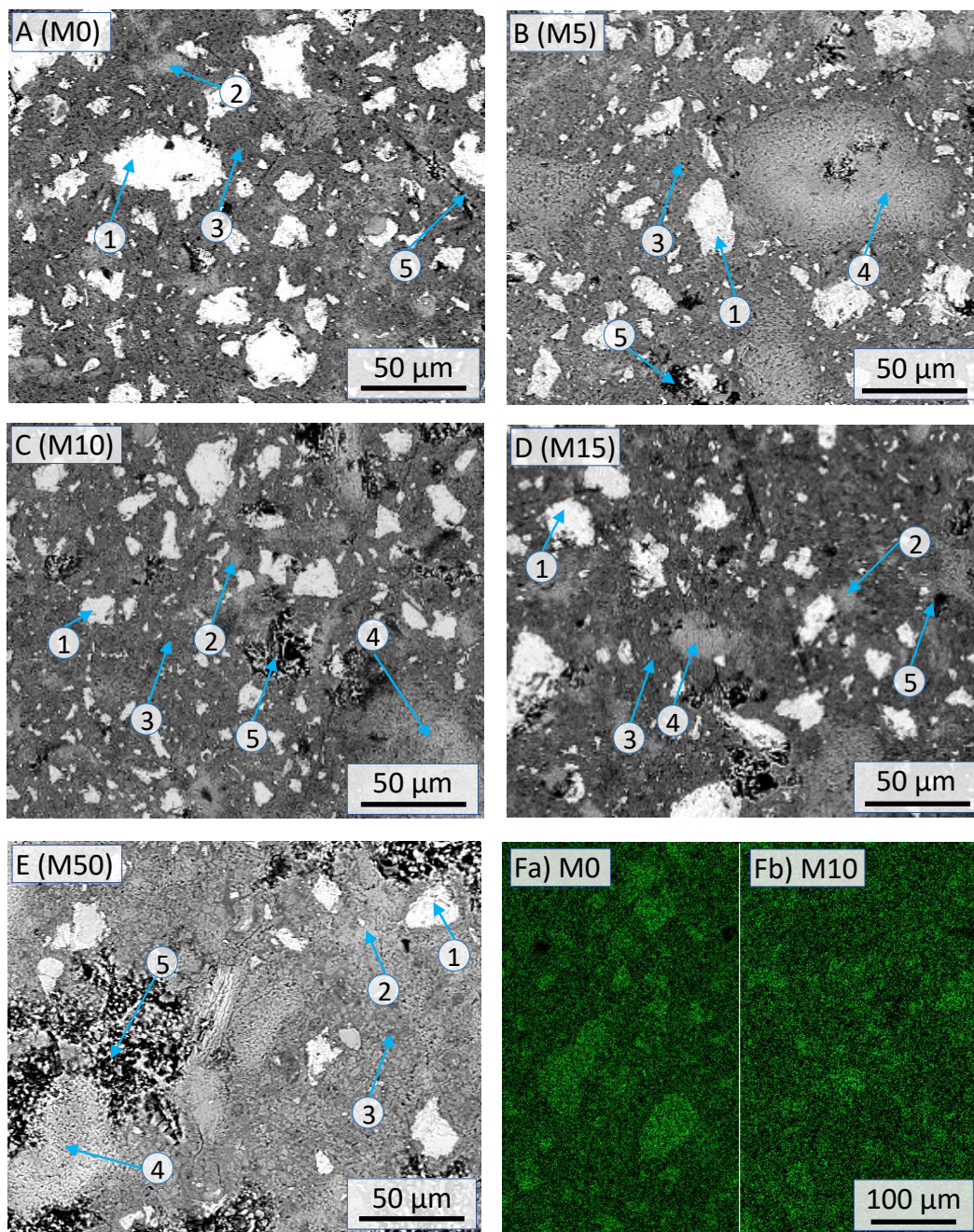
vlastnosti jednotlivých fází (velikost CH krystalu) a jeho závěry byly provedeny z XRD a TGA analýzy.

Tabulka 13: Výsledky fázového složení pomocí SEM obrazové analýzy v kombinaci s EDS analýzou.

Ozn.	Procentuální zastoupení jednotlivých fází [%]				
	Slínek	Mikromletá mramorová moučka	Portlandit	C-S-H gel	Póry a trhliny
M0	17,26 ± 2,31	–	18,49 ± 1,84	61,61 ± 4,22	2,63 ± 0,11
M5	15,14 ± 2,01	4,99 ± 1,11	12,98 ± 1,51	64,25 ± 3,25	2,65 ± 0,25
M10	14,27 ± 1,91	10,21 ± 1,45	12,86 ± 1,48	60,12 ± 3,68	2,53 ± 0,32
M15	10,68 ± 1,18	14,22 ± 1,48	13,38 ± 1,61	59,11 ± 2,96	2,62 ± 0,28
M50	6,58 ± 0,59	51,21 ± 3,69	9,40 ± 1,55	29,42 ± 2,99	3,39 ± 0,48

Přechodová zóna mramor/cement

Další fáze výzkumu se zabývala tranzitní zónou v okolí zrna mramoru. Pro zobrazení byl použit detektor zpětně odražených elektronů, který dává informaci o fázovém kontrastu materiálu. U jednotlivých skenů byl výsledek obdobný, a proto byl jeden vybrán jako reprezentativní, na němž jsou výsledky popsány (Obrázek 42). Na Obrázku 43 lze po-



Obrázek 41: Snímky ze SEM mikroskopu: A) Mikrostruktura vzorku M0, B) Mikrostruktura vzorku M5, C) Mikrostruktura vzorku M10, D) Mikrostruktura vzorku M15, E) Mikrostruktura vzorku M50 – BSE detektor, zvětšeno 500×, 1 – slínek, 2 – portlandit, 3 – C-S-H gel, 4 – zrno mramoru a 5 – póry/trhlina F) Prvková mapa rozmístění vápníku: a) vzorek M0, b) vzorek M10, zvětšeno 400×.

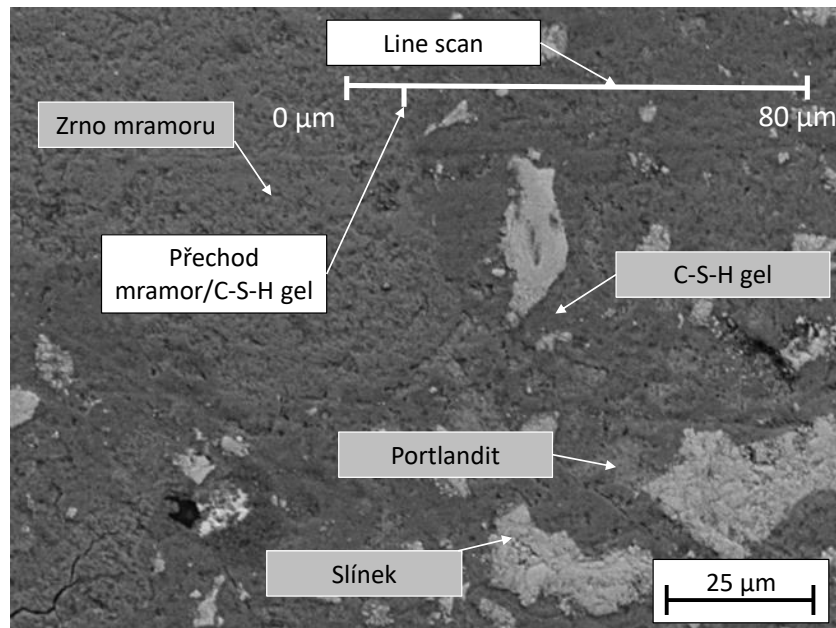
zorovat průběh váhového a atomárního zastoupení kyslíku, vápníku a křemíku a poměr Ca/Si. Důraz byl kladen na tyto prvky, protože CEM I 42,5R Radotín má velký obsah C_3S (trikalciumpilikát) a C_2S (dikalciumsilikát) a malý obsah C_3A (trikalciumaluminát) a C_4AF (tetrakalciumaluminoforit), tzn. že výsledný produkt je tvořen hlavně těmito prvky.

V místě vzniku C-S-H gelu, tedy fází vzniklých hydratací a hydrolýzou C_3S a C_2S , má množství vápníku a křemíku vliv na vzniklé nové fáze. Celkově lze říci, že identifikace, tedy přesné složení struktur hydrosilikátů (hydrosilikátových gelů), je obtížná, a proto je uveden pouze poměr Ca/Si. Výsledný C-S-H gel lze chemicky popsat takto [99]:



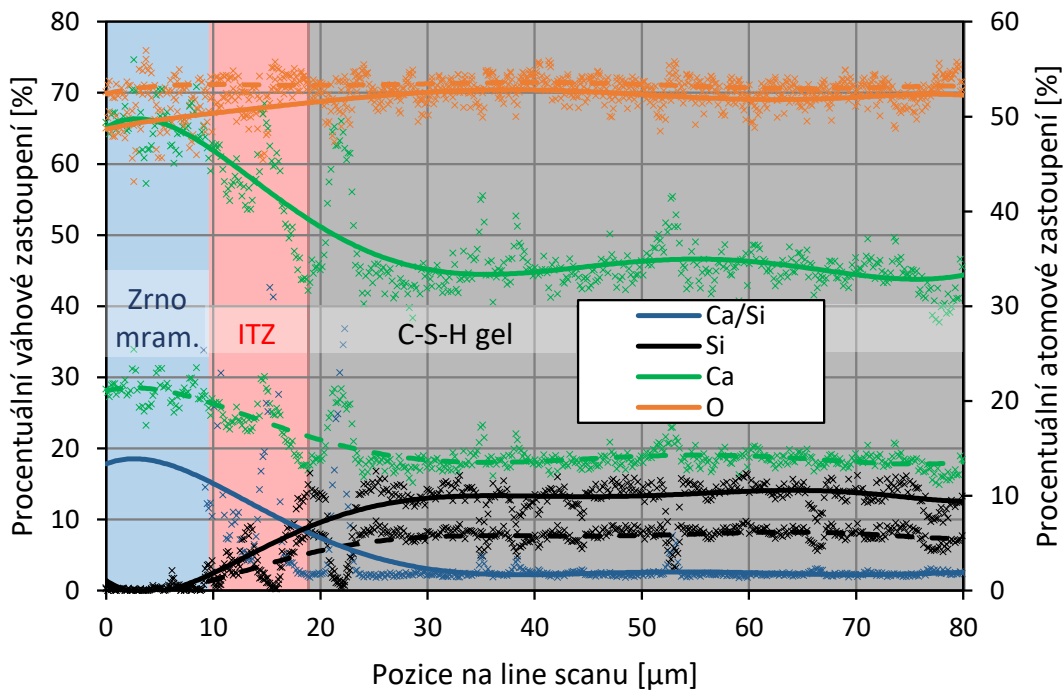
kde u C-S-H gelu s vysokou hustotou jsou konstanty ve velikosti a rozmezí: $x = 0,5 - 1,5$, $y = 1$, $z = 0,5 - 2,5$ a u C-S-H gelu s nízkou hustotou $x = 1,5 - 2$, $y = 1$, $z = 1 - 4$.

Pokud se podíváme na váhové a atomární zastoupení vápníku (Obrázek 43), lze pozorovat, že v místě zrna se nachází větší koncentrace vápníku. Velké množství vápníku v zrně je způsobeno jeho složením. Jedná se z 98 hm. % o kalcit, tedy $CaCO_3$. Posléze do vzdálenosti přibližně 10 mikronů od zrna dochází ke zvýšení poměru Ca/Si, což je způsobeno hlavně snížením množstvím křemíku a následně do 20 mikronů dochází k pozvolné změně na původní hodnoty. Z výsledků lze konstatovat, že v okolí zrn se upřednostňuje vytváření jedné fáze, která má vyšší poměr Ca/Si. Uvedenou fázi by mohl představovat LD C-S-H gel. Pro potvrzení této domněnky byla následně provedena indentace.



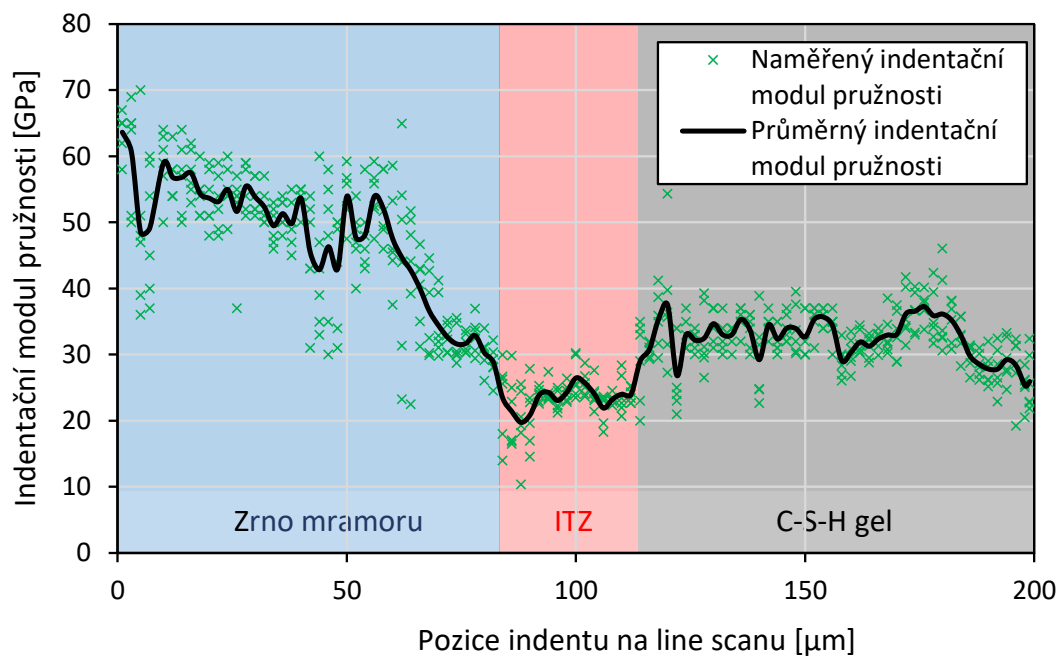
Obrázek 42: Schéma provedeného line scanu vzorku M10 s popisem jednotlivých fází, zvětšeno 500×.

Na Obrázku 44 je znázorněn vývoj indentačního modulu v line scanu. V oblasti 0 až 50 mikronů lze sledovat indentační modul mikromletého mramorového zrna. Průměrná hodnota indentačního modulu zrna mramoru byla 55 GPa. Oblast 50 až 80 mikronů je ovlivněna okolními fázemi. Indentace a vyhodnocení pomocí metody podle autorů Olivera – Pharra [122] počítá s homogenním poloprostorem v místě indentu. Jedná se tedy



Obrázek 43: Výsledky line scanu vzorku M10 pomocí EDS analýzy ve váhových (plná čára) a atomárních (čárkovaná čára) koncentracích.

o klasickou dekonvoluci s jasnou hranicí materiálu, což u heterogenních materiálů se zrny není. Z těchto důvodů jsou výsledky ovlivněny okolním prostorem a kontaktem s ostatními tělesy. V oblasti od 80 do 110 mikronů se dostáváme do tranzitní zóny mezi zrnem mramoru a cementovou pastou. Hodnoty indentačních modulů tranzitní zóny ukazují na její horší mechanické vlastnosti, v průměru o 5 až 10 GPa. V další části line scanu, tj. v oblasti nad 110 mikronů, je indentační modul obdobný jako v jiných místech pro C-S-H gel. Výsledky potvrzují původní domněnku o přechodové zóně s nižšími mechanickými vlastnostmi, tedy LD C-S-H gel.

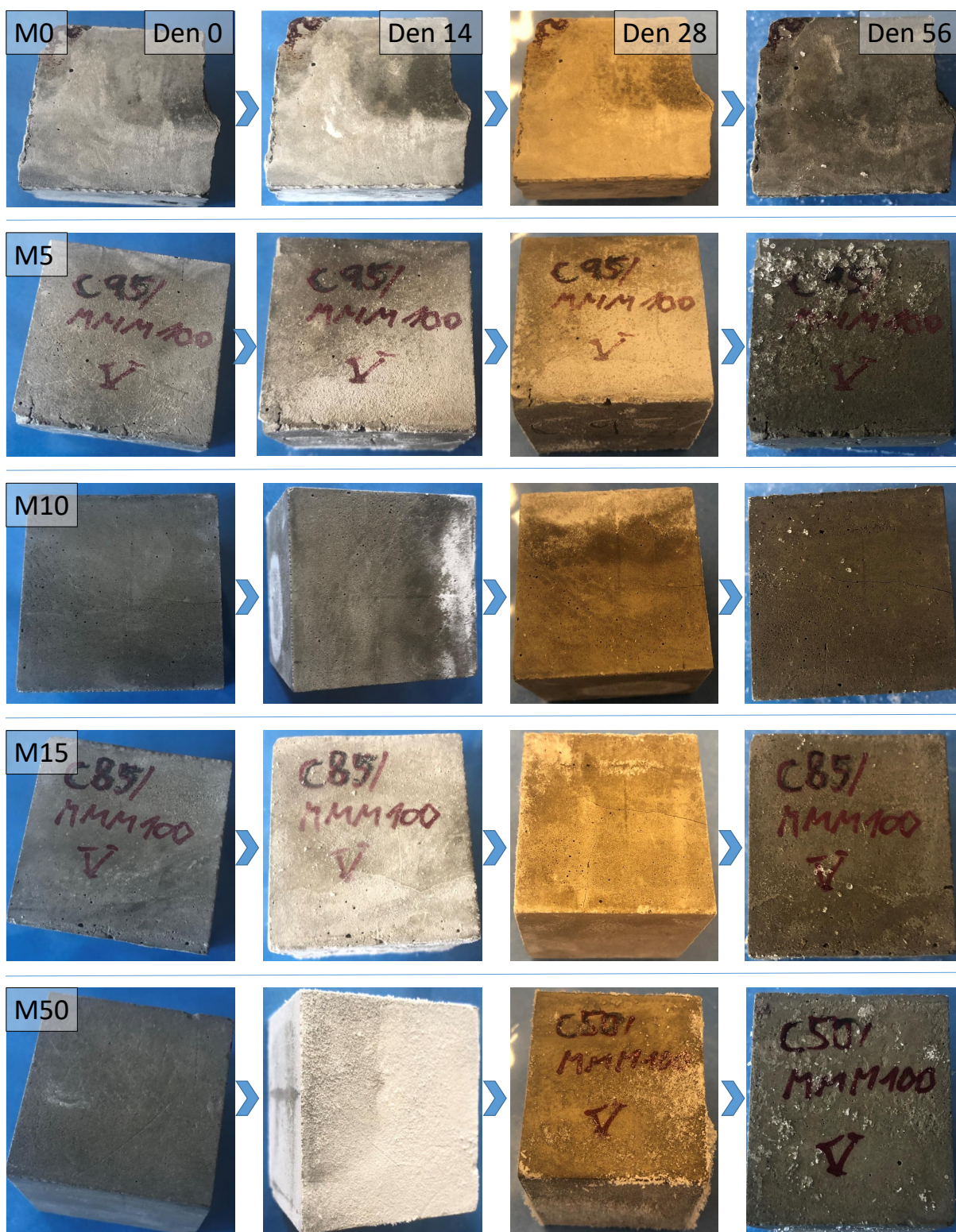


Obrázek 44: Trend indentačního modulu v line scanu přes hranu mramorového zrna.

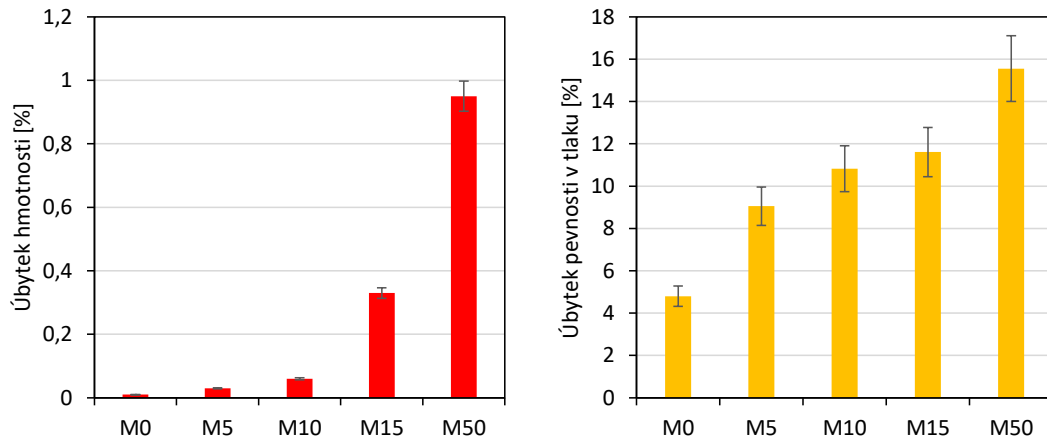
Odolnost proti síranové korozi

Průběh vizuálního zkoumání testovaných směsí lze pozorovat na Obrázku 45. Po 14 dnech urychlené síranové koroze v 10 % Na_2SO_4 došlo u sledovaných vzorků M50, M15 a M10 k viditelné tvorbě bílých krystalů na jejich povrchu. Reakcí síranu sodného s cementovou maticí za nízkých teplot vzniká thaumazit. Po 28 dnech síranové koroze došlo ke vzniku prvních trhlin ve všech zkoumaných vzorcích, jen kromě referenční směsi. Jednalo se především o vlásečnicové trhliny způsobené vykrystalizováním thaumazitu. Po dalších 28 dnech (56. den) už nedocházelo k dalšímu rozšiřování trhlin, nýbrž k vyluhování vápníku, který následně krystalizoval na povrchu testovaných materiálů.

Po 56 dnech byly cementové pasty otestovány, a to za účelem zjistit úbytek hmotnosti vlivem vyluhování vápníku a pevnosti v tlaku, které slouží pro stanovení koeficientu korozní odolnosti (Obrázek 46). U všech směsí s mramorovou moučkou došlo k úbytku hmotnosti, jako například u vzorku M50 až 0,95 hm. %. Uvedený úbytek naznačuje zhoršenou odolnost proti síranové korozi. Předpoklad následně potvrdil test pevnosti v tlaku, kde vzorek M50 dosahoval o 15,5 % nižší pevnost v tlaku po 56 dnech v 10% roztoku Na_2SO_4 , tedy koeficient korozní odolnosti byl 0,845. Zbylé materiály s mikromletou mramorovou moučkou dosahovaly koeficientu korozní odolnosti 0,9. Výsledky jsou ve shodě i s ostatními autory, kteří se zabývali ve svých výzkumech síranovou korozi [142]. Oproti zrychlené síranové korozi použili tradiční způsob, který trval jeden (celý) rok. Po roce prokazovaly vzorky složené z 20 hm. % CaCO_3 nižší pevnost v tlaku o 20 %.



Obrázek 45: Vizuální stanovení síranové koroze.



Obrázek 46: Procentuální úbytek fyzikálních vlastností vlivem působení síranové koroze po dobu 60 dní (2 měsíce): úbytek hmotnosti – vlevo, úbytek pevnosti v tlaku – vpravo, s vynesnými směrodatnými odchylkami.

7 Praktická aplikace

V rámci problematiky zaměřené na využití odpadního materiálu na bázi mramoru bylo řešeno několik grantových projektů. V jejich rámci byla využita data z prezentovaného výzkumu v kombinaci s dalšími články a daty získanými autorem. Data byla publikována v konferenčních sbornících nebo v odborných časopisech.

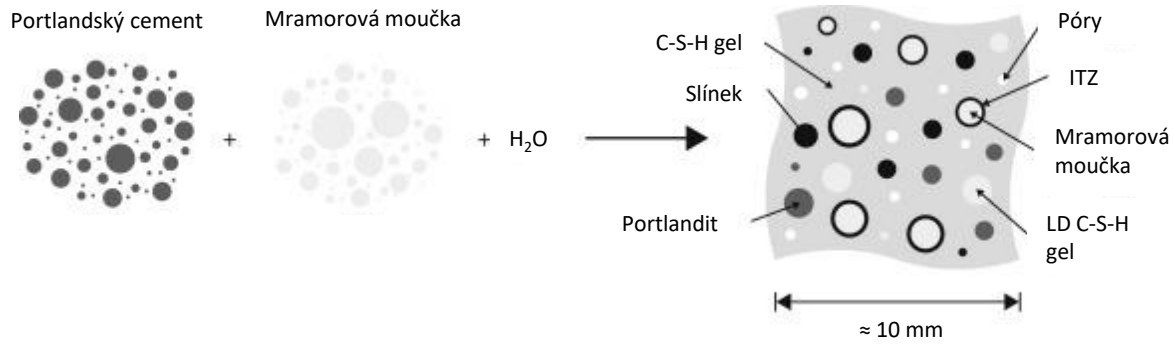
V podkapitole 7.1 jsou získaná data využita v základním výzkumu, přičemž se jedná především o data z podkapitoly 6.2, v níž jsou řešeny vlivy na hydrataci a výsledné produkty (fáze) v cementovém kompozitu. Následně je v podkapitole 7.2 věnována pozornost některým významným cílům projektů založených na aplikovaném výzkumu a orientovaných na využití odpadního materiálu v nových výrobcích.

7.1 Využití dat pro vytvoření mikromechanického modelu

Experimentálně získaná data byla v další fázi výzkumu použita pro vytvoření mikromechanického modelu, jenž vznikl ve spolupráci s Václavem Nežerkou tak, aby ho bylo možné v budoucnu rozšířit o další materiály, jako je mikromletý beton [143]. Mikromechanický model sloužil hlavně k potvrzení domněnky o ITZ zóně v oblasti okolo zrna mramoru a vycházel z předchozích použitých modelů v práci doktora Nežerky, která se zabývala modelováním malty na bázi vápna a modelu vytvořeným Pichlerem a Hellmichem [144]. Mikromechanický model byl vytvořen za využití homogenizačního schématu Mori-Tanaka [145] v kombinaci s von Misesovým kritériem selhání cementových past. Uvedené kombinace bylo využito v již prezentovaných modelech cementových kompozitů, např. od autorů Feenstra a de Borste [146].

Vytvořený mikromechanický model cementových past s náhradou ve formě mikromleté mramorové moučky byl modelován jako jednoúrovňový, tedy v jediném měřítku. Reprezentativní objemový element byl složený z fází zjištěných v podkapitole 6.2. V rámci této podkapitoly bylo také určeno zastoupení jednotlivých fází a jejich mechanických vlastností na mikroúrovni. Fáze byly idealizovány na sférické inkluze v C-S-H gelu s ITZ zónou modelovanou jako sférickou skořepinou. Schéma modelu je zobrazeno na Obrázku 47 a v Tabulce 14 jsou uvedeny jednotlivé předpoklady.

Pro verifikaci modelu byla vyhotovena nová sada cementových past s procentuální náhradou ve formě mikromleté mramorové moučky. Nová sada vzorků byla vyrobena hlavně ze dvou základních důvodů. Prvním z nich byla struktura mikromechanického modelu, kde jednotlivé směsi měly stejný vodní součinitel. Druhým důvodem bylo využití komplexní mikromechanické studie cementových past připravených z CEM I 42,5R [147], v níž byly vzorky ošetřovány po dobu 28 dní ve vodní lázni při laboratorní teplotě. Mikromechanická studie byla využita k mikromechanickému popsání hlavních čtyř fází cementové matrice, a to: HD C-S-H gel, LD C-S-H gel, slínek a portlandit.



Obrázek 47: Schéma mikromechanického modelu pasty na bázi cementu a mikromleté mramorové moučky [143].

Tabulka 14: Předpoklady použité u mikromechanického modelu [143]

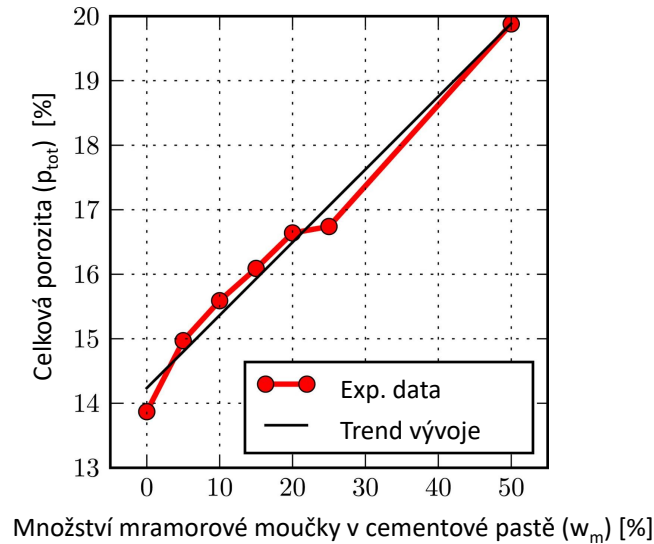
Fáze	Předpoklady
C-S-H gel	Homogenní a izotropní prostředí s von Misesovo kritériem
Slínek a Portlandit	Izotropní sférické inkluze dokonale spojená s cementovou maticí
LD C-S-H gel	Izotropní sférické inkluze, které jsou poddajné a dokonale spojená s cementovou maticí
Mramorová moučka	Izotropní sférické tuhé inkluze, které jsou obklopené ITZ
ITZ	Izotropní sférické skořepiny vytvořené kolem mramorových inkluzí
Póry	Izotropní sférické inkluze s nulovou tuhostí

V Tabulce 15 lze sledovat složení jednotlivých směsí pro verifikaci modelu. Rozměry testovaných vzorků a způsob testování byly obdobné jako v případě dat získaných do podkapitoly 6.2. Na vzorcích byla pomocí rtuťové porozimetrie změřena celková porozita vzorků (Tabulka 15) a určena závislost porozity (p_{tot}) na procentuálně-hmotnostní náhradě (Obrázek 48). Pomocí metody nejmenších čtverců byl následně stanoven vztah:

$$p_{tot} = 25,535 - 0,113(100 - w_m), \quad (36)$$

kde w_m je procentuální náhrada Portlandského cementu mikromletou mramorovou moučkou v %.

Mikromechanický model je ve shodě s experimentálním měřením, přičemž dynamický modul pružnosti se snižuje s rostoucím množstvím náhrady ve formě mikromleté mramorové moučky, jak je zobrazeno na Obrázku 49. Snížení tuhosti vlivem náhrady Portlandského cementu mikromletou mramorovou moučkou je spojené v tomto případě se vznikem



Obrázek 48: Závislost celkové porozity na množství náhrady ve formě mikromleté mramorové moučky [143].

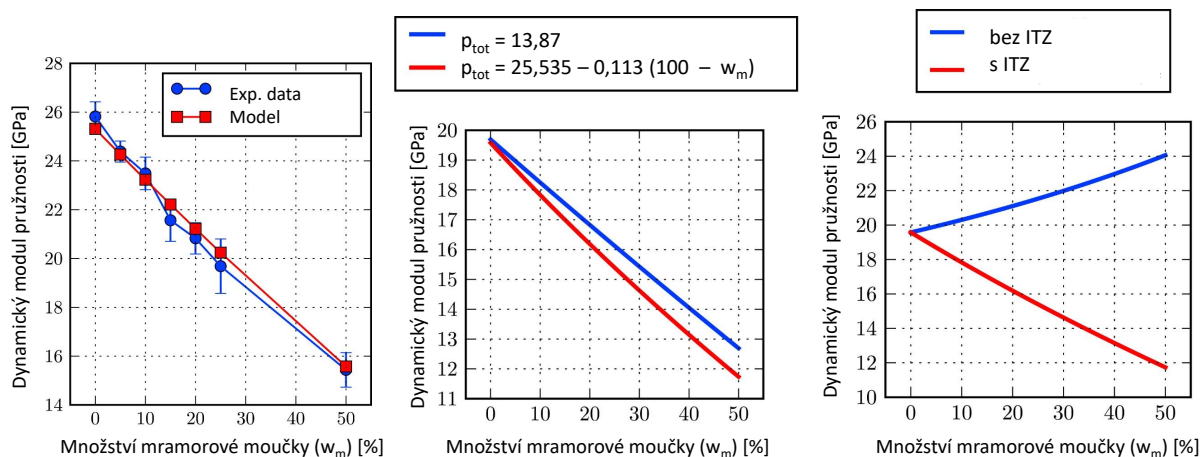
ITZ a zvýšením celkové porozity výsledných kompozitů. Vliv porozity na výsledný modul pružnosti je znám řadu let [96] a v dnešní době se tento vliv potvrzuje i u směsí malt s obsahem mramorového kalu [78].

Mikromechanický model umožnil definovat vztahy mezi množstvím mikromleté mramorové moučky a dynamického modulu pružnosti ve dvou módech, a to s vlivem změny porozity a s konstantní porozitou. V prvním případě byl mikromechanický model vytvořen pro kompozit o konstantní porozitě 13,87 % (odpovídající čisté cementové pastě) a ve druhém případě pro kompozit o celkové porozitě vypočtené na základě rovnice 36, viz Obrázek 49. Výsledky ukazují na to, že při redukci celkové porozity v menších procentuálních náhradách za cement, by došlo k nepatrnému nárůstu mechanických vlastností, jež byly zjištěny v rámci podkapitoly 6.2.

Vliv redukce pórovitosti je však ve srovnání s efektem eliminace ITZ spíše malý, protože kdyby došlo k eliminaci vzniklé ITZ, tak by se tuhost cementových past výrazně zvýšila s množstvím použité náhrady, viz výsledky modelu na Obrázku 49. Možným východiskem je eliminace ITZ pomocí chemických reakcí [148–151], ale z pohledu nejsnadnějšího využití se jedná o použití nízké náhrady cementu do 15 hm. %.

Tabulka 15: Souhrn složení směsí (váhové procentuální zastoupení jednotlivých složek), konzistence a výsledná celková porozita [143].

Ozn.	CEM I 42,5 R	Mikromletá mramorová moučka	w/b	Rozlití kužele [mm]	Celková porozita [%]
100/0	100 %	0 %	0,35	25,2 × 25,6	13,87 ± 1,35
95/5	95 %	5 %	0,35	26,0 × 26,0	14,97 ± 1,28
90/10	90 %	10 %	0,35	26,4 × 26,4	15,59 ± 0,95
85/15	85 %	15 %	0,35	26,3 × 26,3	16,09 ± 1,49
80/20	80 %	20 %	0,35	26,4 × 26,3	16,64 ± 1,48
75/25	75 %	25 %	0,35	26,3 × 26,8	16,74 ± 1,55
50/50	50 %	50 %	0,35	26,9 × 26,9	19,88 ± 1,82



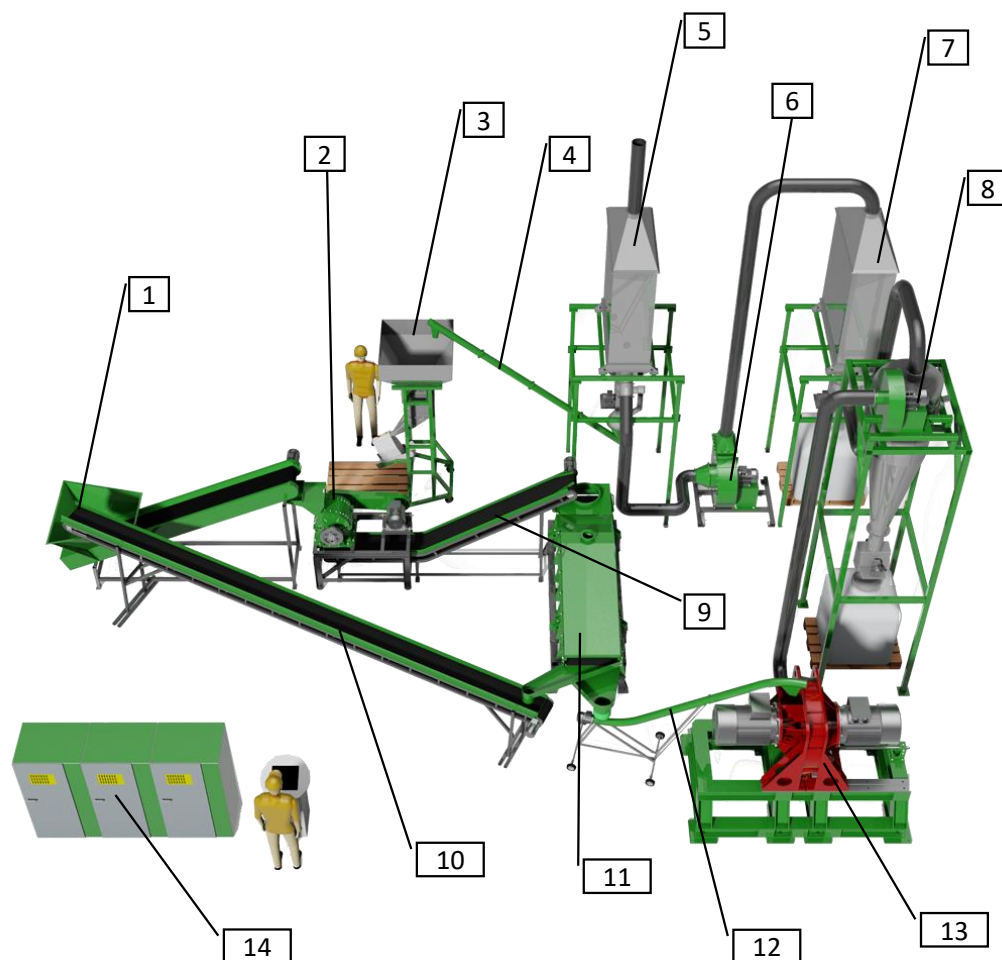
Obrázek 49: Porovnání výsledných dynamických modulů pružnosti z experimentu a modelu – vlevo, znázorněný vliv celkové porozity na dynamický modul pružnosti – uprostřed, znázorněný vliv ITZ na dynamický modul pružnosti – vpravo [143].

7.2 Nízkonákladový stavební systém s vysokým obsahem druhotných surovin

Samotné zavedení výsledků základního výzkumu do praxe bylo řešeno v rámci dvou projektů, a to: Modifikace a vývoj variantní vápenocementové malty pomocí mikromleté aktivované mramorové moučky nebo kalu a Lehčené zdicí materiály na bázi mikromletých minerálních vedlejších produktů s řízenými užitnými vlastnostmi. Cílem prvního zmíněného projektu bylo navrhnout vhodnou maltovou směs pro zdění nebo omítání obsahující 10 až 30 hm. % odprašků v závislosti na jejich jemnosti. Cílem druhého zmíněného projektu bylo specifikovat vývoj nového typu lehčených zdicích prvků s využitím minerálních vedlejších produktů či minerálních stavebních odpadů. Oba projekty mají za účel aplikovat odpadní materiály, mezi něž patří odpadní materiál na bázi mramoru. Jejich záměrem bylo především snížit spotřebu cementu a vápenného hydrátu z hlediska úspory finančních prostředků na výrobu stavebních prvků, a tak snížit negativní dopad výroby na životní prostředí. Dalším důležitým aspektem bylo, že v rámci výzkumu nebyla zcela záměrně využita stavební chemie, jež by finální směsi prodražovala. V rámci projektů vznikla recyklační linka (Obrázek 50) na zpracování odpadu na bázi mramoru, která slouží pro výrobu směsí stavebního systému s vysokým obsahem recyklovaných surovin.

Stavební systém byl vytvořen z lehčené zdicí tvarovky, tenkovrstvého lepidla a vícevrstvého omítkového systému. Z předchozích výsledků dostupných recyklovaných materiálů byly vybrány dvě základní recyklované suroviny, a to mikromletý beton pomletý z konstrukčního betonu a mikromletá mramorová moučka. Řešitelský kolektiv se rozhodl vytvořit takový stavební systém, který by byl konkurenceschopný s běžnými produkty na dnešním trhu, tzn. vývoj takového systému, jenž bude splňovat tepelně-vlhkostní a mechanické parametry při zachování nízkých nákladů. Další aspekt, který jsme chtěli splnit, je navrhnout technologický postup výroby tak, aby nebylo potřeba velkých investičních nákladů pro výrobní komplex a aby byly zachovány nízké energetické požadavky při výrobě. Proto jsme se z těchto důvodů vyhnuli použití autoklávu, jenž by prodražoval finální produkt.

V rámci výzkumu byly zkoumány nejen vlivy příměsí ve formě mikromletého recyklovaného betonu [59, 152–171] nebo mikromleté mramorové moučky [7, 58, 138, 172–178], ale také různých druhů a značek přísad, jako jsou plastifikátory [179, 180], pěnicí přísady [181] a urychlovače tuhnutí [182] od firem Den Braven, Sika a Mapei. Dále byly také řešeny vlivy přidávaných různých polymerních vláken [183–185] a plniv [186–190]. Výsledkem projektu bylo udělení šesti užitných vzorů (příloha A), které ochraňují výsledný stavební systém s ohledem na duševní vlastnictví.



Obrázek 50: Recyklační linka na zpracování mramorových odprašků: 1 – násypka a pásový dopravník, 2 – kladivový mlýn, 3 – pytlovací stanice, 4 – šnekový dopravník, 5 – filtrační zařízení, 6 – ventilátor, 7 – filtrační zařízení vč. plnicí stanice, 8 – odsávací zařízení vč. plnicí stanice, 9 – pásový dopravník č. 1, 10 – pásový dopravník č. 2, 11 – vibrační třídíč, 12 – spirálový dopravník, 13 – vysokorychlostní mlýn, 14 – ovládání [60].

Lehčená zdicí tvarovka

Lehčený zdicí prvek je vytvořen na bázi cementové matrice s použitím mikromletého plniva a minerálních vedlejších produktů s aplikací vláken a je vylehčen pomocí pěnотvorné přísady (Obrázek 51). Jedná se o výrobek, který splňuje optimální kombinaci mechanických, tepelně-technických a vlhkostních parametrů. Výhodou navrženého procesu výroby tvarovek je variabilita, díky níž lze vyrábět zdicí tvarovku o různých rozměrech a tvarech, neboť se jedná o litou směs. Na Obrázku 51 je zobrazena lehčená zdicí tvarovka o přesných rozměrech 120 × 250 × 500 mm, jichž bylo dosaženo pomocí procesu broušení.

Finální směs lehčené zdicí tvarovky je vytvořena ze tří základních vstupních materiálů, z čehož jsou dva odpadní. Směs je složena z 10 hm. % odpadní mikromleté mramorové moučky, která má za následek snížení vodního součinitele, 50 hm. % odpadního mikromletého konstrukčního betonu, jenž slouží ve směsi nejen jako plnivo, ale i jako

mechanicky aktivované pojivo. Jde o 36,3 hm. % cementu CEM I 42,5 R, který slouží ve směsi jako pojivo. Dále jsou použity aditiva zlepšující mechanické nebo tepelně-technické vlastnosti, a to 0,2 hm. % plastifikační přísady Urychlovač a plastifikátor stavebních hmot Den Braven, 1,5 hm. % napěňovací přísady Sika lightcrete a 2 hm. % plastových mikrovláken o průměru 12 mikronů a délce 4 mm, které ztužují napěněnou strukturu. Při výrobě jsou nejdříve smíchána vlákna s cementem, následně se dodá voda a plastifikační přísada. V dalším kroku se přidá napěňovací přísada. Nakonec je do směsi postupně dodáván recyklát. Směs je řádně zamíchána za využití vysokých otáček a lita do příslušných forem.

Tenkvrstvé lepidlo

Inovace technického řešení spočívá ve využití mikromletého mechanicky aktivovaného recyklovaného betonu v cementových maltách pro zdění. Díky jemnosti upravené betonové moučky, jež byla získána vysokorychlostním mletím, je dosaženo dobré zpracovatelnosti maltových směsí bez nutnosti přidávat chemické plastifikátory a provzdušňující přísady. Díky poznatkům o vlastnostech recyklované jemně mleté moučky je využívána jako jemné aktivní plnivo s částečnou náhradou za pojivo. Současné zdicí směsi obdobného složení bez recyklované moučky obvykle dosahují vyšší ceny a horších mechanických vlastností. Použitím jemně mletého recyklovaného betonu je sníženo množství pojiva a chemických přísad při zachování požadovaných funkčních vlastností. Protože jemně mletý recyklovaný beton je v podstatě odpadním produktem, je dosaženo snížení výrobních nákladů na maltovou směs. V tomto řešení navíc není využíváno žádných chemických přísad a aditiv.

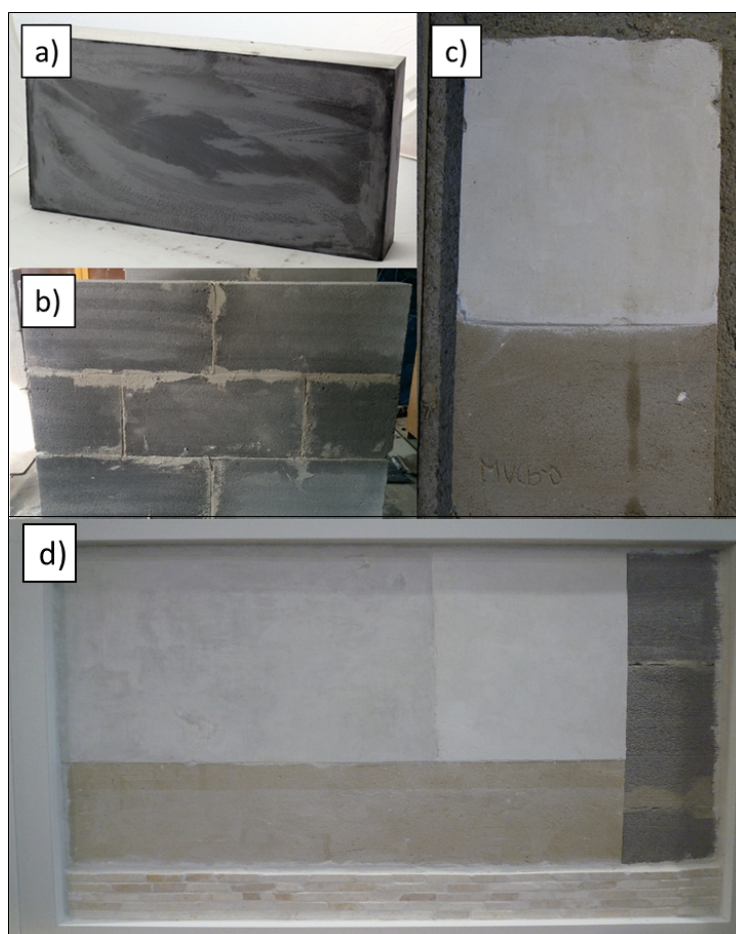
Tenkvrstvé lepidlo použité pro lepení lehčených zdicích tvarovek (Obrázek 51) je složeno z 20 hm. % cementu CEM I 42,5R, 10 hm. % odpadní mikromleté mramorové moučky a 70 hm. % odpadního mikromletého konstrukčního betonu. Při výrobě musí být suchá směs nejprve řádně zhomogenizována. Teprve potom může být za průběžného míchání postupně přidávána voda. Homogenizace a samotné míchání lze provádět ručně, pomocí metly a míchače nebo prostřednictvím stavební míchačky. Homogenizace i míchání musí probíhat alespoň 5 minut. Nanášení navržené tenkvrstvé malty při zdění přesných tvárnic je prováděno standardně zednickou lžící a ocelovým nebo plastovým zubatým hladítkem.

Vícevrstvý omítkový systém

Z důvodu využití co největšího množství recyklovaného materiálu byla omítka navržena jako vícevrstvý systém (Obrázek 51), který obsahoval jádrovou omítku a finální povrch ve formě štku. Vyvinutý omítkový systém lze používat jak pro vnitřní prostředí, tak i pro vnější použití. Je přímo navržen tak, aby ho bylo možné použít na lehčené tvárnice při zachování dobré přilnavosti k povrchu a nízkého smrštění.

Jádrová omítka je složena z 10 hm. % cementu CEM I 42,5R, 40 hm. % přírodního

kameniva frakce 0/2, 45 hm. % mikromletého konstrukčního betonu a 5 hm. % mikromleté mramorové moučky. Menší množství použitého odpadního materiálu bylo zapříčiněno z důvodu zachování klíčových vlastností pro jádrovou omítku, a to dobré přilnavosti a nízkého smrštění. Nanášení navržené malty při omítání probíhá ručním nahazováním a následně stržením latí. Po zavadnutí je malta zahlazena dřevěným nebo plastovým hladítkem. Omítka slouží jako podklad pod finální štukové omítky. Finální štuk je složen z 10 hm. % cementu CEM I 42,5R a 90 hm. % odpadní mikromleté mramorové moučky. Štuk je nanášen pomocí hladítka v menších vrstvách. Omítka slouží jako finální povrch nebo je také možné omítku opatřit nátěry.



Obrázek 51: Prvky stavebního systému: a) lehčená zdicí tvarovka, b) tenkovrstvé lepidlo, c) vícevrstvý omítkový systém, d) finální vzhled stavebního systému.

Stavební systém využívá synergie a vzájemné kompatibility jednotlivých stavebních prvků z důvodu uplatnění stejného druhu materiálů. Proto je nespornou výhodou této aplikace obdobné chování v celé ploše konstrukce, čímž se vyvaruje možným nehomogenitám v nich vzniklých. Navíc stavební systém efektivně využívá odpadní materiál v co největším množství při zachování užitečných vlastností. V Tabulce 16 je shrnuto složení jednotlivých prvků stavebního systému se zjištěnými užitečnými vlastnostmi 28 dní starých vzorků podle platných norem.

Nespornou výhodou uvedeného stavebního systému je jeho 100% recyklovatelnost, kdy lze vyseparovat pomocí drcení a sítování použité kamenivo v maltách a zbylý materiál je možné pomocí procesu vysokorychlostního mletí znovu pomlít a vytvořit opětovně mikromletý materiál s přidanou hodnotou. Ten lze pak použít například při výrobě nových lehčených bloků nebo v omítkových systémech. Další výhodou je využití odpadu vzniklého z procesu výroby lehčených zdicích tvarovek, neboť vzniklý odpadní materiál ve formě z výroby vadných tvarovek nebo odprašků vzniklých z procesu řezání a broušení tvárnic lze aktivovat pomocí vysokorychlostního mletí a vzniklou mikromletou odpadní moučku opětovně použít při výrobě nových tvarovek. Výsledný produkt nevytváří z těchto důvodů odpadní materiál jak v průběhu výroby, tak i po skončení jeho životnosti.

Tabulka 16: Souhrn složení stavebních prvků s užitnými vlastnostmi.

		Prvek stavebního systému			
		Lehčená zdicí tvarovka	Tenko- vrstvé lepidlo	Jádrová omítka	Štuk
Složení [hm. %]	Pojivo – Cement CEM I 42,5 R	36,3	20	10	10
	Přírodní plnivo	0	0	40	0
	Další přísady a vlákna	3,7	0	0	0
	Mikromletý odpadní mramor	10	10	5	90
	Mikromletý odpadní beton	50	70	45	0
	Vodní součinitel w/c	0,6–0,8	1,4–1,6	1,1–1,3	2,5–2,7
	Množství odpadní suroviny	60	80	50	90
Užitné vlastnosti	Objemová hmotnost [kg/m ³]	700–600	1550–1650	1620–1820	1520–1620
	Pevnost v tlaku [MPa]	min. 4,0	min. 6,0	min. 7,5	min. 4,1
	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	min. 2,0	min. 1,5	min. 1,9	min. 1,0
	Dynamický modul pružnosti [GPa]	min. 3,2	min. 7,5	min. 8,3	min. 3,5
	Dynamický smykový modul [GPa]	min. 1,1	min. 3,0	min. 3,2	min. 1,0
	Součinitel tepelné vodivosti [W/m·K]	0,20–0,26	0,62–0,72	0,75–0,85	0,65–0,85
	Měrná tepelná kapacita [J/kg·K]	1500–1800	750–850	750–900	800–900

Trvanlivost – vliv okolních podmínek

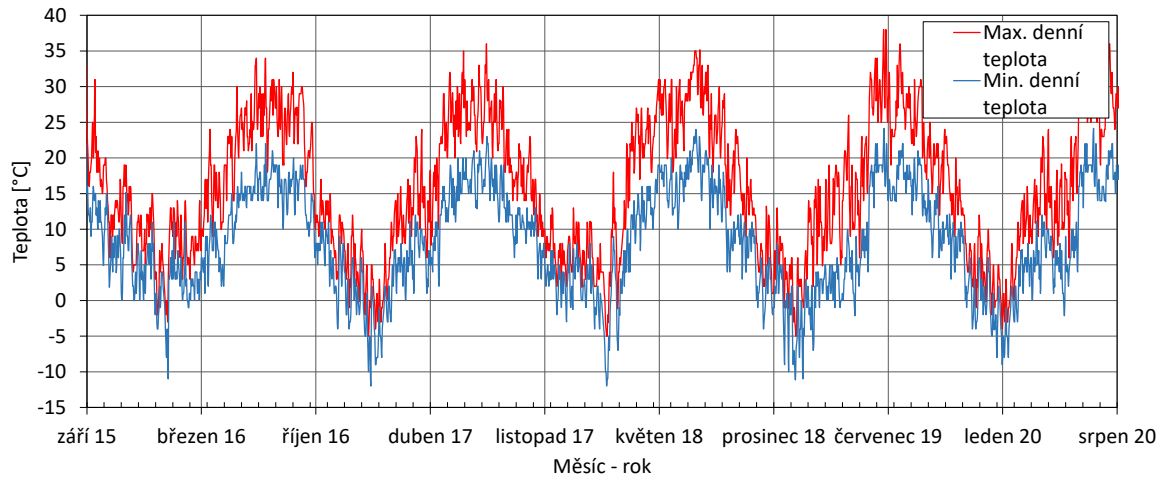
Pro testování trvanlivosti celého stavebního systému byla vyhotovena experimentální stěna, která byla vystavena dlouhodobému působení vnějšího prostředí bez jakékoliv ochrany. Experimentální testovací stěna s rozměry 1000 × 1500 mm byla postavena na pozemku Fakulty stavební ČVUT v Praze a byla sledována po dobu pěti let. Tvárnice byly spojeny navrženým cementovým lepidlem s mikromletým odpadním materiálem. Na stěnu byla natažena navržená omítací malta s podílem mikromletého materiálu, na kterou byla aplikována další vnější vrstva hladké omítky (štuku). Obě vrstvy omítky byly s vysokým obsahem mikromletého odpadního materiálu, podkladová vrstva měla tloušťku cca 5 mm a omítka určená pro povrchovou vrstvu byla nanášena pouze v tloušťce několika mm. Plocha omítky byla cca 1000 × 750 mm. Výsledkem pohledového zkoumání bylo zjištění, že po dobu čtyř let testovaná stěna nevykazuje degradaci použitých materiálů (Obrázek 52), protože na stavebních prvcích po zkoušce nenastaly vzhledové změny, a tudíž nedošlo ani k poškození materiálů. V průběhu pohledového zkoumání byl každý stavební prvek hodnocen samostatně.



Obrázek 52: Pohled na nanášenou omítku stav v září 2015 – vlevo, stav v srpnu 2020 – vpravo.

Výsledky reálného testu a průběhy teplot po dobu zkoumání byly aproximovány na běžné normativní postupy, protože v průběhu reálných podmínek dochází ke stejným jevům jako při zkoušce odolnosti proti mrazu [191], a to zmrazování a ohřevu povrchu cementových kompozitů [192, 193]. Pro vytvoření náhledu na průměrné období v oblasti, kde stojí experimentální stěna, byla vybrána meteorologická stanice Praha – Klementinum, jež poskytuje veřejně informace o maximálních a minimálních denních teplotách v období od září 2015 do srpna 2020 (Obrázek 53) [194]. Za uvedenou historicky krátkou dobu proběhlo celkově pět zimních období, přičemž zimní období byla jak extrémní (2018/2019), tak i mírnější (2015/2016).

Do výpočtu byly vždy zařazeny zimní měsíce, tj. listopad až duben a dny (24 hodinové úseky), kdy došlo buď k poklesu teploty pod bod mrazu, anebo k jejímu navýšení. Uvedené



Obrázek 53: Vývoj minimálních a maximálních denních teplot v období od září 2015 do srpna 2020 [194].

teplotní změny (toky) znamenají pro změnu skupenství největší extrém, a tudíž jsou i nebezpečné pro vodou nasáklý povrch cementových kompozitů. V Tabulce 17 je přehled hrubé energetické bilance součtů, poklesů a nárůstů teploty ve sledovaných obdobích. Pro energetickou (teplotní) bilanci 1 kg čisté vody byl uvažován standardní fyzikální vzorec (viz rovnice 37) a standardní teploty [193]. Použité hodnoty vycházejí z vlastností vody či ledu pro jednu oblast teploty a je zanedbán vliv rozdílu hustoty vody a ledu. Z uvedených důvodů se jedná spíše o rozvalu na přepočítání zmrazovacích cyklů, než o přesný výpočet. Teplo Q bylo vypočítáno podle vzorce:

$$Q = m \cdot c_i \cdot \Delta T, \quad (37)$$

kde:

c je měrná tepelná kapacita: vody při 20 °C $C_{H_2O} = 4181 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$, ledu $C_{led} = 2100 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$, skupenské teplo tání ledu $I_{t \text{ ice}} = 333700 \text{ Jkg}^{-1}$,
 ΔT je teplota, kde je použita suma poklesů a vzestupů teplot za příslušné období.

Běžná normativní zkouška stanovení mrazuvzdornosti betonu počítá s 25násobky cyklů, kde během jednoho cyklu dochází k ochlazení vody, kterou je vzorek nasycen, a to na teplotu -20 °C, a potom k jeho oteplení na teplotu +20 °C. Při přepočtu na teplo je během jednoho cyklu ochlazováním odebráno teplo jednomu kg vody o velikosti 126 kJ a při ohřevu spolu s táním předáno teplo o velikosti 459 kJ. Teoretická energetická bilance normativní zkoušky a reálného experimentu byla využita k přepočtu na zmrazovací cykly (Tabulka 17). Na základě dosažených výsledných hodnot lze konstatovat, že teoreticky byla stěna v průběhu reálného experimentu vystavena 39 zmrazovacím cyklům.

Druhou možností, jak spočítat možný počet zmrazovacích cyklů, je stanovení limitní záporné teploty, u níž dojde k promrznutí materiálu v celém objemu. Podle dostupné odborné literatury [195] je tato teplota stanovena v okolí materiálu na -5 °C . Při spočítání počtu výskytů teplot nižších než -5 °C lze dojít ke 54 zmrazovacím cyklům. Z pohledu charakterizace materiálu na mrazuvzdornost je možné použít označení odolnost vůči mrazu T50 (50 zmrazovacích cyklů). V porovnání s dostupnou literaturou není mrazuvzdornost často řešené téma, protože je aplikace odpadní mramorové moučky řešena především pro oblasti subtropického a tropického podnebného pásu. Uygunoglu a kol. [61] se zabývali mrazuvzdorností podle normy ASTM C666 a v jejich experimentální studii nemělo použité mramorové kamenivo vliv na mrazuvzdornost výsledného materiálu, který odolal 60 zmrazovacím cyklům.

Tabulka 17: Teoretický technický odhad přidané a odevzdané energie pro 1 kg vody v průběhu sledovaného období.

	Zimní období					Suma celkem
	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	
Počet ochlazení pod 0 °C [-]	17	54	38	53	40	202
Suma ochlazení [$^{\circ}\text{C}$]	54	178	125	187	136	680
Počet oteplení nad 0 °C [-]	21	35	37	53	36	182
Suma oteplení [$^{\circ}\text{C}$]	102	123	123	319	166	833
Ochlazení – odebrané teplo [kJ]	540	888	777	1726	982	4914
Oteplení – dodané teplo [kJ]	7548	12568	13124	19413	13162	65814
Počet cyklů ochlazení [-]	4,3	7,1	6,2	13,7	7,8	39,1
Počet cyklů oteplení [-]	16,4	27,4	28,6	42,3	28,7	143,3

7.3 Ekonomická analýza

Vzhledem k tomu, že základní faktor ovlivňující využitelnost mikromleté mramorové moučky v praxi představuje cena, byl vyhotoven odhad ceny její aplikace v praxi. Z výsledků se jeví její největší potenciál využití v oblasti směsných cementů a jako náhrada za jemné kamenivo. V případě náhrady za přírodní plnivo je její využitelnost přímo závislá na ceně za dopravu, protože rozdíl cen přírodního kameniva a recyklátu je od 100 do 200 Kč za tunu. V druhém případě je atraktivita recyklátu vyšší, protože cena Portlandských cementů každoročně stoupá, dokonce za poslední tři roky došlo celosvětově k navýšení průměrné ceny Portlandského cementu o 13,6 % [196].

Z uvedeného důvodu byl proveden odhad ceny pro směsná pojiva, tedy Portlandský cement se substitucí v podobě mikromleté mramorové moučky v 15 hm. %. Oblast zájmu dle použitých materiálů (podkapitola 5.1) není jen území ČR, ale také další oblasti, v nichž dochází ke vzniku velkého množství odpadního materiálu na bázi mramoru (např. Střední východ). Z uvedeného důvodu je kalkulace na směsný cement provedena pro oblast Berouna (Česká republika), Západního břehu Jordánu (Izrael) a Shaq El Thoaban (Egypt).

V Tabulce 18 jsou uvedeny ceny jednotlivých surovin, úkonů a dalších nákladů. Mezi cenově nejdůležitější položky patří doprava a mletí odpadního materiálu, protože v případě úpravy mramorové moučky na mikromletou mramorovou moučku se jedná o vysokoenergetické mletí. Do ceny mletí byly započítány následující položky: cena energie, pořizovací cena mlýnu rozpočítaná po dobu životnosti, produktivita a opotřebení mlecích elementů. Cena mletí byla přímo určena pro recyklační linku od firmy LAVARIS s mlýnem SKD 800 s životností 60 tis. hodin provozu, pořizovací cenou 10 mil. Kč, produktivitou 5 t materiálu za hodinu, výměnou mlecích elementů v ceně 2 tis. Kč za každých 250 tun namletého materiálu a příkonem 70 kW. Interval výměny mlecích elementů je přímo závislý na druhu mletého materiálu, potažmo jeho tvrdosti, tuhosti a abrazivnosti. V případě dopravy je tato položka velmi proměnlivá. Pro transport námi testované odpadní mramorové moučky z firmy Jež, spol. s r.o., do cementárny Radotín je vzdálenost dopravy celkově nízká (cca 35 km), ale v případě přepravy ze závodu na těžbu a zpracování mramoru v oblasti Západního břehu Jordánu do nejbližší cementárny v Haifě představuje tato vzdálenost 300 km. V Egyptě je vzdálenost nižší, protože největší těžební komplex na mramor v Shaq El Thoaban je vzdálen necelých 100 km od cementárny Suez cement. Všechny tři zmíněné cementárny spadají pod HEIDELBERG CEMENT Group.

Z Tabulky 18 je patrný poměrně velký vliv ceny dopravy. V rámci ČR a Egypta došlo k cenové úspoře cca 10 % na 1 tunu cementu, v případě Izraele došlo vlivem velké vzdálenosti k přibližně stejné hodnotě ceny za směsný cement, jako je cena Portlandského cementu, a vzniklé přínosy mají pouze mimoekonomický charakter.

Tabulka 18: Cenová kalkulace [197–201].

Průměrná cena bez DPH					
Surovina	Množství [t]	ČR	Egypt	Izrael	
CEM I 42,5R	1	2 900 Kč	880 EGP	337 ILS	
Mramorová moučka	1	150 Kč	40 EGP	15 ILS	
Úkon	Jednotka [t]	ČR	Egypt	Izrael	
Mletí	1	400 Kč	55 EGP	40 ILS	
Doprava	1 t/km	5 Kč	1 EGP	1 ILS	
Oblast	Vzdálenost [km]	Cena dopravy	Cena recyklátu s pomletím a dopravou	Cena směšného cementu při náhradě 15 hm. %	Úspora ceny [%]
ČR	35	175 Kč	725 Kč	2 574 Kč	11 %
Egypt	100	100 EGP	195 EGP	778 EGP	12 %
Izrael	300	300 ILS	355 ILS	340 ILS	0 %

7.4 Zhodnocení ekologických aspektů

Mezi další požadavky, na jež je v dnešní době brán zřetel, patří negativní zatížení životního prostředí výsledným materiálem. Uhlíková stopa materiálu je jedním z nejčastěji používaným parametrem popisující vliv materiálu na životní prostředí. Jedná se o množství vyprodukovaných emisí CO₂ v průběhu výroby a dovozu materiálu.

Podle dostupných zdrojů je emise z výroby CO₂ obdobná pro mikromletý odpadní mramor jako pro jiné jemné frakce přírodního kameniva [202]. Z uvedeného důvodu je dále řešena pouze náhrada cementu mikromletou mramorovou moučkou pro směsná pojiva. Hodnota množství produkovaného CO₂ z výroby byla stanovena z dostupných informací v odborné literatuře a z webových stránek společnosti CEMEX [202, 203]. Emise CO₂ z dopravy byla určena z aktuálních dat Centra dopravního výzkumu [204]. Množství vyprodukovaného CO₂ z dopravy je určeno pro nákladní automobil s průměrnou spotřebou paliva 28 l/100 km a nosností 30 tun materiálu. Vzdálenost transportu byla určena pro tři oblasti, tedy jako v případě předchozí ekonomické analýzy (podkapitola 7.3).

V Tabulce 19 lze vidět celkovou uhlíkovou stopu pro směsný cement s 15 hm. % mikromleté odpadní mramorové moučky. Z výsledků je patrné, že doprava má minimální vliv na množství vyprodukovaného CO₂ a při použití směsného pojiva dojde k úspoře až 111 kg CO₂ na tunu vytvořeného pojiva. Při roční celosvětové produkci 1800 mil. tun cementu by došlo k úspoře až 200 mil. tun CO₂, což je roční produkce CO₂ v Belgii [205].

Tabulka 19: Celková uhlíková stopa směsného pojiva.

Položka	Oblast		
	ČR	Egypt	Izrael
Vzdálenost [km]	35	100	300
Emise z dopravy [kg CO ₂]	26,3	75,1	225,2
Emise z dopravy [kg CO ₂ /t]	0,9	2,5	7,5
Emise z výroby cementu [kg CO ₂ /t]	750	750	750
Emise z výroby mikromleté mramorové moučky [kg CO ₂ /t]	5,0	5,0	5,0
Celková emise směsného pojiva při náhradě 15 hm. % [kg CO ₂ /t]	638,4	638,6	639,4
Úspora vyprodukovaného množství CO₂ [%]	14,9	14,8	14,7

8 Závěr

Na základě prezentovaných výsledků bylo prokázáno, že mikromletá mramorová moučka má velký potenciál uplatnění ve stavebním průmyslu. Hlavní primární část praktické části byla zcela záměrně provedena pouze na cementových pastách, kde nebyla použita žádná stavební chemie. Důvodem bylo především nalezení limitních hodnot náhrad za přírodní materiály. Zároveň bylo možné tímto způsobem určit zcela jednoznačně závěry, a to bez vlivů dalších efektů, jenž by byly spojeny s použitím stavební chemie.

Druhá část praktické části je zaměřena na aplikaci ve stavebnictví. Jednou z možných aplikací je předložený komplexní stavební systém s vysokým obsahem upravených recyklovaných surovin. Výhodou tohoto řešení je kompatibilita jednotlivých prvků, které mají stejný materiálový základ, a tím i podobné materiálové vlastnosti. K další výhodě patří i snížení nebo úplné nahrazení písku v těchto systémech a redukce množství použitého cementu.

Dílní klíčové závěry z pohledu využití mikromleté mramorové moučky lze shrnout v následujících bodech:

- Obsah předložené disertační práce vyvrací předpoklady o nevhodnosti řešení recyklace a aplikace materiálu na bázi odpadního mramoru ve stavebnictví. Ve spolupráci s firmou LAVARIS, spol. s r.o., byl optimalizován proces vysokoenergetického mletí, který spočívá v úpravě energetických nároků potřebných k pomletí mramorového kalu. Na základě dosažených výsledků bylo prokázáno, že obvodová rychlost mlýnu 100 m/s je dostačující k vytvoření vysokorychlostně mikromleté mramorové moučky. Mikromletou mramorovou moučku lze využít jako náhradu buď za jemné kamenivo, nebo za pojivo. Výsledné materiály, u nichž byl nahrazen jemný písek drceným mramorem a mikromletou mramorovou moučkou, měly minimálně stejné vlastnosti jako běžně používaný písek, a to jak v oblasti Středního východu, tak i pro ČR. V případě náhrady za pojivo mají cementové pasty s 15 hm. % náhradou cementu mikromletou mramorovou moučkou srovnatelné mechanické vlastnosti jako pasty složené pouze z referenčního cementu. Cementové pasty ze směsného cementu s 10 hm. % mikromleté mramorové moučky dokonce vykazovaly o 15 % vyšší pevnosti v tlaku pro stejně staré vzorky.
- Mikromletá mramorová moučka měla vliv na některé fyzikálně-mechanické vlastnosti, jež jsou důležité pro aplikaci ve stavebním průmyslu, jako například pevnost v tlaku a doba tuhnutí. K navýšení pevností v tlaku u nižších procentuálních náhrad došlo vlivem snížení otevřené porozity (hlavně v okolí velikosti póru 10 mikronů) výsledných cementových past. K uvedenému efektu dochází pod vlivem mikromleté mramorové moučky, jež plní funkci mikroplniva v cementovém kompozitu. Navíc má mikromletá mramorová moučka podle experimentů plastifikační účinek, čímž

je množství záměsové vody nižší a struktura kompaktní. Z výsledků měření vývoje hydratačního tepla a počátku a konce tuhnutí bylo zjištěno, že přidáním mikromleté mramorové moučky dochází k počátku tuhnutí dříve a doba tuhnutí je delší. Jedná se o efekt tvorby nukleačních center pro růst portlanditu, který urychlí počátek tuhnutí cementové pasty. To také potvrdila elektronová mikroskopie, a tím vyvrátila tvrzení [11,106] spočívající v tom, že mramorová moučka má nulový či negativní efekt na průběh hydratace. Ve struktuře cementové pasty s mikromletou mramorovou moučkou docházelo ke vzniku velkého množství malých krystalů portlanditu a v průběhu hydratace mikromletá mramorová moučka oddělovala jednotlivá zrna cementu, čímž pomohla k lepšímu přístupu vody k nezhydratovanému slínku.

- Prvková mikroanalýza v kombinaci s nanoindentací ukázala jediný negativní efekt při použití mikromleté mramorové moučky, a to vytváření ITZ v jejím okolí v šířce přibližně 30 mikronů. Vytváření ITZ a jeho efekt na mechanické vlastnosti potvrdil vytvořený mikromechanický model, který ukázal na to, že za předpokladu, když by došlo k redukci oblasti ITZ, tak by výsledný cementový kompozit mohl dosahovat podstatně lepších mechanických vlastností. Jedná se o často sledovaný jev u plniv, který lze pomocí příměsí a chemických přísad často úplně eliminovat [206].
- V rámci aplikovaného výzkumu byl navržen komplexní stavební systém s vysokým obsahem druhotných surovin, v nichž velkou část směsi tvořila mikromletá mramorová moučka jako náhrada za pojivo nebo plnivo. Mikromletá mramorová moučka byla aplikována v lehčeném stavebním bloku, zdicí maltě a ve dvouvrstvém omítkovém systému. Ze stavebního systému byla postavena experimentální stěna, jež vizuálně nevykazuje po dobu pěti let ve vnějším prostředí degradaci materiálu.
- Využití mikromleté mramorové moučky splňuje v dnešní době důležitá eko-kritéria, jako jsou ekologické a ekonomické aspekty materiálu. Využití mikromleté mramorové moučky jako náhrady za Portlandský cement má za následek přibližné snížení ceny pojiva o 10 % a úsporu vyprodukovaného CO₂ o 15 % při zachování užitečných vlastností.

Seznam obrázků

1	Barevné druhy mramoru: a) bílý mramor Bianco Carrara (Itálie), b) béžový mramor Botticino Classico (Itálie), c) černý mramor Nero Marquina (Španělsko), d) zelený mramor Verde Guatemala (Indie), e) hnědý mramor Emperador (Turecko), f) žlutý mramor Giallo Atlantide (Egypt) [1].	3
2	Aplikační odvětví pro mramor [3].	4
3	Celosvětová produkce těžby béžového mramoru [3].	5
4	Ukládání mramorového kalu v okolí továren [10, 11].	7
5	Lom Carrara v Toskánsku, Itálii [16].	8
6	Odkrytá skládka v západním svahu odvalu dolu Emanuel – vlevo, severní svah „Buštěhradská haldy“ – vpravo [20].	8
7	Základní mechanizmy mletí [53].	12
8	Vývoj hydratačního tepla v čase [100].	21
9	Snímky z elektronové mikroskopie 0 hm. % směs s mramorovým kalem – vlevo, 100 hm. % směs mramorovým kalem – vpravo [65].	22
10	Mikroskopická analýza cementové matrice v betonu [11].	24
11	Snímek z elektronové mikroskopie, referenční malta bez mramorové moučky – vlevo, malta s 15 hm. % mramorové moučky – vpravo: CH (modré částice); póry (červené částice); kamenivo písku (černé částice); částečně zreagované cementové zrno a mramorový kal (bílé částice); C-S-H gel (šedá barva) [106].	24
12	Změny pevnosti v tlaku v důsledku využití mramorové moučky jako náhrady za cement.	26
13	Změny pevnosti v tlaku v důsledku využití mramorové moučky jako náhrady za přírodní kamenivo.	27
14	Změna pevnosti betonu v tlaku pro jednotlivé experimenty s vypočtenou pevností v tlaku z nelineárních rovnic: náhrada za cement – vlevo, náhrada za jemné kamenivo – vpravo [112].	28
15	Schematické znázornění principu transmisního (vlevo) a řádkovacího (vpravo) elektronového mikroskopu [118].	31
16	Excitační objem a signály uvolněné ze vzorku po dopadu primárních elektronů [119].	32
17	Ukázka: Shottkyho katody (nahore) a detail jejího hrotu, LaB ₆ krystalu (vlevo dole) a wolframového vlákna (vpravo dole) [120].	33
18	Schéma situace pod hrotem.	36

19	Dynamický model systému indentoru v kontaktu se vzorkem, kde m je hmotnost systému indentoru, C_i je koeficient tlumení systému indentoru, C_s je koeficient tlumení materiálu vzorku, K_s je kontaktní tuhost, K_i je konstanta tuhosti listové pružiny, na níž je upevněn hrot [123].	37
20	Obrazová analýza: a) snímek z elektronového mikroskopu s viditelným fázovým kontrastem (zvětšení 1000×), b) označení jednotlivých zrn, c) nahrazení zrn elipsou.	46
21	Ukázka zatěžovací funkce pro jeden indent.	48
22	Křivky zrnitosti testovaných materiálů: jemné kamenivo a pojivo (vlevo), hrubé kamenivo (vpravo).	52
23	Vstupní materiály a jejich mikrostruktura: a) Cement CEM I 42,5 R – elektronová mikroskopie (zvětšení 1500×), b) Mramorový kal – elektronová mikroskopie (zvětšení 100×), c) Mramorové odprašky – elektronová mikroskopie (zvětšení 100×), d) Drcený mramor – optická mikroskopie (zvětšení 80×), e) Písek z Gazy – optická mikroskopie (zvětšení 80 k×), f) Písek ze Záležlic – optická mikroskopie (zvětšení 80×).	53
24	Záznam z prvkové analýzy s průběhem rentgenového spektra: a) mramorový kal, b) mramorové odprašky.	54
25	Snímek mikromleté mramorové moučky – zkoumané oblasti pomocí analýzy.	54
26	Difraktogram Portlandského cementu a mramorových odprašků.	55
27	a) vysokorychlostní mlýn firmy Lavaris, s. r. o. [60], b) pin (vlevo) a příklad opotřebení pinů (uprostřed a vpravo).	56
28	Křivka zrnitosti použitého cementu, mramorové moučky a mikromleté mramorové moučky.	57
29	a) mramorová moučka, zvětšení 80× z optického mikroskopu, b) mikromletá mramorová moučka, zvětšení 80× z optického mikroskopu, c) mramorová moučka zvětšení, 100× pomocí elektronové mikroskopie, d) mikromletá mramorová moučka, zvětšení 100× pomocí elektronové mikroskopie.	59
30	Objemová hmotnost testovaných materiálů s vnesenými směrodatnými odchylkami.	64
31	Dynamický modul pružnosti a dynamický smykový modul testovaných materiálů s vnesenými směrodatnými odchylkami.	65
32	Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku testovaných materiálů s vnesenými směrodatnými odchylkami.	65
33	Pevnost v tlaku testovaných směsí v rámci prvotní fáze výzkumu s vnesenými směrodatnými odchylkami.	66
34	Pevnost v tahu za ohybu testovaných směsí v rámci prvotní fáze výzkumu s vnesenými směrodatnými odchylkami.	67

35	Vývoj dynamického modulu pružnosti s vynesnými směrodatnými odchylkami.	68
36	Vývoj dynamického smykového modulu s vynesnými směrodatnými odchylkami.	68
37	Pevnost v tahu za ohybu – vlevo, pevnost v tlaku, s vynesnými směrodatnými odchylkami – vpravo.	69
38	Distribuční křivka pórů testovaných směsí.	70
39	Křivka vývoje hydratačního tepla pro testované materiály (plná čára), kumulativní křivka vyprodukovaného tepla (čárkovaná čára).	71
40	Difraktogram cementových past.	74
41	Snímky ze SEM mikroskopu: A) Mikrostruktura vzorku M0, B) Mikrostruktura vzorku M5, C) Mikrostruktura vzorku M10, D) Mikrostruktura vzorku M15, E) Mikrostruktura vzorku M50 – BSE detektor, zvětšeno 500×, 1 – slínek, 2 – portlandit, 3 – C-S-H gel, 4 – zrno mramoru a 5 – póry/trhlina F) Prvková mapa rozmístění vápníku: a) vzorek M0, b) vzorek M10, zvětšeno 400×.	76
42	Schéma provedeného line scanu vzorku M10 s popisem jednotlivých fází, zvětšeno 500×.	77
43	Výsledky line scanu vzorku M10 pomocí EDS analýzy ve váhových (plná čára) a atomárních (čárkovaná čára) koncentracích.	78
44	Trend indentačního modulu v line scanu přes hranu mramorového zrna.	79
45	Vizuální stanovení síranové koroze.	81
46	Procentuální úbytek fyzikálních vlastností vlivem působení síranové koroze po dobu 60 dní (2 měsíce): úbytek hmotnosti – vlevo, úbytek pevnosti v tlaku – vpravo, s vynesnými směrodatnými odchylkami.	82
47	Schéma mikromechanického modelu pasty na bázi cementu a mikromleté mramorové moučky [143].	84
48	Závislost celkové porozity na množství náhrady ve formě mikromleté mramorové moučky [143].	85
49	Porovnání výsledných dynamických modulů pružnosti z experimentu a modelu – vlevo, znázorněný vliv celkové porozity na dynamický modul pružnosti – uprostřed, znázorněný vliv ITZ na dynamický modul pružnosti – vpravo [143].	86
50	Recyklační linka na zpracování mramorových odprašků: 1 – násypka a pásový dopravník, 2 – kladivový mlýn, 3 – pytlovací stanice, 4 – šnekový dopravník, 5 – filtrační zařízení, 6 – ventilátor, 7 – filtrační zařízení vč. plnicí stanice, 8 – odsávací zařízení vč. plnicí stanice, 9 – pásový dopravník č. 1, 10 – pásový dopravník č. 2, 11 – vibrační třídič, 12 – spirálový dopravník, 13 – vysokorychlostní mlýn, 14 – ovládání [60].	88

51	Prvky stavebního systému: a) lehčená zdicí tvarovka, b) tenkovrstvé lepidlo, c) vícevrstvý omítkový systém, d) finální vzhled stavebního systému. . . .	90
52	Pohled na nanesenou omítku stav v září 2015 – vlevo, stav v srpnu 2020 – vpravo.	92
53	Vývoj minimálních a maximálních denních teplot v období od září 2015 do srpna 2020 [194].	93

Seznam tabulek

1	Souhrnná tabulka publikovaných studií na téma: Náhrada kameniva mramorovou moučkou v betonu.	15
2	Souhrnná tabulka publikovaných studií na téma: Náhrada cementu mramorovou moučkou v betonu.	16
3	Chemické složení testovaných materiálů, vyjádřených v oxidech.	50
4	Granulometrické složení.	51
5	Vyhodnocení prvkové analýzy.	52
6	Granulometrické složení – mikromletí.	57
7	Výsledky obracové analýzy tvaru zrn v závislosti na rychlosti mikromletí. .	58
8	Složení testovaných malt s náhradou běžně využívaného přírodního plniva odpadním mramorem.	60
9	Složení testovaných cementových past s náhradou Portlandského cementu mikromletou mramorovou moučkou.	61
10	Strukturální vlastnosti testovaných směsí se stanovením doby tuhnutí. . .	72
11	Výsledky XRF analýzy.	73
12	Výsledky fázové složení z XRD.	75
13	Výsledky fázového složení pomocí SEM obrazové analýzy v kombinaci s EDS analýzou.	75
14	Předpoklady použité u mikromechanického modelu [143]	84
15	Souhrn složení směsí (váhové procentuální zastoupení jednotlivých složek), konzistence a výsledná celková porozita [143].	86
16	Souhrn složení stavebních prvků s užitnými vlastnostmi.	91
17	Teoretický technický odhad přidané a odevzdané energie pro 1 kg vody v průběhu sledovaného období.	94
18	Cenová kalkulace [197–201].	96
19	Celková uhlíková stopa směšného pojiva.	97

Reference

- [1] Kámen dekor. Vzorník materiálů na trhu, 2020. Dostupné z: <https://www.kamendekor.cz/vzornik/>, [cit. 06.08.2020].
- [2] Anna Šárochová. Mramor - Král antiky, J. 2013. Dostupné z: <https://www.lomyatezba.cz/2013/2013-01/item/300-mramor-kral-antiky/>, [cit. 11.08.2020].
- [3] Fakher J Aukour. Incorporation of Marble Sludge in Industrial Building. *Marble and Beige Marble Industry Report*, 3(1):58–65, 2009.
- [4] Renata Horná. Těžené a importované mramory v České republice, 2007. Dostupné z: <http://www.revuekamen.cz/mramory.htm>, [cit. 06.08.2020].
- [5] S. Yoshizawa. Global trends in waste generation. *REWAS2004, Madrid Spain*, 2004.
- [6] A. Pappu, M. Saxena, and S. R. Asolekar. Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials. *Building and Environment*, 42(6):2311–2320, 2007.
- [7] Z. Prošek, J. Trejbal, J. Topič, T. Plachý, and P. Tesárek. Utilization of the waste from the marble industry for application in transport infrastructure: mechanical properties of cement pastes. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 236, 2017.
- [8] M. S. Ibrahim, E. Badr, S. a Asker, and N. M. El-galad. Health Risk Assessment of Marble Dust at Marble Workshops. *Nature and Science*, 9(11):144–154, 2011.
- [9] Egyptian Environmental Affairs Agency (EEAA). Country report on the solid waste management in EGYPT. Dostupné z: <https://www.retech-germany.net>, 2014.
- [10] A.O. Mashaly, B.N. Shalaby, and M.A. El-Hefnawi. Characterization of The Marble Sludge of The Shaq El Thoaban Industrial Zone , Egypt and Its Compatibility for Various Recycling Applications. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 6(3):153–161, 2012.
- [11] A. A. Aliabdo, A. M. Elmoaty, and E. M. Auda. Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. *Construction and Building Materials*, 50:28–41, 2014.

- [12] V. Liguori, G. Rizzo, and M. Traverso. Marble quarrying: An energy and waste intensive activity in the production of building materials. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 108:197–207, 2008.
- [13] G. Marras, A. Bortolussi, R. Peretti, and N. Careddu. Characterization methodology for re-using marble slurry in industrial applications. *Energy Procedia*, 125:656–665, 2017.
- [14] D. A. Willey. The marble quarries of carrara. *Scientific American*, 97:361–362, 1907.
- [15] G. Antonella Dino, C. Chiappino, and P. Rossetti. Quarry waste management and recovery: first results connected to Carrara marble ravaneti (Italy). In *EGU General Assembly Conference*, EGU General Assembly Conference, pages 39–82, 2017.
- [16] B. Demirel and K. E. Alyamaç. Waste marble powder/dust. In R. Siddique and P. Cachim, editors, *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete*, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, pages 181 – 197. Woodhead Publishing, 2018.
- [17] Cenia česká informační agentura životního prostředí. Statistická ročenka životního prostředí České republiky 2017. Dostupné z: <https://www.cenia.cz/publikace/statisticka-rocenka-zivotniho-prostredi-cr/>, [cit. 06.08.2020], 2018.
- [18] O. Vavruška. *Současnost a perspektiva těžby a úpravy nerudných surovin II*. VŠB - Technická univerzita, Ostrava, 2002.
- [19] V. Kotecký. *Potenciál alternative k těžbě stavebního kamene, štěrkopísku a vápenců v České republice*. Hnutí DUHA, 2000.
- [20] Česká geologická služba. *Výroční zpráva České geologické služby 2013*. Česká geologická služba, Praha, 2014.
- [21] G. Yakse N. Ural. Utilization of large pieces of marble quarry waste as base materials. *Open Geosciences*, in print, 2020.
- [22] A. Rana, P. Kalla, H. K. Verma, and J. K. Mohnot. Recycling of dimensional stone waste in concrete: A review. *Journal of cleaner production*, 135:312–331, 2016.
- [23] F. Pacheco-Torgal, V. W.Y. Tam, J. A. Labrincha, Y. Ding, and J. De Brito. *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*. Woodhead Publishing, 2013.

-
- [24] J. Lederová and P. Leber. Využití průmyslových odpadních materiálů při výrobě stavebních hmot. *Stavebnictví*, 8(04), 2008.
- [25] H. Ş. Arel. Recyclability of waste marble in concrete production. *Journal of Cleaner Production*, 131:179–188, 2016.
- [26] V. Corinaldesi, G. Moriconi, and T. R. Naik. Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, 24(1):113–117, J. 2010.
- [27] M.-Y. Lee, C.-H. Ko, F.-C. Chang, S.-L. Lo, J.-D. Lin, M.-Y. Shan, and J.-C. Lee. Artificial stone slab production using waste glass, stone fragments and vacuum vibratory compaction. *Cement and Concrete Composites*, 30(7):583–587, 2008.
- [28] H. Binici, T. Shah, O. Aksogan, and H. Kaplan. Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates. *Journal of Materials Processing Technology*, 208(1-3):299–308, 2008.
- [29] K. K Alzboon and K. N. Mahasneh. Effect of Using Stone Cutting Waste on the Compression Strength and Slump Characteristics of Concrete. *International Journal of Environmental Science and Engineering*, 3(3):491–496, 2009.
- [30] İ. B. Topçu, T. Bilir, and T. Uygunoğlu. Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 23(5):1947–1953, 2009.
- [31] N. Almeida, F. Branco, and J. R. Santos. Recycling of stone slurry in industrial activities: Application to concrete mixtures. *Building and Environment*, 42(2):810–819, 2007.
- [32] H. Hebhoub, H. Aoun, M. Belachia, H. Houari, and E. Ghorbel. Use of waste marble aggregates in concrete. *Construction and Building Materials*, 25(3):1167–1171, 2011.
- [33] P. Turgut. Masonry composite material made of limestone powder and fly ash. *Powder Technology*, 204(1):42–47, 2010.
- [34] S. Dhanapandian and B. Gnanavel. Using granite and marble sawing power wastes in the production of bricks: Spectroscopic and mechanical analysis. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2(1):73–86, 2010.
- [35] W. Acchar, F. A. Vieira, and A. M. Segadães. Using ornamental stone cutting rejects as raw materials for red clay ceramic products: Properties and microstructure development. *Materials Science and Engineering: A*, 435-436:606–610, 2006.

- [36] P. Turgut. Properties of masonry blocks produced with waste limestone sawdust and glass powder. *Construction and Building Materials*, 22(7):1422–1427, 2008.
- [37] O. Gencil, C. Ozel, F. Koksall, E. Erdogmus, G. Martínez-Barrera, and W. Brostow. Properties of concrete paving blocks made with waste marble. *Journal of Cleaner Production*, 21(1):62–70, 2012.
- [38] M. Shahul Hameed and A.S.S. Sekar. Properties of green concrete containing quarry rock dust and marble sludge powder as fine aggregate. *ARPJ. Eng. Appl. Sci*, 4(4):83–89, 2009.
- [39] T. Kaosol. Reuse Water Treatment Sludge for Hollow Concrete Block Manufacture. *Energy Research Journal*, 1(2):131–134, 2010.
- [40] G. Marras, N. Careddu, C. Internicola, and G. Siotto. Recovery and reuse of marble powder by-product. In *Global stone congress*, pages 2–5, 2010.
- [41] N. Bilgin, H. A. Yeprem, S. Arslan, A. Bilgin, E. Günay, and M. Marşoglu. Use of waste marble powder in brick industry. *Construction and Building Materials*, 29:449–457, 2012.
- [42] P. Davini. Investigation into the desulphurization properties of by-products of the manufacture of white marbles of Northern Tuscany. *Fuel*, 79(11):1363–1369, 2000.
- [43] S. Ahsan. Use of some natural and waste materials for waste water treatment. *Water Research*, 35(15):3738–3742, 2001.
- [44] H. Al-Hamaiedh. Reuse of marble sludge slime in ceramic industry. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 4(3):264–271, 2010.
- [45] M. A. Montero, M. M. Jordán, M. S. Hernández-Crespo, and T. Sanfeliu. The use of sewage sludge and marble residues in the manufacture of ceramic tile bodies. *Applied Clay Science*, 46(4):404–408, 2009.
- [46] F. Saboya, G. C. Xavier, and J. Alexandre. The use of the powder marble by-product to enhance the properties of brick ceramic. *Construction and Building Materials*, 21(10):1950–1960, 2007.
- [47] A. M. Segadães, M. A. Carvalho, and W. Acchar. Using marble and granite rejects to enhance the processing of clay products. *Applied Clay Science*, 30(1):42–52, 2005.
- [48] W. M. N. Nour, A. A. Mostafa, and D. M. Ibrahim. Recycled wastes as precursor for synthesizing wollastonite. *Ceramics International*, 34(1):101–105, 2008.

- [49] C. Pérez-Sirvent, M. L. García-Lorenzo, M. J. Martínez-Sánchez, M. C. Navarro, J. Marimón, and J. Bech. Metal-contaminated soil remediation by using sludges of the marble industry: Toxicological evaluation. *Environment International*, 33(4):502–504, 2007.
- [50] L. E. G. Cambroner, J. M. Ruiz-Roman, F. A. Corpas, and J. M. Ruiz Prieto. Manufacturing of Al–Mg–Si alloy foam using calcium carbonate as foaming agent. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(4):1803–1809, 2009.
- [51] PSP Engineering a.s. Systémy pro drcení a třídění nerostných surovin a pro recyklaci. Dostupné z: http://www2.pspeng.cz/Attachment/CZ_SystemyDrceni.pdf, [cit. 24.08.2015].
- [52] R. K. Bapna. Marble waste minimization. *Department of Mines Geology Newsletter*, 23:1–4, 2020.
- [53] Z. Prokšán, M. Procházka, M. Faltus, M. Procházka, and J. Valentin. Využití vysokorychlostního mletí v odpadovém hospodářství. In *Týden výzkumu a inovací pro praxi a životní prostředí.*, 2017.
- [54] L. G. Austin and O. Trass. Size reduction of solids crushing and grinding equipment. In *Handbook of powder science & technology*, pages 586–634. Springer, 1997.
- [55] R. H. Snow, B. H. Kaye, C. E. Capes, and G. C. Sresty. Size reduction and size enlargement. *Microscope*, 20:8, 1984.
- [56] Z. Prokšán. Efektivní zpracování odpadů vysokoenergetickým mletím. In *Týden výzkumu a inovací pro praxi a životní prostředí*, 2019.
- [57] G. Šebot. *Těžba a úprava nerostných surovin*. Skripta, ČVUT v Praze, Ediční středisko ČVUT, Praha, 1983.
- [58] Z. Prošek, K. Šeps, and J. Topič. The Effect of Micronized Waste Marble Powder as Partial Replacement for Cement on Resulting Mechanical Properties of Cement Pastes. *Advanced Materials Research*, 1144:54–58, 2017.
- [59] Z. Prošek, P. Tesárek, J. Trejbal, and T. Horová. Recycling of construction waste using high-speed milling process: determination of waste concrete. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 22:88–93, 2019.
- [60] LAVARIS. Kamenné odprašky. Dostupné z: <https://www.lavaris.cz>, [cit. 01.07.2019].

- [61] T. Uygunolu, I. B. Topcu, O. Gencil, and W. Brostow. The effect of fly ash content and types of aggregates on the properties of pre-fabricated concrete interlocking blocks (PCIBs). *Construction and Building Materials*, 30:180–187, 2012.
- [62] M. Omar, G. D. Abd Elhameed, M. A. Sherif, and H. A. Mohamadien. Influence of limestone waste as partial replacement material for sand and marble powder in concrete properties. *HBRC Journal*, 8(3):193–203, 2012.
- [63] A. Mishra, A. Pandey, P. Maheshwari, A. Chouhan, S. Suresh, and S. Das. Green cement for sustainable concrete using marble dust. *International Journal of ChemTech Research CODEN (USA): IJCRGG ISSN*, pages 0974–4290, 2013.
- [64] R. K. Khyaliya, K. S. A. Kabeer, and A. K. Vyas. Evaluation of strength and durability of lean mortar mixes containing marble waste. *Construction and Building Materials*, 147:598–607, 2017.
- [65] B. Demirel. The effect of the using waste marble dust as fine sand on the mechanical properties of the concrete. *International Journal of Physical Sciences*, 5(9):1372–1380, 2010.
- [66] N. Bilgin. *Using Waste Marble Dust in Building Materials*. PhD thesis, Master’s thesis, 2010, Yildiz Technical University, 2010.
- [67] B. Rai, K. H. Naushad, K. Abhishek, T. S. Rushad, and S. K. Duggal. Influence of Marble powder/granules in Concrete mix. *International journal of civil and structural engineering*, 1(4):827, 2011.
- [68] R. A. Hamza, S. El-Haggar, and S. Khedr. Marble and granite waste: characterization and utilization in concrete bricks. *International Journal of Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics*, 1(4):286–291, 2011.
- [69] M. M. C. Dhoka. Green concrete: using industrial waste of marble powder, quarry dust and paper pulp. *International Journal of Engineering Science*, 2(10):67–70, 2013.
- [70] D. Silva, F. Gameiro, and J. Brito. Mechanical properties of structural concrete containing fine aggregates from waste generated by the marble quarrying industry. *Journal of materials in civil engineering*, 26(6):04014008, 2014.
- [71] A. André, J. Brito, A. Rosa, and D. Pedro. Durability performance of concrete incorporating coarse aggregates from marble industry waste. *Journal of Cleaner Production*, 65:389–396, 2014.

-
- [72] P. Martins, J. Brito, A. Rosa, and D. Pedro. Mechanical performance of concrete with incorporation of coarse waste from the marble industry. *Materials Research*, 17(5):1093–1101, 2014.
- [73] K. E. Alyamaç and E. Tuğrul. A durable, eco-friendly and aesthetic concrete work: marble concrete. In *11th International Congress on Advances in Civil Engineering (ACE 2014)*, volume 50, pages 21–25, 2014.
- [74] O. Keleştemur, E. Arici, S. Yildiz, and B. Gökçer. Performance evaluation of cement mortars containing marble dust and glass fiber exposed to high temperature by using Taguchi method. *Construction and Building Materials*, 60:17–24, 2014.
- [75] F. Gameiro, J. Brito, and D. Correia da Silva. Durability performance of structural concrete containing fine aggregates from waste generated by marble quarrying industry. *Engineering Structures*, 59:654–662, 2014.
- [76] P. J. Chavhan and S. D. Bhole. To study the behaviour of marble powder as supplementary cementitious material in concrete. *Int J Eng Res Appl*, 4(4):377–381, 2014.
- [77] S. D. Kore and A. K. Vyas. Impact of marble waste as coarse aggregate on properties of lean cement concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 4:85–92, 2016.
- [78] K. I. S. A. Kabeer and A. K. Vyas. Utilization of marble powder as fine aggregate in mortar mixes. *Construction and Building Materials*, 165:321–332, 2018.
- [79] D. K. Ashish. Feasibility of waste marble powder in concrete as partial substitution of cement and sand amalgam for sustainable growth. *Journal of Building Engineering*, 15:236–242, 2018.
- [80] H. Y. Aruntaş, M. Gürü, M. Dayi, and I. Tekin. Utilization of waste marble dust as an additive in cement production. *Materials and Design*, 31(8):4039–4042, 2010.
- [81] A. Ergün. Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 25(2):806–812, 2011.
- [82] V. M. Sheike, P. Y. Pawde, and R. R. Shrivastava. Effect of Marble Powder with and without Silica Fume on Mechanical Properties of Concrete. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 1(1):40–45, 2012.

- [83] N. M. Soliman. Effect of using marble powder in concrete mixes on the behavior and strength of RC slabs. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 3(5):1863–1870, 2013.
- [84] P. A. Shirule, A. Rahman, and R. D. Gupta. Partial replacement of cement with marble dust powder. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, 1(3):2249, 2012.
- [85] V. G. Pathan and M. G. Pathan. Feasibility and need of use of waste marble powder in concrete production. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, pages 23–26, 2014.
- [86] E. Bacarji, R. D. Toledo Filho, E. A.B. Koenders, E. P. Figueiredo, and J. L.M.P. Lopes. Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers. *Construction and Building Materials*, 45:1–10, 2013.
- [87] A. Rana, P. Kalla, and L. J. Csetenyi. Sustainable use of marble slurry in concrete. *Journal of Cleaner Production*, 94:304–311, 2015.
- [88] A. Talah, F. Kharchi, and R. Chaid. Influence of Marble Powder on High Performance Concrete Behavior. *Procedia Engineering*, 114:685–690, 2015.
- [89] R. Rodrigues, J. De Brito, and M. Sardinha. Mechanical properties of structural concrete containing very fine aggregates from marble cutting sludge. *Construction and Building Materials*, 77:349–356, 2015.
- [90] M. J. Munir, S. M. S. Kazmi, and Y. F. Wu. Efficiency of waste marble powder in controlling alkali–silica reaction of concrete: A sustainable approach. *Construction and Building Materials*, 154:590–599, 2017.
- [91] M. Singh, A. Srivastava, and D. Bhunia. An investigation on effect of partial replacement of cement by waste marble slurry. *Construction and Building Materials*, 134:471–488, 2017.
- [92] A. Khodabakhshian, J. Brito, M. Ghalehnovi, and E. Asadi Shamsabadi. Mechanical, environmental and economic performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder. *Construction and Building Materials*, 169:237–251, 2018.
- [93] R. Kumar. Modified mix design and statistical modelling of lightweight concrete with high volume micro fines waste additive via the box-behnken design approach. *Cement and Concrete Composites*, 113:103706, 2020.

-
- [94] Z. Siddique, R. Bhargava, M. M. Ansari, and W. Khan. Experimental study for the utilization of marble powder and in construction industry. In *AIP Conference Proceedings*, volume 2158, page 020025. AIP Publishing LLC, 2019.
- [95] ČSN EN 197-1 ed. 2. Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. *Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*, 2012.
- [96] A. M. Neville. *Properties of concrete*, volume 4. Longman London, 1995.
- [97] T. C. Hansen, F. Radjy, and E. J. Sellevold. Cement paste and concrete. *Annual Review of Materials Science*, 3(1):233–268, 1973.
- [98] H. M. Jennings, J. J. Thomas, D. Rothstein, and J. J. Chen. Handbook of porous solids, Cements as porous materials, 2002.
- [99] H. F. W. Taylor. *Cement chemistry*. Thomas Telford, 1997.
- [100] P. Pytlík. Technologie betonu. 2. vydání. *VUT v Brně, Nakladatelství VUTIUM*, 2000.
- [101] Z. Šauman. *Maltoviny I*. Vysoké učení technické, Brno, 1993.
- [102] ČSN EN 206 +A1. Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. *Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*, 2018.
- [103] R. Hela. Příměsi do betonu. *Beton TKS*, 2:4–10, 2015.
- [104] J. Lukáš. *Současné trendy ve stavebnictví, betony speciálních vlastností*. Brno, 2007.
- [105] J. Bensted. Thaumasite - Background and nature in deterioration of cements, mortars and concretes. *Cement and Concrete Composites*, 21(2):117–121, 1999.
- [106] N. T. Seghir, M. Mellas, Ł. Sadowski, A. Krolicka, A. and Zak, and K. Ostrowski. The utilization of waste marble dust as a cement replacement in air-cured mortar. *Sustainability (Switzerland)*, 11(8), 2019.
- [107] M. Uysal and M. Sumer. Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures. *Construction and Building materials*, 25(11):4112–4120, 2011.
- [108] S. K. Agarwal and D. Gulati. Utilization of industrial wastes and unprocessed micro-fillers for making cost effective mortars. *Construction and Building Materials*, 20(10):999–1004, 2006.

- [109] S. Yildiz and O. Kelestemur. Estimation of compressive strength of waste marble dust and glass fibre included concretes by artificial neural network. *Engineering Sciences*, 6(4):1292–1303, 2011.
- [110] N. Ural, C. Karakurt, and A. T. Cömert. Influence of marble wastes on soil improvement and concrete production. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 16(3):500–508, 2014.
- [111] Z Prošek, V Nežerka, and P Tesárek. Enhancing cementitious pastes with waste marble sludge. *Construction and Building Materials*, 255:119372, 2020.
- [112] E. Tugrul Tunc. Recycling of marble waste: A review based on strength of concrete containing marble waste. *Journal of environmental management*, 231:86–97, 2019.
- [113] V. M. SounthararaJ. and A. Sivakumar. Effect of the lime content in marble powder for producing high strength concrete. *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 8(4):260–264, 2013.
- [114] MEFANET. Mikroskopické metody, 2019. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Mikroskopicke_metody, [cit. 11.08.2020].
- [115] J. Mertz. *Introduction to optical microscopy*. Cambridge University Press, 2019.
- [116] Z. Dolníček. *Laboratorní metody výzkumu*. Přírodovědecká fakulta Univerzita Palackého, Olomouc, 2005.
- [117] L. Eckertová, L. Frank, and A. Delong. *Metody analýzy povrchů: elektronová mikroskopie a difrakce*. Praha : Academia, 1996.
- [118] A. Jäger and V. Gärtnerová. Elektronovým mikroskopem do nitra materiálů aneb jak vypadá jejich struktura. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/popularizace/elektronovym-mikroskopem-do-nitra-materialu-aneb-jak-vypada-jejich-struktura>, [cit. 28.06.2019].
- [119] R. Kubínek, K. Šafářová, and M. Vůjtek. *Elektronová mikroskopie*. Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, 2011.
- [120] Z. Foret. *Návrh koncepce a vývoj jednoúčelového rastrovacího elektronového mikroskopu*. PhD thesis, Vysoké učení technické v Brně, 2010.
- [121] I. N. Sneddon. The relation between load and penetration in the axisymmetric boussinesq problem for a punch of arbitrary profile. *International Journal of Engineering Science*, 3(1):47–57, 1965.

- [122] W.C. Oliver and G.M. Pharr. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*, 7(06):1564–1583, J. 2011.
- [123] S. A. S. Asif, K. J. Wahl, and R. J. Colton. Nanoindentation and contact stiffness measurement using force modulation with a capacitive load-displacement transducer. *Review of Scientific Instruments*, 70(5):2408, 1999.
- [124] S. A. Asif, K. J. Wahl, R. J. Colton, and O. L. Warren. Quantitative imaging of nanoscale mechanical properties using hybrid nanoindentation and force modulation. *Journal of Applied Physics*, 90(3):1192, 2001.
- [125] ČSN EN 196-2. Metody zkoušení cementu - Část 2: Chemický rozbor cementu. *Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*, 2013.
- [126] ASTM C1356-07. Standard Test Method for Quantitative Determination of Phases in Portland Cement Clinker by Microscopical Point-Count Procedure. *Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2007.
- [127] ASTM C1365 - 19. Standard Test Method for Determination of the Proportion of Phases in Portland Cement and Portland-Cement Clinker Using X-Ray Powder Diffraction Analysis. *ASTM Standard Test Method*, 2018.
- [128] ČSN EN 1097-5. Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 5: Stanovení vlhkosti sušením v sušárně. *Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*, 2008.
- [129] ČSN EN 196-3. Metody zkoušení cementu. Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti. *Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*, 2005.
- [130] ČSN EN 1015-3. Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku). *Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*, 2000.
- [131] ČSN 731372. Nedestruktivní zkoušení betonu - Rezonanční metoda zkoušení betonu. *Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*, 2012.
- [132] ASTM E1876-01. Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. *Annual Book of ASTM Standards*, 2015.

- [133] ČSN EN 1015-11. Zkušební metody malt pro zdivo - Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku. *Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*, 2000.
- [134] ČSN EN 196-1. Metody zkoušení cementu. Část 1: Stanovení pevnosti. *Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*, 2016.
- [135] ASTM C1012 - 04. Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution. *ASTM Standard Test Method*, 2004.
- [136] P. Nielsen, S. Nicolai, A. Darimont, and X. Kestemont. Influence of cement and aggregate type on thaumasite formation in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 53:115–126, 2014.
- [137] V. Nežerka and J. Trejbal. Assessment of aggregate-bitumen coverage using entropy-based image segmentation. *Road Materials and Pavement Design*, 0(0):1–12, 2019.
- [138] L. Hlubocký and Z. Prošek. Mechanical Properties of Cement Composite with Material Based on Waste Marble Powder and Crushed Limestone. *Advanced Materials Research*, 1144:9–13, 2017.
- [139] S. T. Erdogan, P. N. Quiroga, D. W. Fowler, H. A. Saleh, R. A. Livingston, E. J. Garboczi, P. M. Ketcham, J. G. Hagedorn, and S. G. Satterfield. Three-dimensional shape analysis of coarse aggregates: New techniques for and preliminary results on several different coarse aggregates and reference rocks. *Cement and Concrete Research*, 36(9):1619–1627, 2006.
- [140] M. Uysal and K. Yilmaz. Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites*, 33(7):771–776, 2011.
- [141] J. Péra, S. Husson, and B. Guilhot. Influence of finely ground limestone on cement hydration. *Cement and Concrete Composites*, 21:99–105, 1999.
- [142] M. Vyšvařil and M. Rovnaníková. Odolnost jemnozrnných betonů vůči síranové korozi v odpadních systémech. *TZB-info*, 2017. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/materialy-voda-kanalizace/15420-odolnost-jemnozrnnych-betonu-vuci-siranove-korozi-v-odpadnich-systemech>.
- [143] V. Nežerka, J. Zeman, and J. Němeček. Micromechanics-based simulations of compressive and tensile testing on lime-based mortars. *Mechanics of Materials*, 105:49–60, 2017.

-
- [144] B. Pichler and C. Hellmich. Upscaling quasi-brittle strength of cement paste and mortar: A multi-scale engineering mechanics model. *Cement and Concrete Research*, 41(5):467–476, 2011.
- [145] T. Mori and K. Tanaka. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. *Acta Metallurgica*, 21(5):571–574, 1973.
- [146] P. H. Feenstra and R. Borst. Constitutive Model for Reinforced Concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, 121(5):587–595, 1995.
- [147] J. Němeček. Creep effects in nanoindentation of hydrated phases of cement pastes. *Materials Characterization*, 60(9):1028–1034, 2009.
- [148] T. Akçaoğlu, M. Tokyay, and T. Çelik. Effect of coarse aggregate size and matrix quality on ITZ and failure behavior of concrete under uniaxial compression. *Cement and Concrete Composites*, 26(6):633–638, 2004.
- [149] K. L. Scrivener, A. K. Crumbie, and P. Laugesen. The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete. *Interface Science*, 12(4):411–421, 2004.
- [150] R. Zimbelmann. A contribution to the problem of cement-aggregate bond. *Cement and Concrete Research*, 15(5):801–808, 1985.
- [151] G. Prokopski and J. Halbiniak. Interfacial transition zone in cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 30(4):579–583, 2000.
- [152] Z. Prošek, J. Topič, J. Ďureje, and J. Trejbal. Comparison between the impact of micronized waste concrete and marble additions on mechanical properties of cementitious pastes. *Waste Forum*, 2:262–267, 2018.
- [153] Z. Prošek, J. Trejbal, P. Tesárek, and J. Ďureje. Dynamic moduli of cement paste with different kinds of recycled concrete admixtures. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 379, page 012015, 2018.
- [154] J. Topič, Z. Prošek, J. Trejbal, J. Fládr, and T. Plachý. Fine recycled concrete powder used as filler and cement replacement in new concrete. In *CESB 2016 - Central Europe Towards Sustainable Building 2016: Innovations for Sustainable Future*, 2016.
- [155] J. Topič, J. Fládr, and Z. Prošek. Flexural and Compressive Strength of the Cement Paste with Recycled Concrete Powder. *Advanced Materials Research*, 1144:65–69, 2017.

- [156] J. Topič and Z. Prošek. Hydration Heat Evolution of the Cement Paste with Recycled Concrete: Influence of Grain Size Distribution of Recycled Concrete Powder. In *Key Engineering Materials*, volume 731, pages 37–42. Trans Tech Publ, 2017.
- [157] J. Topič and Z. Prošek. Hydration process and mechanical properties of cement paste with recycled concrete powder and silica sand powder. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 13:125–129, 2017.
- [158] Z. Prošek, P. Tesárek, and V. Hrbek. Characterization of old concrete for new use: Grid nanoindentation and scanning electron microscopy. In *NANOCON 2018 - Conference Proceedings, 10th Anniversary International Conference on Nanomaterials - Research and Application*, pages 736–741, 2019.
- [159] J. Topič, Z. Prošek, J. Fládr, J. Trejbal, P. Tesárek, and G. Karra'a. Influence of Finely Ground Recycled Concrete on Microstructure of Cement-Based Composite Material. *Key Engineering Materials*, 714:111–115, 2016.
- [160] J. Topič, Z. Prošek, J. Fládr, and P. Tesárek. Influence of fineness of recycled concrete powder on the heat evolution and influence of its amount on mechanical-physical properties of cement paste. *Waste Forum*, 2:268–274, 2018.
- [161] Z. Prošek, P. Tesárek, J. Dureje, J. Trejbal, and O. Zobal. Investigation of mechanical properties of cement pastes with fine recycled concrete as partial replacement for portland cement: Kind of method high-speed milling. In *Experimental Stress Analysis - 56th International Scientific Conference, EAN 2018 - Conference Proceedings*, pages 338–341, 2018.
- [162] Z. Prošek, P. Tesárek, J. Trejbal, and Tomáš Plachý. Mechanical properties of cement pastes with fine old concrete, influence of different type of approach mixing. In *57TH CONFERENCE ON EXPERIMENTAL STRESS ANALYSIS*, page in press, Luhačovice, Czech republic, 2019.
- [163] M. Lidmila, J. Topič, T. Plachy, Z. Prošek, V. Nežerka, and P. Tesárek. Mechanical Properties of Recycled Binder/Micro-Filler Cement-Based Material. *Advanced Materials Research*, 1054:234–237, 2014.
- [164] J. Hruža, J. Topič, and Z. Prošek. Mechanical Properties of the Cement Paste with Fine Ground Recycled Concrete Depending on the Microstructure. *Advanced Materials Research*, 1144:22–27, 2017.
- [165] V. Hrbek, Z. Prošek, V. Nežerka, and P. Tesarek. Microscopic performance of cementitious composite with recycled concrete admixture. In *NANOCON 2018 -*

-
- Conference Proceedings, 10th Anniversary International Conference on Nanomaterials - Research and Application*, pages 204–209, 2019.
- [166] J. Topič and Z. Prošek. Properties and microstructure of cement paste including recycled concrete powder. *Acta Polytechnica*, 57(1):49–57, 2017.
- [167] Z. Prošek, P. Tesárek, and J. Trejbal. Recycling and its use in concrete waste processing by high-speed milling. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 21:28–32, 2019.
- [168] J. Topič, J. Trejbal, T. Plachý, and Z. Prošek. Relationship between Compressive Strength and Young’s Modulus of Cement Paste with Recycled Concrete Powder. *Key Engineering Materials*, 722:254–259, 2017.
- [169] J. Topič, Z. Prošek, J. Fládr, V. Nežerka, and P. Tesárek. Replacement of Cement with Finely Ground Recycled Concrete: Influence on Mechanical Properties. *Applied Mechanics and Materials*, 825:69–72, 2016.
- [170] J. Topič, Z. Prošek, J. Trejbal, and G. Karra. Shrinkage of the cement pastes with different amount of finely ground recycled concrete. *International Journal of Advanced Research in Science and Engineering*, 2015.
- [171] J. Hruža, J. Topič, and Z. Prošek. The Dependence of the Shrinkage of the Cement Composite with Fine Ground Recycled Concrete on its Microstructure. *Key Engineering Materials*, 731:103–108, 2017.
- [172] Z. Prošek, J. Topič, and P. Tesárek. Destructive Testing of cement paste with micronized waste marble powder as partial replacement for cement - Long time development of mechanical properties. In *EAN 2017 - 55th Conference on Experimental Stress Analysis 2017*, pages 451–454, 2017.
- [173] Z. Prošek, K. Šeps, J. Topič, and P. Tesárek. Effect of particle size distribution waste micronized marble powder on the mechanical properties of the cement composite. In *EAN 2016 - 54th International Conference on Experimental Stress Analysis*, 2016.
- [174] Z. Prošek, P. Tesárek, J. Topič, and J. Trejbal. Hydration Process of Cement Paste with the Waste Micronized Marble Powder. *NANS - Nanomateriály a nanotechnologie ve stavebnictví*, 2016.
- [175] Z. Prošek, J. Topič, K. Šeps, and P. Tesárek. Influence of Waste Crushed Limestone and Waste Micronized Marble Powder on Mechanical Properties of Cement Composite. *Key Engineering Materials*, 722:222–227, 2017.


- [176] Z. Prošek and J. Topič. Long-time investigation of cement composite material with micronized waste marble powder: dynamic modules. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 13:93–96, 2017.
- [177] Z. Prošek, J. Trejbal, and P. Tesárek. Vliv jemně mleté mramorové moučky jako částečné náhrady za portlandský cement na mechanické vlastnosti výsledného kompozitu. In *Recycling*, Brno, 2018.
- [178] Z. Prošek, J. Trejbal, and P. Tesárek. Využití odpadu z mramorového průmyslu jako částečné náhrady za cement – vliv mramorové moučky na proces hydratace Portlandského cementu. In *TVIP - týden výzkumu a inovací pro praxi - Třetí Ruka*, 2018.
- [179] J. Ďureje, Z. Prošek, J. Hruža, and P. Tesárek. Cement matrix containing micronized recycled concrete and the influence of additives. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 15:20–24, 2018.
- [180] P. Tesárek, Z. Prošek, P. Ryparová, J. Hruža, V. Nežerka, and J. Fládr. Effect of cement/water ratio on mechanical properties of cement pastes containing recycled micronized concrete powder and chemical additives. In *Experimental Stress Analysis - 56th International Scientific Conference, EAN 2018 - Conference Proceedings*, pages 416–420, 2018.
- [181] J. Ďureje and Z. Prošek. Foamed cement composites: detection of the modulus of elasticity using dic analysis and comparison with other methods. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 13:35–38, 2017.
- [182] J. Hruža and Z. Prošek. The effect of plasticizer on mechanical properties of the cement paste with fine ground recycled concrete. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 13:61–65, 2017.
- [183] J. Topič, J. Bartoš, Lubomír Kopecký, K. Šeps, Z. Prošek, and J. Trejbal. Cement Composite Reinforced with Synthetic Fibers: Comparison of Three-Point and Four-Point Bending Test Results. *Applied Mechanics and Materials*, 827:332–335, 2016.
- [184] J. Topič, J. Bartoš, L. Kopecký, J. Fládr, Z. Prošek, and J. Trejbal. Development of mechanical properties of a cement composite reinforced with synthetic fibers. In *EAN 2015 - 53rd Conference on Experimental Stress Analysis*, pages 442–445, 2015.
- [185] J. Trejbal, J. Ďureje, R. Hlůžek, and Z. Prošek. Interaction assessment between fiber reinforcement and cement matrix containing finely ground recycled concrete.

- In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 379, page 012016, 2018.
- [186] J. Topič, A. Osvald, V. Nežerka, Z. Prošek, M. Lidmila, J. Valentin, and P. Tesárek. Comparison of Compressive Strength and Young's Modulus of Cement Samples with Different Types of Aggregate. *Key Engineering Materials*, 677:207–210, 2016.
- [187] T. Plachý, P. Tesárek, L. Hlubocký, J. Hrůza, J. Fládr, J. Trejbal, and Z. Prošek. Effect of Microfillers on Selected Destructive and Nondestructive Mechanical Properties of Cement Mortars: Different Types of Recycled Materials. *Key Engineering Materials*, 722:195–200, 2017.
- [188] Z. Prošek, A. Osvald, J. Topič, J. Valentin, J. Trejbal, and P. Tesárek. Influence of Recycled Concrete Composition on its Elastic Stiffness. *Key Engineering Materials*, 677:288–291, 2016.
- [189] Z. Prošek, J. Topič, J. Trejbal, K. Šeps, and P. Tesárek. Influence of Recycled Materials on Resulting Mechanical Properties of Cement Composites. *Applied Mechanics and Materials*, 825:53–56, 2016.
- [190] J. Antoš, L. Dejdar, J. Trejbal, and Z. Prošek. Performance of cement composites reinforced with surface-modified polypropylene micro- and macro-fibers. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 13:11–15, 2017.
- [191] ČSN 73 1322. Stanovení mrazuvzdornosti betonu. *Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*, 1969.
- [192] P. Reiterman. Studium účinku cyklického zmrazování na vlastnosti vybraných typů pískovců, 2014. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/studium-ucinku-cyklickeho-zmrazovani-na-vlastnosti-vybranych-typu-piskovcu/>, [cit. 12.07.2019].
- [193] P. Veselý, V. Veselý, and S. Smiřinský. Pohled na metody ověřování životnosti ztvrdlého betonu při zkouškách v laboratorním prostředí. In *Workshop - Trvanlivost silikátových materiálů 2013*, pages 34 – 43, 2013.
- [194] In-počasí.cz. Archiv počasí. Dostupné z: <https://www.in-pocasi.cz/archiv/>, [cit. 01.09.2020].
- [195] R. Coufal. Odolnost betonu v prostředí s mrazovými cykly. *Materiály pro stavbu*, 4:32–37, 2013.

- [196] Statista. Global cement price growth 2013-2020. Dostupné z: <https://www.statista.com/>, [cit. 12.07.2019].
- [197] Heidelberg Cement Hanson cement. Products and Servis. Dostupné z: <http://www.hanson-israel.com/>, [cit. 06.08.2020], 2019.
- [198] Heidelberg Cement SUEZ cement. Suez Cement Group of Companies products. Dostupné z: <https://www.suezcement.com>, [cit. 06.08.2020], 2019.
- [199] Heidelberg Cement Česká republika. Dokumenty ke stažení. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/>, [cit. 06.08.2020], 2019.
- [200] Cement Egypt. Home of Egyptian cement, cement prices OPS, 2019. Dostupné z: <http://cementegypt.com/>, [cit. 06.08.2020].
- [201] Nesher Israel Cement Enterprises LTD. Cement price list, 2019. Dostupné z: <https://www.nesher.co.il>, [cit. 06.08.2020].
- [202] S. C. Bostanci, M. Limbachiya, and H. Kew. Use of recycled aggregates for low carbon and cost effective concrete construction. *Journal of Cleaner Production*, 189:176–196, 2018.
- [203] Cemex. Statistické hodnocení kvality a chemismu cementu, 2020. Dostupné z: <https://www.cemex.cz/>, [cit. 11.08.2020].
- [204] Centrum dopravního výzkumu. Studie o vývoji dopravy z hlediska životního prostředí v České republice za rok 2016. *Elektronický průvodce udržitelnou dopravou*, 2017. Dostupné z: <https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/doprava/>.
- [205] EUROSTAT European Statistical System. CO₂ production. <https://ec.europa.eu/>, [cit. 11.08.2020], 2020.
- [206] V. Nežerka, P. Bílý, V. Hrbek, and J. Fládr. Impact of silica fume, fly ash, and metakaolin on the thickness and strength of the itz in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 103:252–262, 2019.

Příloha A - Užité vzory: A1 - Cementová malta

UŽITNÝ VZOR

<p>(19) ČESKÁ REPUBLIKA</p>  <p>ÚŘAD PRŮMYSLOVÉHO VLASTNICTVÍ</p>	<p>(21) Číslo přihlášky: 2016-32664 (22) Přihlášeno: 05.08.2016 (47) Zapsáno: 04.10.2016</p>	<p>(11) Číslo dokumentu: 29 853</p> <p>(13) Druh dokumentu: U1 (51) Int. Cl.: C04B 18/12 (2006.01) C04B 28/20 (2006.01)</p>
<p>(73) Majitel: CVUT v Praze, Fakulta stavební, Praha 6, CZ Ing. George Karra'a, Karlova Vary, CZ</p> <p>(72) Původce: Ing. Jan Valentin, Ph.D., Kouřim, CZ Ing. Pavel Tesárek, Ph.D., Hradec Králové 6, CZ Ing. Zdeněk Prošek, Ústí nad Labem, CZ Ing. Jaroslav Topič, Hroznětín, CZ Ing. George Karra'a, Karlova Vary, CZ</p> <p>(74) Zástupce: Ing. Lenka Bobková, Kosmická 755, 149 00 Praha 4</p>		
<p>(54) Název užitého vzoru: Cementová malta</p>		

CZ 29853 U1

Úřad průmyslového vlastnictví v zápisném řízení nezjišťuje, zda předmět užitého vzoru splňuje podmínky způsobilosti k ochraně podle § 1 zák. č. 478/1992 Sb.

Cementová maltaOblast techniky

Technické řešení se týká cementové malty.

Dosavadní stav techniky

5 Cementové malty mají ve stavebnictví široké použití. S výrobou malty je spojená těžba písku. Rozsáhlá těžba písku má na krajinu negativní dopad. Dnes je proto snaha, aby těžba písku probíhala méně intenzivním šetrným způsobem.

Na druhé straně se hromadí nevyužitý odpad vznikajícího těžbou a zpracováním kamene resp. mramoru, vápence a žuly stává se celosvětovým ekologickým problémem. V posledních letech vedla rostoucí poptávka po mramoru na vývozních trzích ke zvýšení produkce bez ohledu na jeho kvalitu. Výsledkem byla změna těžebních postupů a hojně využívání odstřelu, který má destruktivní vliv na kamenolom a produkuje zvýšené množství odpadu. Odpadní materiál má několik podob v závislosti na tom, v jaké fázi zpracování vzniká. Velikost částic odpadu vznikajícího při těžbě se pohybuje od velikosti prachových částic až po balvany o velikosti v řádu desítek centimetrů. Tento nevyužitý odpad se skladuje v oblastech poblíž míst, kde dochází k těžebním a má negativní vliv na udržitelný rozvoj těchto oblastí. Další velké množství odpadu produkují tovární linky zpracovávající kámen a to ve formě pevných odpadů, které vznikají vyřazením kamenných bloků z linky kvůli jejich špatnému tvaru nebo pokud jsou bloky rozbité nebo popraskané. Třetí forma odpadů je brusný kal, který vzniká během řezání bloku nebo během procesu broušení a leštění. Po vyschnutí vznikají pevné hroudy brusného kalu.

Těžba je doménu především Číny, Íránu a Egypta, velký podíl na produkci mají i Itálie nebo Španělsko. Avšak zpracování ve formě řezání a broušení probíhá v mnoha evropských zemích. Balvany a hrubé frakce vápence lze relativně snadno a ve velkém množství využít ve stavebnictví. Na druhou stranu využití kamenných odprašků je stále nedostatečné a jeho skladování značně zatěžuje životní prostředí.

Kamenné odprašky, v závislosti na složení, je možné použít například dle patentu US 4 026 716, kde je použito od 5 do 15 % hmotn. jemně mletého vápence ve směsi vysokopevnostního betonu. Tuto aplikaci nelze použít s odpadními kamennými odpraškami pocházejícími z těžby a zpracování kamene z důvodu její kontaminace z různých zdrojů. Další možnou aplikaci popsali Karasahin a Terzi v článku Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete v časopisu Construction and Building Materials, roč. 21, č. 3, na stránce 616 až 620. Tato aplikace je omezená maximální velikostí částic a díky tomu se stává neefektivní v množství zpracovaného odpadu. Dále lze použít mramorovou moučku v odsiřovacích procesech. Tuto aplikaci popsal Davini v článku Investigation into the desulphurization properties of by-products of the manufacture of white marbles of Northern Tuscany v časopisu Fuel, roč. 79, č. 11, na stránce 1363 až 1369. A nakonec dosavadní aplikace v maltách jsou popsány v patentech US 4 390 372, US 3 489 582, US 3 169 877. Všechny tyto aplikace využívají množství chemických aditiv pro úspěšné použití kamenných odprašků. Tyto chemická aditiva zatěžují ekonomicky výsledný produkt a tím se stávají neefektivně použitelná v praxi.

Podstata technického řešení

Podle předloženého technického řešení se navrhuje cementová malta, spočívající v tom, že v suché směsi obsahuje 0,1 až 0,9 % hmotn. MgO; 6,5 až 24 % hmotn. $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$; 0,3 až 2,7 % hmotn. $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$; 0,6 až 3,6 % hmotn. $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$; 0,6 až 3,6 % hmotn. $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$; 40 až 80 % říčního těžebního písku frakce do 2 mm; a 10 až 50 % hmotn. vysokorychlostně mikromleté kamenné moučky.

Vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka má výhodně měrný povrch $2,8\text{ m}^2/\text{cm}^3$ a zrnitost do 0,03 mm, s velikostí středního zrna 3,7 μm .

CZ 29853 U1

Vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka vykazuje výhodně následující zastoupení frakcí:
 0,05 až 0,15 % hmotn. frakce do 0,3 µm, 0,5 až 1 % hmotn. frakce 0,3 až 0,5 µm, 1 až 3 %
 hmotn. frakce 0,5 až 0,7 µm, 1 až 5 % hmotn. frakce 0,7 až 1 µm, 5 až 10 % hmotn. frakce 1 až
 2 µm, 15 až 25 % hmotn. frakce 2 až 4 µm, 20 až 30 % hmotn. frakce 4 až 6 µm, 15 až 35 %
 5 hmotn. frakce 6 až 10 µm, 5 až 15 % hmotn. frakce 10 až 20 µm a 5 až 10 % hmotn. frakce 20 až
 30 µm.

Vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka se získává z kamenných odprašků pocházejících
 z lomů a provozů zabývajících se zpracováním, například řezáním, drcením, broušením, leštěním
 10 přírodního kamene a je tvořena 0 až 100 % hmotn. mramoru, 0 až 100 % hmotn. vápence a 0 až
 10 % hmotn. žuly, v závislosti na probíhajícím druhu produkce. Tento materiál má podobu vodou
 zpevněných slepenců, které jsou dále upravené vysokorychlostním mletím, například přístrojem
 podle PUV 2014-29552. Mletí zajišťuje oddělení zrn, dosažení vhodné jemnosti a zabraňuje
 15 shlukování zrn ve směsi. Jemnost upravené vysokorychlostně mikromleté kamenné moučky od-
 povídá jemnosti mletí cementu. Vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka nahrazuje část
 plniva, běžné nebo křemičité písky. Tímto řešením je využit odpadní materiál, a zároveň jsou
 šetřeny přírodní zdroje. Vzhledem k tomu, že vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka
 plní i funkci mikro plniva, je dosaženo lepších mechanických vlastností než u běžných malt, bez
 nutnosti přidání cementu a je zároveň dosaženo dobré zpracovatelnosti bez přidání chemických
 20 přísad, které výrazně zvyšují cenu maltových směsí. Je dosaženo srovnatelných mechanických
 vlastností v porovnání s dostupnými maltami pro omítání a zdění při snížení ceny finálního pro-
 duktu.

Příklady uskutečnění technického řešení

Příklad 1

Suchá směs o složení:

	MgO	3CaO·SiO ₂	2CaO·SiO ₂	3CaO ·Al ₂ O ₃	4CaO·Al ₂ O ₃ · Fe ₂ O ₃	písek	vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka
25 [% hmotn.]	0,1	6,8	0,3	1,4	1,4	40	50

kde vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka měla měrný povrch 2,8 m²/cm³ měla následující zastoupení frakcí:

Velikost zrna [µm]	<0,3	0,3 až 0,5	0,5 až 0,7	0,7 až 1	1 až 2	2 až 4	4 až 6	6 až 10	10 až 20	20 až 30
Množství [hmotn.] [%]	0,1	1	1	1	5	15	21,9	30	15	10

30 byla vždy nejprve řádně zhomogenizována. Poté byla za průběžného míchání postupně přidávána
 voda v množství 12 až 14 % hmotn. suché směsi podle požadované konzistence a savosti pod-
 kladu. Homogenizace i míchání byly v závislosti na množství prováděny ručně, pomocí metly
 a míchače nebo pomocí stavební míchačky a probíhaly alespoň 5 minut. Malta při běžném zdění
 byla nanášena standardně zednickou lžící a dřevěným nebo plastovým hladítkem. Při omítání
 35 byla malta ručně nahazována a následně stržena latí a po zavadnutí zahlazena dřevěným nebo
 plastovým hladítkem. Vzniklá omítka může sloužit jako podklad pod finální štukové omítky.

Na základě výsledku provedených empirických a pevnostních zkoušek po 28 dnech měla malta
 následující parametry:

objemovou hmotnost 1600 až 1800 kg/m³

pevnost v tlaku minimálně 8,0 MPa, podle ČSN EN 1015-11,

40 pevnost v tahu za ohybu minimálně 1,5 MPa, podle ČSN EN 1015-11,

CZ 29853 U1

dynamický modul pružnosti minimálně 6,2 GPa, podle ČSN 73 1372,

dynamický smykový modul minimálně 2,1 GPa, podle ČSN 73 1372.

Příklad 2

Suchá směs o složení:

	MgO	3CaO·SiO ₂	2CaO·SiO ₂	3CaO·Al ₂ O	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	písek	vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka
[% hmotn.]	0,1	6,8	0,3	1,4	1,4	80	10

kde vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka s měrným povrchem 2,8 m²/cm³ měla následující zastoupení frakcí:

Velikost zrna [μm]	<0,3	0,3 až 0,5	0,5 až 0,7	0,7 až 1	1 až 2	2 až 4	4 až 6	6 až 10	10 až 20	20 až 30
Množství [% hmotn.]	0,1	1	1	1	5	15	21,9	30	15	10

byla vždy nejprve řádně zhomogenizována. Poté byla za průběžného míchání postupně přidávána voda v množství 12 až 14 % hmotn. suché směsi podle požadované konzistence a savosti podkladu. Homogenizace i míchání byly v závislosti na množství prováděny ručně, pomocí metly a míchače nebo pomocí stavební míchačky a probíhaly alespoň 5 minut. Malta při běžném zdění byla nanášena standardně zednickou lžící a dřevěným nebo plastovým hladítkem. Při omítání byla malta ručně nahazována a následně stržena latí a po zavaznutí zahlazena dřevěným nebo plastovým hladítkem. Vzniklá omítka může sloužit jako podklad pod finální štukové omítky.

Na základě výsledku provedených empirických a pevnostních zkoušek po 28 dnech měla malta následující parametry:

objemová hmotnost 1750 až 1950 kg/m³

pevnost v tlaku minimálně 9,0 MPa, podle ČSN EN 1015-11,

pevnost v tahu za ohybu minimálně 2,0 MPa, podle ČSN EN 1015-11,

dynamický modul pružnosti minimálně 6,8 GPa, podle ČSN 73 1372,

dynamický smykový modul minimálně 2,5 GPa, podle ČSN 73 1372.

Příklad 3

Suchá směs o složení:

	MgO	3CaO·SiO ₂	2CaO·SiO ₂	3CaO·Al ₂ O	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	písek	vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka
[% hmotn.]	0,3	21,4	1,9	3,2	3,2	40	30

kde vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka s měrným povrchem 2,8 m²/cm³ měla následující zastoupení frakcí:

Velikost zrna [μm]	<0,3	0,3 až 0,5	0,5 až 0,7	0,7 až 1	1 až 2	2 až 4	4 až 6	6 až 10	10 až 20	20 až 30
Množství [% hmotn.]	0,1	1	1	1	5	15	21,9	30	15	10

CZ 29853 U1

5 byla vždy nejprve řádně zhomogenizována. Poté byla za průběžného míchání postupně přidávána voda v množství 36 až 42 % hmotn. suché směsi podle požadované konzistence a savosti podkladu. Homogenizace i míchání byly v závislosti na množství prováděny ručně, pomocí metly a míchače nebo pomocí stavební míchačky a probíhaly alespoň 5 minut. Malta při běžném zdění byla nanášena standardně zednickou lžící a dřevěným nebo plastovým hladítkem. Při omítání byla malta ručně nahazována a následně stržena latí a po zavadnutí zahlazena dřevěným nebo plastovým hladítkem. Vzniklá omítka může sloužit jako podklad pod finální štukové omítky.

Na základě výsledku provedených empirických a pevnostních zkoušek po 28 dnech měla malta následující parametry:

- 10 objemová hmotnost 1600 až 1800 kg/m³
 pevnost v tlaku minimálně 15,0 MPa, podle ČSN EN 1015-11,
 pevnost v tahu za ohybu minimálně 3,5 MPa, podle ČSN EN 1015-11,
 dynamický modul pružnosti minimálně 10,5 GPa, podle ČSN 73 1372,
 dynamický smykový modul minimálně 4,0 GPa, podle ČSN 73 1372.

15 Příklad 4

Suchá směs o složení:

	MgO	3CaO ·SiO ₂	2CaO· SiO ₂	3CaO· Al ₂ O ₃	4CaO· Al ₂ O ₃ · Fe ₂ O ₃	písek	vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka
[% hmotn.]	0,3	21,4	1,9	3,2	3,2	40	30

kde vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka s měrným povrchem 2,8 m²/cm³ měla následující zastoupením frakcí:

Velikost zrna [μm]	<0,3	0,3 až 0,5	0,5 až 0,7	0,7 až 1	1 až 2	2 až 4	4 až 6	6 až 10	10 až 20	20 až 30
Množství hmotn.]	0,15	1	3	5	10	25	30	15,85	5	5

20 byla vždy nejprve řádně zhomogenizována. Poté byla za průběžného míchání postupně přidávána voda v množství 36 až 42 % hmotn. suché směsi podle požadované konzistence a savosti podkladu. Homogenizace i míchání byly v závislosti na množství prováděny ručně, pomocí metly a míchače nebo pomocí stavební míchačky a probíhaly alespoň 5 minut. Malta při běžném zdění byla nanášena standardně zednickou lžící a dřevěným nebo plastovým hladítkem. Při omítání byla malta ručně nahazována a následně stržena latí a po zavadnutí zahlazena dřevěným nebo plastovým hladítkem. Vzniklá omítka může sloužit jako podklad pod finální štukové omítky.

Na základě výsledku provedených empirických a pevnostních zkoušek po 28 dnech měla malta následující parametry:

- 30 objemová hmotnost 1600 až 1800 kg/m³
 pevnost v tlaku minimálně 15,5 MPa, podle ČSN EN 1015-11,
 pevnost v tahu za ohybu minimálně 3,6 MPa, podle ČSN EN 1015-11,
 dynamický modul pružnosti minimálně 10,8 GPa, podle ČSN 73 1372,
 dynamický smykový modul minimálně 4,2 GPa, podle ČSN 73 1372.

CZ 29853 UI

Průmyslová využitelnost

Cementová zdící a omítací malta obsahující vysokorychlostně mikromletou kamennou moučku je dle navrženého technického řešení vhodná pro zdění v tloušťce spáry do 20 mm u zdiva z běžných keramických a betonových tvárnic a cihel. Malta je určena především pro novou výstavbu, ale je možné ji použít i při opravách stávajícího zdiva. Cementová omítací malta obsahující vysokorychlostně mikromletou kamennou moučku je dle navrženého technického řešení vhodná pro omítání v tloušťce vrstvy do 15 mm. Malta slouží především jako jádrová omítka pod finální vrstvu omítky. Malta je určena především pro novou výstavbu, ale je možné ji použít i při opravách stávajících omítek.

NÁROKY NA OCHRANU

1. Cementová malta, **vyznačující se tím**, že její suchá směs obsahuje 0,1 až 0,9 % hmotn. MgO; 6,5 až 24 % hmotn. $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$; 0,3 až 2,7 % hmotn. $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$; 0,6 až 3,6 % hmotn. $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$; 0,6 až 3,6 % hmotn. $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$; 40 až 80 % hmotn. říčního těžného písku frakce do 2 mm; a 10 až 50 % hmotn. vysokorychlostně mikromleté kamenné moučky.


2. Cementová malta podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka má měrný povrch $2,8\text{ m}^2/\text{cm}^3$ a zrnitost do 0,03 mm s velikostí středního zrna 3,7 μm .

3. Cementová malta podle nároku 1 nebo 2, **vyznačující se tím**, že vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka vykazuje následující zastoupení frakcí: 0,05 až 0,15 % hmotn. frakce do 0,3 μm ; 0,5 až 1 % hmotn. frakce 0,3 až 0,5 μm ; 1 až 3 % hmotn. frakce 0,5 až 0,7 μm ; 1 až 5 % hmotn. frakce 0,7 až 1 μm ; 5 až 10 % hmotn. frakce 1 až 2 μm ; 15 až 25 % hmotn. frakce 2 až 4 μm ; 20 až 30 % hmotn. frakce 4 až 6 μm ; 15 až 35 % hmotn. frakce 6 až 10 μm ; 5 až 15 % hmotn. frakce 10 až 20 μm ; a 5 až 10 % hmotn. frakce 20 až 30 μm .

Konec dokumentu

A2 - Vápenocementová malta

UŽITNÝ VZOR

(19) ČESKÁ REPUBLICA  ÚŘAD PRŮMYSLOVÉHO VLASTNICTVÍ	(21) Číslo přihlášky: 2016-32665 (22) Přihlášeno: 05.08.2016 (47) Zapsáno: 11.10.2016	(11) Číslo dokumentu: 29 870 (13) Druh dokumentu: U1 (51) Int. Cl.: C04B 18/12 (2006.01) C04B 28/20 (2006.01)
	(73) Majitel: ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Praha 6, CZ Ing. George Karra'a, Karlovy Vary, CZ (72) Původce: Ing. Jan Valentin, Ph.D., Kouřim, CZ Ing. Pavel Tesárek, Ph.D., Hradec Králové 6, CZ Ing. Zdeněk Prošek, Ústí nad Labem, CZ Ing. Jaroslav Topič, Hroznětín, CZ Ing. George Karra'a, Karlovy Vary, CZ Ing. Josef Fládr, Ph.D., Chlumčany, CZ (74) Zástupce: Ing. Lenka Bobková, Kosmická 755, 149 00 Praha 4	
(54) Název užitého vzoru: Vápenocementová malta		

CZ 29870 U1

Úřad průmyslového vlastnictví v zápisném řízení nezjišťuje, zda předmět užitého vzoru splňuje podmínky způsobilosti k ochraně podle § 1 zák. č. 478/1992 Sb.

Vápenocementová maltaOblast techniky

Technické řešení se týká a vápenocementové malty.

Dosavadní stav techniky

- 5 Vápenocementové malty mají ve stavebnictví široké použití. S výrobou malty je spojená těžba písků. Rozsáhlá těžba písků má na krajinu negativní dopad. Dnes je proto snaha, aby těžba písků probíhala méně intenzivním šetrným způsobem.

- Na druhé straně se hromadí nevyužitý odpad vznikající těžbou a zpracováním kamene resp. mramoru, vápence a žuly stává se celosvětovým ekologickým problémem. V posledních letech
10 vedla rostoucí poptávka po mramoru na vývozních trzích ke zvýšení produkce bez ohledu na jeho kvalitu. Výsledkem byla změna těžebních postupů a hojně využívání odstřelu, který má destruktivní vliv na kamenolom a produkuje zvýšené množství odpadu. Odpadní materiál má několik podob v závislosti na tom, v jaké fázi zpracování vzniká. Velikost částic odpadu vznikající při těžbě se pohybuje od velikosti prachových částic až po balvany o velikosti v řádu desítek centimetrů. Tento nevyužitý odpad se skladuje v oblastech poblíž míst, kde dochází k těžbám a má
15 negativní vliv na udržitelný rozvoj těchto oblastí. Další velké množství odpadu produkují tovární linky zpracovávající kámen a to ve formě pevných odpadů, které vznikají vyřazením kamenných bloků z linky kvůli jejich špatnému tvaru nebo pokud jsou bloky rozbité nebo popraskané. Třetí forma odpadů je brusný kal, který vzniká během řezání bloku nebo během procesu broušení
20 a leštění. Po vyschnutí vznikají pevné hroudy brusného kalu.

- Těžba je doménou především Číny, Íránu a Egypta, velký podíl na produkci mají i Itálie nebo Španělsko. Avšak zpracování ve formě řezání a broušení probíhá v mnoha evropských zemích. Balvany a hrubé frakce vápence lze relativně snadno a ve velkém množství využít ve stavebnictví. Na druhou stranu využití kamenných odprašků je stále nedostatečné a jeho skladování značně
25 zatěžuje životní prostředí.

- Kamenné odprašky, v závislosti na složení, je možné použít například dle patentu US 4 026 716 kde je použito od 5 do 15 % hmotn. jemně mletého vápence ve směsi vysoko pevnostního betonu. Tuto aplikaci nelze použít s odpadními kamennými odpraškami pocházejícími z těžby a zpracování kamene z důvodu její kontaminace z různých zdrojů. Další možnou aplikaci popsali Karasahin a Terzi v článku Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete v časopisu Construction and Building Materials na stránce 616 až 620. Tato aplikace je omezená
30 maximální velikostí částic a díky tomu se stává neefektivní v množství zpracovaného odpadu. Dále lze použít mramorovou moučku v odsiřovacích procesech. Tuto aplikaci popsal Davini v článku Investigation into the desulphurization properties of by-products of the manufacture of white marbles of Northern Tuscany v časopisu Fuel na stránce 1363 až 1369. A nakonec dosavadní aplikace v maltách jsou popsány v patentech US 4 390 372, US 3 489 582, US 3 169 877. Všechny tyto aplikace využívají chemických aditiv pro úspěšné použití kamenných odprašků. Tyto chemická aditiva zatěžují ekonomicky výsledný produkt a tím se stávají neefektivně použitelná v praxi.

Podstata technického řešení

- Podle předloženého technického řešení se navrhuje vápenocementová malta spočívající v tom, že v suché směsi obsahuje 0,1 až 0,9 % hmotn. MgO; 6,5 až 24 % hmotn. 3CaO·SiO₂; 0,3 až 2,7 % hmotn. 2CaO·SiO₂; 0,6 až 3,6 % hmotn. 3CaO·Al₂O₃; 0,6 až 3,6 % hmotn. 4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃; 1 až 20 % hmotn. hydroxidu vápenatého, 40 až 79 % hmotn. říčního těžženého písků frakce do
45 2 mm; a 10 až 49 % hmotn. vysokorychlostně mikromleté kamenné moučky.

Vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka má výhodně měrný povrch 2,8 m²/cm³ a zrnitost do 0,03 mm s velikostí středního zrna 3,7 μm.

CZ 29870 U1

Vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka vykazuje výhodně následující zastoupení frakcí: 0,05 až 0,15 % hmotn. frakce do 0,3 μm ; 0,5 až 1 % hmotn. frakce 0,3 až 0,5 μm ; 1 až 3 % hmotn. frakce 0,5 až 0,7 μm ; 1 až 5 % hmotn. frakce 0,7 až 1 μm ; 5 až 10 % hmotn. frakce 1 až 2 μm ; 15 až 25 % hmotn. frakce 2 až 4 μm ; 20 až 30 % hmotn. frakce 4 až 6 μm ; 15 až 35 % hmotn. frakce 6 až 10 μm ; 5 až 15 % hmotn. frakce 10 až 20 μm ; a 5 až 10 % hmotn. frakce 20 až 30 μm .

Vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka se získává z kamenných odprašků pocházejících z lomů a provozů zabývajících se zpracováním, například řezáním, drcením, broušením, leštěním přírodního kamene a je tvořena 0 až 100 % hmotn. mramoru, 0 až 100 % hmotn. vápence a 0 až 10 % hmotn. žuly, v závislosti na probíhajícím druhu produkce. Tento materiál má podobu vodou zpevněných slepenců, které jsou dále upravené vysokorychlostním mletím, například přístrojem podle PUV 2014-29552. Mletí zajišťuje oddělení zrn, dosažení vhodné jemnosti a zabraňuje shlukování zrn ve směsi. Jemnost upravené vysokorychlostně mikromleté kamenné moučky odpovídá jemnosti mletí cementu.

Vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka nahrazuje část plniva, běžné nebo křemičité písky. Tímto řešením je využit odpadní materiál, a zároveň jsou šetřeny přírodní zdroje. Vzhledem k tomu, že vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka plní i funkci mikro plniva, je dosaženo lepších mechanických vlastností než u běžných malt, bez nutnosti přidání cementu a je zároveň dosaženo dobré zpracovatelnosti bez přidání chemických přísad, které výrazně zvyšují cenu maltových směsí. Je dosaženo srovnatelných mechanických vlastností v porovnání s dostupnými maltami pro omítání a zdění při snížení ceny finálního produktu.

Příklady uskutečnění technického řešení

Příklad 1

Suchá směs o složení:

	MgO	3CaO·SiO ₂	2CaO·SiO ₂	3CaO·Al ₂ O ₃	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	Hydroxid vápenatý	písek	vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka
[% hmotn.]	0,1	6,8	0,3	1,4	1,4	1	79	10

kde vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka s měrným povrchem 2,8 m²/cm³ měla následující zastoupení frakcí:

Velikost zrna [μm]	<0,3	0,3 až 0,5	0,5 až 0,7	0,7 až 1	1 až 2	2 až 4	4 až 6	6 až 10	10 až 20	20 až 30
Množství [% hmotn.]	0,1	1	1	1	5	15	21,9	30	15	10

byla vždy nejprve řádně zhomogenizována. Poté byla za průběžného míchání postupně přidávána voda v množství 11 až 13 % hmotn. suché směsi podle požadované konzistence a savosti podkladu. Homogenizace i míchání může být v závislosti na množství prováděny ručně, pomocí metly a míchače nebo pomocí stavební míchačky a probíhaly alespoň 5 minut.

Malta při běžném zdění byla nanášena standardně zednickou lžící a dřevěným nebo plastovým hladítkem. Při omítání byla malta ručně nahazována a následně stržena latí a po zavadnutí zahlazena dřevěným nebo plastovým hladítkem. Vzniklá omítka může sloužit jako podklad pod finální štukové omítky.

Na základě výsledku provedených empirických a pevnostních zkoušek po 28 dnech měla malta následující parametry:

objemová hmotnost 1700 až 1900 kg/m³

pevnost v tlaku minimálně 6,5 MPa, podle ČSN EN 1015-11,

CZ 29870 U1

pevnost v tahu za ohybu minimálně 1,4 MPa, podle ČSN EN 1015-11,
 dynamický modul pružnosti minimálně 6,4 GPa, podle ČSN 73 1372,
 dynamický smykový modul minimálně 2,7 GPa, podle ČSN 73 1372.

Příklad 2

- 5 Suchá směs o složení:

	MgO	3CaO· SiO ₂	2CaO· SiO ₂	3CaO· Al ₂ O ₃	4CaO· Al ₂ O ₃ · Fe ₂ O ₃	Hydroxid vápenatý	písek	vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka
[% hmotn.]	0,1	6,8	0,3	1,4	1,4	1	40	49

kde vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka s měrným povrchem 2,8 m²/cm³ měla následující zastoupení frakcí:

Velikost zrna [μm]	<0,3	0,3 až 0,5	0,5 až 0,7	0,7 až 1	1 až 2	2 až 4	4 až 6	6 až 10	10 až 20	20 až 30
Množství [% hmotn.]	0,1	1	1	1	5	15	21,9	30	15	10

- 10 byla vždy nejprve řádně zhomogenizována. Poté byla za průběžného míchání postupně přidávána voda v množství 11 až 13 % hmotn. suché směsi podle požadované konzistence a savosti podkladu. Homogenizace i míchání může být v závislosti na množství prováděny ručně, pomocí metly a míchače nebo pomocí stavební míchačky a probíhalo alespoň 5 minut.

- 15 Malta při běžném zdění byla nanášena standardně zednickou lžící a dřevěným nebo plastovým hladítkem. Při omítání byla malta ručně nahazována a následně stržena latí a po zavaznutí zahlazena dřevěným nebo plastovým hladítkem. Vzniklá omítka může sloužit jako podklad pod finální štukové omítky.

Na základě výsledku provedených empirických a pevnostních zkoušek po 28 dnech měla malta následující parametry:

- 20 objemová hmotnost 1600 až 1800 kg/m
- ³

pevnost v tlaku minimálně 4,9 MPa, podle ČSN EN 1015-11,

pevnost v tahu za ohybu minimálně 1,2 MPa, podle ČSN EN 1015-11,

dynamický modul pružnosti minimálně 5,5 GPa, podle ČSN 73 1372,

dynamický smykový modul minimálně 2,1 GPa, podle ČSN 73 1372.

- 25 Příklad 3

Suchá směs o složení:

	MgO	3CaO· SiO ₂	2Ca O·Si O ₂	3Ca O·Al ₂ O	4CaO· Al ₂ O ₃ · Fe ₂ O ₃	Hydroxid vápenatý	písek	vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka
[% hmotn.]	0,3	21,4	1,9	3,2	3,2	20	40	10

CZ 29870 U1

kde vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka s měrným povrchem $2,8 \text{ m}^2/\text{cm}^3$ měla následující zastoupení frakcí:

Velikost zrna [μm]	<0,3	0,3 až 0,5	0,5 až 0,7	0,7 až 1	1 až 2	2 až 4	4 až 6	6 až 10	10 až 20	20 až 30
Množství hmotn.] [%	0,1	1	1	1	5	15	21,9	30	15	10

- 5 byla vždy nejprve řádně zhomogenizována. Poté byla za průběžného míchání postupně přidávána voda v množství 33 až 39 % hmotn. suché směsi podle požadované konzistence a savosti podkladu. Homogenizace i míchání byly v závislosti na množství prováděny ručně, pomocí metly a míchače nebo pomocí stavební míchačky a probíhaly alespoň 5 minut.

- 10 Malta při běžném zdění byla nanášena standardně zednickou lžící a dřevěným nebo plastovým hladítkem. Při omítání byla malta ručně nahazována a následně stržena latí a po zavaždnutí zahlazena dřevěným nebo plastovým hladítkem. Vzniklá omítka může sloužit jako podklad pod finální štukové omítky.

Na základě výsledku provedených empirických a pevnostních zkoušek po 28 dnech měla malta následující parametry:

- objemová hmotnost 1900 až 2000 kg/m^3
 15 pevnost v tlaku minimálně 17,8 MPa, podle ČSN EN 1015-11,
 pevnost v tahu za ohybu minimálně 5,6 MPa, podle ČSN EN 1015-11,
 dynamický modul pružnosti minimálně 15,7 GPa, podle ČSN 73 1372,
 dynamický smykový modul minimálně 54,7 GPa, podle ČSN 73 1372.

Příklad 4

- 20 Suchá směs o složení:

	MgO	3CaO·SiO ₂	2CaO·SiO ₂	3CaO·Al ₂ O ₃	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	Hydroxid vápenatý	písek	vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka
[% hmotn.]	0,3	21,4	1,9	3,2	3,2	20	40	10

kde vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka s měrným povrchem $2,8 \text{ m}^2/\text{cm}^3$ měla následujícím zastoupením frakcí:

Velikost zrna [μm]	<0,3	0,3 až 0,5	0,5 až 0,7	0,7 až 1	1 až 2	2 až 4	4 až 6	6 až 10	10 až 20	20 až 30
Množství hmotn.] [%	0,15	1	3	5	10	25	30	15,85	5	5

- 25 byla vždy nejprve řádně zhomogenizována. Poté byla za průběžného míchání postupně přidávána voda v množství 33 až 39 % hmotn. suché směsi podle požadované konzistence a savosti podkladu. Homogenizace i míchání může být v závislosti na množství prováděny ručně, pomocí metly a míchače nebo pomocí stavební míchačky a probíhaly alespoň 5 minut.

CZ 29870 U1

Malta při běžném zdění byla nanášena standardně zednickou lžící a dřevěným nebo plastovým hladítkem. Při omítání byla malta ručně nahazována a následně stržena latí a po zavadnutí zahlazena dřevěným nebo plastovým hladítkem. Vzniklá omítka může sloužit jako podklad pod finální štukové omítky.

- 5 Na základě výsledku provedených empirických a pevnostních zkoušek po 28 dnech měla malta následující parametry:

objemová hmotnost 1870 až 1970 kg/m³

pevnost v tlaku minimálně 20,0 MPa, podle ČSN EN 1015-11,

pevnost v tahu za ohybu minimálně 6,6 MPa, podle ČSN EN 1015-11,

- 10 dynamický modul pružnosti minimálně 16,0 GPa, podle ČSN 73 1372,

dynamický smykový modul minimálně 7,0 GPa, podle ČSN 73 1372.

Průmyslová využitelnost

- 15 Vápenocementová zdíci a omítací malta obsahující vysokorychlostně mikromletou kamennou moučku je dle navrženého technického řešení vhodná pro zdění v tl. spáry do 20 mm u zdiva z běžných keramických a betonových tváric a cihel. Malta je určena především pro novou výstavbu, ale je možné ji použít i při opravách stávajícího zdiva.

- 20 Vápenocementová omítací malta obsahující vysokorychlostně mikromletou kamennou moučku je dle navrženého technického řešení vhodná pro omítání v tloušťce vrstvy do 15 mm. Malta slouží především jako jádrová omítka pod finální vrstvu omítky. Malta je určena především pro novou výstavbu, ale je možné ji použít i při opravách stávajících omítek.

NÁROKY NA OCHRANU

- 25 1. Vápenocementová malta, **vyznačující se tím**, že její suchá směs obsahuje 0,1 až 0,9 % hmotn. MgO; 6,5 až 24 % hmotn. 3CaO·SiO₂; 0,3 až 2,7 % hmotn. 2CaO·SiO₂; 0,6 až 3,6 % hmotn. 3CaO·Al₂O₃; 0,6 až 3,6 % hmotn. 4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃; 1 až 20 % hmotn. hydroxidu vápenatého; 40 až 79 % hmotn. říčního těžného písku frakce do 2 mm; a 10 až 49 % hmotn. vysokorychlostně mikromleté kamenné moučky.


2. Vápenocementová malta podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka má měrný povrch 2,8 m²/cm³ a zrnitost do 0,03 mm s velikostí středního zrna 3,7 μm.

- 30 3. Vápenocementová malta podle nároku 1 nebo 2, **vyznačující se tím**, že vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka vykazuje následující zastoupení frakcí: 0,05 až 0,15 % hmotn. frakce do 0,3 μm; 0,5 až 1 % hmotn. frakce 0,3 až 0,5 μm; 1 až 3 % hmotn. frakce 0,5 až 0,7 μm; 1 až 5 % hmotn. frakce 0,7 až 1 μm; 5 až 10 % hmotn. frakce 1 až 2 μm; 15 až 25 % hmotn. frakce 2 až 4 μm; 20 až 30 % hmotn. frakce 4 až 6 μm; 15 až 35 % hmotn. frakce 6 až 10 μm; 5 až 15 % hmotn. frakce 10 až 20 μm; 5 až 10 % hmotn. frakce 20 až 30 μm.

Konec dokumentu

A3 - Tenkovrstvá cementová malta

UŽITNÝ VZOR

<p>(19) ČESKÁ REPUBLIKA</p>  <p>ÚŘAD PRŮMYSLOVÉHO VLASTNICTVÍ</p>	<p>(21) Číslo přihlášky: 2016-32666 (22) Přihlášeno: 05.08.2016 (47) Zapsáno: 04.10.2016</p>	<p>(11) Číslo dokumentu: 29 854</p> <p>(13) Druh dokumentu: U1 (51) Int. Cl.: C04B 18/12 (2006.01) C04B 28/20 (2006.01)</p>
<p>(73) Majitel: ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Praha 6, CZ Ing. George Karra'a, Karlovy Vary, CZ</p> <p>(72) Původce: Ing. Jan Valentin, Ph.D., Kouřim, CZ Ing. Pavel Tesárek, Ph.D., Hradec Králové, CZ Ing. Zdeněk Prošek, Ústí nad Labem, CZ Ing. Jaroslav Topič, Hroznětín, CZ Ing. George Karra'a, Karlovy Vary, CZ</p> <p>(74) Zástupce: Ing. Lenka Bobková, Kosmická 755, 149 00 Praha 4</p>		
<p>(54) Název užitého vzoru: Tenkovrstvá cementová malta</p>		

CZ 29854 U1

CZ 29854 U1

Tenkovrstvá cementová maltaOblast techniky

Technické řešení se týká cementové malty.

Dosavadní stav techniky

5 Cementové malty mají ve stavebnictví široké použití. S výrobou malty je spojená těžba písku. Rozsáhlá těžba písku má na krajinu negativní dopad. Dnes je proto snaha, aby těžba písku probíhala méně intenzivním šetrným způsobem.

Na druhé straně se hromadí nevyužitý odpad vznikajícího těžbou a zpracováním kamene resp. mramoru, vápence a žuly stává se celosvětovým ekologickým problémem. V posledních letech vedla rostoucí poptávka po mramoru na vývozních trzích ke zvýšení produkce bez ohledu na jeho kvalitu. Výsledkem byla změna těžebních postupů a hojně využívání odstřelu, který má destruktivní vliv na kamenolom a produkuje zvýšené množství odpadu. Odpadní materiál má několik podob v závislosti na tom, v jaké fázi zpracování vzniká. Velikost částic odpadu vznikajícího při těžbě se pohybuje od velikosti prachových částic až po balvany o velikosti v řádu desítek centimetrů. Tento nevyužitý odpad se skládá v oblastech poblíž míst, kde dochází k těžením a má negativní vliv na udržitelný rozvoj těchto oblastí. Další velké množství odpadu produkují tovární linky zpracovávající kámen a to ve formě pevných odpadů, které vznikají vyřazením kamenných bloků z linky kvůli jejich špatnému tvaru nebo pokud jsou bloky rozbité nebo popraskané. Třetí forma odpadů je brusný kal, který vzniká během řezání bloku nebo během procesu broušení a leštění. Po vyschnutí vznikají pevné hroudy brusného kalu.

Těžba je doménou především Číny. Íránu a Egypta, velký podíl na produkci mají i Itálie nebo Španělsko. Avšak zpracování ve formě řezání a broušení probíhá v mnoha evropských zemích. Balvany a hrubé frakce vápence lze relativně snadno a ve velkém množství využít ve stavebnictví. Na druhou stranu využití kamenných odprašků je stále nedostatečné a jeho skladování značně zatěžuje životní prostředí.

25 Kamenné odprašky, v závislosti na složení, je možné použít například dle patentu US 4 026 716 kde je použito od 5 do 15 % hmotn. jemně mletého vápence ve směsi vysokopevnostního betonu. Tuto aplikaci nelze použít s odpadními kamennými odpraškami pocházejícími z těžby a zpracování kamene z důvodu její kontaminace z různých zdrojů. Další možnou aplikaci popsali Karasahin a Terzi v článku Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete v časopisu Construction and Building Materials na stránce 616 až 620. Tato aplikace je omezená maximální velikostí částic a díky tomu se stává neefektivní v množství zpracovaného odpadu. Dále lze použít mramorovou moučku v odsiřovacích procesech. Tuto aplikaci popsal Davini v článku Investigation into the desulphurization properties of by-products of the manufacture of white marbles of Northern Tuscany v časopisu Fuel na stránce 1363 až 1369. A nakonec dosavadní aplikace v maltách jsou popsány v patentech US 4 390 372, US 3 489 582, US 3 169 877. Všechny tyto aplikace využívají chemických aditiv pro úspěšné použití kamenných odprašků. Tyto chemická aditiva zatěžují ekonomicky výsledný produkt a tím se stávají neefektivně použitelná v praxi.

Podstata technického řešení

40 Podle předloženého technického řešení se navrhuje tenkovrstvá cementová malta, spočívající v tom, že v suché směsi obsahuje 0,1 až 0,9 % hmotn. MgO; 6,5 až 24 % hmotn. $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$; 0,3 až 2,7 % hmotn. $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$; 0,6 až 3,6 % hmotn. $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$; 0,6 až 3,6 % hmotn. $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$; 20 až 70 % hmotn. říčního těženého písku frakce do 1 mm; a 10 až 70 % hmotn. vysokorychlostně mikromleté kamenné moučky.

45 Vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka má s výhodou měrný povrch $2,8\text{ m}^2/\text{cm}^3$ a zrnitost do 0,03 mm s velikostí středního zrna 3,7 μm .

Vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka vykazuje s výhodou následující zastoupení frakcí: 0,05 až 0,15 % hmotn. frakce $<0,3\ \mu\text{m}$, 0,5 až 1 % hmotn. frakce 0,3 až 0,5 μm , 1 až 3 %

CZ 29854 U1

hmotn. frakce 0,5 až 0,7 μm , 1 až 5 % hmotn. frakce 0,7 až 1 μm , 5 až 10 % hmotn. frakce 1 až 2 μm , 15 až 25 % hmotn. frakce 2 až 4 μm , 20 až 30 % hmotn. frakce 4 až 6 μm , 15 až 35 % hmotn. frakce 6 až 10 μm , 5 až 15 % hmotn. frakce 10 až 20 μm , 5 až 10 % hmotn. frakce 20 až 30 μm .

- 5 Vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka se získává z kamenných odprašků pocházejících z lomů a provozů zabývajících se zpracováním, například řezáním, drcením, broušením, leštěním přírodního kamene a je tvořena 0 až 100 % hmotn. mramoru, 0 až 100 % hmotn. vápence a 0 až 10 % hmotn. žuly, v závislosti na probíhajícím druhu produkce. Tento materiál má podobu vodou zpevněných slepenců, které jsou dále upravené vysokorychlostním mletím, například přístrojem podle PUV 2014-29552. Mletí zajišťuje oddělení zrn, dosažení vhodné jemnosti a zabraňuje shlukování zrn ve směsi. Jemnost upravené vysokorychlostně mikromleté kamenné moučky odpovídá jemnosti mletí cementu.

- 15 Vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka nahrazuje část plniva, běžné nebo křemičité písky. Tímto řešením je využit odpadní materiál, a zároveň jsou šetřeny přírodní zdroje. Vzhledem k tomu, že vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka plní i funkci mikro plniva, je dosaženo lepších mechanických vlastností než u běžných malt, bez nutnosti přidání cementu a je zároveň dosaženo dobré zpracovatelnosti bez přidání chemických přísad, které výrazně zvyšují cenu maltových směsí. Je dosaženo srovnatelných mechanických vlastností v porovnání s dostupnými maltami pro omítání a zdění při snížení ceny finálního produktu.

- 20 Příklady uskutečnění technického řešení

Příklad 1

Suchá směs o složení:

	MgO	3CaO·SiO ₂	2CaO·SiO ₂	3CaO·Al ₂ O	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	písek	vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka
[% hmotn.]	0,1	6,8	0,3	1,4	1,4	20	70

- 25 kde vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka s měrným povrchem 2,8 m²/cm³ měla následující zastoupení frakcí:

Velikost zrna [μm]	<0,3	0,3 až 0,5	0,5 až 0,7	0,7 až 1	1 až 2	2 až 4	4 až 6	6 až 10	10 až 20	20 až 30
Množství [% hmotn.]	0,1	1	1	1	5	15	21,9	30	15	10

- 30 byla vždy nejprve řádně zhomogenizována. Poté byla za průběžného míchání postupně přidávána voda v množství 14 až 16 % hmotn. suché směsi podle požadované konzistence a savosti podkladu. Homogenizace i míchání byly v závislosti na množství prováděny ručně, pomocí metly a míchače nebo pomocí stavební míchačky a probíhaly alespoň 5 minut. Nanášení navržené tenkovrstvé malty při zdění přesných tvárnic bylo prováděno standardně zednickou lžící a ocelovým nebo plastovým zubatým hladítkem.

- Na základě výsledku provedených empirických a pevnostních zkoušek po 28 dnech měla navržená malta následující parametry:

- 35 objemová hmotnost 1500 až 1600 kg/m³

pevnost v tlaku minimálně 4,0 MPa, podle ČSN EN 1015-11,

pevnost v tahu za ohybu minimálně 1,0 MPa, podle ČSN EN 1015-11,

dynamický modul pružnosti minimálně 3,5 GPa, podle ČSN 73 1372,

CZ 29854 U1

dynamický smykový modul minimálně 1,0 GPa, podle ČSN 73 1372.

Příklad 2

Suchá směs o složení:

	MgO	3CaO·SiO ₂	2CaO·SiO ₂	3CaO·Al ₂ O	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	písek	vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka
[% hmotn.]	0,2	13,6	0,6	2,8	2,8	70	10

- 5 kde vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka s měrným povrchem 2,8 m²/cm³ měla následující zastoupení frakcí:

Velikost zrna [μm]	<0,3	0,3 až 0,5	0,5 až 0,7	0,7 až 1	1 až 2	2 až 4	4 až 6	6 až 10	10 až 20	20 až 30
Množství hmotn. [%]	0,1	1	1	1	5	15	21,9	30	15	10

- 10 byla vždy nejprve řádně zhomogenizována. Poté byla za průběžného míchání postupně přidávána voda v množství 28 až 32 % hmotn. suché směsi podle požadované konzistence a savosti podkladu. Homogenizace i míchání byly v závislosti na množství prováděny ručně, pomocí metly a míchače nebo pomocí stavební míchačky a probíhaly alespoň 5 minut. Nanášení navržené tenkovrstvé malty při zdění přesných tvárnic bylo prováděno standardně zednickou lžící a ocelovým nebo plastovým zubatým hladítkem.

- 15 Na základě výsledku provedených empirických a pevnostních zkoušek po 28 dnech měla navržená malta následující parametry:

objemová hmotnost 1800 až 2000 kg/m³

pevnost v tlaku minimálně 9,0 MPa, podle ČSN EN 1015-11,

pevnost v tahu za ohybu minimálně 1,5 MPa, podle ČSN EN 1015-11,

dynamický modul pružnosti minimálně 6,0 GPa, podle ČSN 73 1372,

- 20 dynamický smykový modul minimálně 1,0 GPa, podle ČSN 73 1372.

Příklad 3

Suchá směs o složení:

	MgO	3CaO·SiO ₂	2CaO·SiO ₂	3CaO·Al ₂ O	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	písek	vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka
[% hmotn.]	0,3	21,4	1,9	3,2	3,2	40	30

- 25 kde vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka s měrným povrchem 2,8 m²/cm³ měla následující zastoupení frakcí:

Velikost zrna [μm]	<0,3	0,3 až 0,5	0,5 až 0,7	0,7 až 1	1 až 2	2 až 4	4 až 6	6 až 10	10 až 20	20 až 30
Množství hmotn. [%]	0,1	1	1	1	5	15	21,9	30	15	10

CZ 29854 U1

- 5 byla vždy nejprve řádně zhomogenizována. Poté byla za průběžného míchání postupně přidávána voda v množství 42 až 48 % hmotn. suché směsi podle požadované konzistence a savosti podkladu. Homogenizace i míchání byly v závislosti na množství prováděny ručně, pomocí metly a míchače nebo pomocí stavební míchačky a probíhaly alespoň 5 minut. Nanášení navržené tenkovrstvé malty při zdění přesných tvárnic bylo prováděno standardně zednickou lžící a ocelovým nebo plastovým zubatým hladítkem.

Na základě výsledku provedených empirických a pevnostních zkoušek po 28 dnech měla navržená malta následující parametry:

objemová hmotnost 1600 až 1800 kg/m³

- 10 pevnost v tlaku minimálně 14,0 MPa, podle ČSN EN 1015-11,
pevnost v tahu za ohybu minimálně 3,0 MPa, podle ČSN EN 1015-11,
dynamický modul pružnosti minimálně 10,0 GPa, podle ČSN 73 1372,
dynamický smykový modul minimálně 3,5 GPa, podle ČSN 73 1372.

Příklad 4

- 15 Suchá směs o složení:

	MgO	3CaO·SiO ₂	2CaO·SiO ₂	3CaO·Al ₂ O ₃	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	písek	vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka
[% hmotn.]	0,3	21,4	1,9	3,2	3,2	40	30

kde vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka je frakce do 0,03 mm s měrným povrchem 2,8 m²/cm³ s následujícím zastoupením frakcí:

Velikost zrna [μm]	<0,3	0,3 až 0,5	0,5 až 0,7	0,7 až 1	1 až 2	2 až 4	4 až 6	6 až 10	10 až 20	20 až 30
Množství [% hmotn.]	0,15	1	3	5	10	25	30	15,85	5	5

- 20 byla vždy nejprve řádně zhomogenizována. Poté byla za průběžného míchání postupně přidávána voda v množství 42 až 48 % hmotn. suché směsi podle požadované konzistence a savosti podkladu. Homogenizace i míchání byly v závislosti na množství prováděny ručně, pomocí metly a míchače nebo pomocí stavební míchačky a probíhaly alespoň 5 minut. Nanášení navržené tenkovrstvé malty při zdění přesných tvárnic bylo prováděno standardně zednickou lžící a ocelovým nebo plastovým zubatým hladítkem.

25 Na základě výsledku provedených empirických a pevnostních zkoušek po 28 dnech měla navržená malta následující parametry:

objemová hmotnost 1550 až 1750 kg/m³

pevnost v tlaku minimálně 15,0 MPa, podle ČSN EN 1015-11,

- 30 pevnost v tahu za ohybu minimálně 3,1 MPa, podle ČSN EN 1015-11,
dynamický modul pružnosti minimálně 11,2 GPa, podle ČSN 73 1372,
dynamický smykový modul minimálně 3,6 GPa, podle ČSN 73 1372.

Průmyslová využitelnost

- 35 Tenkovrstvá cementová zdící malta obsahující vysokorychlostně mikromletou kamennou moučku je dle navrženého technického řešení vhodná pro tenkovrstvé zdění předpokládající

CZ 29854 U1

tloušťku vrstvy do 3 mm u zdiva z přesných tvárníc na bázi plynosilikátu, resp. pórobetonu. Malta je určena především pro novou výstavbu, ale je možné ji použít i při opravách stávajícího zdiva.


NÁROKY NA OCHRANU

- 5 **1.** Tenkovrstvá cementová malta, **vyznačující se tím**, že její suchá směs obsahuje 0,1 až 0,9 % hmotn. MgO; 6,5 až 24 % hmotn. $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$; 0,3 až 2,7 % hmotn. $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$; 0,6 až 3,6 % hmotn. $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$; 0,6 až 3,6 % hmotn. $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$; 20 až 70 % hmotn. říčního těžného písku frakce do 1 mm; a 10 až 70 % hmotn. vysokorychlostně mikromleté kamenné moučky.
- 10 **2.** Tenkovrstvá cementová malta podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka má měrný povrch $2,8\text{ m}^2/\text{cm}^3$ a zrnitost do 0,03 mm s velikostí středního zrna 3,7 μm .
- 15 **3.** Tenkovrstvá cementová malta podle nároku 1 nebo 2, **vyznačující se tím**, že vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka vykazuje následující zastoupení frakcí: 0,05 až 0,15 % hmotn. frakce $<0,3\ \mu\text{m}$; 0,5 až 1 % hmotn. frakce 0,3 až 0,5 μm ; 1 až 3 % hmotn. frakce 0,5 až 0,7 μm ; 1 až 5 % hmotn. frakce 0,7 až 1 μm ; 5 až 10 % hmotn. frakce 1 až 2 μm ; 15 až 25 % hmotn. frakce 2 až 4 μm ; 20 až 30 % hmotn. frakce 4 až 6 μm ; 15 až 35 % hmotn. frakce 6 až 10 μm ; 5 až 15 % hmotn. frakce 10 až 20 μm ; a 5 až 10 % hmotn. frakce 20 až 30 μm .

Konec dokumentu

A4 - Tenkovrstvá vápenocementová malta

UŽITNÝ VZOR

(19) ČESKÁ REPUBLIKA  ÚŘAD PRŮMYSLOVÉHO VLASTNICTVÍ	(21) Číslo přihlášky: 2016-32667 (22) Přihlášeno: 05.08.2016 (47) Zapsáno: 04.10.2016	(11) Číslo dokumentu: 29 855 (13) Druh dokumentu: U1 (51) Int. Cl.: C04B 18/12 (2006.01) C04B 28/20 (2006.01)
	(73) Majitel: ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Praha 6, CZ Ing. George Karra'a, Karlovy Vary, CZ (72) Původce: Ing. Jan Valentin, Ph.D., Kouřim, CZ Ing. Pavel Tesárek, Ph.D., Hradec Králové 6, CZ Ing. Zdeněk Prošek, Ústí nad Labem, CZ Ing. Jaroslav Topič, Hroznětín, CZ Ing. George Karra'a, Karlovy Vary, CZ (74) Zástupce: Ing. Lenka Bobková, Kosmická 755, 149 00 Praha 4	

(54) Název užitého vzoru:
Tenkovrstvá vápenocementová malta

CZ 29855 U1

Úřad průmyslového vlastnictví v zápisném řízení nezjišťuje, zda předmět užitého vzoru splňuje podmínky způsobilosti k ochraně podle § 1 zák. č. 478/1992 Sb.

Tenkovrstvá vápenocementová maltaOblast techniky

Technické řešení se týká vápenocementové malty.

Dosavadní stav techniky

5 Cementové malty mají ve stavebnictví široké použití. S výrobou malty je spojená těžba písku. Rozsáhlá těžba písku má na krajinu negativní dopad. Dnes je proto snaha, aby těžba písku probíhala méně intenzivním šetrným způsobem.

Na druhé straně se hromadí nevyužitý odpad vznikající těžbou a zpracováním kamene resp. mramoru, vápence, žuly a stává se celosvětovým ekologickým problémem. V posledních letech 10 vedla rostoucí poptávka po mramoru na vývozních trzích ke zvýšení produkce bez ohledu na jeho kvalitu. Výsledkem byla změna těžebních postupů a hojně využívání odstřelu, který má destruktivní vliv na kamenolom a produkuje zvýšené množství odpadu. Odpadní materiál má několik podob v závislosti na tom, v jaké fázi zpracování vzniká. Velikost částic odpadu vznikajícího při těžbě se pohybuje od velikosti prachových částic až po balvany o velikosti v řádu desítek centimetrů. Tento nevyužitý odpad se skladuje v oblastech poblíž míst, kde dochází k těžení a má 15 negativní vliv na udržitelný rozvoj těchto oblastí. Další velké množství odpadu produkují tovární linky zpracovávající kámen a to ve formě pevných odpadů, které vznikají vyřazením kamenných bloků z linky kvůli jejich špatnému tvaru nebo pokud jsou bloky rozbité nebo popraskané. Třetí forma odpadů je brusný kal, který vzniká během řezání bloku nebo během procesu broušení 20 a leštění. Po vyschnutí vznikají pevné hroudy brusného kalu.

Těžba je doménou především Číny. Íránu a Egypta, velký podíl na produkci mají i Itálie nebo Španělsko. Avšak zpracování ve formě řezání a broušení probíhá v mnoha evropských zemích. Balvany a hrubé frakce vápence lze relativně snadno a ve velkém množství využít ve stavebnictví. Na druhou stranu využití kamenných odprašků je stále nedostatečné a jeho skladování značně 25 zatěžuje životní prostředí. Kamenné odprašky, v závislosti na složení, je možné použít například dle patentu US 4 026 716 kde je použito od 5 do 15 % hmotn. jemně mletého vápence ve směsi vysoko pevnostního betonu. Tuto aplikaci nelze použít s odpadními kamennými odpraškami pocházející z těžby a zpracování kamene z důvodu její kontaminace z různých zdrojů. Další možnou aplikaci popsali Karasahin a Terzi v článku Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete v časopisu Construction and Building Materials v čísle 21 z roku 2007 na 30 stránce 616 až 620. Tato aplikace je omezená maximální velikostí částic a díky tomu se stává neefektivní v množství zpracovaného odpadu. Dále lze použít mramorovou moučku v odsířovacích procesech. Tuto aplikaci popsal Davini v článku Investigation into the desulphurization properties of by-products of the manufacture of white marbles of Northern Tuscany v časopisu Fuel 35 číslo 79 z roku 2000 na stránce 1363 až 1369. A nakonec dosavadní aplikace v maltách jsou popsány v patentech US 4 390 372, US 3 489 582, US 3 169 877. Všechny tyto aplikace využívají chemických aditiv pro úspěšné použití kamenných odprašků. Tyto chemická aditiva zatěžují ekonomicky výsledný produkt a tím se stávají neefektivně použitelná v praxi.

Podstata technického řešení

40 Podle předloženého technického řešení se navrhuje tenkovrstvá cementová malta, spočívající v tom, že v suché směsi obsahuje 0,1 až 0,9 % hmotn. MgO; 6,5 až 24 % hmotn. $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$; 0,3 až 2,7 % hmotn. $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$; 0,6 až 3,6 % hmotn. $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$; 0,6 až 3,6 % hmotn. $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$; 1 až 20 % hmotn. hydroxidu vápenatého; 30 až 79 % hmotn. říčního 45 těžného písku frakce do 1 mm; a 10 až 59 % hmotn. vysokorychlostně mikromleté kamenné moučky.

Vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka má výhodně měrný povrch $2,8\text{ m}^2/\text{cm}^3$ a zrnitost do 0,03 mm s velikostí středního zrna 3,7 μm .

Vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka vykazuje výhodně následující zastoupení frakcí: 0,05 až 0,15 % hmotn. frakce do 0,3 μm ; 0,5 až 1 % hmotn. frakce 0,3 až 0,5 μm ; 1 až 3 %

CZ 29855 U1

hmotn. frakce 0,5 až 0,7 μm ; 1 až 5 % hmotn. frakce 0,7 až 1 μm ; 5 až 10 % hmotn. frakce 1 až 2 μm ; 15 až 25 % hmotn. frakce 2 až 4 μm ; 20 až 30 % hmotn. frakce 4 až 6 μm ; 15 až 35 % hmotn. frakce 6 až 10 μm ; 5 až 15 % hmotn. frakce 10 až 20 μm ; a 5 až 10 % hmotn. frakce 20 až 30 μm .

- 5 Vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka se získává z kamenných odprašků pocházejících z lomů a provozů zabývajících se zpracováním, například řezáním, drcením, broušením, leštěním přírodního kamene a je tvořena 0 až 100 % hmotn. mramoru, 0 až 100 % hmotn. vápence a 0 až 10 % hmotn. žuly, v závislosti na probíhajícím druhu produkce. Tento materiál má podobu vodou zpevněných slepenců, které jsou dále upravené vysokorychlostním mletím, například přístrojem
10 podle PUV 2014-29552. Mletí zajišťuje oddělení zrn, dosažení vhodné jemnosti a zabraňuje shlukování zrn ve směsi. Jemnost upravené vysokorychlostně mikromleté kamenné moučky odpovídá jemnosti mletí cementu.

- Vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka nahrazuje část plniva, běžné nebo křemičité písky. Tímto řešením je využit odpadní materiál, a zároveň jsou šetřeny přírodní zdroje. Vzhledem k tomu, že vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka plní i funkci mikro plniva, je
15 dosaženo lepších mechanických vlastností než u běžných malt, bez nutnosti přidání cementu a je zároveň dosaženo dobré zpracovatelnosti bez přidání chemických přísad, které výrazně zvyšují cenu maltových směsí. Je dosaženo srovnatelných mechanických vlastností v porovnání s dostupnými maltami pro omítání a zdění při snížení ceny finálního produktu.

- 20 Příklady uskutečnění technického řešení

Příklad 1

Suchá směs o složení:

	MgO	3CaO·SiO ₂	2CaO·SiO ₂	3CaO·Al ₂ O ₃	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	Hydroxid vápenatý	písek	vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka
[% hmotn.]	0,1	6,8	0,3	1,4	1,4	1	79	10

- 25 kde vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka s měrným povrchem 2,8 m²/cm³ měla následující zastoupení frakcí:

Velikost zrna [μm]	<0,3	0,3 až 0,5	0,5 až 0,7	0,7 až 1	1 až 2	2 až 4	4 až 6	6 až 10	10 až 20	20 až 30
Množství hmotn. [%]	0,1	1	1	1	5	15	21,9	30	15	10

- 30 byla vždy nejprve řádně zhomogenizována. Poté byla za průběžného míchání postupně přidávána voda v množství 15 až 18 % hmotn. suché směsi podle požadované konzistence a savosti podkladu. Homogenizace i míchání byly v závislosti na množství prováděny ručně, pomocí metly a míchače nebo pomocí stavební míchačky a probíhaly alespoň 5 minut. Nanášení navržené tenkovrstvé malty při zdění přesných tvárnic bylo prováděno standardně zednickou lžící a ocelovým nebo plastovým zubatým hladítkem.

- Na základě výsledku provedených empirických a pevnostních zkoušek po 28 dnech měla navržená malta následující parametry:

- 35 objemová hmotnost 1670 až 1870 kg/m³
pevnost v tlaku minimálně 5,5 MPa, podle ČSN EN 1015-11,
pevnost v tahu za ohybu minimálně 1,1 MPa, podle ČSN EN 1015-11,

CZ 29855 U1

dynamický modul pružnosti minimálně 6,0 GPa, podle ČSN 73 1372,

dynamický smykový modul minimálně 2,5 GPa, podle ČSN 73 1372.

Příklad 2

Suchá směs o složení:

	MgO	3CaO·SiO ₂	2CaO·SiO ₂	3CaO·Al ₂ O ₃	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	Hydroxid vápenatý	písek	vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka
[% hmotn.]	0,1	6,8	0,3	1,4	1,4	1	30	59

5

kde vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka s měrným povrchem 2,8 m²/cm³ měla následujícím zastoupením frakcí:

Velikost zrna [μm]	<0,3	0,3 až 0,5	0,5 až 0,7	0,7 až 1	1 až 2	2 až 4	4 až 6	6 až 10	10 až 20	20 až 30
Množství [% hmotn.]	0,1	1	1	1	5	15	21,9	30	15	10

10

Ā byla vždy nejprve řádně zhomogenizována. Poté byla za průběžného míchání postupně přidávána voda v množství 15 až 18 % hmotn. suché směsi podle požadované konzistence a savosti podkladu. Homogenizace i míchání byly v závislosti na množství prováděny ručně, pomocí metly a míchače nebo pomocí stavební míchačky a probíhaly alespoň 5 minut. Nanášení navržené tenkovrstvé malty při zdění přesných tvárnic je prováděno standardně zednickou lžící a ocelovým nebo plastovým zubatým hladítkem.

15

Na základě výsledku provedených empirických a pevnostních zkoušek po 28 dnech měla navržená malta následující parametry:

objemová hmotnost 1550 až 1750 kg/m³

pevnost v tlaku minimálně 4,5 MPa, podle ČSN EN 1015-11,

pevnost v tahu za ohybu minimálně 1,0 MPa, podle ČSN EN 1015-11,

20

dynamický modul pružnosti minimálně 5,0 GPa, podle ČSN 73 1372,

dynamický smykový modul minimálně 2,0 GPa, podle ČSN 73 1372.

Příklad 3

Suchá směs o složení:

	MgO	3CaO·SiO ₂	2CaO·SiO ₂	3CaO·Al ₂ O ₃	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	Hydroxid vápenatý	písek	vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka
[% hmotn.]	0,3	21,4	1,9	3,2	3,2	20	30	20

25

kde vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka s měrným povrchem 2,8 m²/cm³ měla následující zastoupení frakcí:

Velikost zrna [μm]	<0,3	0,3 až 0,5	0,5 až 0,7	0,7 až 1	1 až 2	2 až 4	4 až 6	6 až 10	10 až 20	20 až 30
Množství [% hmotn.]	0,1	1	1	1	5	15	21,9	30	15	10

CZ 29855 U1

5 byla vždy nejprve řádně zhomogenizována. Poté byla za průběžného míchání postupně přidávána voda v množství 45 až 54 % hmotn. suché směsi podle požadované konzistence a savosti podkladu. Homogenizace i míchání byly v závislosti na množství prováděny ručně, pomocí metly a míchače nebo pomocí stavební míchačky a probíhaly alespoň 5 minut. Nanášení navržené tenkovrstvé malty při zdění přesných tvárníc je prováděno standardně zednickou lžící a ocelovým nebo plastovým zubatým hladítkem.

Na základě výsledku provedených empirických a pevnostních zkoušek po 28 dnech měla navržená malta následující parametry:

objemová hmotnost 1870 až 1970 kg/m³

10 pevnost v tlaku minimálně 17,5 MPa, podle ČSN EN 1015-11,

pevnost v tahu za ohybu 5,2 MPa, podle ČSN EN 1015-11,

dynamický modul pružnosti 15,5 GPa, podle ČSN 73 1372,

dynamický smykový modul 5,5 GPa, podle ČSN 73 1372.

Příklad 4

15 Suchá směs o složení:

	MgO	3CaO·SiO ₂	2CaO·SiO ₂	3CaO·Al ₂ O ₃	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	Hydroxid vápenatý	písek	vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka
[% hmotn.]	0,3	21,4	1,9	3,2	3,2	20	30	20

kde vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka s měrným povrchem 2,8 m²/cm³ měla následujícím zastoupením frakcí:

Velikost zrna [μm]	<0,3	0,3 až 0,5	0,5 až 0,7	0,7 až 1	1 až 2	2 až 4	4 až 6	6 až 10	10 až 20	20 až 30
Množství hmotn. [%]	0,15	1	3	5	10	25	30	15,85	5	5

20 byla vždy nejprve řádně zhomogenizována. Poté byla za průběžného míchání postupně přidávána voda v množství 45 až 54 % hmotn. suché směsi podle požadované konzistence a savosti podkladu. Homogenizace i míchání byly v závislosti na množství prováděny ručně, pomocí metly a míchače nebo pomocí stavební míchačky a probíhaly alespoň 5 minut. Nanášení navržené tenkovrstvé malty při zdění přesných tvárníc je prováděno standardně zednickou lžící a ocelovým nebo plastovým zubatým hladítkem.

25 Na základě výsledku provedených empirických a pevnostních zkoušek po 28 dnech měla navržená malta následující parametry:

objemová hmotnost 1870 až 1970 kg/m³

pevnost v tlaku minimálně 18,9 MPa, podle ČSN EN 1015-11,

30 pevnost v tahu za ohybu minimálně 6,5 MPa, podle ČSN EN 1015-11,

dynamický modul pružnosti minimálně 15,8 GPa, podle ČSN 73 1372,

dynamický smykový modul minimálně 6,9 GPa, podle ČSN 73 1372.

Průmyslová využitelnost

35 Tenkovrstvá vápenocementová zdící malta obsahující vysokorychlostně mikromletou kamennou moučku je dle navrženého technického řešení vhodná pro tenkovrstvé zdění v tloušťce vrstvy do

CZ 29855 U1

3 mm u zdíva z přesných tvárníc na bázi plynosilikátu, pórobetonu. Malta je určena především pro novou výstavbu, ale je možné ji použít i při opravách stávajícího zdíva.


NÁROKY NA OCHRANU

- 5 1. Tenkovrstvá cementová malta, **v y z n a č u j í c í s e t í m**, že její suchá směs obsahuje 0,1 až 0,9 % hmotn. MgO; 6,5 až 24 % hmotn. $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$; 0,3 až 2,7 % hmotn. $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$; 0,6 až 3,6 % hmotn. $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$; 0,6 až 3,6 % hmotn. $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$; 1 až 20 % hmotn. hydroxidu vápenatého; 30 až 79 % hmotn. říčního těžného písku frakce do 1 mm; a 10 až 59 % hmotn. vysokorychlostně mikromleté kamenné moučky.
- 10 2. Tenkovrstvá vápenocementová malta podle nároku 1, **v y z n a č u j í c í s e t í m**, že vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka má měrný povrch $2,8\text{ m}^2/\text{cm}^3$ a zrnitost do 0,03 mm s velikostí středního zrna $3,7\text{ }\mu\text{m}$.
- 15 3. Tenkovrstvá vápenocementová malta podle nároku 1 nebo 2, **v y z n a č u j í c í s e t í m**, že vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka vykazuje následující zastoupení frakcí: 0,05 až 0,15 % hmotn. frakce do $0,3\text{ }\mu\text{m}$; 0,5 až 1 % hmotn. frakce $0,3\text{ až }0,5\text{ }\mu\text{m}$; 1 až 3 % hmotn. frakce $0,5\text{ až }0,7\text{ }\mu\text{m}$; 1 až 5 % hmotn. frakce $0,7\text{ až }1\text{ }\mu\text{m}$; 5 až 10 % hmotn. frakce $1\text{ až }2\text{ }\mu\text{m}$; 15 až 25 % hmotn. frakce $2\text{ až }4\text{ }\mu\text{m}$; 20 až 30 % hmotn. frakce $4\text{ až }6\text{ }\mu\text{m}$; 15 až 35 % hmotn. frakce $6\text{ až }10\text{ }\mu\text{m}$; 5 až 15 % hmotn. frakce $10\text{ až }20\text{ }\mu\text{m}$; a 5 až 10 % hmotn. frakce $20\text{ až }30\text{ }\mu\text{m}$.

Konec dokumentu

A5 - Tvarovka pro výplňové zdivo

UŽITNÝ VZOR

<p>(19) ČESKÁ REPUBLIKA</p>  <p>ÚŘAD PRŮMYSLOVÉHO VLASTNICTVÍ</p>	<p>(21) Číslo přihlášky: 2016-32668 (22) Přihlášeno: 05.08.2016 (47) Zapsáno: 11.10.2016</p>	<p>(11) Číslo dokumentu: 29 871</p> <p>(13) Druh dokumentu: U1 (51) Int. Cl.: C04B 18/12 (2006.01) C04B 28/20 (2006.01) C04B 35/03 (2006.01)</p>
<p>(73) Majitel: ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Praha 6, CZ Ing. George Karra'a, Karlovy Vary, CZ</p> <p>(72) Původce: Ing. Jan Valentin, Ph.D., Kouřim, CZ Ing. Pavel Tesárek, Ph.D., Hradec Králové 6, CZ Ing. Zdeněk Prošek, Ústí nad Labem, CZ Ing. Jaroslav Topič, Hroznětín, CZ Ing. George Karra'a, Karlovy Vary, CZ Ing. Karel Šeps, Dubá, CZ</p> <p>(74) Zástupce: Ing. Lenka Bobková, Kosmická 755, 149 00 Praha 4</p>		
<p>(54) Název užitého vzoru: Tvarovka pro výplňové zdivo</p>		

CZ 29871 U1

Tvarovka pro výplňové zdivoOblast techniky

Technické řešení se týká tvarovky pro zdění.

Dosavadní stav techniky

- 5 Výplňové zdivo z tvarovek se ve stavebnictví běžně používá. S výrobou tvarovek souvisí těžba písků. Rozsáhlá těžba písků má na krajinu negativní dopad. Dnes je proto snaha, aby těžba písků probíhala méně intenzivním šetrným způsobem.

Na druhé straně se hromadí nevyužitý odpad vznikající těžbou a zpracováním kamene resp. mramoru, vápence a žuly stává se celosvětovým ekologickým problémem. V posledních letech vedla rostoucí poptávka po mramoru na vývozních trzích ke zvýšení produkce bez ohledu na jeho kvalitu. Výsledkem byla změna těžebních postupů a hojně využívání odstřelu, který má destruktivní vliv na kamenolom a produkuje zvýšené množství odpadu. Odpadní materiál má několik podob v závislosti na tom, v jaké fázi zpracování vzniká. Velikost částic odpadu vznikajícího při těžbě se pohybuje od velikosti prachových částic až po balvany o velikosti v řádu desítek centimetrů. Tento nevyužitý odpad se skladuje v oblastech poblíž míst, kde dochází k těžbě a má negativní vliv na udržitelný rozvoj těchto oblastí. Další velké množství odpadu produkují tovární linky zpracovávající kámen a to ve formě pevných odpadů, které vznikají vyřazením kamenných bloků z linky kvůli jejich špatnému tvaru nebo pokud jsou bloky rozbité nebo popraskané. Třetí forma odpadů je brusný kal, který vzniká během řezání bloku nebo během procesu broušení a leštění. Po vyschnutí vznikají pevné hroudy brusného kalu.

Těžba je doménu především Číny, Íránu a Egypta, velký podíl na produkci mají i Itálie nebo Španělsko. Avšak zpracování ve formě řezání a broušení probíhá v mnoha evropských zemích. Balvany a hrubé frakce vápence lze relativně snadno a ve velkém množství využít ve stavebnictví. Na druhou stranu využití kamenných odprašků je stále nedostatečné a jeho skladování značně zatěžuje životní prostředí. Kamenné odprašky, v závislosti na složení, je možné použít například dle patentu US 4 026 716 kde je použito od 5 do 15 % hmotn. jemně mletého vápence ve směsi vysoko pevnostního betonu. Tuto aplikaci nelze použít s odpadními kamennými odpraškami pocházející z těžby a zpracování kamene z důvodu její kontaminace z různých zdrojů. Další možnou aplikaci popsali Karasahin a Terzi v článku Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete v časopisu Construction and Building Materials v ročníku 21 z roku 2007 na stránce 616 až 620. Tato aplikace je omezená maximální velikostí částic a díky tomu se stává neefektivní v množství zpracovaného odpadu. Dále lze použít mramorovou moučku v odsiřovacích procesech. Tuto aplikaci popsal Davini v článku Investigation into the desulphurization properties of by-products of the manufacture of white marbles of Northern Tuscany v časopisu Fuel, ročník 79 z roku 2000, na stránce 1363 až 1369. A nakonec dosavadní aplikace ve výrobě tvárnice je popsali Turgut a Algin v článku Limestone dust and wood sawdust as brick v časopisu Building and Environment v ročníku 42 z roku 2007 na stránce 3399 až 3403 a Aukour v článku Incorporation of Marble Sludge in Industrial Building v časopisu Jordan Journal of Civil Engineering v ročníku 3, číslo 1 z roku 2009 na stránce 58 až 65. Tato aplikace má velký nedostatek s pohledu množství využitého odpadu, protože tvárnice s vysokým obsahem kamenných odprašků nespĺňují bez chemických aditiv normu na oteruvzdornost a jsou velmi křehká. Pokud nebudou použity chemická aditiva tak v těchto směsích je pouze použito 30 % hmotn. kamenných odprašků a pokud by byly chemická aditiva použita tak lze využít větší množství odpadu, ale výsledný produkt je ekonomicky zatížen cenou chemických aditiv a tím se stává neefektivně použitelný v praxi.

Podstata technického řešení

Podle předloženého technického řešení se navrhuje tvarovka pro výplňové zdivo v suché směsi, spočívající v tom, že obsahuje 0,1 až 0,45 % hmotn. MgO; 6,5 až 12 % hmotn. $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$; 0,3 až 1,3 % hmotn. $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$; 0,6 až 1,8 % hmotn. $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$; 0,6 až 1,8 % hmotn.

CZ 29871 U1

$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$; 0 až 45 % hmotn. říčního těžného písku frakce do 2 mm a 45 až 90 % hmotn. vysokorychlostně mikromleté kamenné moučky.

Vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka má výhodně měrný povrch $2,8 \text{ m}^2/\text{cm}^3$ a zrnitost do 0,03 mm s velikostí středního zrna 3,7 μm .

- 5 Vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka vykazuje výhodně následující zastoupení frakcí: 0,05 až 0,15 % hmotn. frakce do 0,3 μm ; 0,5 až 1 % hmotn. frakce 0,3 až 0,5 μm ; 1 až 3 % hmotn. frakce 0,5 až 0,7 μm ; 1 až 5 % hmotn. frakce 0,7 až 1 μm ; 5 až 10 % hmotn. frakce 1 až 2 μm ; 15 až 25 % hmotn. frakce 2 až 4 μm ; 20 až 30 % hmotn. frakce 4 až 6 μm ; 15 až 35 % hmotn. frakce 6 až 10 μm ; 5 až 15 % hmotn. frakce 10 až 20 μm ; 5 až 10 % hmotn. frakce 20 až 30 μm .

- 10 Vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka se získává z kamenných odprašků pocházejících z lomů a provozů zabývajících se zpracováním, například řezáním, drcením, broušením, leštěním přírodního kamene a je tvořena 0 až 100 % hmotn. mramoru, 0 až 100 % hmotn. vápence a 0 až 10 % hmotn. žuly, v závislosti na probíhajícím druhu produkce. Tento materiál má podobu vodou zpevněných slepenců, které jsou dále upravené vysokorychlostním mletím, například přístrojem podle PUV 2014-29552. Mletí zajišťuje oddělení zrn, dosažení vhodné jemnosti a zabraňuje shlukování zrn ve směsi. Jemnost upravené vysokorychlostně mikromleté kamenné moučky odpovídá jemnosti mletí cementu. Vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka nahrazuje část plniva, běžné nebo křemičité písky.

- 15 Tímto řešením je využit odpadní materiál, a zároveň jsou šetřeny přírodní zdroje. Vzhledem k tomu, že vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka plní i funkci mikro plniva, je dosaženo lepších mechanických vlastností než u běžného lehčeného zdiva, bez nutnosti přidání cementu. Přidáním vysokorychlostně mikromleté kamenné moučky je zároveň dosaženo vhodné zpracovatelnosti bez přidání chemických přísad, které výrazně zvyšují cenu výrobní směsi cementového kompozitu pro zdící tvarovky. Výhodou zmíněného řešení je spotřeba odpadního materiálu vznikajícího při těžbě a úpravě přírodního kamene, tento materiál může způsobit vážné problémy pro životní prostředí a proto jeho aplikace má pozitivní vliv na ekologii. Zároveň využití vysokorychlostně mikromleté kamenné moučky v cementovém kompozitu pro zdící tvarovky snižuje spotřebu přírodních zdrojů (písku, křemičitého písku), nevyžaduje velké množství chemických přísad a také je dosaženo srovnatelných mechanických vlastností v porovnání s dostupnými lehčenými tvárcemi pro zdění, a zároveň snížení ceny finálního produktu.

Příklady uskutečnění technického řešení

Příklad 1

- 35 Suchá směs o složení:

	MgO	3CaO·SiO ₂	2CaO·SiO ₂	3CaO·Al ₂ O ₃	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	písek	vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka
[% hmotn.]	0,1	6,8	0,3	1,4	1,4	45	45

kde vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka s měrným povrchem $2,8 \text{ m}^2/\text{cm}^3$ měla následující zastoupení frakcí:

Velikost zrna [μm]	<0,3	0,3 až 0,5	0,5 až 0,7	0,7 až 1	1 až 2	2 až 4	4 až 6	6 až 10	10 až 20	20 až 30
Množství [% hmotn.]	0,1	1	1	1	5	15	21,9	30	15	10

- 40 byla řádně zhomogenizována. Teprve poté byla za průběžného míchání postupně přidávána voda v množství 25 % hmotn. suché směsi. Homogenizace a samotné míchání probíhaly pomocí mí-

CZ 29871 U1

chačky alespoň 5 minut. Směs byla uložena do forem ve dvou krocích a po každém kroku hutněna pomocí vibrování po dobu 2 min. Vzorky následně tvrdnuly po dobu 28 dní v laboratorních podmínkách při teplotě 20 ± 2 °C a relativní vlhkosti 50 ± 5 %. Formy vzhledem k hmotnosti tvarovky neměly objem větší než $0,008 \text{ m}^3$.

- 5 Na základě výsledku provedených empirických a pevnostních zkoušek po 28 dnech měly plně tvárnice následující parametry:

objemová hmotnost 1660 až 1700 kg/m^3

pevnost v tlaku minimálně 5,0 MPa, podle ČSN EN 1015-11,

pevnost v tahu za ohybu minimálně 1,0 MPa, podle ČSN EN 1015-11,

- 10 dynamický modul pružnosti minimálně 4,6 GPa, podle ČSN 73 1372,

dynamický smykový modul minimálně 1,9 GPa, podle ČSN 73 1372.

Příklad 2

Suchá směs o složení:

	MgO	3CaO·SiO ₂	2CaO·SiO ₂	3CaO·Al ₂ O ₃	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	písek	vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka
[% hmotn.]	0,1	6,8	0,3	1,4	1,4	0	90

- 15 kde vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka s měrným povrchem $2,8 \text{ m}^2/\text{cm}^3$ měla následující zastoupení frakcí:

Velikost zrna [μm]	<0,3	0,3 až 0,5	0,5 až 0,7	0,7 až 1	1 až 2	2 až 4	4 až 6	6 až 10	10 až 20	20 až 30
Množství hmotn. [%]	0,1	1	1	1	5	15	21,9	30	15	10

- 20 byla řádně zhomogenizována. Teprve poté byla za průběžného míchání postupně přidávána voda v množství 25 % hmotn. suché směsi. Homogenizace a samotné míchání probíhaly pomocí míchačky alespoň 5 minut. Směs byla uložena do forem ve dvou krocích a po každém kroku hutněna pomocí vibrování po dobu 2 min. Vzorky následně tvrdnuly po dobu 28 dní v laboratorních podmínkách při teplotě 20 ± 2 °C a relativní vlhkosti 50 ± 5 %. Formy vzhledem k hmotnosti tvarovky neměly objem větší než $0,008 \text{ m}^3$.

- 25 Na základě výsledku provedených empirických a pevnostních zkoušek po 28 dnech měly plně tvárnice s obsahem jemně mleté kamenné moučky následující parametry:

objemová hmotnost 1500 až 1600 kg/m^3

pevnost v tlaku minimálně 4,0 MPa, podle ČSN EN 1015-11,

pevnost v tahu za ohybu minimálně 1,0 MPa, podle ČSN EN 1015-11,

dynamický modul pružnosti minimálně 3,5 GPa, podle ČSN 73 1372,

- 30 dynamický smykový modul minimálně 1,5 GPa, podle ČSN 73 1372.

Příklad 3

Suchá směs o složení:

	MgO	3CaO·SiO ₂	2CaO·SiO ₂	3CaO·Al ₂ O ₃	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	písek	vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka
[% hmotn.]	0,15	11,2	0,45	1,6	1,6	0	85

CZ 29871 U1

kde vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka s měrným povrchem $2,8 \text{ m}^2/\text{cm}^3$ měla následující zastoupení frakcí:

Velikost zrna [μm]	<0,3	0,3 až 0,5	0,5 až 0,7	0,7 až 1	1 až 2	2 až 4	4 až 6	6 až 10	10 až 20	20 až 30
Množství [% hmotn.]	0,1	1	1	1	5	15	21,9	30	15	10

5 byla řádně zhomogenizována. Teprve poté byla za průběžného míchání postupně přidávána voda v množství 25 % hmotn. suché směsi. Homogenizace a samotné míchání probíhaly pomocí míchačky alespoň 5 minut. Směs byla uložena do forem ve dvou krocích a po každém kroku hutněna pomocí vibrování po dobu 2 min. Vzorky následně tvrdnuly po dobu 28 dní v laboratorních podmínkách při teplotě $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti $50 \pm 5 \%$. Formy vzhledem k hmotnosti tvarovky neměly objem větší než $0,008 \text{ m}^3$.

10 Na základě výsledku provedených empirických a pevnostních zkoušek po 28 dnech měly plně tvárnice následující parametry:

objemová hmotnost 1600 až 1650 kg/m^3

pevnost v tlaku minimálně $6,5 \text{ MPa}$, podle ČSN EN 1015-11,

pevnost v tahu za ohybu minimálně $1,0 \text{ MPa}$, podle ČSN EN 1015-11,

15 dynamický modul pružnosti minimálně $4,7 \text{ GPa}$, podle ČSN 73 1372,

dynamický smykový modul minimálně $1,9 \text{ GPa}$, podle ČSN 73 1372.

Příklad 4

Suchá směs o složení:

	MgO	3CaO· SiO ₂	2CaO· SiO ₂	3CaO· Al ₂ O	4CaO· Al ₂ O ₃ · Fe ₂ O ₃	písek	vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka
[% hmotn.]	0,15	11,2	0,45	1,6	1,6	0	85

20 kde vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka s měrným povrchem $2,8 \text{ m}^2/\text{cm}^3$ měla následující zastoupení frakcí:

Velikost zrna [μm]	<0,3	0,3 až 0,5	0,5 až 0,7	0,7 až 1	1 až 2	2 až 4	4 až 6	6 až 10	10 až 20	20 až 30
Množství [% hmotn.]	0,15	1	3	5	10	25	30	15,85	5	5

25 byla řádně zhomogenizována. Teprve poté byla za průběžného míchání postupně přidávána voda v množství 25 % hmotn. suché směsi. Homogenizace a samotné míchání probíhaly pomocí míchačky alespoň 5 minut. Směs byla uložena do forem ve dvou krocích a po každém kroku hutněna pomocí vibrování po dobu 2 min. Vzorky následně tvrdnuly po dobu 28 dní v laboratorních podmínkách při teplotě $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti $50 \pm 5 \%$. Formy vzhledem k hmotnosti tvarovky neměly objem větší než $0,008 \text{ m}^3$.

30 Na základě výsledku provedených empirických a pevnostních zkoušek po 28 dnech měly plně tvárnice následující parametry:

objemová hmotnost 1600 až 1650 kg/m^3

pevnost v tlaku minimálně $6,7 \text{ MPa}$, podle ČSN EN 1015-11,

CZ 29871 U1

pevnost v tahu za ohybu minimálně 1,2 MPa, podle ČSN EN 1015-11,
dynamický modul pružnosti minimálně 4,9 GPa, podle ČSN 73 1372,
dynamický smykový modul minimálně 2,0 GPa, podle ČSN 73 1372.

Průmyslová využitelnost

- 5 Tvarovky pro výplňové zdivo podle navrženého technického řešení jsou vhodné k provádění
plného zdiva pro nenosné konstrukce. Velikost objemové hmotnosti má za následek dobré akus-
tické vlastnosti při zachování průměrných tepelně technických vlastností. Vysokorychlostně mi-
kromletá kamenná moučka obsažená v tvárnících má pozitivní vliv na vnitřní prostředí, protože
10 může absorbovat přebytečnou vlhkost v místnostech. Pro spojování tvarovek mohou být použity
běžně dostupné komerční maltové směsi nebo v závislosti na přesnosti forem a technologické
kázni mohou být použity i tenkovrstvé maltové směsi sloužící pro přesné zdění.


NÁROKY NA OCHRANU

1. Tvarovka pro výplňové zdivo, **vyznačující se tím**, že její suchá směs obsahuje
0,1 až 0,45 % hmotn. MgO; 6,5 až 12 % hmotn. $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$; 0,3 až 1,3 % hmotn. $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$;
15 0,6 až 1,8 % hmotn. $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$; 0,6 až 1,8 % hmotn. $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$; 0 až 45 % hmotn.
říčního těžného písku frakce do 2 mm; a 45 až 90 % hmotn. vysokorychlostně mikromleté
kamenné moučky.
2. Tvarovka pro výplňové zdivo podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že vysoko-
rychlostně mikromletá kamenná moučka má měrný povrch $2,8\text{ m}^2/\text{cm}^3$ a zrnitost do 0,03 mm
20 s velikostí středního zrna 3,7 μm .
3. Tvarovka pro výplňové zdivo podle nároku 1 nebo 2, **vyznačující se tím**, že
vysokorychlostně mikromletá kamenná moučka vykazuje následující zastoupení frakcí: 0,05 až
0,15 % hmotn. frakce do 0,3 μm ; 0,5 až 1 % hmotn. frakce 0,3 až 0,5 μm ; 1 až 3 % hmotn. frakce
0,5 až 0,7 μm ; 1 až 5 % hmotn. frakce 0,7 až 1 μm ; 5 až 10 % hmotn. frakce 1 až 2 μm ; 15 až
25 25 % hmotn. frakce 2 až 4 μm ; 20 až 30 % hmotn. frakce 4 až 6 μm , 15 až 35 % hmotn. frakce
6 až 10 μm ; 5 až 15 % hmotn. frakce 10 až 20 μm ; 5 až 10 % hmotn. frakce 20 až 30 μm .

Konec dokumentu

A6 - Lehčený kompozitní stavební prvek

UŽITNÝ VZOR

(19) ČESKÁ REPUBLIKA  ÚŘAD PRŮMYSLOVÉHO VLASTNICTVÍ	(21) Číslo přihlášky: 2019-36005 (22) Přihlášeno: 12.03.2019 (47) Zapsáno: 16.04.2019	(11) Číslo dokumentu: 32 790 (13) Druh dokumentu: U1 (51) Int. Cl.: C04B 18/16 (2006.01) C04B 24/26 (2006.01) C04B 24/28 (2006.01)
	(73) Majitel: České vysoké učení technické v Praze, Praha 6, Dejvice, CZ LAVARIS s.r.o., Libčice nad Vltavou, CZ (72) Původce: doc. Ing. Pavel Tesárek, Ph.D., Hradec Králové, Třebeš, CZ Ing. Zdeněk Prošek, Ústí nad Labem, CZ Ing. George Karra'a, Karlovy Vary, CZ (74) Zástupce: Ing. Vladimír Belfín, patentový zástupce, Litovická 305, 253 01 Hostivice	

(54) Název užitého vzoru:
Lehčený kompozitní stavební prvek

CZ 32790 U1

Lehčený kompozitní stavební prvekOblast techniky

5

Technické řešení se týká lehčeného kompozitního stavebního prvku v podobě tvárníc, tvarovek a jiných podobných zdících bloků na bázi plniva, pojiva a chemicky vázané vody.

10 Dosavadní stav techniky

V současné době je stále větší snahou v těchto stavebních prvcích resp. ve směsích pro jejich výrobu používat vhodné a jinak dosud skládkované odpadní materiály, a to jak v zájmu úspor jejich výrobních nákladů, tak i v zájmu šetření přírodních zdrojů a ochrany životního prostředí.

15

Z českého spisu CZ 29871 U1 je například známá tvarovka pro výplňové zdivo, jejíž suchá směs obsahuje v hmotnostním množství 0,1 až 0,45 % MgO, 6,5 až 12 % 3CaO·SiO₂, 0,3 až 1,3 % 2CaO·SiO₂, 0,6 až 1,8 % 3CaO·Al₂O₃, 0,6 až 1,8 % 4CaO·Al₂O₃ Fe₂O₃, 0 až 45 % říčního těžného písku frakce do 2 mm a 45 až 90 % vysokorychlostně mikromleté kamenné moučky, která se získává z kamenných odprašků, pocházející z provozů, které se zabývají těžbou a zpracováním přírodního kameniva. Mikromletá kamenná moučka plní v tomto případě funkci náhrady části plniva, tj. písku.

20

25

Z dalšího českého spisu CZ 29873 U1 je pak známá plná betonová tvarovka pro zdění, jejíž suchá směs obsahuje v hmotnostním množství 0,4 až 0,8 % MgO, 11 až 17 % 3CaO·SiO₂, 1,0 až 12,2 % 2CaO·SiO₂, 1,3 až 2,5 % 3CaO·Al₂O₃, 1,3 až 2,5 % 4CaO Al₂O₃·Fe₂O₃, dále 20 až 40 % říčního těžného písku frakce do 4 mm a 30 až 50 % přírodního drčeného kameniva frakce 4 až 8 mm a 15 až 35 % mikromletého mechanicky aktivovaného recyklovaného betonu. Mikromletý recyklovaný beton zde má funkci částečné náhrady jak plniva, tak i částečné náhrady pojiva, tj. cementu.

30

35

Zejména v případě částečné náhrady plniva mikromletým recyklovaným betonem dochází ale u těchto tvarovek oproti např. tvarovkám, vyrobených pouze z cementu a plniva bez jakýchkoli jejich náhrad zmíněnými recykláty, k úbytkům zvláště jejich tlakové pevnosti a dynamického modulu pružnosti, což je způsobeno tím, že recyklovaný beton je oproti cementu schopen reagovat ve směsi pro jejich výrobu pouze v omezené míře. Zatímco takto způsobený úbytek mechanických vlastností při optimálních poměrech jednotlivých složek směsi pro výrobu těchto tvarovek je u nelehčených tvarovek téměř nepodstatný, u pomocí pěny vylehčených tvarovek resp. u obdobných lehčených zdících prvků, znamená tento úbytek již značný problém, neboť vzhledem k jejich lehčené matici dochází u nich k poklesu mechanických vlastností pod požadovanou úroveň.

40

Podstata technického řešení

45

Tento problém je do značné míry vyřešen lehčeným kompozitním stavebním prvkem v podobě tvárníc, tvarovek či obdobných zdících bloků s vylehčenou maticí, který je vytvořen na bázi směsi plniva a pojiva, přičemž nejméně jedna ze složek této směsi je alespoň částečně nahrazena recyklátem, tvořeným mikromletým starým betonem a/nebo mikromletým odpadem ze zpracování kamene, podle nyní předkládaného řešení. Podstata tohoto technického řešení přitom spočívá v tom, že jeho vylehčená matrice je ztužena plazmaticky povrchově upravenými plastovými (PET, PP, PVA, PE či jejich směsí) mikrovlákný, jejichž obsah ve směsi plniva a pojiva se pohybuje v rozmezí 0,5 až 2 % hmotn.

50

CZ 32790 U1

Využitím synergie průchodem plazmatickou jednotkou povrchově upravených mikrovláken s recyklátem, resp. jejich kombinací je podstatně zlepšena soudržnost mikrovláken s vylehčenou maticí. Lehčený kompozitní stavební prvek podle tohoto technického řešení pak splňuje obecně
5 platné jak mechanické, tak i tepelně-technické parametry při zachování nízkých výrobních nákladů.

Mikrovláčna mohou být, jak je již uvedeno výše, vytvořena např. z polyethylenu nebo polypropylenu, přičemž jejich průměr se může pohybovat v rozmezí 8 až 400 μm a délka
10 v rozmezí 2 až 60 mm. Plazmatická úprava mikrovláken se v průběhu jejich výroby se provádí v zájmu zvýšení smáčivosti jejich povrchu.

Množství plniva se v lehčeném kompozitním stavebním prvku podle technického řešení může pohybovat v rozmezí 50 až 70 % hmotn., přičemž přírodní plnivo, jako písek nebo kamenivo, zde je nahrazeno výše uvedeným recyklátem, a množství pojiva se v něm může pohybovat v rozmezí
15 30 až 50 % hmotn., přičemž cement jako toto pojivo, zde může být tímto recyklátem nahrazeno až ze 1/4 jeho celkového obsahu. Velikost zrn mikromletého recyklátu může činit až 300 μm .

Podstata technické řešení spočívá dále v tom, že lehčený kompozitní stavební prvek s výhodou dále obsahuje až 2 % hmotn. hydrofobizačních přísad pro zamezení jeho nasákovosti. Těmito
20 hydrofobizačními přísadami může být např. Polymembran 100. Dále plastifikační přísadu s obsahem až 1 % hmotn. pro snížení množství záměsové vody a napěňovací přísadu s obsahem 0,5 až 2 % hmotn., pro napěnění kompozitní matrice.

25 Příklady uskutečnění technického řešení

Příklad 1

Lehčený kompozitní stavební prvek dle jeho prvního příkladného provedení je vytvořen v podobě
30 tvárnice, která obsahuje 46,4 % hmotn. cementu jako pojiva, 1 % hmotn. hydrofobizační přísady, v tomto případě TerraSil (Zydex) a 0,2 % hmotn. plastifikační přísady, v tomto případě urychlovač a plastifikátor stavebních hmot Den Braven. Jeho pěnou vylehčená matrice je pomocí napěňovací 1 % hmotn. přísady Sika lightcrete přítom ztužena plazmaticky povrchově upravenými plastovými
35 mikrovláknými o průměru 12 μm a délce 4 mm, přičemž jejich obsah ve směsi plniva a pojiva činí 1,4 % hmotn. Vodní součinitel, tedy poměr hmotnosti vody a celkové hmotnosti plniva a pojiva byl 0,27.

Při výrobě jsou nejdříve smíchána vlákna s cementem, následně se přidá voda a plastifikační
40 přísada. V dalším kroku je do směsi postupně přidávám recyklát. Nakonec je přidána napěňovací přísada a směs řádně zamíchána, za využití vysokých otáček.

Na základě výsledku provedených zkoušek hotového vyzrálého kompozitu po 28 dnech měl kompozitní materiál takovéto vlastnosti:

45	Objemová hmotnost	500 až 600 kg/m^3
	Pevnost v tlaku - 28 dní	min. 1,5 MPa, podle ČSN EN 1015-11.
	Pevnost v tahu za ohybu - 28 dní	min. 1,0 MPa, podle ČSN EN 1015-11.
	Součinitel tepelné vodivosti -	0,18 až 0,23 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$
50	Měrná tepelná kapacita -	1730 až 1850 $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$.

Příklad 2

Lehčený kompozitní stavební prvek dle jeho druhého příkladného provedení je vytvořen
55 v podobě tvárnice, která obsahuje 9,7 % hmotn. mikromletého odpadu ze zpracování kameniva

CZ 32790 U1

5 jako plnivo, 37,1 % hmotn. cementu jako pojivo a 50,0 % hmotn. mikromletého starého betonu jako plnivo a pojivo a 0,2 % hmotn. plastifikační přísady, v tomto případě urychlovač a plastifikátor stavebních hmot Den Braven. Jeho pěnou vylehčená matrice je přitom ztužena plazmaticky povrchově upravenými plastovými mikroválkny o průměru 12 μm a délce 4 mm, přičemž jejich obsah ve směsi plniva a pojiva činí 2 % hmotn. Matrice byla vylehčena pomocí

10 napěňovací 1 % hmotn. přísady Sika lightcrete. Vodní součinitel, tedy poměr hmotnosti vody a celkové hmotnosti plniva a pojiva byl 0,24.

Při výrobě jsou nejdříve smíchána vlákna s cementem, následně se přidá voda a plastifikační

15 přísada. V dalším kroku je do směsi postupně přidávám recyklát.

Nakonec je přidána napěňovací přísada a směs řádně zamíchána, za využití vysokých otáček.

Na základě výsledku provedených zkoušek hotového vyzrálého kompozitu po 28 dnech měl

15	Objemová hmotnost	700 až 600 kg/m^3
	Pevnost v tlaku - 28 dní	min. 4,0 MPa, podle ČSN EN 1015-11.
	Pevnost v tahu za ohybu - 28 dní	min. 2,0 MPa, podle ČSN EN 1015-11.
20	Součinitel tepelné vodivosti -	0,2 až 0,26 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$
	Měrná tepelná kapacita -	1500 až 1800 $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$.

Příklad 3

25 Lehčený kompozitní stavební prvek dle jeho třetího příkladného provedení je vytvořen v podobě tvárnice, která obsahuje 30,0 % hmotn. cementu jako pojivo a 65,4 % hmotn. mikromletého starého betonu jako plnivo a pojivo a 0,2 % hmotn. plastifikační přísady, v tomto případě urychlovač a plastifikátor stavebních hmot Den Braven a 1 % hmotn. hydrofobizační přísady, v tomto případě Polymembran 100. Jeho pěnou vylehčená matrice je přitom ztužena plazmaticky

30 povrchově upravenými plastovými mikroválkny o průměru 12 μm a délce 4 mm, přičemž jejich obsah ve směsi plniva a pojiva činí 1,7 % hmotn. Matrice byla vylehčena pomocí napěňovací 1,7 % hmotn. přísady Sika lightcrete. Vodní součinitel, tedy poměr hmotnosti vody a celkové hmotnosti plniva a pojiva byl 0,25.

35 Při výrobě jsou nejdříve smíchána vlákna s cementem, následně se přidá voda a plastifikační přísada. V dalším kroku je do směsi postupně přidávám recyklát. Nakonec je přidána napěňovací

40 přísada a směs řádně zamíchána, za využití vysokých otáček.

Na základě výsledku provedených zkoušek hotového vyzrálého kompozitu po 28 dnech měl

40	Objemová hmotnost	600 až 700 kg/m^3
	Pevnost v tlaku - 28 dní	min. 2,0 MPa, podle ČSN EN 1015-11.
	Pevnost v tahu za ohybu - 28 dní	min. 1,0 MPa, podle ČSN EN 1015-11.
45	Součinitel tepelné vodivosti -	0,13 až 0,15 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$
	Měrná tepelná kapacita -	1300 až 1500 $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$.

NÁROKY NA OCHRANU

50

1. Lehčený kompozitní stavební prvek v podobě tvárnice, tvarovky či obdobných zdících bloků s vylehčenou maticí, vytvořený na bázi směsi plniva a pojiva, přičemž nejméně jedna ze složek této směsi je alespoň částečně nahrazena recyklátem, tvořeným mikromletým starým betonem

55 a/nebo mikromletým odpadem ze zpracování kameniva, **vyznačující se tím**, že jeho vylehčená

CZ 32790 U1

matrice je ztužena plazmaticky povrchově upravenými plastovými mikrovlákný, jejichž obsah ve směsi plniva a pojiva se pohybuje v rozmezí 0,5 až 2 % hmotn.

2. Lehčený kompozitní stavební prvek podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že průměr plazmaticky povrchově upravených plastových mikrovláken v jeho vylehčené matici se pohybuje v rozmezí 8 až 400 μm a jejich délka v rozmezí 2 až 60 mm.
3. Lehčený kompozitní stavební prvek podle alespoň jednoho z předcházejících nároků, **vyznačující se tím**, že obsahuje až 2 % hmotn. hydrofobizačních přísad.
4. Lehčený kompozitní stavební prvek podle alespoň jednoho z předcházejících nároků, **vyznačující se tím**, že dále obsahuje až 1 % hmotn. plastifikační přísady.
5. Lehčený kompozitní stavební prvek podle alespoň jednoho z předcházejících nároků, **vyznačující se tím**, že dále obsahuje až 0,5 až 2 % hmotn. napěňovací přísady.