



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební
Katedra mechaniky K132**

**Návrh prvků stavebního systému
na bázi odpadních materiálů při zpracování kamene**

**Design of Elements of Building Systems
Based on the Waste Materials During Processing of Stone**

Bakalářská práce

Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Plachý, Ph.D.

Lukáš Hlubocký

Praha 2016



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Hlubocký Jméno: Lukáš Osobní číslo: 410755

Zadávající katedra: Katedra mechaniky - K132

Studijní program: Stavební inženýrství - SI

Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb - C

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Návrh prvků stavebního systému na bázi odpadních materiálů při zpracování kamene

Název bakalářské práce anglicky: Design of Elements of Building Systems Based on the Waste Materials During Processing of Stone

Pokyny pro vypracování:

- rešerše současného stavu problematiky
- návrh a posouzení vodorovných prvků pro rodinný dům
- návrh a stanovení vybraných mechanických vlastností materiálu na bázi cementu a mikromletého odpadního materiálu při zpracování kamene


Seznam doporučené literatury:

Vybrané články z databáze WoS, Scopus a Science Direct.

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Tomáš Plachý, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 24. 2. 2016

Termín odevzdání bakalářské práce: 22. 5. 2016


Podpis vedoucího práce


Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

25. 2. 2016
Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 22. 05. 2016

.....
Lukáš Hlubocký

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Tomáši Plachému, Ph.D. za jeho čas a trpělivost při konzultacích, cenné rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Zdeňku Proškovi za konzultace ohledně materiálového řešení navržených směsí a poskytnutí vstupních surovin pro jejich výrobu. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat Jaromíru Hružovi za spolupráci při práci v laboratořích. Práce vznikla v rámci řešení projektů Centra pro nanotechnologie ve stavebnictví FSV ČVUT v Praze. Experimentální část práce byla podpořena z prostředků ČVUT v Praze v rámci projektu SGS16/201/OHK1/3T/11 a díky podpoře projektu GA ČR GA15-12420S,

V Praze dne 22. 05. 2016

.....
Lukáš Hlubočský

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá využitím odpadního materiálu při zpracování kamene. Zaměřena je na materiály na bázi mramoru a vápence ve formě drtě a kalu, konkrétně jde o materiál v surové podobě nebo v podobě mikromletého materiálu. Řešen je návrh směsi cementového kompozitu s použitím odpadního materiálu jako náhrady za cement a kamenivo. Dále práce řeší návrh vodorovného prvku stavebního systému. Součástí řešení je zjednodušený statický výpočet v programu Excel, který na základě zadaných rozměrů a charakteristik referenčního objektu a velikost otvoru specifikuje materiálové charakteristiky cementového kompozitu. Zároveň jsou v práci popsány experimentální metody měření vybraných vlastností materiálů. Byla zkoumána zpracovatelnost čerstvé směsi cementového kompozitu, jeho smrštění a objemová hmotnost, pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu a dynamický modul pružnosti na vzorcích $40 \times 40 \times 160$ mm při stáří vzorků do 28 dní.

Klíčová slova

Kamenné moučky, mramorový kal, odpadní materiály, recyklace, rezonanční metoda, mechanické vlastnosti, smrštění

Abstract

The thesis deals with the use of waste materials in the processing of stone. It is focused on materials based on marble and limestone in the form of crushed and sludge, namely the material in the raw form or in the form of micronized material. The solution is a draft of mixture of cement composite material with using waste as a substitute for cement and aggregates. Next the paper deals with design of the horizontal component of the building system. The solution includes a simplified static calculation in Excel, which specifies the characteristics of the cement composite material based on the dimensions and characteristics of the reference object and based on the size of the hole. Simultaneously, the paper describes the experimental methods for measuring the selected material properties. The workability of fresh mixtures of cement composite, the shrinkage and density, compressive strength and flexural strength and dynamic modulus of elasticity were investigated on samples $40 \times 40 \times 160$ mm up to 28 days of age.

Keywords

Stone powder, Marble sludge, Waste materials, Recycling, Resonance method, Mechanical properties, Shrinkage

Obsah

1	ÚVOD	7
2	SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	8
2.1	CHARAKTERISTIKY A VLASTNOSTI ODPADNÍHO MATERIÁLU	11
2.2	MOŽNOSTI VYUŽITÍ ODPADNÍHO MATERIÁLU NA BÁZI MRAMORU A VÁPENCE.....	13
2.2.1	Vliv odpadního materiálu na pevnostní charakteristiky	13
2.2.2	Vliv odpadního materiálu na další vybrané užité vlastnosti	20
2.3	VODOROVNÉ KONSTRUKCE NA BÁZI MRAMOROVÉHO ODPADU	26
2.3.1	Norma pro návrh betonové směsi.....	27
2.3.2	Normy pro návrh a posuzování betonových konstrukcí	27
3	CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	33
4	PRAKTICKÁ ČÁST	34
4.1	POUŽITÉ MATERIÁLY A NÁVRH SLOŽENÍ SMĚSÍ	34
4.1.1	Zpracovatelnost směsi (zkouška rozlívání).....	38
4.1.2	Smrštění vzorků	39
4.2	PEVNOST V TAHU ZA OHYBU	40
4.2.1	Metodika měření	40
4.2.2	Výsledky a diskuze	41
4.3	PEVNOST V TLAKU	42
4.3.1	Metodika měření	42
4.3.2	Výsledky a diskuze	43
4.4	DYNAMICKÝ MODUL PRUŽNOSTI	44
4.4.1	Metodika měření	44
4.4.2	Výsledky a diskuze	49
4.5	VIZUALIZACE A NÁVRH STAVEBNÍHO SYSTÉMU	51
4.6	NÁVRH VODOROVNÉHO PRVKU VE VÝPOČTOVÉM DOKUMENTU	53
5	ZÁVĚR	59
6	SEZNAM ZDROJŮ	60
7	SEZNAM OBRÁZKŮ	63
8	SEZNAM TABULEK	65
9	SEZNAM PŘÍLOH	66

1 Úvod

Bakalářská práce se zabývá využitím odpadního materiálu, který vzniká při zpracování kamene. V práci se zaměřuji hlavně na problematiku v oblasti Egypta a Blízkého východu, kde ročně dochází k produkci velkého množství tohoto odpadního materiálu, ale není téměř využíván. Produkovaný odpadní materiál je pouze skládkován v blízkosti průmyslových závodů. Zaměřuji se na odpadní materiál produkovaný mramorovým průmyslem. Skládkování ohrožuje životní prostředí a snižuje možnost využití zaneseného území. Z důvodu téměř žádného využití tohoto odpadu se jedná o odpadní materiál s takřka nulovou cenou.

V práci se zabývám současným stavem problematiky, jaké má odpadní materiál složení a jaká je možnost současného využití. V práci uvádím odborné publikace, které se zabývají možnostmi využití tohoto odpadu ve stavebnictví. Dále v práci řeším návrh směsi na bázi cementového kompozitu s využitím co nejmenšího množství cementu a současně co největší využití odpadního materiálu z průmyslu na zpracování mramoru. Odpadním materiálem je mramorový kal z řezání, broušení a leštění mramoru a drcený mramor a vápenec z těžby těchto surovin.

Práce řeší také vybrané mechanické vlastnosti navržených směsí a metodiky, kterými byly tyto vlastnosti zkoumány. Zjednodušeným statickým výpočtem pomocí výpočtového dokumentu v programu MS EXCEL, řeším požadovanou pevnost materiálu pro možnost výroby vodorovných prvků stavebního systému. Na základě výsledků experimentálně zjištěných vlastností materiálu je cílem předběžně navrhnout a posoudit vodorovné prvky stavebního systému. Posouzení provádím zjednodušeně pouze pro ověření vhodnosti navržených směsí.

2 Současný stav problematiky

Celosvětově se produkuje velké množství odpadního materiálu, který vzniká při těžbě, zpracování a úpravě přírodního kamene. Z důvodu zlepšení či snížení znehodnocování životního prostředí a snížení množství odpadních materiálů, které již nelze druhotně využívat, se rozmáhá snaha o zužitkovávání těchto odpadních materiálů v souladu s principy udržitelného rozvoje.

Zpracovávat lze druhotně odpadní materiály přímo ve formě, ve které je produkujeme nebo ve formě vzniklé po recyklaci. Většina dnes méně používaných odpadních materiálů vyžaduje určitý druh recyklace či jejich úpravu. Odpadní materiály je nutné třídít nebo z nich separovat nebezpečné složky, tyto složky mohou být zdravotně závadné nebo mohou poškozovat finální produkt fyzikálními či chemickými reakcemi, které vznikají při zpracování, úpravě nebo zabudování materiálu do stavby a působení vnějších vlivů na materiál jako jsou například povětrnostní vlivy.

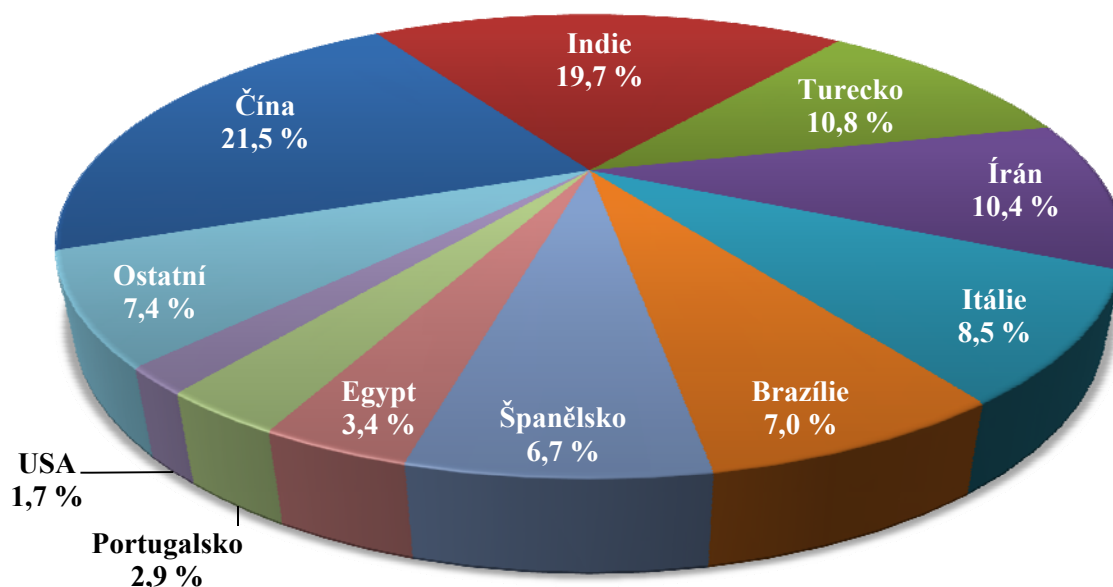
Hlavní problematikou, kterou řeším, je odpadní materiál, který vzniká při těžbě, zpracování a úpravě přírodního kamene. Při těchto činnostech vznikají dva druhy odpadního materiálu. V průběhu těžby vzniká pevný odpad ve formě šterku a kameniva, jílu a dalších materiálů, které mají zrna o velikosti větší než 125 μm . Při zpracování a úpravě vznikají odpadní materiály jako kamenné kaly a další materiály z broušení a řezání, dále pak například při drcení a mletí kamenné odprašky. Odpadní materiály druhého typu mají zrna menší než 125 μm (Prošek 2016).

Množství odpadního materiálu při těžbě a zpracování přírodního kamene každým rokem stoupá. Jeho využití je nedostatečné v poměru k jeho produkci. I když není Česká republika velkým producentem tohoto odpadu, Český ekologický ústav eviduje množství odpadního materiálu z těžby a zpracování kamene přes 500 tisíc tun. Udávané množství pro ČR je však dle odhadů podhodnocené. Vavruška odhaduje roční produkci tohoto odpadního materiálu na 2,5 milionu tun (Vavruška 2002). V roce 2010 nově odhadoval množství tohoto odpadního materiálu uloženého na skládkách (Obrázek 1) Kotecký na 20 milionů tun (Kotecký 2000).



Obrázek 1 – Skládka (odval) u dolu Nosek v Tuchlovicích – vlevo, Severní svah „Buštěhradské haldy“ – vpravo (Štrupl 2012).

Do hlavních deseti celosvětových producentů lomového kamene patří Čína, Indie, Turecko, Írán, Itálie, Brazílie, Španělsko, Egypt, Portugalsko a USA. Hmotnostní procentuální zastoupení jednotlivých zemí znázorňuje následující graf (Obrázek 2). Hlavních deset producentů lomového kamene dohromady představuje 92,6 % světové produkce lomového kamene dle statistik v roce 2009 (Aukour 2011).

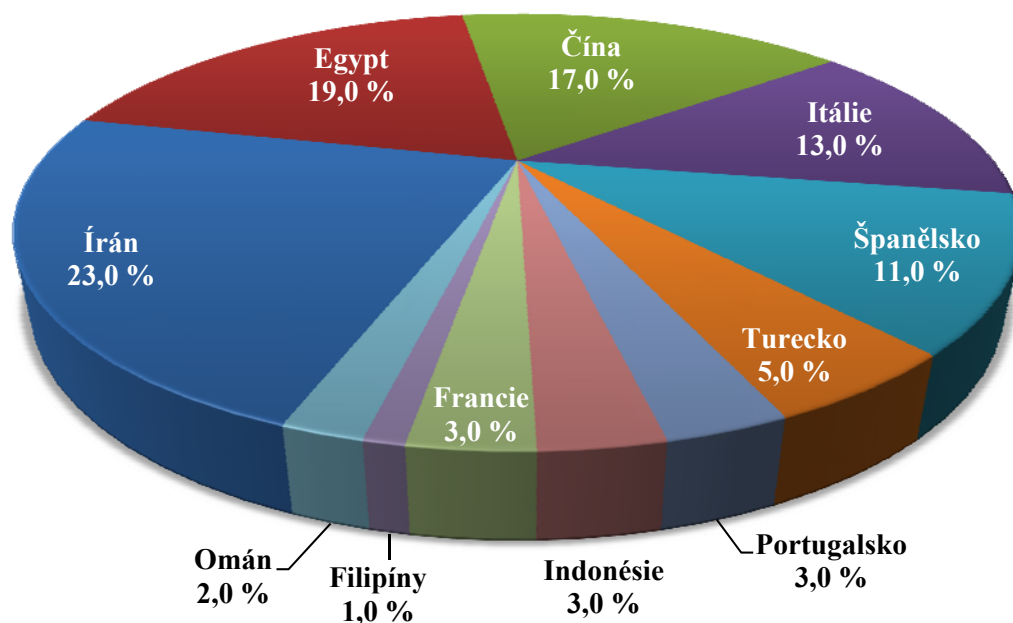


Obrázek 2 – Deset hlavních celosvětových producentů lomového kamene v roce 2009 (Aukour 2011).

Jedním z hlavních producentů mramoru je Itálie, která má bohatá a velice rozsáhlá mramorová ložiska. Italská ložiska mají velmi dobrou strukturu. Itálie má významný podíl na celosvětovém obchodu s mramorem. Čína dle odhadů IMM a CSMA zastávala asi 6 % celkové světové produkce mramoru v roce 2009 (Aukour 2011).

Jelikož pro praktickou část jsem měl k dispozici vzorky odpadních materiálů z běžového mramoru, budu se v dalších odstavcích věnovat otázce těžby a množství odpadních materiálů právě z běžového mramoru. Materiál tohoto druhu se těží především v zemích, které jsou znázorněny v grafu níže (Obrázek 3). Z tohoto grafu je patrné, že hlavní producenti běžového mramoru jsou především Írán, Egypt, Čína, Itálie a Španělsko.

Mramory těžené ve jmenovaných zemích se od sebe navzájem liší různými vlastnostmi. Obecně platí, že běžové mramory produkované v Íránu, Egyptě a ve Španělsku jsou určeny především k vývozu do zahraničí, zatímco ty produkované v Itálii a Číně jsou částečně používány přímo v zemi, kde se těží, a pouze částečně vyváženy do zahraničí (Aukour 2011).



Obrázek 3 – Celosvětová produkce těžby běžového mramoru v roce 2009 (Aukour 2011).

S ohledem na téma bakalářské práce a typu vzorového objektu, kterým se zabývám, se zaměřím na území Blízkého východu a Egypta, jakožto lokality, pro které je tento materiál nejlépe dostupný, kde dochází k produkci odpadního materiálu při těžbě, zpracování a úpravě běžového mramoru ve velké míře. Kamenný průmysl je v těchto lokalitách v rozkvětu. Těžba běžového mramoru je v těchto lokalitách doménou především pro Egypt, jak je patrné z předchozího grafu (Obrázek 3). Převážná část této těžby pochází z průmyslové zóny Shaq El Thoaban, která se nachází východně od Káhiry (Aukour 2011).

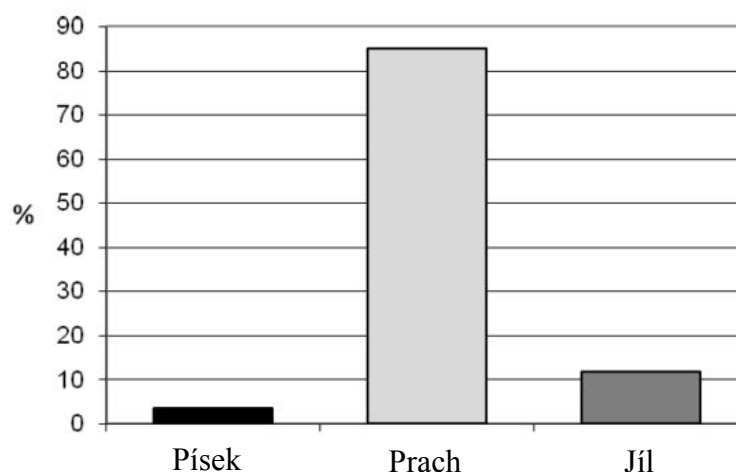
Z důvodu velké poptávky po mramoru probíhá nyní těžba kamene méně šetrnými metodami (odstřel). Při těchto metodách těžby vniká velké množství odpadního materiálu (66 %) ve formě šterků, kameniva a drobných částic. Odhadované množství odpadního materiálu z těžby v Egyptě je 6,4 milionů tun ročně (Mashaly et al. 2012). Zmíněný odpad je skladován v blízkosti kamenolomů a továrních linek na zpracování mramoru. Sklárky odpadního materiálu brání rozšiřování kamenolomů a mají negativní vliv na udržitelný rozvoj tohoto průmyslu. Při zpracování mramoru vznikají dva druhy odpadu. Prvním druhem jsou pevné odpady, které vznikají vyřazením nevhodných mramorových bloků. Nevhodnost mramorových bloků je způsobena prasklinami či jejich rozbitím. Druhým druhem odpadního materiálu jsou mramorové kaly, které vznikají řezáním bloků nebo během broušení a leštění nařezaných částí bloků. Odpad, který produkují tovární linky, se pro Egypt odhaduje na jeden milion tun ročně a většina tohoto odpadu se skladuje v blízkosti továrních linek bez dalšího využití (Obrázek 4).



Obrázek 4 – Ukládání mramorového kalu v okolí továrních linek (Mashaly et al. 2012).

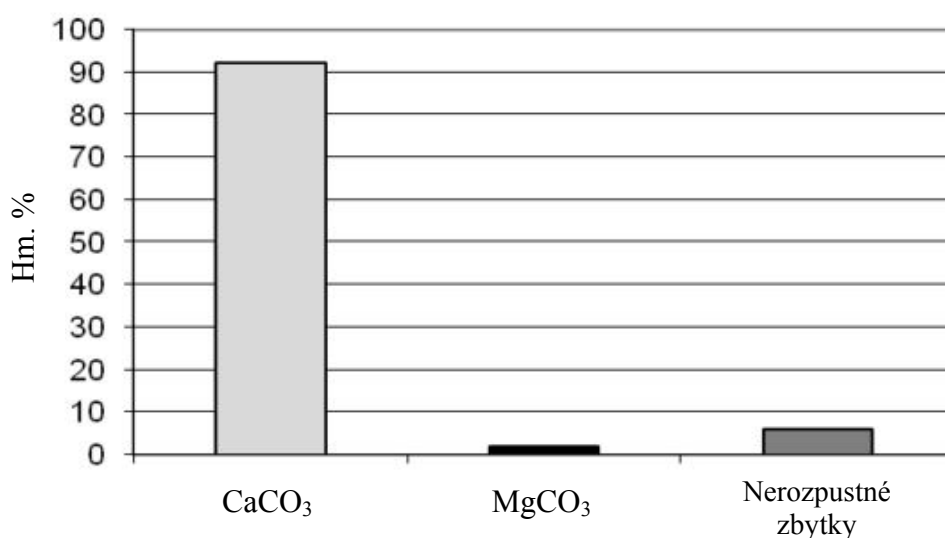
2.1 Charakteristiky a vlastnosti odpadního materiálu

Na příkladu problematiky v Egyptě je naznačeno složení odpadního materiálu v této lokalitě. V práci Mashaly et al. (2012) byla provedena analýza chemického složení těchto odpadních materiálů. Vzorky byly odebrány v Egyptské průmyslové zóně Shaque Al Thoaban východně od Káhiry. Byly zkoumány reprezentativní vzorky mramorových kalů na procentuální obsah vody, distribuci velikostí zrn laserovou analýzou, index bělosti a chemická analýza gravimetrickou metodou. Gravimetrickou metodou byl stanoven obsah CaO a MgO z čehož byl vypočten obsah CaCO₃ a MgCO₃. Průměrný obsah vody ve vzorcích mramorových kalů uvádí A. O. Mashala na 17,26 % (minimálně 9,62 %, maximálně 24,89 %). Odchylna byla způsobena stavem kalu při odebírání vzorků. Při analýze velikosti zrn zjistil, že dominantní velikost zrn mramorového kalu je prachovitá (2 – 63 μm), tato zrna tvořila 84,9 % z odebraných vzorků. Frakce velikosti jílových zrn (< 2 μm) tvořila okolo 11,6 % ze vzorků a pískové frakce (> 63 μm) představovaly asi 3,4 % (Obrázek 5).



Obrázek 5 – Zastoupení jednotlivých frakcí zrn mramorových kalů (Mashaly et al. 2012).

Autor stanovil obsah CaO a MgO a odhad obsahu CaCO₃ a množství MgCO₃, které jsou hlavními složkami mramorových kalů z řezání, broušení a leštění mramoru, vápence a dolomitu. Obsah CaCO₃ (uhličitanu vápenatého) v mramorovém kalu byl v rozmezí od 82,58 hm. % do 98,84 hm. % s průměrnou hodnotou 91,53 hm. %. Obsah MgCO₃ (uhličitanu hořečnatého) se pohyboval v rozmezí od 0 hm. % do 11,44 hm. % s průměrnou hodnotou 1,48 hm. %. MgCO₃ neměl dominantní zastoupení, jelikož většina kalu je produkována řezáním mramoru. Nerozpustný zbytek se pohyboval od 1,15 hm. % do 22,27 hm. % s průměrnou hodnotou 7,34 hm. % (Obrázek 6). Nerozpustný zbytek zastupuje všechny jíly a písky vyskytující se ve zpracovávaném mramoru a všechny nečistoty přimísené do kalu během celého procesu zpracování a ukládání mramorového kalu (Mashaly et al. 2012).



Obrázek 6 – Zastoupení CaCO₃, MgCO₃ a nerozpustných zbytků ve zkoumaných vzorcích mramorového kalu (Mashaly et al. 2012).

V závěru práce Mashaly et al. (2012) konstatuje, že obsah CaCO₃ a MgCO₃ výrazně ovlivňuje velikost zrn produkovaného prachu a kalu. Se zvyšujícím obsahem CaCO₃ ve zpracovávaném mramoru roste jemnost produkovaného odpadního materiálu. U obsahu MgCO₃ je tento trend opačný, tedy s rostoucím obsahem MgCO₃ klesá jemnost odpadního materiálu.

2.2 Možnosti využití odpadního materiálu na bázi mramoru a vápence

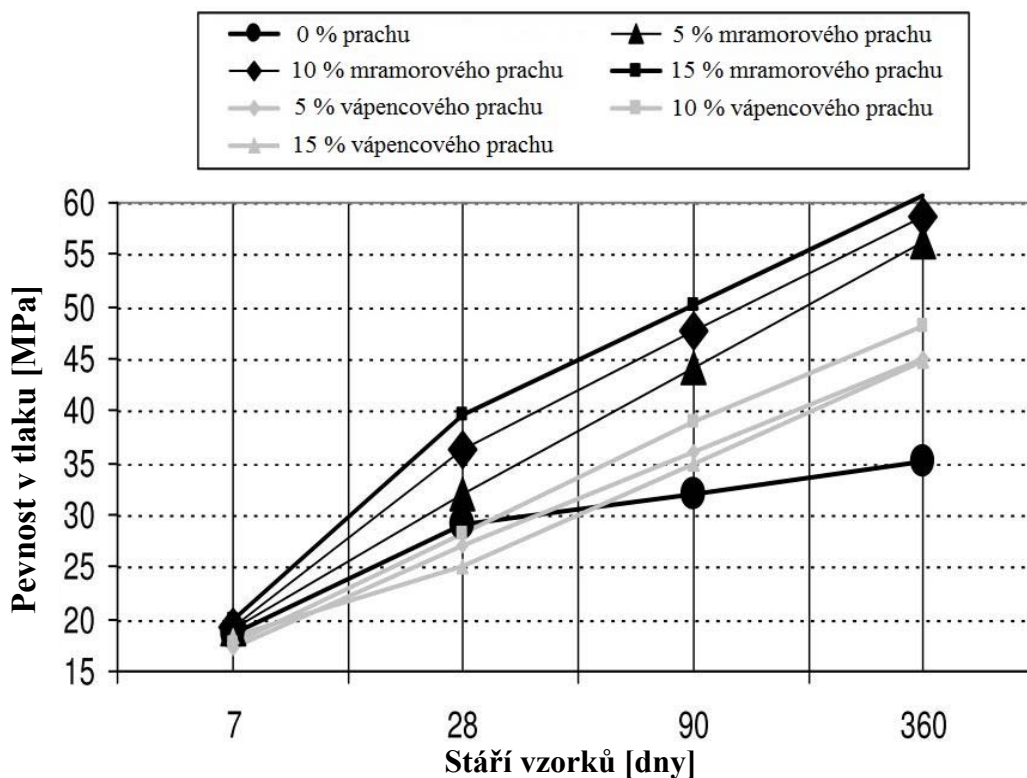
Mnoho odborných publikací se zabývá otázkou jak nejlépe využívat tento odpadní materiál. Důvodem je hlavně jeho velké produkované množství, které je skladováno v blízkosti průmyslových závodů, které ho produkují. Skladování tohoto odpadního materiálu negativně ovlivňuje životní prostředí a udržitelný rozvoj v těchto oblastech. Nejlepším způsobem, jak odpadní materiály na bázi mramoru a vápence připravit ke druhotnému využití, je recyklace. Z výsledků analýzy mramorového kalu z oblasti Egypta, kterou provedl A. O. Marshala je patrné, že základní složkou mramoru v těchto oblastech je CaCO_3 . Z tohoto důvodu, mramorové a vápencové odpadní materiály (pevné, kalové a další) mohou být využity v mnoha aplikacích. Jedním z největších odvětví průmyslu, kde se snaží tento odpadní materiál využívat je betonářský a cementářský průmysl. Jedná se o využití pro přímou výrobu cementu nebo vytváření cementových kompozitů. Velké využití by mohl mít tento odpad i v cihlářském průmyslu, ve kterém je již sice využíván, ale ne ve velké míře. Dále je využíván například v papírenském průmyslu, průmyslu na výrobu plastů, ocelářském průmyslu, při výrobě asfaltových směsí, hnojiv a pro využití v dalších odvětvích průmyslu. Použití odpadního materiálu na bázi mramoru a vápence v těchto odvětvích je ale nedostačující, jelikož se jedná o použití v malém množství, tedy 5 hm. % až 10 hm. %. Produkce těchto odpadů je větší než jeho dosavadní využívání. Nedostatečným využitím je zapříčiněn každoroční nárůst skladovaného množství.

2.2.1 Vliv odpadního materiálu na pevnostní charakteristiky

Nejvíce dostupných odborných publikací se zabývá využitím odpadních materiálů na bázi mramoru a vápence při výrobě betonu. V těchto pracích je převážně řešen vliv na vybrané mechanické vlastnosti betonů, jejich mikrostrukturu, zpracovatelnost a na další vlivy. Postupně se budu věnovat jednotlivým publikacím a jejich výsledkům.

První vybraná publikace je od autorů Binici et al. (2007), kteří zkoumali vybrané mechanické vlastnosti betonu s obsahem mramorového prachu a vápencového prachu. Autoři používali odpadní materiály jako náhradu za jemné písčité kamenivo. Autoři nahrazovali ve směsích jemnou frakci kameniva postupně od 0 hm. %, 5 hm. %, 10 hm. % až 15 hm. % z kameniva. Směsi obsahovaly ve všech případech 400 kg portlandského cementu na m^3 . Na jimi vyrobených vzorcích zkoumali pevnost v tlaku betonu při stáří vzorků 7 dní, 28 dní, 90 dní a 360 dní. Dále testovali odolnost proti síranu sodnému po dobu 12-ti měsíců, odolnost proti otěru a nasákavost betonu. Pro výrobu vzorků autoři používali vápencový prach, který byl získán

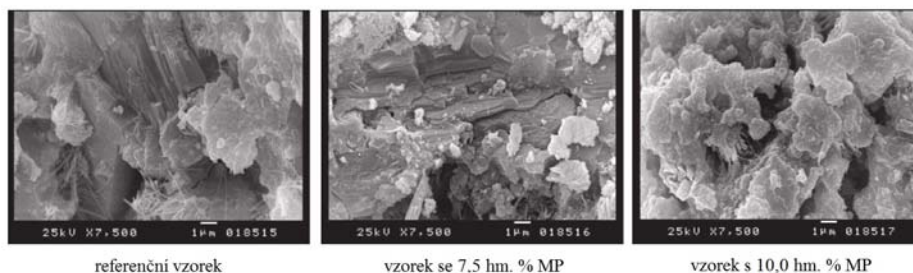
proséváním odpadního kameniva na sítu o velikosti oka 1 mm. Mramorový prach byl získán ve vlhké formě přímo z továrny na zpracování mramoru. Mramorový prach musel být před použitím na výrobu vzorků vysušen. Odpadní mramorový prach obsahoval několik typů mramoru. Odpadový mramorový prach nejdříve prali a poté ho prosévali na sítu o velikosti oka 1 mm. Z následujícího obrázku (Obrázek 7) je patrný vývoj pevnosti v tlaku v závislosti na čase. Autoři v experimentu zjistili, že je znatelný rozdíl mezi použitím mramorového prachu a vápencového prachu. Všechny vzorky se zastoupením mramorového prachu měly větší pevnosti v tlaku než referenční sada vzorků bez použití odpadního materiálu. U vápencového prachu byly pevnosti v tlaku horší než referenční vzorky. U vápencového prachu se pevnost v tlaku zvýšila nad hodnotu referenčních vzorků po 28 až 60 dnech stáří vzorků. Pevnosti v tlaku referenčních vzorků měly průměrnou hodnotu 29 MPa při stáří vzorků 28 dní. Vzorky s 5 hm. % mramorového prachu (MP) měly průměrnou pevnost v tlaku 32 MPa, vzorky s 10 hm. % MP měly průměrnou pevnost v tlaku 36,2 MPa a vzorky s 15 hm. % MP měly průměrnou pevnost v tlaku 39,7 MPa. Z těchto výsledků vyplývá, že do 15 hm. % MP se pevnost v tlaku oproti referenčnímu vzorku stále zvyšuje. Při použití vápencového prachu (VP) pevnosti v tlaku při stáří vzorků 28 dní nabývaly průměrných hodnot 27,1 MPa pro 5 hm. % VP, 28,2 MPa pro 10 hm. % VP a 25 MPa pro 15 hm. % VP. U VP již není rostoucí trend pevnosti v tlaku až do 15 hm. % VP a všechny pevnosti v tlaku byly nižší než u referenčních vzorků.



Obrázek 7 – Pevnost v tlaku v závislosti na stáří vzorků (Binici et al. 2007).

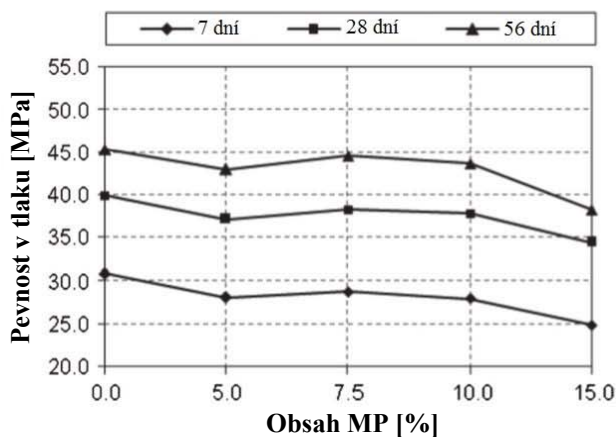
Dále autoři uvádějí, že s rostoucím obsahem prachu se zvyšuje odolnost proti síranu sodnému. Odolnost proti síranu sodnému je větší u vzorků s mramorovým prachem oproti vzorkům s vápencovým prachem a referenčním vzorkům. Stejný trend platil i u nasákavosti. Betony s použitým mramorovým prachem měly menší hloubku průniku vody. Při zkoumání odolnosti proti otěru autoři zjistili, že použití prachu nezlepšuje tuto vlastnost. U některých směsí byla odolnost proti otěru shodná s referenčními vzorky, ale u některých hlavně s použitím mramorového prachu se tato odolnost snížila (Binici et al. 2007).

V práci od autorů Aliabdo et al. (2014) je zkoumána možnost použití mramorového prachu ve dvou aplikacích. První aplikací je modifikace cementu použitím mramorového prachu a druhou aplikací bylo použití mramorového prachu do betonu jako náhrady za cement nebo jako náhrady za písek. Autoři nahrazovali ve své studii pojivo a poté i plnivo postupně od 0,0 hm. %, 5,0 hm. %, 7,5 hm. %, 10,0 hm. % až po 15 hm. % mramorového prachu. Dále použili poměr vody k cementu (v/c) a poměr vody k mramorovému prachu (v/p) tak, aby byl 0,50 a 0,40. Ve studii zkoumali fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti cementové pasty a betonu, který byl modifikován mramorovým prachem. Výsledky porovnávali s referenčními vzorky bez modifikace MP. Dále byla provedena termo-gravimetrická analýza (TGA), analýza rentgenovou difrakcí (XRD) a analýza rastrovacím elektronovým mikroskopem (SEM analýza). Pro výrobu vzorků byl použit portlandský cement CEM I 42,5 N. Jako jemný písek byl použit křemičitý písek s jemnostním modulem 2,35 a jako kamenivo byl použit drcený růžový vápenec frakce 0 – 19 mm. Referenční kontrolní vzorky měly stanovený obsah cementu na 400 kg/m³ a vodní součinitel 0,5. Referenční směs byla složena z 20 hm. % cementu, 30 hm. % jemného písku a 50 hm. % kameniva. Mramorový prach, který byl používán k modifikaci, měl střední velikost zrna 8 μm a maximální velikost zrna 52 μm. Vyrobené vzorky byly až do doby testování skladované ve vodní lázni. Provedená SEM analýza ilustruje vlastnosti mikrostruktury cementových past při stáří 28 dní. Na následujícím obrázku je znázorněna fotografie mikrostruktury referenčního vzorku, vzorku s obsahem mramorového prachu 7,5 hm. % a 10 hm. % jako náhrady za cement. Z analýzy je patrné, že přidáním mramorového prachu je materiál hutnější, méně porézní než referenční vzorky (Obrázek 8). V tomto stáří vzorků se mikrostruktura cementových past skládá z amorfních částic krystalů kalcium silikát hydrátu (C-S-H) a kalcium hydrátu (C-H), které se objevují v masivních vrstvách. Dále jsou zde jehly ettringitu viditelné v pórech.

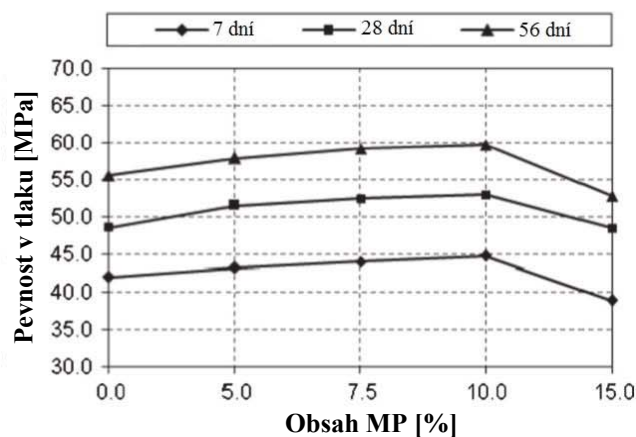


Obrázek 8 – Mikroskopická (SEM) analýza cementové pasty (Aliabdo et al. 2014).

Z výsledků zkoušek pevnosti v tlaku betonu, které autoři prováděli při stáří vzorků 7, 28 a 56 dní, bylo zjištěno, že při použití 15 hm. % mramorového prachu jako náhrady za cement je pevnost v tlaku buď srovnatelná, nebo nižší než u referenční směsi (Obrázek 9). Při náhradě písku mramorovým prachem až do 15 hm. % se pevnost betonu v tlaku zvyšuje a zároveň lze použít menší vodní součinitel (Obrázek 10) (Aliabdo et al. 2014).

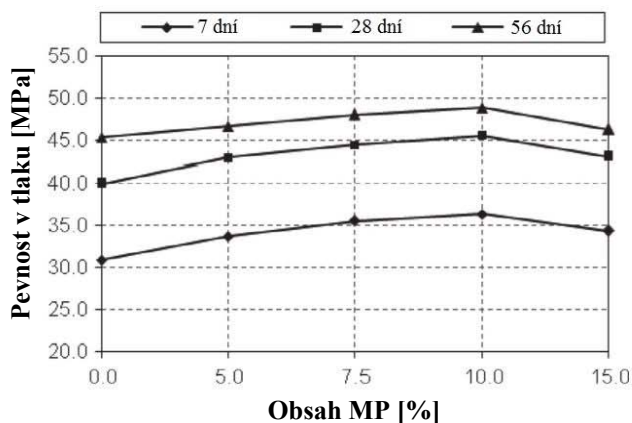


Beton s poměrem v/p = 0,50

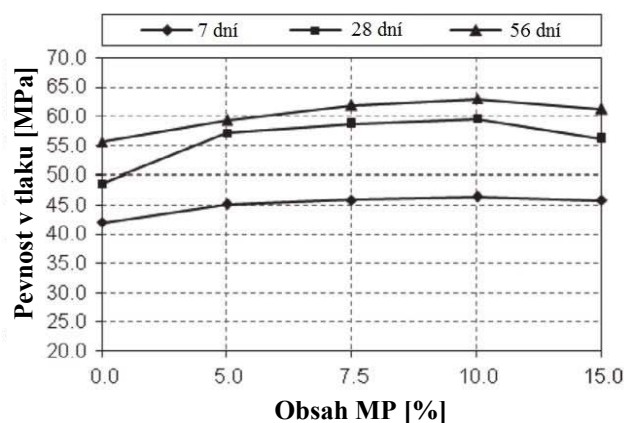


Beton s poměrem v/p = 0,40

Obrázek 9 – Výsledky zkoušek pevnosti v tlaku betonu vyrobeného z mramorového prachu jako náhrada cementu (Aliabdo et al. 2014).



Beton s poměrem v/c = 0,50



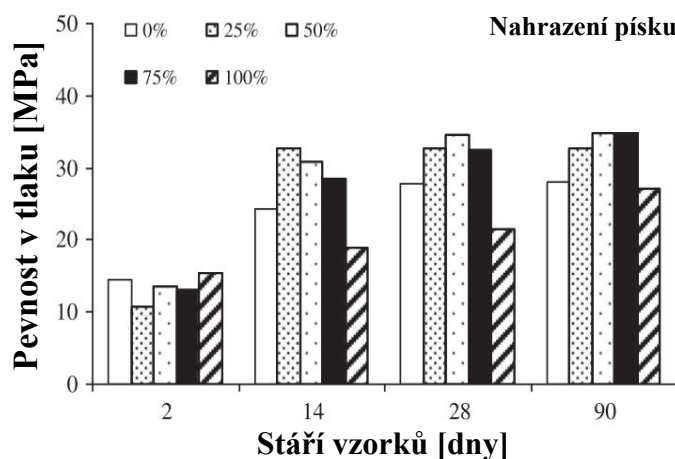
Beton s poměrem v/c = 0,40

Obrázek 10 – Výsledky zkoušek pevnosti v tlaku betonu vyrobeného z mramorového prachu jako náhrada písku (Aliabdo et al. 2014).

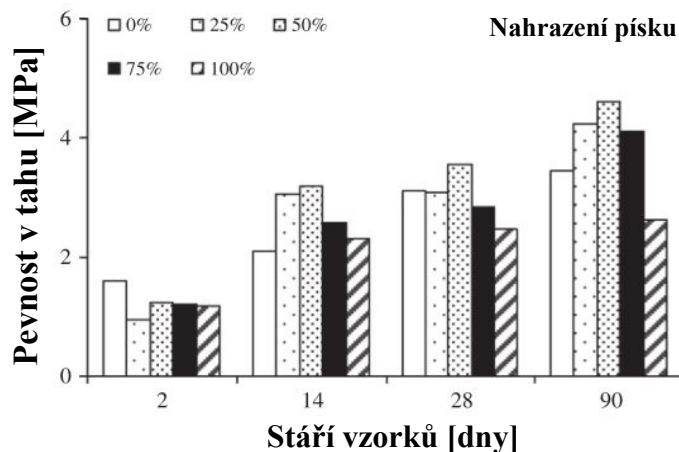
Autoři článku v závěru vyvodili následující závěry, kromě těch již uvedených. Počáteční doba tuhnutí a konečná doba tuhnutí není modifikací mramorovým prachem ovlivněna. Zároveň použití mramorového prachu významně neovlivňuje smrštění. Z TGA analýzy bylo zjištěno, že nedochází použitím mramorového prachu k žádné chemické změně v porovnání s referenčními vzorky. Použitím mramorového prachu jako náhrady za pojivo nebo plnivo až do 15 hm. % je pozitivně ovlivněna soudržnost betonu s ocelovou výztuží. Maximální zlepšení soudržnosti bylo zaznamenáno při nahrazení 10 hm. % pojiva nebo plniva. Vzorky s použitím mramorového prachu měly menší pórovitost než referenční vzorky. Obecně platí, že použití mramorového prachu jako náhrady písku má výraznější vliv na mechanické vlastnosti betonu ve srovnání s použitím jako náhrady cementu (Aliabdo et al. 2014).

Další publikace zabývající se možností využití mramorového odpadu je od autorů Hebhoub et al. (2011). Studie těchto autorů se zabývala možností využití mramorového odpadu jako náhrady přírodního kameniva při výrobě betonu. K výrobě vzorků používali recykláty z bílého mramorového odpadu ve formě písku a štěrku. Jimi používaný bílý mramor byl velmi čistý a obsahoval 99,05 % CaCO_3 . Přírodní písek, který používali pro referenční vzorky, měl jemnostní modul (modul zrnitosti) 1,95. Znamená to, že přírodní písek byl jemný, což přispívá k lepší zpracovatelnosti betonové směsi na úkor jeho pevnosti. Naopak jemnostní modul recyklovaného písku byl 3,12 a jednalo se tedy o hrubý písek, který negativně ovlivnil zpracovatelnost, ale pozitivně ovlivnil odolnost betonu proti otěru. Dále konstatovali, že recyklovaná kameniva mají vyšší obsah uhličitánů než ta přírodní, což zlepšuje vazbu cementové pasty. Autoři vyrobili tři typy betonových směsí. Prvním typem byla betonová směs, kde nahradili přírodní písek recyklovaným pískem a to v rozsahu 25 %, 50 %, 75 % a 100 % (směs S). Ve druhém typu betonové směsi nahradili přírodní štěrk recyklovaným štěrkem v rozsahu 25 %, 50 %, 75 % a 100 % (směs G). V poslední betonové směsi nahradili přírodní písek i štěrk recyklovaným pískem a štěrkem v rozsahu 25 %, 50 %, 75 % a 100 % (směs M). Všechny směsi porovnávali s referenční směsí, která obsahovala pouze přírodní kamenivo. Všechny směsi obsahovaly konstantní množství cementu 350 kg/m^3 a jednalo se o cement CEM I 42,5 N. Vodní součinitel byl taktéž u všech směsí konstantní 0,5. Autoři zkoumali objemovou hmotnost směsí za účelem zjištění obsahu vzduchu v čerstvé betonové směsi. Zpracovatelnost směsi ověřovali zkouškou rozlitím. Dále se v práci zabývali pevnostmi v tlaku a v prostém tahu, které zjišťovali při stáří vzorků 2 dny, 14 dní, 28 dní a 90 dní. Tlakové zkoušky byly prováděny na válcích o rozměrech $16 \times 32 \text{ cm}$ a pevnost v prostém tahu a pevnost v tahu za ohybu byla zkoušena na hranolech o rozměrech $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$. Z výsledků, které autoři uvádějí, je patrné, že nahrazení přírodního kameniva za recyklované může ovlivňovat

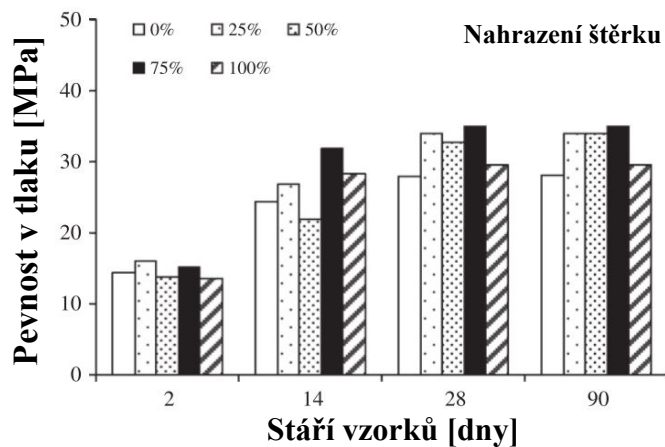
objemovou hmotnost výsledného materiálu. Nejnižší objemové hmotnosti byly dosaženy u směsi G, naopak nejvyšší objemové hmotnosti dosahovaly směsi S při substituci 100 % přírodního kameniva. Pórovitost ztvrdlého betonu je důležitá z důvodu trvanlivosti a mrazuvzdornosti betonu. Při použití recyklovaného kameniva bylo patrné snížení pórovitosti při náhradě 25 %, 50 % a 75 %. Zpracovatelnost se u všech směsí při použití recyklovaných kameniv zhoršila. Má na ni, ale vliv třídění, tvar jemných kameniv a podíl jemné a hrubé frakce kameniva. Hlavním kritickým parametrem pro zpracovatelnost je větší nasákavost přírodních kameniv než kameniv z mramorového odpadu. Z tohoto důvodu by bylo nutné pro lepší výsledky dále zkoumat vodní součinitel jednotlivých směsí. Pevnost v tlaku a tahu jsou jedny z nejdůležitějších vlastností betonu. Autoři sledovali vývoj těchto vlastností, které byly substitucí ovlivněny. Směs S se vyznačuje významným nárůstem pevnosti v tlaku i v prostém tahu při náhradě 25 %, 50 % a 75 % přírodních kameniv. Při nahrazení 100 % přírodního písku se pevnosti v tlaku i v prostém tahu naopak snížily (Obrázek 11 a Obrázek 12). U směsí G (Obrázek 13 a Obrázek 14) a M (Obrázek 15 a Obrázek 16) již ke snížení pevnosti v tlaku a v prostém tahu při 100% nahrazení přírodních kameniv nedochází, ale pevnosti jsou téměř shodné s referenční směsí. Z výsledků všech betonových směsí, u kterých došlo k substituci některých přírodních kameniv v rozsahu 25 %, 50 % a 75 %, je patrné zlepšení pevnosti v tlaku a v prostém tahu (Hebhoub et al. 2011).



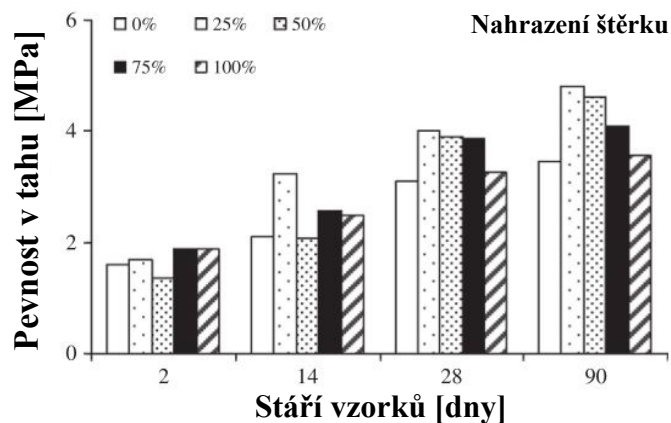
Obrázek 11 – Pevnosti v tlaku směsi S v závislosti na stáří vzorků (Hebhoub et al. 2011).



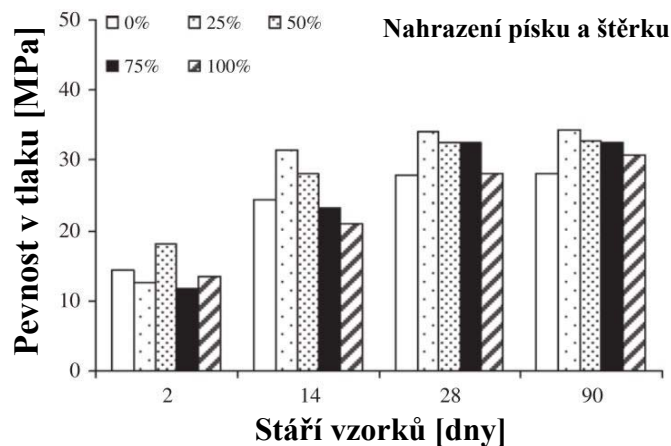
Obrázek 12 – Pevnosti v tahu směsi S v závislosti na stáří vzorků (Hebhoub et al. 2011).



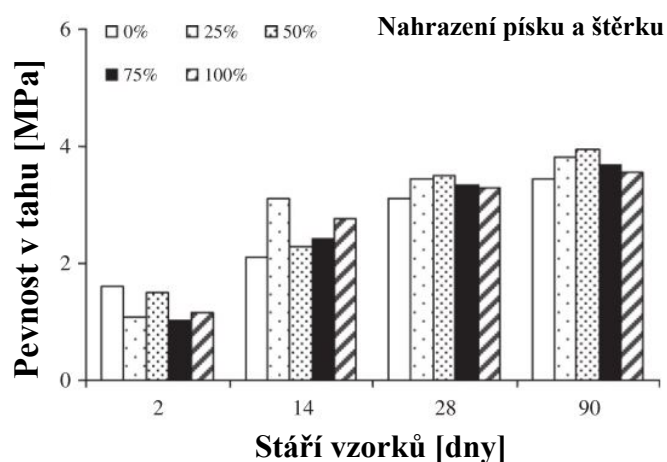
Obrázek 13 – Pevnosti v tlaku směsi G v závislosti na stáří vzorků (Hebhoub et al. 2011).



Obrázek 14 – Pevnosti v tahu směsi G v závislosti na stáří vzorků (Hebhoub et al. 2011).



Obrázek 15 – Pevnosti v tlaku směsi M v závislosti na stáří vzorků (Hebhoub et al. 2011).



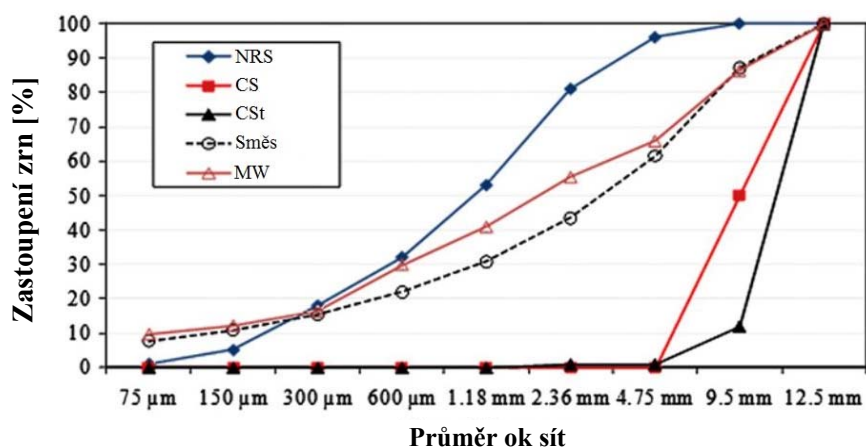
Obrázek 16 – Pevnosti v tahu směsi M v závislosti na stáří vzorků (Hebhoub et al. 2011).

Další publikace se zabývaly například užitím těchto odpadních materiálů jako náhrady či modifikace cementu (Aruntaş et al. 2010), práce zabývající se použitím mramorových odpadů do betonu a omítek (Corinaldesi et al. 2010), (Ergün 2011), (Omar et al. 2012), (Vardhan et al. 2015) a (Molnar a Manea 2016), studie ukazující možnost využití u samozhutnitelných betonů (SCC), které například řešili autoři Gesoğlu et al. 2012, Hunger a Brouwers 2008, Sadek et al. 2016 a Tennich et al. 2015, nebo při použití mramorového odpadu do betonu jako náhrady přírodního kameniva (Kore a Vyas 2016).

2.2.2 Vliv odpadního materiálu na další vybrané užitné vlastnosti

Odvětvím, kterému se při využití kamenných odpadů věnuje mnoho autorů, je i cihlářský průmysl. Autoři se v publikacích zabývají využitím odpadních materiálů na bázi mramoru a vápence při výrobě prvků pro zdění. V těchto pracích je z velké části řešen vliv na vybrané mechanické vlastnosti prvků, jako je jejich pevnost v tlaku a tahu za ohybu. Dalšími faktory, které jsou řešeny u prvků pro zdění, jsou například odolnost proti otěru, nasákavost, mrazuvzdornost a další. Postupně se budu věnovat vybraným publikacím a jejich výsledkům.

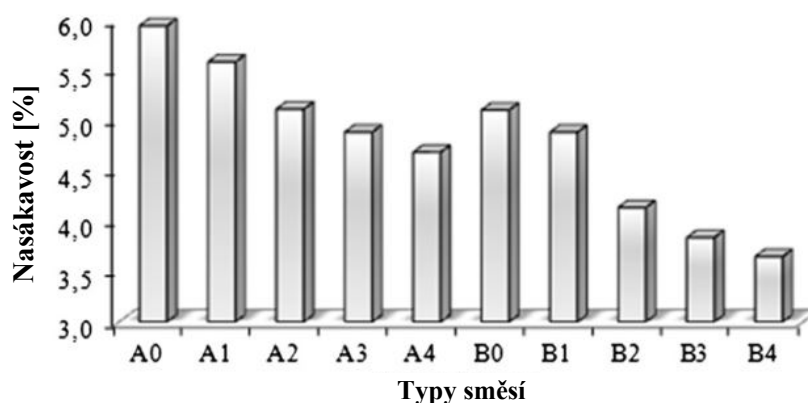
Publikace je od autorů Gencel et al. (2012), kteří zkoumali vybrané vlastnosti betonových dlažebních kostek s obsahem mramorového odpadu (MW). Autoři používali odpadní materiály jako náhradu za přírodní jemné a hrubé kamenivo. Autoři zkoumali deset druhů betonových směsí. Používali dva druhy portlandského cementu a to CEM II 32,5 N a CEM II 42,5 N. Ve všech směsích byl zachován konstantní obsah cementu 400 kg/m^3 . Směsi s cementem CEM II 32,5 N byly označeny jako směsi A, směsi s cementem CEM II 42,5 N byly označeny jako směsi B. U všech směsí byl zachován poměr kameniva k cementu $(a/c) = 4,5$. Vodní součinitel u směsí byl proměnný a pohyboval se od $(v/c) = 0,4$ do $(v/c) = 0,6$. Jako přírodního kameniva bylo použito čistého říčního písku (NRS), drceného písku (CS) a drceného kameniva (CSt). Kamenivo CSt obsahovalo největší zrna $12,5 \text{ mm}$ a jeho objemová hmotnost v suchém stavu byla $2,7 \text{ g/cm}^3$. Říční písek měl objemovou hmotnost v suchém stavu $2,67 \text{ g/cm}^3$ a drcený písek měl $2,69 \text{ g/cm}^3$. Zastoupení zrn kameniva je zachyceno na křivce zrnitosti (Obrázek 17).



Obrázek 17 – Křivka zrnitosti jednotlivých kameniv a směsi kameniv (Gencel et al. 2012).

Referenční vzorky označené jako A0 a B0 byly vyrobeny s použitím přírodního kameniva, které bylo smícháno v poměru 25 % NRS, 25 % CS a 50 % CSt. Drcený mramorový odpad a mramorový prach použitý v tomto výzkumu pochází ze zpracovatelských závodů v Turecku. Autoři zkoumali vzorky, ve kterých nahrazovali přírodní kamenivo za kamenivo z mramorového odpadu. Ve vyrobených směsích postupně nahrazovali 10 hm. %, 20 hm. %, 30 hm. % a 40 hm. % kameniva kamenivem z mramorového odpadu. Při výrobě vzorků byl použit lisovací stroj, který za použití tlaku a vibrací vzorky hutnil až k úplnému ztuhnutí. Všechny vzorky byly vytvrzovány za stálé teploty $20 \text{ }^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti 65 %. Vzorky byly testovány při stáří 3 dny, 7 dní a 28 dní a jejich hmotnost se pohybovala v rozmezí od 3,0 kg do 3,3 kg. Autoři zjišťovali z mechanických vlastností jednoosou pevnost v tlaku, pevnost v tahu a v tahu

za ohybu. Také byla zjišťována odrazová tvrdost Schmidtovým kladívkem. Dále autoři zkoumali vliv použití mramorového odpadu, jako kameniva, na nasákavost. Všechny vzorky byly podrobeny 30 cyklům zmrazování a rozmrazování. Nejprve byly vzorky 2 h zmrazovány na -20 ± 2 °C a následně rozmrazovány na 4 ± 1 °C. Autoři ještě zkoušeli na dlažebních kostkách (vzorcích) odolnost proti otěru pomocí brusného korundového prachu. Z výsledků, které autoři uvádí, je patrné, že s rostoucím obsahem mramorového odpadu se snižuje objemová hmotnost materiálu a zároveň je nutné zvyšovat vodní součinitel pro zachování stejné zpracovatelnosti směsi. Při použití cementu CEM II 42,5 N je možno použít menší vodní součinitel a tím je materiál ve výsledku hutnější. Autorům při měření pevnosti v tlaku vyšlo, že se zvyšujícím obsahem MW se pevnost snižuje. Vzájemná pevnost v tlaku je spojena s růstem objemové hmotnosti vzorků. Zmíněný výsledek je odlišný od prací z předchozí kapitoly (2.2.1 Vliv odpadního materiálu na pevnostní charakteristiky). Autoři článku toto tvrzení ověřovali použitím Schmidtova kladívka pomocí odrazové tvrdosti a z tohoto měření jim vyšel stejný klesající trend. Autory měřený modul pružnosti se také snižoval se zvyšujícím se obsahem mramorového odpadu. V publikaci uvádí ještě vztah mezi pevností v tlaku a modulem pružnosti. Nasákavost vzorků souvisí s distribucí a systémem pórů v zatvrdlém betonu. Kamenivo také může obsahovat póry, ale nejsou obvykle spojeny se systémem pórů v matici. Vliv kameniva na nasákavost je tedy malý. Nasákavost je hlavně ovlivněna použitým cementem a jeho jemností. Nasákavost také významně ovlivňuje vodní součinitel. V důsledku přítomnosti malých částic mramorového prachu se nasákavost se zvyšujícím obsahem MW snižuje (Obrázek 18).



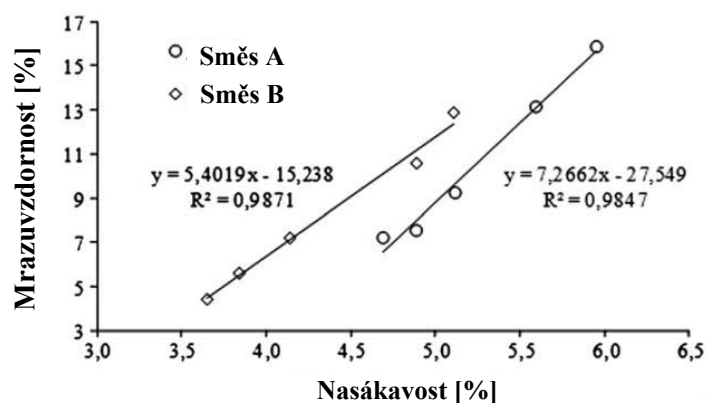
Obrázek 18 – Nasákavost v závislosti na typu směsi (10 % = 1; 20 % = 2; 30 % = 3; 40 % = 4) (Gencel et al. 2012).

Výsledky zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů (FTC) ukazují, že betony ztrácejí pevnost v tlaku. Betony obsahující mramorový odpad měly menší úbytek pevnosti v tlaku než referenční směsi (Tabulka 1). Vliv na mrazuvzdornost má i druh použitého cementu. Směsi s použitým cementem CEM II 42,5 N mají menší úbytky pevnosti než betony s cementem CEM II 32,5 N.

Tabulka 1 – Úbytek pevnosti v tlaku po FTC (Gencel et al. 2012).

Typ směsi	Úbytek pevnosti v tlaku[%]
A0 – referenční vzorek CEM II 32,5 N	15,87
A1 – 10 % MW (CEM II 32,5 N)	13,12
A2 – 20 % MW (CEM II 32,5 N)	9,22
A3 – 30 % MW (CEM II 32,5 N)	7,52
A4 – 40 % MW (CEM II 32,5 N)	7,19
B0 – referenční vzorek (CEM II 42,5 N)	12,85
B1 – 10 % MW (CEM II 42,5 N)	10,56
B2 – 20 % MW (CEM II 42,5 N)	7,20
B3 – 30 % MW (CEM II 42,5 N)	5,62
B4 – 40 % MW (CEM II 42,5 N)	4,43

Zdá se, že vzorky obsahující MW absorbují méně vody a jsou tudíž méně ovlivněny FTC. Vztah mezi mrazuvzdorností a nasákavostí znázorňuje tuto skutečnost (Obrázek 19). Při FTC vznikají mikrotrhliny především mezi cementovou pastou a kamenivem. S počtem FTC roste i množství pórů ve struktuře, které se plní vodou a tak dále narušují strukturu materiálu.



Obrázek 19 – Závislost mrazuvzdornosti na nasákavosti (Gencel et al. 2012).

Autory zjišťovaná odolnost proti oděru je velmi důležitá u stavebních materiálů, převážně pak u materiálů, kde účinkují brusné síly, jako jsou například chodníky, podlahy a silnice. Uvedené opotřebení je menší u směsí s použitím mramorového odpadu. Odolnost proti otěru tedy roste se zvyšujícím obsahem mramorového odpadu. Nejspíše je to zapříčiněno vyšší tvrdostí mramorového kameniva. Autor již dříve uvedl, že odolnost je závislá na tvrdosti kameniva v betonu, jelikož tvrdší kamenivo chrání měkčí cementovou pastu (Gencel et al. 2012).

Další publikace zabývající se možností využití mramorového odpadu pro výrobu bloků pro zdivo obytných budov je od autora Aukour (2009). Autor využíval mramorový odpad

ve formě mramorového kalu. Autor mramorovým kalem nahrazoval ve směsích různé množství jednotlivých frakcí plniva (kameniva). Objemy jednotlivých nahrazujících poměrů uvádí autor ve své práci ve vztahu k obsahu cementu. V každé směsi autor používá konstantní množství cementu. Byl vždy použit 1 kg cementu na jeden zdící blok. Autor v práci neuvádí konkrétní typ použitého cementu. Uvádí, že se jednalo o „černý cement (black cement)“. Z tohoto autorova označení usuzuji, že se dle obecného označení černými popisy jednalo o portlandský cement CEM I. Pevnostní třídu cementu, ale nelze z článku zjistit. V práci byly vyráběny vzorky (bloky) se substitucí přírodního kameniva za kamenivo z mramorového odpadu. Jako přírodní kamenivo byl používán štěrk z vápence o různých frakcích. První používanou frakcí byl vápencový štěrk frakce 6 – 9 mm, další frakce byla 3 – 5 mm. Vápencové štěrky byly nahrazovány mramorovým kalem o velikosti zrn menší než $363,5 \mu\text{m}$, který vyplňoval strukturu směsi. Druhá frakce z odpadního mramoru nahrazovala jemnou frakci vápencového štěrku (písku) a jednalo se o frakci s velikostí zrn 1 – 2 mm. Všechny autorem používané kaly dle zkoušek obsahovaly více než 50 % popílku a neobsahovaly těžké kovy. Jednalo se tedy o zdravotně nezávadné materiály. Sypná hmotnost použitého mramorového kalu byla za vysušeného stavu $1,4 \text{ g/cm}^3$ a hustota zrn mramorového kalu byla $2,85 \text{ g/cm}^3$. Publikace měla za cíl vytvoření stavebního zdícího prvku s vlastnostmi, které splňují požadavky místních standardů. Autor vytvořil více typů stavebních bloků v tloušťkách 100 mm, 120 mm, 150 mm a 200 mm, jako optimální uvádí bloky tloušťky 150 mm (Obrázek 20). Zdící bloky o tloušťce 150 mm se vyznačovaly dle výsledků zkoušek vynikajícími vlastnostmi z hlediska absorpce vody (nasákavost). Nasákavost byla dle výsledků zkoušek 7 hm. %.



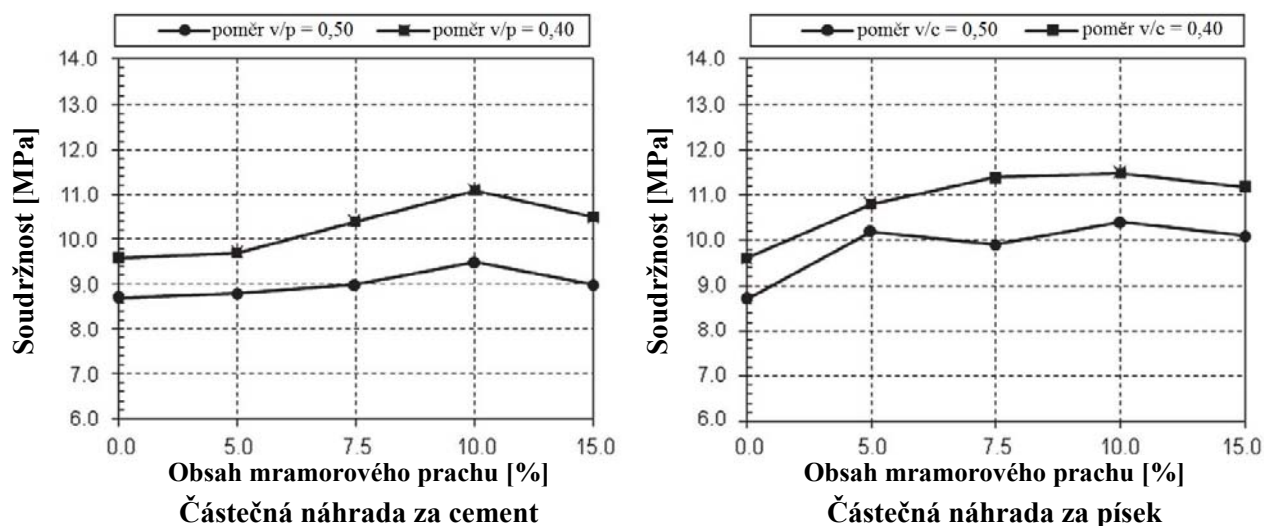
Obrázek 20 – Vyrobené vylehčené stavební bloky tloušťky 150 mm (Aukour 2009).

Autor stavební bloky sledoval i z hlediska smrštění a bloky vyrobené s použitím mramorového kalu vykazovaly menší smrštění. Použití mramorových odpadů v optimálním zastoupení mělo za důsledek zvýšení pevnosti v tlaku. Největšího zvýšení pevnosti v tlaku autor dosáhl u směsi 7, kde dosáhl pevnosti v tlaku 7,8 MPa. Dle autorem uváděných jordánských standardů je požadovaná pevnost v tlaku alespoň 3 MPa. K uváděnému požadavku se blíží většina stavebních bloků komerčně vyráběných v této lokalitě. Autor složení směsí uvádí v jednotkách poměrů. Nejlepší směs 7 měla složení 1 díl jemného přírodního kameniva, 2 díly hrubého přírodního kameniva, žádný přírodní písek, 0,75 kg cementu a 1,5 dílu mramorového kalu. Z výsledků autora vyplývá, že použití pouze mramorového kalu, s velmi jemnou frakcí, do klasické betonové směsi zlepšuje výsledky zkoušek v pevnosti v tlaku stavebních bloků, zmenší jejich nasákavost a smrštění. Vše je v důsledku použití jemnějšího plniva a vytvoření hutnějšího materiálu bez změny chemických reakcí a vazeb v materiálu. Závěrem autor poukazuje na vytvoření stavebních bloků, které jsou zdravotně nezávadné a šetrné k životnímu prostředí. Při optimálních poměrech jednotlivých surovin lze dosáhnout zlepšení důležitých vlastností pro stavební bloky určené pro zdění. Jedná se o vlastnosti, kterými jsou pevnost v tlaku a nasákavost. Použitím tohoto odpadního materiálu lze při zachování vlastností materiálů snížit nutnost čerpat další těžbou zemní zdroje (Aukour 2009).

2.3 Vodorovné konstrukce na bázi mramorového odpadu

V předešlé části je v publikacích řešen návrh různých směsí, ale nejsou zde vystiženy požadavky z norem. Požadavkům z norem se budu věnovat v této podkapitole. Zmíním zde požadavky na návrh betonové směsi a posuzování betonových konstrukcí. Uvažuji s materiálem za použití mramorových odpadů jako příbuzným materiálem betonu. Chování tohoto materiálu je podobné betonu. Dále mě k tomuto srovnání vedl fakt, že se jedná o modifikaci betonové směsi nebo o cementový kompozit s obdobným chováním.

Důvodem k tomuto tvrzení byla hlavně publikace autorů Aliabdo et al. (2014), kterou jsem již uváděl v kapitole 2.2.1 „Vliv odpadního materiálu na pevnostní charakteristiky“ jako druhou publikaci. Složení vzorků a další informace a výsledky jsou uvedeny ve jmenované kapitole. Nyní bych se chtěl zaměřit pouze na část publikace, kterou autor věnoval soudržnosti jím vyrobeného materiálu (cementového kompozitu s použitím odpadního mramoru) s betonářskou výztuží. Podle výsledků autora se soudržnost zvyšuje se zvyšujícím se obsahem mramorového prachu do 15 hm. %. Při použití mramorového prachu jako náhrady cementu má soudržnost menší zvýšení než při použití jako náhrady za písek. Nejvyšší nárůst soudržnosti je zaznamenán při použití 10 hm. % mramorového prachu. Soudržnost byla měřena při stáří vzorků 56 dní. Nárůst pevnosti spoje ocel – beton je zobrazen na následujícím obrázku (Obrázek 21).



Obrázek 21 – Soudržnost výztuže s matricí v závislosti na obsahu mramorového prachu (Aliabdo et al. 2014).

Procentuální nárůst soudržnosti na vzorcích stáří 56 dní s obsahem 5 hm. %, 7,5 hm. %, 10 hm. % a 15 hm. % mramorového prachu, jako náhrady za cement je 1 %, 3 %, 9 % a 3 % pro poměr $v/p = 0,50$ a 1 %, 8 %, 16 % a 9 % pro poměr $v/p = 0,40$. Při použití jako náhrady za písek byl nárůst 17 %, 14 %, 20 % a 16% pro poměr $v/c = 0,50$ a 13 %, 19 %, 20 % a 17 %

pro poměr $v/c = 0,40$. Závěrem autor uvádí, že při použití mramorového prachu jako náhrady za cement nebo náhrady za písek do 15 hm. % je soudržnost příznivě ovlivněna. Maximální zvětšení soudržnosti mezi výztuží a matricí je zaznamenána s použitím mramorového prachu jako náhrady za písek při obsahu mramorového prachu 10 hm. %.

2.3.1 Norma pro návrh betonové směsi

Návrhem betonových směsí se zabývá norma ČSN EN 206. Norma specifikuje požadavky na specifikace, vlastnosti a výrobu betonu. Odchytky od této normy se mohou vyžadovat nebo povolovat pro specifické typy betonů nebo specifické výrobky (např. pro prefabrikované výrobky). Dle této normy se námi navrhovaný materiál řadí mezi specifické typy betonu, z důvodu uvedených v předmětu normy. Důvody zařazení mezi specifické typy betonu:

- Obsah cementu menší než 260 kg/m^3 , což je obsah uvedený v normě pro třídu betonu C20/25. U třídy betonu C12/15 není mezní požadavek na obsah cementu stanoven.
- Použité pouze recyklované kamenivo se zrny o $D_{\max} = 4 \text{ mm}$.

Norma uvádí mezní hodnoty pro maximální vodní součinitel u jednotlivých pevnostních tříd betonu při použití cementu třídy pevnosti 32,5. Vodní součinitel je závislý na stupni vlivu prostředí a pevnostní třídě betonu. Maximální vodní součinitel je pro pevnostní třídu betonu C20/25 a stupeň vlivu prostředí XC1, kde $w/c = 0,65$. U pevnostní třídy betonu C12/15 maximální vodní součinitel není stanoven (ČSN EN 206).

2.3.2 Normy pro návrh a posuzování betonových konstrukcí

Posouzení vodorovných prvků v této práci bylo řešeno s ohledem na vlastnosti materiálu, které jsou podobné betonu, podle normy ČSN EN 1992-1-1 – EC 2. Uvedená norma řeší posuzování betonových konstrukcí. Zatížení bylo stanoveno podle normy ČSN EN 1991 – EC 1.

Norma udává úpravu charakteristických vlastností materiálů. Jedná se o redukci pevnosti dílčími součiniteli a součiniteli zohledňující například nepříznivé účinky způsobu zatěžování. Pro pevnost v tlaku betonu je vztah:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}, \quad (2.3.2-1)$$

kde f_{cd} je návrhová pevnost betonu v tlaku [MPa], f_{ck} je charakteristická pevnost betonu v tlaku [MPa], α_{cc} je součinitel zohledňující dlouhodobé účinky na pevnost v tlaku a nepříznivé účinky způsobu zatěžování (doporučená hodnota dle NP12 je 1) [-] a γ_c je dílčí součinitel betonu dle normy ($\gamma_c = 1,5$) [-].

Návrhovou mez kluzu betonářské výztuže stanovujeme pomocí vztahu:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}, \quad (2.3.2-2)$$

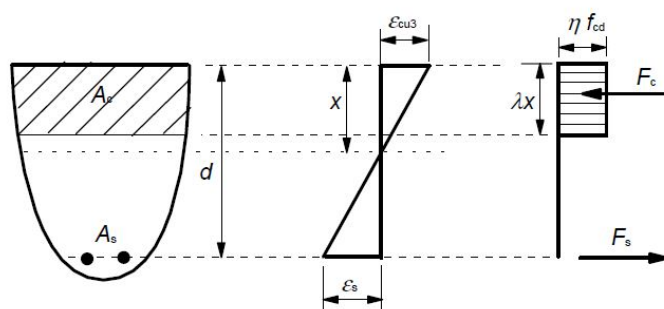
kde f_{yd} je návrhová mez kluzu betonářské výztuže [MPa], f_{yk} je charakteristická mez kluzu betonářské výztuže [MPa] a γ_s je dílčí součinitel betonářské výztuže dle normy ($\gamma_s = 1,15$) [-].

Ocelová výztuž musí být chráněna krycí vrstvou materiálu. Ochrana proti korozi betonářské výztuže závisí na objemové hmotnosti, kvalitě a tloušťce krycí vrstvy materiálu. Jmenované vlastnosti jsou závislé na vodním součiniteli a množství cementu dle ČSN EN 206-1. V našem případě lze kontrolu těchto vlastností pouze předpokládat, jelikož dle normy ČSN EN 206-1 je námi navržený materiál označen jako specifický typ betonu. Krycí vrstva se odvíjí od požadované trvanlivosti konstrukce a stupně vlivu prostředí, kterému je prvek vystaven. Krycí vrstva betonářské výztuže musí zajistit spolehlivé přenesení sil v soudržnosti beton-ocel, ochranu výztuže proti korozi a případnou požadovanou požární odolnost. Nominální krycí vrstva se určí ze vztahu:

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}, \quad (2.3.2-3)$$

kde c_{nom} je nominální krycí vrstva [mm], c_{min} je minimální krycí vrstva [mm] a Δc_{dev} je přídavek na návrhovou odchylku (dle NP je pro monolitické konstrukce $\Delta c_{dev} = 10$ mm a pro prefabrikované konstrukce $\Delta c_{dev} = 5$ mm) [mm].

Norma umožňuje použít zjednodušené pracovní diagramy v případě, že jsou rovnocenné nebo více konzervativní než pracovní diagramy nezjednodušené. Lze tedy předpokládat obdélníkové rozdělení napětí v tlačené části průřezu (Obrázek 22) a zároveň zanedbat pevnost betonu v tahu, což vyplývá z návrhu prvku na mezní stav únosnosti. Při mezním stavu únosnosti jsou již v tažené části průřezu trhliny.



Obrázek 22 – Předpoklad obdélníkového rozdělení napětí (ČSN EN 1992-1-1)

Rozpětí, na které musíme nosník navrhovat, je nazýváno účinné rozpětí nosníku. Navrhovat nosník pouze na světlost otvoru nelze. Rozpětí musíme uvažovat zvětšené o část uložení. Uvažovat rozpětí jako celou délku prvku nebo světlost zvětšit o celou délku uložení by bylo neekonomické. Účinné rozpětí nosníku tedy stanovíme jako:

$$l_{eff} = l_n + a_1 + a_2, \quad (2.3.2-4)$$

kde l_{eff} je účinné rozpětí nosníku [m], l_n je světlost vzdálenost mezi líci podpor [m] a hodnoty a_1 a a_2 jsou hodnoty a_i na každém konci rozpětí [m], které se určí jako minimální hodnota z poloviny délky uložení nebo poloviny výšky nosníku.

Návrh a posouzení ohybové výztuže nosníku se provádí dle mezních stavů únosnosti (MSÚ) a použitelnosti (MSP). Pro zjednodušený statický výpočet (výpočtový dokument EXCEL) jsem řešil zatím pouze MSÚ. Uvedu zde obecný postup návrhu a posouzení pro tento případ. Nejprve je nutné navrhnout potřebnou plochu výztuže, která se vypočítá podle vzorce, který vyplývá z předpokladu na Obrázek 22. V MSÚ podle předchozího obrázku musí platit:

$$M_{Ed} = A_s \cdot f_{yd} \cdot z, \quad (2.3.2-5)$$

kde M_{Ed} je návrhový moment od zatížení [kNm], A_s je plocha tažené výztuže [mm²], f_{yd} je návrhová mez kluzu betonářské výztuže [MPa] a z je rameno vnitřních sil [mm].

Velikost ramene vnitřních sil lze odhadnout pomocí tabulek na základě součinitele μ , který vyjadřuje využití průřezu působícím ohybovým momentem. Na základě tohoto součinitele z tabulek odečteme součinitel ζ , který vyjadřuje poměr velikosti ramene vnitřních sil ke staticky účinné výšce průřezu. Z tohoto vzorce lze odhadnout velikost ramene vnitřních sil jako:

$$z = \zeta \cdot d, \quad (2.3.2-6)$$

kde d je staticky účinná výška průřezu [mm], kterou stanovíme z celkové výšky průřezu h [mm] od níž odečteme krytí výztuže c_{nom} [mm], profil třmínků \varnothing_{sw} [mm] a polovinu profilu ohybové výztuže nosníku \varnothing_s [mm], tedy podle vzorce:

$$d = h - c_{nom} - \frac{\varnothing_s}{2}, \quad (2.3.2-7)$$

Pro zjednodušení a prvotní návrh profilu výztuže uvažujeme hodnotu $\zeta = 0,9$. Tedy:

$$z = 0,9 \cdot d, \quad (2.3.2-8)$$

Úpravou a dosazením do vzorce 2.3.2-5 dostaneme potřebnou plochu výztuže:

$$A_{s,req} = \frac{M_{Ed}}{z \cdot f_{yd}} \cdot 10^6, \quad (2.3.2-9)$$

kde $A_{s,req}$ je potřebná plocha tažené výztuže [mm^2], M_{Ed} je návrhový moment od zatížení [kNm], f_{yd} je návrhová mez kluzu betonářské výztuže [MPa] a z je rameno vnitřních sil [mm].

Podle $A_{s,req}$ zvolíme profil a počet profilů ohybové výztuže (Např. $3 \times \text{Ø}8$ mm), z čehož získáme skutečnou plochu výztuže $A_{s,prov}$ [mm^2]. U návrhu výztuže je vždy otázkou jaké profily a jaký počet zvolit. Platí, že je vhodnější větší počet menších profilů. Souvislost má toto tvrzení s následným posuzováním na MSP (průhyby, šířka trhlin), které s menším počtem větších profilů obvykle nevyhoví.

Než se dostaneme k posouzení námi navržené výztuže, je nutné ověřit několik konstrukčních zásad. Konstrukčními zásadami jsme schopni ověřit, zda náš návrh není nevhodný. Z konstrukčních zásad se ověřuje, že námi navržená plocha výztuže je větší než minimální, aby nedošlo k porušení prvku křehkým lomem (porušení prvku bez varování). Zároveň se ověřuje umožnění dostatečného probetonování konstrukce a proto musí plocha výztuže být menší než maximální. Z důvodu zajištění rovnoměrného spolupůsobení výztuže s betonem a naopak z důvodu dobrého probetonování je potřeba ověřit maximální a minimální vzdálenosti prutů výztuže. U maximální rozteče se jedná o osovou vzdálenost prutů a u minimální rozteče prutů mluvíme o minimální světlé vzdálenosti mezi pruty výztuže.

Posouzení navržené výztuže vychází z rovnosti velikostí sil působících v betonu a v oceli, jak je znázorněno v obrázku 22. Vycházíme tedy z idealizovaného průběhu napětí a dostaneme:

$$F_c = F_s \\ \lambda \cdot x \cdot b \cdot \eta \cdot f_{cd} = A_{s,prov} \cdot f_{yd}, \quad (2.3.2-10)$$

kde F_c je výsledná síla v betonu [kN], F_s je síla ve výztuži [kN], λ je součinitel pro betony C50/60 a nižší roven 0,8[-], x je výška tlačené oblasti průřezu [mm], b je šířka průřezu [mm], η je součinitel pro betony C50/60 a nižší roven 1,0[-], f_{cd} je návrhová pevnost betonu v tlaku [MPa] a f_{yd} je návrhová pevnost betonářské výztuže [MPa].

Úpravou a dosazením do vzorce 2.3.2-10 dostaneme vztah pro výšku tlačené oblasti průřezu x [mm]:

$$x = \frac{A_{s,prov} \cdot f_{yd}}{0,8 \cdot b \cdot f_{cd}}, \quad (2.3.2-11)$$

Nyní lze odvodit vztah pro skutečnou velikost ramene vnitřních sil, nikoli jen odhad jako při návrhu výztuže:

$$z = d - \frac{\lambda}{2} \cdot x = d - \frac{0,8}{2} \cdot x, \quad (2.3.2-12)$$

Moment únosnosti průřezu lze poté zjistit ze vztahu:

$$M_{Rd} = A_{s,prov} \cdot f_{yd} \cdot z, \quad (2.3.2-13)$$

kde M_{Rd} je moment únosnosti průřezu [kNm], $A_{s,prov}$ je navržená plocha tažené výztuže [mm²], f_{yd} je návrhová pevnost betonářské výztuže [MPa] a z je skutečné rameno vnitřních sil [mm].

Konstrukce vyhoví na ohybové namáhání, pokud je splněna podmínka:

$$M_{Rd} \geq M_{Ed}, \quad (2.3.2-14)$$

Musíme ještě ověřit, zda je splněn předpoklad dostatečného protažení výztuže, na němž je tento předešlý postup založen. V našem případě se jedná pouze o zjednodušený návrh vodorovného prvku a ověření tohoto předpokladu zatím není provedeno. Z konstrukčních důvodů se v prvku navrhuje ještě konstrukční výztuž u horního líce prvku. Konstrukční výztuž slouží pro zachycení případných tahů u horních vláken prvku a jako opora pro vyvazování třmínků.

V prvku dochází také ke smykovému namáhání. Z tohoto důvodu je nutné ověřit únosnost tlačené diagonály. Pokud únosnost tlakové diagonály nevyhoví, nejsme schopni žádným množstvím smykové výztuže zajistit přenesení posouvajících sil. Únosnost tlakové diagonály $V_{Rd,max}$ se posuzuje podle vztahu:

$$V_{Rd,max} = v \cdot f_{cd} \cdot b \cdot z \cdot \frac{\cot \theta}{1 + \cot^2 \theta} \geq V_{Ed}, \quad (2.3.2-14)$$

kde V_{Ed} je posouvající síla od zatížení [kN], f_{cd} je návrhová pevnost betonu v tlaku [MPa], b je šířka průřezu [mm], z je rameno vnitřních sil v daném průřezu [mm], θ je úhel sklonu smykových trhlin (zjednodušeně uvažujeme $\cot \theta = 1,5$) a v je součinitel vyjadřující vliv přidavných namáhání podle vztahu:

$$v = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right), \quad (2.3.2-15)$$

kde f_{ck} je charakteristická pevnost betonu v tlaku [MPa].

Smykovou výztuž v podobě třmínek navrhujeme na posouvající sílu $V_{Ed,1}$ [kN], kterou uvažujeme ve vzdálenosti d od líce podpory. Posouzení únosnosti třmínek $V_{Rd,1}$ [kN] se provádí podle vztahu:

$$V_{Rd,1} = \frac{A_{sw} \cdot f_{yd}}{s_1} \cdot z \cdot \cot \theta \geq V_{Ed,1}, \quad (2.3.2-16)$$

kde f_{yd} je návrhová pevnost výztuže [MPa], z je rameno vnitřních sil v daném průřezu [mm], θ je úhel sklonu smykových trhlin (zjednodušeně uvažujeme $\cot \theta = 1,5$), A_{sw} je plocha jednoho dvoustřížného třmínku [mm^2], kterou vypočteme podle vztahu:

$$A_{sw} = \frac{n \cdot \pi \cdot \varnothing_t^2}{4}, \quad (2.3.2-17)$$

kde n je střížnost třmínku ($n = 2$), \varnothing_t je průměr profilu třmínku [mm] a s_1 je rozteč třmínku, kterou stanovíme z podmínky:

$$s_1 = \frac{A_{sw} \cdot f_{yd}}{V_{Ed,1}} \cdot z \cdot \cot \theta \quad (2.3.2-18)$$

Zároveň je nutné splnit konstrukční zásady pro maximální rozteče třmínek:

$$s_1 \leq \min(0,75 \cdot d; 400 \text{ mm}), \quad (2.3.2-19)$$

Jako poslední část u posouzení na smyk i na ohyb je nutné provést kontrolu stupně vyztužení. Je potřeba dodržet minimální i maximální meze procenta vyztužení (ČSN EN 1992-1-1 a Bílý 2015). Dále se posuzují prvky na MSP. Jelikož se jedná o prvotní zjednodušený návrh pro získání informací o možnosti použití našeho materiálu i pro vodorovné prvky, nebude zatím posouzení na MSP prováděno.

3 Cíle bakalářské práce

Cílem práce je návrh optimálního složení směsi obsahující malé množství cementu s využitím co největšího množství odpadního materiálu. Navržené směsi by měly sloužit pro návrh vodorovných prvků stavebního systému pro stavbu jednopodlažního objektu. Hlavním cílem je zjistit vliv poměrů použitých plniv ve směsi. Zjistit optimální poměr mezi obsahem mikromleté mramorové moučky a drceným vápencem frakce 0 – 2 mm v závislosti na vybraných mechanických vlastnostech materiálů, které jsou důležité pro návrh vodorovných prvků.

Nejprve je nutné navrhnout složení ucelené řady sad vzorků cementového kompozitu. Obsah cementu byl na základě požadavku, na co nejmenší jeho množství, navržen na 10 hm. %. Návrh množství vychází z poznatků získaných z publikace od autora Prošek (2016). Vstupní suroviny pro návrh složení směsí a navržené složení směsí řeším v kapitole 4.1.

Na vyrobených vzorcích následně zjišťuji vybrané mechanické vlastnosti. Jednotlivé výsledky mechanických vlastností a experimentální metody jejich měření jsem popsal v kapitolách 4.2 až 4.4. Vždy je uveden popis zkušební metody, způsob vyhodnocení zkoušek a výsledky zkoušek s diskuzí.

Ve spolupráci s Jaromírem Hrůzou jsme navrhli jednopodlažní nízkonákladový rodinný dům. Jaromír Hrůza provedl dispoziční řešení a rozměrovou koncepci objektu. Na základě jeho podkladů jsem zpracoval vizualizaci tohoto objektu a vizualizaci stavebního systému, pro který jsem řešil návrh vodorovných prvků.

Na příkladu navrženého vzorového objektu jsem vypracoval zjednodušený statický výpočet pomocí výpočtového dokumentu v programu MS EXCEL. Dokument na základě zadaných rozměrů objektu spočítá zatížení na vodorovný prvek stavebního systému (překlad). Dále vypočte požadovanou pevnost v tlaku materiálu pro výrobu zadaného překladu. Další část dokumentu je věnována posouzení s již vybraným konkrétním materiálem. V kapitole 4.6 jsem sepsal krátký návod na použití tohoto výpočetního dokumentu.