

Ing. Pavel Tesárek, Ph.D.

HABILITAČNÍ PRÁCE

**VYUŽITÍ MIKROMLETÝCH RECYKLOVANÝCH STAVEBNÍCH
MATERIÁLŮ VE STAVEBNICTVÍ**

České vysoké učení technické v Praze

2017

Poděkování:

Autor děkuje za spolupráci a získávání podkladů při psaní této habilitační práce Ing. Zdeňku Proškovi, Ing. Václavu Nežerkovi, Ph.D., Ing. Jaroslavu Topičovi a Ing. Janovi Trejbalovi. Dále bych rád poděkoval členům Katedry mechaniky Fakulty stavební ČVUT v Praze a především prof. Ing. Jiřímu Mácovi, CSc.

Speciální poděkování patří prof. Ing. Zdeňku Bittnarovi, DrSc., Ing. Martinu Lidmilovi, Ph.D., Ing. Janu Valentinovi, Ph.D., Ing. Tomáši Plachému, Ph.D., Ing. Patru Bittnarovi, Ph.D. a Ing. Josefu Fládrovi Ph.D. za dosavadní spolupráci a podporu.

Poděkování dále patří firmě Lavris, s.r.o., především panu Ing. Georgi Karráa, za poskytnutí testovaných materiálů a za jejich úpravu pomocí vysokorychlostního mletí.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině.

Abstrakt

Předložená habilitační práce je souhrnem několikaletého experimentálního výzkumu prováděného na Katedře mechaniky Fakulty stavební ČVUT v Praze. Předmětem výzkumu bylo ověřit možnost využití dvou běžných odpadů ze stavebního průmyslu – odpadního vápence a recyklovaného betonu. Hlavním cílem bylo využít nejmenší zrna s velikostí pod 1 mm, která v mnoha případech zůstávají nezpracovaná a tvoří i ekologickou zátěž. Několik vybraných stavebních odpadních materiálů bylo upraveno pomocí vysokorychlostního mletí a dále použito v navržených směsích na bázi cementu. V rámci experimentálního výzkumu byl stanoven soubor materiálových parametrů, které charakterizují vstupní suroviny před a po vysokorychlostním mletí (křivka zrnitosti, měrný povrch, chemické a mineralogické složení, vývoj hydratačního tepla atd.). Na základě předchozích poznatků bylo navrženo několik směsí s obsahem vybraných mikromletých materiálů, které redukovaly množství použitého cementu a přírodního plniva a mikroplniva. Na vyrobených vzorcích byl stanoven soubor materiálových vlastností (objemová hmotnost, pórovitost, smrštění, pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku a dynamický modul pružnosti). Perspektivní materiálové varianty byly modifikovány pomocí polyvinylalkoholu a pěnotvorných přísad. Na základě získaných sad materiálových vlastností bylo možno navrhnout složení malt, lepidel, omítacích směsí a plných a lehčených bloků nebo cihel s využitím maximálním využitím recyklovaných mikromletých stavebních materiálů pro stavební systém.

Abstract

The habilitation thesis presents a summary of several years of an extensive experimental research conducted at the Department of Mechanics Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague. The main objective was to verify the possibility of using two conventional wastes from the construction industry – waste limestone and recycled concrete. The main objective was to use the smallest grain size, below 1 mm. Such grains remain unprocessed and constitute an environmental burden. Selected building waste materials were ground using a high speed mill and mixed with Portland cement. The research agenda was focused on establishing parameters that most accurately characterize the input materials before and after high-speed grinding. These include a grading curve, specific surface, chemical and mineralogical composition, hydration heat development, etc. Secondly, several cement-based mixes, designed based on knowledge and experience with such materials, with additions of selected finely ground materials were tested. In particular, the study was focused on mass density, porosity, shrinkage, compressive and flexural strength, and dynamic Young's modulus of the hardened mixes. The most promising mixes were further modified by means of poly-vinyl alcohol (PVA) and foaming agents. The outcomes of such an extensive experimental study were used for optimization of the mixes, based on Portland cement and finely ground additives, to be used as mortars, pastes, plasters, or heavy/aerated building blocks. The emphasis was laid on maximization of fine-ground recycled building waste utilization.

OBSAH

1. ÚVOD	9
2. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	10
2.1 Problematika stavebního odpadu a jeho následné využití ve stavebním průmyslu	12
2.1.1 Vápenec a vápencová moučka	12
2.1.2 Beton a betonový recyklát	15
2.2 Využití mikromletých nebo jemnozrnných recyklovaných stavebních materiálů	17
2.2.1 Využití odpadního kameniva a moučky z těžby hornin se zaměřením na vápenec a mramor	17
2.2.2 Beton a betonový recyklát	20
2.3 Modifikace materiálových vlastností cementových materiálů	26
2.3.1 Využití vodorozpustných polymerů	26
2.3.2 Vylehčení cementové matrice pomocí pěny	29
3. EXPERIMENTÁLNÍ VÝVOJ STAVEBNÍHO SYSTÉMU S VYUŽITÍM MIKROMLETÝCH RECYKLOVANÝCH STAVEBNÍCH ODPADŮ	32
3.1 Vstupní suroviny a jejich specifikace	34
3.2 Úprava recyklovaných materiálů pomocí vysokorychlostního mletí	37
3.3 Použité experimentální metody	44
3.4 Výroba vzorků	45
3.5 Návrh směsí s mikromletým materiálem a jejich materiálové vlastnosti	46
3.6 Modifikace materiálových vlastností pomocí vylehčení – pěn.	55
3.7 Modifikace materiálových vlastností pomocí polymeru PVA	65
3.8 Další možnosti modifikace vlhkostních vlastností	71
4. DISKUSE VÝSLEDKŮ	74
4.1. Materiály pro recyklaci a jejich úprava pomocí vysokorychlostního mletí	74
4.2 Modifikace vlastností pomocí pěny	77
4.3 Modifikace pomocí PVA	82

5. PRAKTICKÉ APLIKACE	83
5.1 Grantové projekty	83
5.2 Praktické aplikace na zkušební stěně	85
5.3 Užité vzory s využitím mikromletých recyklovaných stavebních materiálů	87
5.4 Další možnosti využití získaných dat	101
5.5 Specifikace materiálů pro vzorový objekt	103
6. ZÁVĚR	106
LITERATURA	109
VLASTNÍ LITERATURA	120
SEZNAM TABULEK	125
SEZNAM OBRÁZKŮ	126
Příloha 1: Prezentace dosažených výsledků na mezinárodních veletrzích	129

1. Úvod

Prezentovaný experimentální výzkum navazoval na předchozí prováděné výzkumy v oblasti využití a modifikace odpadních nebo druhotných surovin a to především s materiály na bázi sádry, resp. sádrovce, cihelné drtě a betonové drtě. V současné době tvoří stavební odpad relativně velký podíl na celosvětové produkci odpadu. Číslo o odpadech, která platí celosvětově, jsou podobná i pro Českou republiku. Asi nejlogičtější a nejekologičtější možností jak nakládat se stavebním odpadem, je jeho opětovné využití – recyklace – právě ve stavebnictví. Část stavebního odpadu je dnes již recyklována, ale zbytek je pouze skládkován a není dostatečně využit.

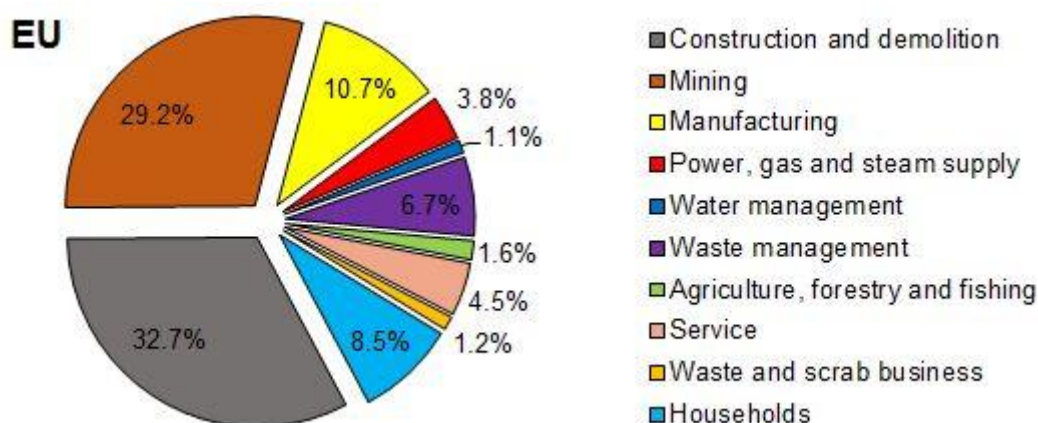
Předložená habilitační práce se zaměřuje na využití mikromletých stavebních materiálů, které pocházejí z recyklovaného odpadu frakce 0/1 mm na bázi betonu, resp. železobetonu, a vápencové moučky, resp. kamenné moučky. Pomocí vysokorychlostního mikromletí je možné frakci 0/1 mm tzv. aktivovat, a to buď pouhým zvýšením měrného povrchu původní suroviny, nebo pomletím můžeme „otevřít“ různé struktury. Takovýmto případem může být např. reaktivace nezhydratovaných slínkových minerálů v kompozitních materiálech na bázi cementu. Podle složení původní suroviny a způsobu technologie vysokorychlostního mletí je možné získat jemnozrnné materiály, které jsou jemnější než klasický cement nebo vápno.

Aby bylo možné mikromleté odpadní materiály efektivně využít, je nutné podrobně znát jejich chemické a mineralogické složení i jejich další charakteristiky (měrný povrch, tvar zrn, křivka zrnitosti atd.). Při znalosti uvedených charakteristik je možné využít mikromleté materiály jako náhradu některých surovin, které jsou běžně používány. V prvním případě je možné tyto materiál využívat jako plnivo, resp. mikroplnivo, do kompozitních materiálů na bázi cementu, vápna nebo jiných pojiv. V uvedeném případě bychom v podstatě využívali jen tvar, resp. jemnost mletí, mikromleté suroviny a vyplnili pomocí ní porézní systém. V druhém případě můžeme využít i chemickou aktivaci a zapojení mikromleté suroviny, které se podílí na tvorbě nových struktur, příkladem může být již zmiňovaný recyklovaný beton.

2. Současný stav problematiky

Hromadění odpadu je celosvětovým environmentálním a ekonomickým problémem. Vývoj nových metod a postupů pro efektivní a šetrné využití odpadních materiálů pomáhá snížit množství skládek a zároveň šetřit životní prostředí a přírodní zdroje. Vždyť jen v rámci EU (Evropské unie) bylo za rok 2012 vyprodukováno přes 2,5 miliardy tun odpadu a z toho jsme byli schopni recyklovat pouze necelých 10 hm. %. V případě ČR je poměr celkového a recyklovaného množství o něco vyšší, ale přesto je stále dost prostoru na zlepšení, protože za rok 2012 jsme vyprodukovali přes 23 milionu tun odpadu, a z toho jsme recyklovali něco málo přes 20 hm. %.

Když se blíže podíváme na statistiku produkce odpadu, a odpadní materiál rozdělíme dle typu, tak minerální a zpevnitelný odpad tvoří v EU 71 % hm. a v případě ČR necelých 54 hm. % veškerého produkovaného odpadu. Velkou část tohoto odpadu tvoří materiály s potenciálem pro využití právě ve stavebnictví na zásypy, terénní úpravy nebo jako stavební materiály. Při rozdělení produkce odpadního materiálu podle jednotlivých ekonomických odvětví je právě stavebnictví, které zahrnuje i demoliční práce, odvětvím s největší produkcí odpadu. V Evropské unii tvoří stavební a demoliční odpad téměř 33 hm. % ze zmíněných 2,5 miliard tun (Obr. 1) a v ČR tvoří přes 37 hm. % ze zmíněných 23 milionů tun. Právě proto má stavební průmysl velký potenciál na recyklaci (Topič 2015d).



Obr. 1: Procentuální zastoupení odpadů v EU podle hospodářských odvětví (Eurostat 2015).

Směrnice Evropského Parlamentu a rady (2008) stanoví, že prvním cílem odpadové politiky by měla být minimalizace nepříznivých účinků odpadů a nakládání s nimi s ohledem na lidské zdraví a životní prostředí. Zároveň nabádá členské státy EU, aby do roku 2020 přijaly opatření, která povedou k tomu, že 70 % celkové hmotnosti stavebního a demoličního odpadu, bude připravováno k opětovnému použití a jiným druhům materiálového využití, včetně zásypů. Zároveň navrhuje, aby od roku 2020 každá nová budova obsahovala alespoň 5 hm. % recyklovaných materiálů jako je papír, kov, plast, sklo apod.

Největším současným problémem v použití recyklovaných materiálů ve stavebnictví, obzvláště v případě konstrukcí pozemních staveb, je nedostatečná důvěra některých projektantů a především stavebníků k recyklovaným stavebním materiálům. Důvodem mohou být i některé problémové stavby a problémy vzniklé s jejich řešením, které negativně ovlivnily názor odborné i laické veřejnosti. Jednou z motivací pro využití odpadu je nižší cena recyklátu v porovnání s primárními surovinami. Rozdíl mezi cenami bohužel není, navzdory snaze provozovatelů recyklačních zařízení, dostatečný k motivaci používat recyklované materiály (Stibůrek 2008). Naopak, především z důvodu zvýšených nákladů na transport do místa aplikace, bývá recyklované kamenivo mnohdy dražší (Marinković et al. 2010). Proto je nutné začít vnímat recyklaci z hlediska budoucnosti dalších generací a postarat se o její maximální implementaci do stavebního průmyslu.

Dosud nedostatečně využívaným odpadem je odpad pocházející z demolic stavebních konstrukcí. Největší část demoličního odpadu pochází ze starých budov a dopravních staveb. Proto obsahuje velké množství složek (příměsí) na bázi asfaltu, betonu a keramického odpadu ve formě cihel, obkladů a tašek. Odpad obsahující asfalt a beton je často aplikován do nových asfaltových směsí určených pro dopravní stavby (Lee et al. 2012). Starý beton a keramický odpad se ve své nejjednodušší podobě používá na zásypy a úpravy zemin. Rovněž ho lze používat jako podkladní vrstvy komunikací (Pasandín et al. 2015) nebo jako povrchy nezpevněných komunikací (Jiménez 2012). Další oblastí, kde je možné znovu použít odpad obsahující beton a keramiku, jsou materiály pro nosné či nenosné konstrukce budov. Demoliční odpad tvoří obvykle z velké části recyklovaný beton, který má velký potenciál pro různé aplikace ve stavebnictví. Je to především proto, že beton často tvoří největší část stavebních konstrukcí.

2.1 Problematika stavebního odpadu a jeho následné využití ve stavebním průmyslu

Jak již bylo naznačeno v předchozí části, tato práce je zaměřena především na využití nejjemnějších částí (moučky, prachu) stavebního odpadu vzniklého při recyklaci betonového materiálu nebo při těžbě a zpracování hornin. Rešeršní část je zaměřena především na dva typické zástupce těchto materiálů.

Prvním materiálem je vápenec, resp. mramor, a druhým je betonový odpad. U obou materiálů je problematické využití nejnižší frakce 0/1 mm, která je ve většině případů považována za nevyužitelnou a tento jemný materiál je skládkován nebo znehodnocen.

2.1.1 Vápenec a vápencová moučka

Během těžby a zpracování hornin vznikají dva druhy odpadu. Prvním je pevný odpad vzniklý během těžby hornin a druhým je odpad vzniklý při zpracování bloků horniny na požadované tvary. Mezi odpady vzniklé během těžby hornin řadíme štěrky, kamenivo, písky, jíly a další materiály (zrna větší než 125 μm), které jsou zpravidla používány jako kamenivo do betonu, do hutněných asfaltových vrstev, pro stabilizované podklady, nestmelené vrstvy a pro různé druhy zemních prací. 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 125 μm), které mohou tvořit např. plnivo ve správkových maltách jako náhradu za vápenec. Pro dosažení optimálních vlastností může maltová směs obsahovat až 80 hm. % brusných kalů, to představuje výrazné snížení nákladů na vstupní surovinu (Ledererová 2008).

Podíl odpadů vzniklých při zpracování hornin na primární surovině vytěžené v lomech se pohybuje v České republice v desítkách procent. Jejich absolutní množství je proto enormní. 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 (2002) odhaduje roční produkci tohoto odpadního materiálu na 2,5 milionů tun. Množství tohoto odpadu každým rokem stoupá a jeho využití je nedostatečné. Z těchto důvodů množství odpadu uloženého na skládkách bylo v roce 2010 odhadováno na 20 milionů tun (Kotecký 2000). Dříve řada provozovatelů stavěla u lomů malé

drtiče odpadu, které zpracovávaly odpadový 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. Uvedený způsob úpravy odpadu se udržel až do 50. let minulého století, kdy zanikl. V 70. letech byly provedeny pokusy s jejím obnovením na lomech těžících dekorační kámen v žulových oblastech, kvůli nerentabilitě však zanikly (Kotecký 2000).

Druhou možností je odpad vzniklý během těžby a úpravy kamene. Na příkladu Egypta je možné si udělat představu o produkci odpadu z kamene. Kamenný průmysl v Egyptě ukázal za posledních 16 let obrovský vývoj, investice v tomto odvětví činily více než 1,5 miliardy dolarů, a i díky tomu je Egypt na páté příčce celosvětového žebříčku mezi zeměmi produkující kámen. Dále se Egypt zařadil celosvětově na čtvrté místo v produkci vápence, mramoru a žuly. Podle výroční zprávy z roku 2011 je Egypt celosvětově na druhém místě v těžbě bėžového mramoru. Většina této těžby pochází z průmyslové zóny Shaq El Thoaban, která se nachází východně od Káhiry (EEAA 2014).

Velká poptávka po vápenci a mramoru na vývozních trzích vedla ke zvýšení produkce bez ohledu na způsob a kvalitu těžby. Zvýšení produkce bylo docíleno použitím odstřelu, který má destruktivní vliv na kamenolom a způsobuje obrovské množství odpadu, odhady se pohybují až okolo 66 %, odhadované množství pro Egypt je 6,4 milionů tun ročně (Mashaly et al. 2012). Vzniklý odpad se skladuje v oblastech poblíž míst (z důvodů dopravy), kde dochází k těžení, ale zároveň brání dalšímu rozšiřování kamenolomů a tím má v podstatě negativní vliv na udržitelný rozvoj v tomto regionu. Velké množství odpadu vyprodukují i tovární linky, které dále zpracovávají mramor, ty se nacházejí převážně hned v okolí kamenolomů.

Tovární linky na zpracování mramoru tvoří dva druhy odpadů. První je ve formě pevných odpadů, které vznikají vyřazením mramorových bloků z linky kvůli jejich špatnému tvaru nebo pokud jsou bloky rozbité nebo popraskané. Druhá forma odpadů je mramorový kal, který vzniká během řezání bloku nebo během procesu broušení a leštění, tedy finální úpravy povrchů. Odpad, který vyprodukují tovární linky v Egyptě, se odhaduje na jeden milion tun ročně. Většina tohoto odpadu je ukládána v blízkosti továren bez ohledu na jejich další možné využití, viz např. Obr. 2 a Obr. 3 (Mashaly et al. 2012).



Obr. 2: Ukládání mramorového kalu v okolí továren (Mashaly et al. 2012).



Obr. 3: Ukládání mramorového kalu v okolí továren (Aliabdo et al. 2014).

S rostoucím množstvím produkce vápence, mramoru a dalších hornin v Egyptě, roste i množství vyprodukovaného odpadu, který není dále efektivně a v dostatečném množství zpracováván, a je tedy pouze skládkován. Skládkování je prováděno nedostatečně, v mnoha případech se jedná o vysypání odpadu na nejbližší místo, resp. hromadu.

V budoucnu může velké množství horninového odpadu do jisté míry přetvořit ráz krajiny, kdy je na jedné straně těženo velké množství horniny a na druhé straně je nutné odpad skládkovat, „průmyslová“ plocha se tak v podstatě zdvojnásobuje. S uvedenými jevy souvisí i znečišťování životního prostředí a problematika udržitelného rozvoje v regionu. Jemné částice z nechráněných skládek se mohou dostat do dalekého okolí a způsobit např. degradaci půdy, znečištění ovzduší a vodních zdrojů. Následně může dojít k poškození fauny a flóry, to může mít samozřejmě i přímý vliv na lidský organismus. Řešením uvedených problémů by bylo využití horninových odpadů, jiný způsob skládkování, ale především efektivní způsob těžení, řezání a úpravy povrchů, které by zvýšily efektivitu produkce (Ibrahim et al. 2011).

2.1.2 Beton a betonový recyklát

V současné době je beton nejvyužívanějším stavebním materiálem a nabízí se možnosti jeho následného využití v podobě recyklátu, který se bude přidávat do betonu nebo materiálů na bázi cementu jako jsou malty, lepidla, omítky atd. Trendem v současné době je vyrábět takové materiály/betony, které jsou ze 100 % recyklovatelné, tedy po skončení životnosti konstrukce nezpůsobí další ekologickou zátěž (De Schepper et al. 2014). Odpadního betonu v současné době přibývá i vlivem válečných konfliktů v mnoha zemích, mezi takovéto země patří v současné době především Ukrajina, Sýrie a Irák.

Podle dokumentu vydaného Egyptskou agenturou pro záležitosti životního prostředí (EEAA 2014) dochází na území Blízkého východu a Egypta k produkci dvou odpadů, které lze použít pro stavební účely. Prvním je stavební a demoliční odpad, který se např. pro Egypt v roce 2012 odhaduje na 4 miliony tun. Uvedené číslo každoročně roste, protože dochází k nárůstu stavební činnosti spojené s novostavbami a stará zástavba „uvolňuje“ prostor pro tu novou. Další faktor zvyšující toto číslo souvisí s nízkou životností materiálů a staveb v rozvojových zemích. Obecně platí, že velké stavební firmy splňují požadavky správného sběru tohoto odpadu, ale po odvezení nedochází ke třídění odpadu. Dokud nedojde ke zlepšení třídění demoličního a stavebního odpadu, nelze tento odpad efektivně dál použít ve stavebních konstrukcích. Druhý typ odpadu je spojen s průmyslem na zpracování hornin (především vápence).

Problematika „kvalitního“ zdroje pro betonový recyklát souvisí především s jeho čistotou a kvalitou. Čistota je závislá na zdrojové surovině, jestli se jedná o čistý betonový recyklát nebo o směsný materiál se zbytky zdiva, dřeva atd. Kvalita vlastního betonového recyklátu je dána i materiálovým složením původního betonu i způsobu, jakým byl během své životnosti namáhán, tedy hlavně ve vztahu k funkčnosti (jako např. vystavení povětrnosti, aplikace v podzemí, v přímořské oblasti, vystavený agresivním podzemním vodám atd.). Všechny tyto vlivy mají významný podíl na výsledných vlastnostech betonu, resp. betonové konstrukce, a tedy i vlastnostech výsledného recyklátu. Důležitou roli hraje v procesu i vlastní složení betonu pro specifické typy konstrukcí a aplikací.

Ve stavebnictví jsou v podstatě dvě velké oblasti, ze kterých je betonový recyklát získáván, resp. kde při demolicích vzniká. A opačně, ve stejných dvou oblastech je možno recyklovaný materiál použít při rekonstrukcích nebo novostavbách:

- dopravní infrastruktura: silniční a železniční stavby,
- pozemní stavby.

V případě **infrastruktury**, když opomineme konstrukce betonových mostů a tunelů, se u silničních staveb převážně využívají staré betonové podkladní nebo povrchové vrstvy, které jsou součástí vozovek, především na dálnicích a rychlostních komunikacích. Během rekonstrukcí vozovek jsou betonové vrstvy sejmuty a opětovně využity. Recyklovaný beton lze zpracovat přímo na stavbě při využití mobilních recyklačních linek. Proces recyklace je efektivní především z toho důvodu, že materiál je homogenní a není nutné ho složitě třídit a upravovat.

U železničních staveb jsou z betonu, resp. železobetonu, pražce nebo tramvajové desky. Recyklované železobetonové pražce je možno použít na stejné stavbě jako kamenivo na posypy a zpevnění neúnosných zemin pražcového podloží. Recyklace betonových železničních pražců a tramvajových desek je komplikovanější než u silničních staveb, protože obsahují betonářskou výztuž, která musí být nejdříve za použití drtičů, desintegrátorů a separátorů odstraněna, pak ze zbytků zůstane jen betonová drť, která může být znovu použita na nové stavbě (Lidmila et al. 2014a, Lidmila et al. 2014b). Kvalita recyklátu může být i proměnlivá, a tím je limitováno další použití recyklátu (Silva et al. 2014). V současnosti je snaha modernizovat stávající recyklační technologie za účelem čištění a zlepšení kvality recyklovaného betonového kameniva.

Mezi nové technologie patří např. hybridní čištění, které se skládá z procesu praní kameniva za účelem odstranění nečistot z jeho povrchu, dále máčení ve slabé kyselině, která napomáhá odstranění cementové matrice ze zrn kameniva, a zároveň snižuje obsah nežádoucích příměsí jako síranů a chloridů v kamenivu, takto upravené kamenivo může vykazovat i kvality přírodního kameniva. Pepe et al. (2014) testoval autogenní postup čištění, kamenivo je mezi sebou navzájem omíláno a z jeho povrchu je odstraňována cementová matrice. Na druhou stranu je vytvářen další odpad.

2.2 Využití mikromletých nebo jemnozrnných recyklovaných stavebních materiálů

2.2.1 Využití odpadního kameniva a moučky z těžby hornin se zaměřením na vápenec a mramor

Při těžbě materiálů pro stavební průmysl vzniká velké množství stavebního odpadu. Část odpadů vzniká při vlastní těžbě a další při zpracování výrobků na požadovaný tvar nebo úpravu jeho povrchů. Problematické se jeví především využití horninového odpadu frakce 0/1 mm, která většinou zůstává v lokalitě těžby nebo je odvezena na skládku.

Příkladem může být např. lokalita Shaq El Thoaban, východně od Káhiry v Egyptě, kde se těží mramor a ročně zde vznikne až několik miliónů tun odpadu (Mashaly et al. 2012). Skladování jemnozrnného odpadního materiálu zde probíhá masově a neorganizovaně, a proto v regionu vzniká problém jak tento materiál efektivně využít, aby nemusel být skládkován na obrovských haldách a postupně nedocházelo k znečišťování a znehodnocování tohoto materiálu, který by mohl najít další uplatnění. Problematické množství materiálu může napáchat škodu na lokálním ekosystému a do budoucna není rozhodně v souladu s principy udržitelného rozvoje. Mashaly et al. (2012) provedl řadu chemických analýz pomocí termogravimetrie na vzorcích 25 mramorových kalů z továren na zpracování kamene v oblasti Shaq El Thoaban (Egypt). Stanovoval především množství CaCO_3 (uhličitan vápenatý) a MgCO_3 (uhličitan hořečnatý). Obsah CaCO_3 ve vzorcích mramorového kalu se pohyboval v rozmezí hodnot od 82,58 hm. % do 98,84 hm. %, s průměrem 91,53 hm. %. Množství MgCO_3 se pohybovalo se v rozmezí od 0 do 11,44 hm. %, s průměrem 1,48 hm. %. Ostatní složky měly zastoupení od 1,15 hm. % do 22,27 hm. %, s průměrem 7,34 hm. %. Ostatní složky představují jíly, písky vyskytující se v mramoru, a také všechny nečistoty, které byly přidány do kalu v průběhu zpracování mramoru, jako např. různá abrasiva. Jako jednou z možností se jeví využití tohoto jemnozrnného materiálu ve stavebním průmyslu. Část materiálu, ale velmi malá, se v současné době již takto využívá.

Aliado et al. (2014) nahrazoval ve svém výzkumu mramorovým kalem plnivo a pojivo. V prvním kroku použil mramorový kal jako náhradu cementu a v druhém jako náhradu písku, v obou případech náhrada tvořila od 0 do 15 hm. %. Střední velikost zrna mramorového kalu byla 8 μm a maximální velikost zrna byla 52 μm .

Směs byla složená z portlandského cementu, jemného a hrubého kameniva z drceného vápence frakce 0/19 mm o vodním součiniteli 0,5. Z výsledků je patrné, že mramorový prach neovlivňuje procesy tuhnutí a tvrdnutí, hodnoty smrštění jsou srovnatelné. Celková porozita betonu se při použití vápencové kalu zvyšuje. S ní souvisí i nárůst pevnosti v tlaku, která se zvyšuje s obsahem vápencové moučky až do 10 hm. %, při 15 hm. % již klesá. Pozitivní vliv byl pozorován u soudržnosti ocelové výztuže s cementovou matricí, maximální soudržnosti bylo dosaženo při použití 10 hm. % vápencové moučky. Hamza et al. (2011) nahrazoval jemné kamenivo frakce 0/0,1 mm ve směsi mramorovým kalem od 0 do 40 hm. % u betonových cihel s rozměry 250×120×60 mm podle amerických norem (AMST) používaných v Egyptě. Směs byla dále složena z cementu a hrubého kameniva frakce 0/11 mm. Podle jeho zjištění bylo optimální složení směsi při použití 10 % mramorového kalu, protože tato směs vykazovala nejvyšších hodnot pevnosti v tlaku. Demirel (2010) ve své studii nahrazoval jemný písek frakce 0/4 mm mramorovým prachem frakce 0/0,25 v hmotnostních procentech od 0 do 100 % v betonu, který byl vyroben z portlandského cementu CEM I 42,5 a hrubého kameniva frakce 4/16 mm. Z jeho výsledků je patrné, že beton měl nejvyšší pevnosti v tlaku při 100% náhradě písku mramorovým prachem, obdobně tomu bylo u hodnot dynamického modulu pružnosti, se zvyšujícím se množstvím mramorového prachu klesala pórovitost materiálu, ta měla vliv na zlepšení uvedených pevnostních charakteristik.

Shelke et al. (2012) porovnával vliv mramorového kalu a křemičitého úletu (mikrosiliky) na mechanické vlastnosti betonu, který se skládal z portlandského cementu, jemného a hrubého kameniva a plastifikátoru. Mramorový kal byl dávkován v různých objemových procentech k objemu betonu, konkrétně od 0 do 16 %. Z jejich výsledků je patrné, že s množstvím mramorového kalu se snižuje zpracovatelnost čerstvé betonové směsi. U pevností v tlaku na válcích byl zaznamenán nárůst hodnot při použití 8 objemových procent mramorového kalu. Ergün (2011) se snažil nahradit část cementu v betonu jemnou drtí z vápence a diatomitu. Směs tvořil portlandský cement, říční písek frakce 0/4 mm a drceného kamenivo (frakcí 0/4 mm, 6/12 mm a 12/22 mm), superplastifikátoru a vody. Množství cementu bylo v různých hmotnostních poměrech nahrazeno vápencovým diatomitovým kalem. Při použití 10 hm. % vápencového kalu a 5 hm. % diatomitového kalu jako náhrady za cement bylo dosaženo nejlepších výsledků pevností v tlaku a v tahu za ohybu po 28 dnech.

Omar et al. (2012) studoval vliv drceného vápence v jemnozrnném cementovém kompozitu, kde nahrazoval část jemného kameniva. Při testech byly použity tři různé poměry písku za drcený vápenec, podle jejich závěrů neměl přídavek vápence vliv na rozlivové vlastnosti. Pro hodnoty pevností v tlaku po 28 dnech byl při poměru písku a vápence 1:1 sledován nárůst o 12 %. Pro hodnoty pevností v tahu za ohybu o cca 10 %. V uvedeném případě byla pravděpodobně příčinou vyšších pevností v tlaku a v tahu za ohybu nižší tuhost vápence v porovnání s pískem. Z doposud citovaných prací není jednoznačně možné určit, jestli má přidání vápencového kalu jednoznačně pozitivní vliv na mikrostrukturu cementové matrice. Několik vědeckých týmů se touto problematikou zabývalo a výsledky jsou nejednoznačné. Např. Demirel (2010) ve své práci uvádí, že vápencový kal má vliv na mikrostrukturu cementové matrice, ale Aliabdo et al. (2014) tuto teorii nepotvrdil, je ale nutné podotknout, že obě měření byla prováděna za různých podmínek a nedají se tedy jednoznačně porovnat.

Obdobně jako u recyklovaného betonu, je možné při těžbě vápence nebo dalších hornin, využít kamenivo frakce 0/32 mm, resp. 0/64 mm, jako náhradu za těžené kamenivo, tento odpad vzniká při vlastní těžbě nebo u kazových bloků s trhlinami. Obdobně jako u betonu, se touto problematikou zabývalo poměrně hodně vědeckých kolektivů, jen pro představu je stručný souhrn uveden v Tab. 1, za období od roku 2000.

Tab. 1: Příklad využití drceného vápence při experimentálním výzkumu od roku 2000.

Autoři	Zaměření výzkumu
Bonavetti et al. (2003)	betonová směs
Yahia et al. (2005)	betonová směs
Petit et al. (2010)	tekuté malty
Valcuende et al. (2012)	samozhutnitelný beton
Joudi-Bahri et al. (2012)	samozhutnitelný beton
Martínez et al. (2013)	malty
Andre et al. (2014)	betonová směs
Kockal (2015)	cementová malta
Rana, A. et al. (2017)	betonová směs
Tekin et al. (2017)	betonová směs

Z výše uvedených vybraných prací je možno vyvodit závěr, že mikromletý vápencový kal nebo kal z jiných hornin je možno použít u cementových kompozitních materiálů jako částečnou náhradu cementu. Jako optimální hranice, při zachování „stávajících“ vlastností cementové matrice se jeví hodnota 10 hm %. Mechanismus zlepšení mechanických vlastností cementové matrice (pevnost v tlaku a v tahu za ohybu) spočívá ve vyplnění mikropórů, které by v cementové matici vznikly. Důvodem je menší velikost částic vápencového kalu.

2.2.2 Beton a betonový recyklát

Recyklované kamenivo na bázi betonu může dosahovat různých kvalit, a to samozřejmě nejen díky původnímu složení, ale i technologii recyklace. Uvedený předpoklad platí především pro hrubé kamenivo frakce 0/64 mm, kde významný podíl hraje původní kamenivo. Podle jeho velikosti (křivky zrnitosti) zde budou převládat zrna původních velikostí, optimalizace křivky zrnitosti a snížení mezerovitosti je stejným principem, který je využíván při navrhování betonů a to především vysokopevnostních a vysokohodnotných (Aïtcin 2005).

Rodrigues et al. (2013) se ve svém výzkumu zabýval rozbořem sedmi různých betonových recyklátů z různých recyklačních linek v Portugalsku. Na recyklátech stanovil fyzikální, chemické a mineralogické vlastnosti. Z jeho výzkumu je patrné, že vlastnosti betonového recyklovaného kameniva závisí především na lokalitě, kde je recyklační linka umístěna. Vybrané linky se nacházely v různých oblastech Portugalska (byly situovány od severu k jihu). Recyklační linky jsou záměrně umísťovány tak, aby byly schopny obsáhnout určitou „optimální“ oblast, mimo tuto oblast jsou již ekonomické náklady na dopravu příliš vysoké a ekonomické hledisko využití recyklátu začíná „převažovat“ v jeho neprospěch. Z optimální oblasti jsou do recyklační linky sváženy zbytky demolovaných staveb. Je logické, že pro výrobu betonových konstrukcí bylo využito lokální přírodní kamenivo, které se v dané oblasti nachází. Zkoumané recyklované kamenivo vyhovělo z hlediska obsahu síranů a chloridů, ale nevyhovělo z hlediska obsahu lehkých částic, důvodem byla nízká účinnost recyklace. Agrela et al. (2011) se snažil stanovit limitní, resp. minimální použitelné, vlastnosti recyklovaného betonového kameniva s příměsemi, tedy dalším stavebním odpadem (jako např. cihly nebo sádkokarton). Aby nový beton vyhověl

normovým požadavkům, neměl by podíl ostatního částic v recyklovaném betonovém kamenivu přesáhnout hodnotu 10 hm. %. Recyklát s obsahem vyšším jak 30 hm. % by měl být používán pouze jako materiál pro doplňkové nenosné konstrukce. Doporučené je také nepoužívat do betonových konstrukcí recyklované kamenivo s obsahem sádrovce více jak 1,5 hm. %, důvodem je vysoký obsah síranů. Matar et al. (2012) ve své práci navrhl beton s 30 a 50 hm. % obsahem hrubého recyklovaného kameniva a dosáhl pevnosti v tlaku o 30 % vyšší než u referenčního betonu s přírodním kamenivem. Uvedeným efekt docílil zvýšením množstvím použitého cementu o 10 hm. % a zvýšením obsahu záměsové vody z důvodu vyšší nasákavosti recyklovaného kameniva. Beltrán et al. (2013) navrhnul betonové směsi obsahující 100 hm. % hrubého recyklovaného kameniva s různými hodnotami vodního součinitele. Při zvýšení hodnoty cementu o 12 hm. % dosáhl hodnot pevností v tlaku stejných jako u referenčního betonu s přírodním kamenivem. Vyšší obsah cementu také zvýšil trvanlivost betonu s recyklovaným kamenivem, ale permeabilita, pronikání chloridů a stupeň karbonatace byla o něco nižší. Beton s recyklovaným kamenivem proto doporučuje používat do nízkoagresivních prostředí.

Gayarre et al. (2014) testoval vliv ošetření na vývoj a výsledné mechanické vlastnosti betonu s recyklovaným betonovým kamenivem s různou kvalitou recyklátu. Použil vodní součinitel 0,65 a množství hrubého recyklovaného betonového kameniva bylo 0, 20, 50 a 100 hm. %. Betonové vzorky po odformování byly vystaveny po dobu 28 dní různým prostředím, v prvním případě byly vzorky uloženy v laboratorním prostředí s teplotou 20 °C a relativní vlhkostí 95 %, a v druhém případě volně ve venkovním prostředí, kde se teplota pohybovala od 19 do 33 °C a relativní vlhkostí 48 až 80 %. Z výsledků je patrné, že sedmidenní tlakové pevnosti nezávisí na způsobu uložení. U betonů s recyklovaným kamenivem, které byly vystaveny venkovnímu prostředí, klesla pevnost v tlaku po 28 dnech o 20 % v porovnání se vzorky v laboratorním prostředí.

Kou et al. (2013) se ve své dlouhodobé studii věnoval trvanlivosti a vývoji mechanických vlastností betonu s recyklovaným betonovým kamenivem. Vyrobené vzorky byly uloženy ve dvou různých prostředích. V prvním případě byly vzorky umístěny v laboratorním prostředí s konstantní teplotou a vlhkostí, v druhém případě byly uloženy ve vodní lázni. Podle předpokladů dosahovaly vzorky uložené ve vodní

lázni vyšší hodnoty pevnosti v tlaku. Dále bylo prokázáno, že kamenivo z recyklovaného betonu má vyšší nasákavost a je poréznější, proto je potřeba věnovat betonům s recyklovaným kamenivem vyšší pozornost při ošetřování.

Šefflová et al. (2014) navrhla směs s několika druhy recyklovaného kameniva a testovala vliv na tepelné vlastnosti betonu. Z výsledků je patrné, že vliv na tepelné vlastnosti nebyl žádný. Pavlů et al. (2014) navrhla několik směsí s různými poměry s druhy recyklovaného kameniva, podle prezentovaných výsledků je možné část přírodního kameniva nahradit recyklovaným, aniž by došlo ke zhoršení mechanických vlastností. Pavlů a Šefflová (2014a) testovala vliv recyklovaného kameniva na absorpci vody betonu a navrhly matematický model na predikci absorpce vody betonu s recyklovaným kamenivem. Pavlů a Šefflová (2014b) na betonu jen s recyklovaným kamenivem stanovovaly statický a dynamický modul pružnosti v závislosti na druhu použitého hrubého kameniva. Šefflová a Pavlů (2015) a Pavlů a Šefflová (2015) navrhly několik směsí s obsahem jemného recyklovaného kameniva, které částečně nebo úplně nahrazovalo jemné přírodní kamenivo. U těchto betonů stanovovaly sadu mechanických vlastností na makroúrovni. Šefflová a Pavlů (2016) a Pavlů a Šefflová (2016) testovaly beton s různým obsahem recyklovaného kameniva a stanovovaly závislost mezi složením betonu a odolností proti zmrazovacím a rozmrazovacím cyklům.

Další možností je použití **plastifikátoru** nebo **superplastifikátoru**, které vede k redukci vody v betonové směsi při zachování zpracovatelnosti, snížení celkové pórovitosti, a tím zvýšení hodnot pevností v tlaku a v tahu za ohybu. Obecně platí, že při použití recyklovaného kameniva je toto kamenivo poréznější, a proto je potřeba vyšší vodní součinitel, než při použití kameniva přírodního. Cartuxo et al. (2015) modifikoval betonovou směs pouze s recyklovaným kamenivem za pomoci superplastifikátoru. Použitím superplastifikátoru se podařilo snížit množství záměsové vody i přes vyšší nasákavost recyklovaného kameniva při zachování zpracovatelnosti jako u přírodního kameniva. Proto bylo možné navrhnout betonovou směs s recyklovaným kamenivem, která měla stejné vlastnosti jako směs s přírodním kamenivem. Domingo-Cabo et al. (2009) při návrhu betonové směsi použil kvalitní recyklované kamenivo, portlandský cement a superplastifikátor. Při stejném složení měl referenční beton s přírodním kamenivem nižší pevnost v tlaku zhruba o 20 % než beton s recyklovaným kamenivem a superplastifikátorem. Beton s recyklovaným

kamenivem ale dosahoval o 15 % vyšší hodnotu smrštění. Soares et al. (2014) použil do betonové směsi dva druhy kameniva, přírodní a kvalitní recyklované. Směs s recyklovaným betonem byla modifikována pomocí superplastifikátoru, díky tomu tato směs dosahovala vyšší pevnosti v tlaku, a to o 40 % než referenční beton, tato směs měla také díky vysoké objemové hmotnosti, resp. nižší celkové pórovitosti, zvýšenou trvanlivost.

Pereira et al. (2012) navrhl několik betonových směsí betonu s náhradou přírodního hrubého kameniva kamenivem recyklovaným, pro které navrhl systém autonomního čištění. S upraveným recyklovaným kamenivem betonové směsi měly stejné hodnoty pevností v tlaku jako referenční sady s přírodním kamenivem.

Çakır (2014) modifikoval vlastnosti betonových směsí s použitím přírodního a recyklovaného kameniva, ke kterému byly přidávány ještě další složky jako mikrosilika a struska. Na zlepšení zpracovatelnosti a redukci vodního součinitele směsi byl použit superplastifikátor. Některé betonové směsi s recyklovaným kamenivem a dalšími složkami vykazovaly vyšší trvanlivost než referenční betony s přírodním kamenivem, ale za cenu zhoršení pevností v tlaku.

Ošetření povrchu recyklovaného kameniva je logickou cestou, jak eliminovat největší problém tohoto materiálu – nasákavost. Způsobů ošetření povrchu je několik. Problematické je dosáhnout úpravy v celém povrchu kameniva a vyřešit způsob, jak se tato úprava zapojí do nové struktury betonu při kontaktu s cementem. Li et al. (2009) navrhnul obalovat recyklované kamenivo pomocí pucolánové moučky. Vlastní proces obalování probíhal při výrobě směsi na počátku míchání. Směs s upraveným recyklovaným kamenivem měla lepší zpracovatelnost a bylo dosaženo vyšších hodnot pevnosti v tlaku. Zlepšení vybraných užitných vlastností bylo dosaženo díky kompaktnější přechodové zóně mezi cementovou maticí a kamenivem.

Zhihui et al. (2013) používal ke zlepšení vlastností recyklovaného betonu cementovou pastu, tloušťka nanesené cementové pasty byla ovlivněna vodním součinitelem. Při tloušťce vrstvy okolo 0,035 mm, která odpovídala cementové pastě s vodním součinitelem 0,8, došlo ke zlepšení pevnosti v tlaku o 10 % v porovnání s recyklovaným betonem bez upraveného kameniva. Zároveň došlo u této směsi k výraznému zlepšení odolnosti proti síranům.

Kou et al. (2010) ve své práci impregnoval kamenivo do betonu pomocí 10% vodního roztoku polyvinylalkoholu po dobu jednoho dne. Při 100% náhradě běžného kameniva recyklovaným impregnovaným kamenivem dosáhl stejných hodnot pevností v tlaku jako pro referenční beton.

Tepelné ošetření recyklátu patří mezi další možnosti jak „aktivovat“ recyklovaný materiál, v podstatě se jedná o nový výpal spojený případně s mletím, tedy ty stejné procesy, které vedou k výrobě portlandského slínku. Otázkou je teplota, při nízkých teplotách nedojde k potřebnému výpalu, při vyšších se dostáváme do energeticky stejně náročných procesů, jako při výpalu slínku. Problematické je, jak oddělit a tepelně ošetřovat jen „čistou“ cementovou matici, a ne i jemně podrcený písek, štěrk a další komponenty. Shui et al. (2011) testoval vlastnosti dehydratované cementové pasty. Podle jeho zjištění se cementová pasta upravená tepelně při 500 °C skládá především z C-S-H gelu, CaO z nezkrytalizované dehydratované pasty. Po opětovném smísení dehydratované cementové pasty s vodou došlo ke znovuoobnovení hydratačních produktů C-S-H gelu, ettringitu a CaOH_2 . Zvolená teplota má zásadní vliv na vlastnosti vyrobeného cementu podobně jako při výpalu slínků, vliv má i jemnost mletí. Testoval také směs dehydratované cementové pasty s popílkem, která znovu vytvářela C-S-H gel. Při hydrataci došlo také k rehydrataci cementových zrn, která nebyla aktivována při první hydrataci.

Florea et al. (2014) testoval vliv teploty při dehydrataci cementové pasty a možnosti využití takto upraveného pojiva v cementových maltách. Z výsledků je patrné, že jemnozrnný drcený beton ošetřený při 800 °C může být použit jako částečná náhrada portlandského cementu. Při náhradě 20 hm. % cementu, zůstávají hodnoty pevnosti v tlaku téměř identické. Při nižší teplotě (okolo 500 °C) byla stejná náhrada výrazně méně efektivní.

Schoon et al. (2012 a 2015) se pokoušel využít jemné frakce recyklovaného betonu (prach) jako alternativu k surovinám pro výrobu portlandského cementu. V rámci výzkumu testoval různé druhy jemnozrnného betonového odpadu v závislosti na dalších vlivech (jako ne např. druh betonu, způsob recyklace a stáří betonu). Z výsledků je patrné, že se může jednat o alternativní pojivo, ale problém zůstává ve výpalu a technologii výroby, který zvyšuje ekonomickou náročnost celého procesu, k těmto nákladům je nutné ovšem přičíst recyklaci.

Gastaldi et al. (2015) navazoval ve svém výzkumu na již provedené experimenty a navrhl využít směs z jemného recyklovaného betonu, vápence a břidlice na výrobu portlandského slínku. Z jeho výzkumu je patrné, že vzhledem k mineralogickému složení a nízkému zastoupení C_3S není možné použít pouze tyto suroviny. Problematické je především využití vysokého obsahu SiO_2 z původního recyklovaného kameniva, které je vhodné spíše jako náhrada písku, resp. plniva. Jako limit stanovil 40 hm. % moučky z recyklovaného betonu, vyšší množství již pak není vhodné. Kwon et al. (2015) řešil stejnou problematiku, ale při zachování kvality portlandského slínku. Doporučuje použít maximálně 30 hm. % moučky z recyklovaného betonu. Ahmari et al. (2012) ve své práci navrhl geopolymery při využití směsi recyklované betonové moučky, cementu a popílků. Přidání recyklované betonové moučky zvětšuje výslednou tlakovou pevnost geopolymery, při využití 50 hm. % moučky místo cementu nedošlo ke zhoršení pevnosti v tlaku.

Liu et al. (2014) se věnoval **zkoumání pucolánových vlastností** hybridní moučky vyrobené z recyklovaného betonového a cihelného prachu z recyklační linky. Nejvyšší reaktivitu měla cihelná zrna. Do 30 hm. % je možno využít tuto směs jako náhradu cementu při zachování hodnot pevností v tlaku. Podobně jako u pucolánových přísad je zkoumána u mikromletého betonu reaktivita pomocí kalorimetrie, aby bylo možno předem ověřit vliv na hydratační procesy v cementové maltě nebo pastě, resp. v betonu. De Schepper et al. (2013) testoval chování slínku vyrobeného pouze z mikromletého betonového recyklátu, kromě testování prováděl i počítačové simulace a porovnával experimentální výsledky s výsledky z počítačových simulací. Snahou jeho výzkumu bylo i navrhnout takový cement a beton, který by bylo možné následně celý recyklovat a opětovně využít, takovýto materiál má název Kompletně recyklovatelný beton, anglicky Completely Recyclable Concrete, se zkratkou CRC (De Schepper et al. 2014). Aby bylo možno takovýto beton následně recyklovat, je vhodné ho upravit tak, aby byly vytvořeny vhodné poměry slínkových minerálů, za tímto účelem je možno do směsi přidávat například anhydrit – síran vápenatý (De Schepper et al. 2017).

Na podobných principech se využívá mikromletá betonová moučka v **asfaltových směsích**, např. Hwang et al. (2008) zlepšoval vlastnosti asfaltového pojiva recyklovanými materiály. Při náhradě běžně používaných fillerů je možné snížit i výrobní cenu výsledného materiálu. Chen et al. (2011) nahrazoval běžně

používanou vápencovou moučku v asfaltových směsích mikromletou betonovou moučkou. Recyklovaná betonová moučka obsahovala větší množství křemíku a menší množství vápníku. Při použití recyklované betonové moučky v asfaltových směsích dochází ke snížení citlivosti při působení vody a zároveň ke zlepšení mechanických vlastností při vysokých teplotách a zvýšení trvanlivosti. Kim et al. (2012) nahrazoval v cementové pastě a maltě část použitého cementu moučkou z recyklovaného betonu. Zpracovatelnost směsí se zhoršovala se zvyšujícím se množstvím použité moučky, z důvodu přidání moučky se prodlužoval hydratační proces. Z jeho výsledků je patrné, že množství moučky by mělo být omezeno na 15 hm. %, protože potom dochází k výraznému poklesu hodnot pevnosti v tlaku a současně se zvyšuje nasákavost.

2.3 Modifikace materiálových vlastností cementových materiálů

Existuje celá řada možností jak modifikovat vlastnosti čerstvé cementové nebo betonové směsi a jejich výsledné vlastnosti z hlediska užitných vlastností, tj. souboru mechanických, tepelných a vlhkostních vlastností, které specifikují nebo limitují užití konkrétního materiálu. Podrobněji budou rozebrány možnosti:

- Využití vodorozpustných polymerů.
- Vylehčení matrice pomocí pěny.

2.3.1 Využití vodorozpustných polymerů

Polymerní malty a betony jsou známy již delší dobu a jsou využívány ve stavebnictví, problematická je především jejich vyšší cena (Reis a Jurumenha 2013). Vhodnou variantou může být využití polyvinylalkoholu (PVA), který je cenově dostupnější než jiné polymery. Ve vodě rozpustných polymerů, které se dají využít v materiálech na bázi cementu, je samozřejmě více, patří mezi ně např. polyvinylacetát (PVAc), který testoval např. Knapen a Gemert (2009a, 2009b) a Singh et al. (2003).

Právě proto patří PVA nejčastěji mezi používané polymery ve stavebnictví. Jedná se o polymer rozpustný ve vodě, který je vyráběn v pevné fázi nebo jako vodný roztok. V pevné formě je vyráběn ve formě kuliček jako základní surovina (pevný polymer), který je dále využíván, nebo jako vlákna (mikrovlákna), která jsou využívána

ve stavebnictví. V případě použití mikrovláken jsou při jejich výrobě přidávána tzv. zesíťovací činidla a PVA je potom pomocí chemické nebo tepelné reakce zesíťováno a vytváří polymer, který je zcela nerozpustný ve vodě. PVA mikrovlákná v betonu potom nedegradují (Wang a Li 2006). V podobě vodného roztoku je PVA u cementových kompozitních materiálů možno využít a modifikovat materiál v celém jeho objemu nebo ve formě povrchové úpravy.

Řada autorů se zabývala modifikací cementových past, malt nebo betonů pomocí polymerů. Následující přehled je tedy zcela záměrně zaměřen především na polymer PVA nebo jeho kombinaci s dalšími polymery. Kou a Poon (2010) modifikoval recyklované kamenivo z betonu za účelem nahrazení přírodního kameniva. V první fázi svého výzkumu se zaměřili na stanovení vhodné koncentrace vodného roztoku PVA v rozmezí hodnot od 6 do 12 hm. % pro impregnaci recyklovaného kameniva. Jako optimální se jeví 10 % vodný roztok PVA. V druhé fázi testoval ošetřené kamenivo v 10% roztoku PVA v betonové směsi v porovnání s neošetřeným kamenivem. Z výsledků je patrné, že betonová směs s impregnovaným recyklovaným kamenivem dosahovala lepších hodnot u zpracovatelnosti a smrštění, ale zároveň i u mechanických vlastností – pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu.

Allahverdi et al. (2010) testoval vliv PVA na vlastnosti cementové pasty, množství použitého PVA k cementu se pohybovalo od 0,4 do 2 % k množství cementu, tedy množství polymeru/cement, a vodní součinitel se měnil od 0,28 do 0,32. PVA bylo dávkováno ve formě kuliček do vodní lázně a následně zahříváno, aby se vytvořil polymerní roztok. Z publikovaných výsledků je patrné, že se zpracovatelnost zlepšuje s množstvím PVA, ale jen do hodnoty 1,6 hm. %, pro hodnotu 2 % se zhoršuje. Do hodnoty 1,6 hm. % se zvyšuje hodnota pevnosti v tahu za ohybu. V porovnání s referenční sadou bez PVA je tato hodnota dvojnásobná pro vyšší hodnoty vodního součinitele, nejvíce se tento jev projevil u vodního součinitele 0,30. Se zvyšujícím se množstvím PVA se zvyšovaly hodnoty objemové hmotnosti a snižovala se nasákavost cementových vzorků.

Kim a Robertson (1998) testoval vliv PVA na vlastnosti cementové malty s kamenivem z vápence a granitu, množství PVA se pohybovala od 0 do 2 hm. % z hmotnosti portlandského cementu. Z jejich výsledků se jako optimální jeví použít množství 1,4 hm. % PVA, u testovaných vzorků došlo k nárůstu pevnosti v tahu

za ohybu. Kim et al. (1999) v navazující studii testoval vliv PVA do 2 hm. % na cementové malty a beton, v porovnání s referenčními neošetřenými vzorky je patrné, že PVA zlepšuje zpracovatelnost čerstvých směsí. Pevnost v tlaku se u vzorků z PVA mírně snížila, ale pevnost v tahu za ohybu byla srovnatelná. Pro beton se stejnou celkovou pórovitostí s přidavkem PVA byla výsledná hodnota pevnosti v tlaku vyšší.

Jenni et al. (2005) testoval vliv PVA a dalších materiálů jako latex na adhesivní vlastnosti cementové malty. Výsledky prokázaly, že v závislosti na množství mohou přísadky ovlivnit nasákavost, kterou mohou výrazně snížit, ale na druhou stranu mají za následek snížení soudržnosti s podkladem. Sing a Rai (2001) zkoumal vliv 3 hm. % PVA, cementu a 10 % popílku z rýžových lusků. Výsledky prokázaly, že PVA zvyšuje pevnost v tlaku a snižuje celkovou pórovitost, res. zvyšuje objemovou hmotnost. Morlat et al. (2007) testoval vliv PVA a polyvinylpyrrolidonu (PVP) na cementovou pastu s mikrosilikou s nízkou hodnotou vodního součinitele. Z výsledků je patrné, že lomová energie při zkoušce pevnosti v tahu byla nejvyšší při použití 3 hm. % PVA a 4 hm. % PVP.

Pique a Vazquez (2013) testoval vliv PVA na vlastnosti cementové pasty z portlandského cementu. PVA v pastě způsobilo zvýšení pevnosti v tahu, ale snížení pevnosti v tlaku, na průběh hydratace nebyl pozorován žádný vliv. Thong et al. (2016) testoval mikrostrukturu cementového kompozitu s různým obsahem PVA a vody. Ze studie vyplývá, že PVA má vliv na ITZ mezi cementovou maticí a kamenivem, ovlivňuje i její chemické složení, to ale platí jen pro určité limitní množství PVA k cementu. Při vyšších hodnotách PVA naopak dochází ke snížení soudržnosti a výsledné mechanické vlastnosti cementového kompozitu se zhoršují. Výzkumem mikrostruktury cementových kompozitních materiálů s přidavkem PVA se zabývaly i jiné vědecké týmy, mezi ně patří např. Viswanath a Thachil (2008) a Thong et al. (2015). Především tvorbu C-S-H gelu při kombinaci cementu a PVA testoval Yongjia (2011). Obdobně zkoumal mikrostrukturu na rozhraní mezi kamenivem a cementovou maticí Poon et al. (2004).

2.3.2 Vylehčení cementové matrice pomocí pěny

Vylehčení matrice pomocí pěny je z technologického hlediska jednodušší, než například autoklávování při výrobě pórobetonu (Panesar 2013) a další metody za účelem vylehčení hmoty (Amran et al. 2015). Technologická náročnost souvisí i s celkovými vyššími náklady a to nejen na pořízení vlastní výrobní linky, ale i během vlastního provozu (Kearsley 2006, Ramamurthy et al. 2009). U vylehčených materiálů je zásadní množství dodané pěny, která vylehčí matici. S množstvím použité pěny souvisí i zpracovatelnost směsi a možnosti jejího lití (Kuzielová et al. 2016). Kromě čistě vědeckých článků se objevují i články věnující se poloprůmyslové nebo průmyslové výrobě (Narayanan a Ramamurthy 2012). Z vlastností pěnobetonu jsou testovány především mechanické vlastnosti na makro úrovni (Jones a McCarthy 2005), ale existují i studie o mikromechanických vlastnostech matrice (Karsley a Visagie 1999). Pěnový beton, především ten s nízkými objemovými hmotnostmi okolo 500 kg/m^3 je většinou hydrofilní a jeho mechanické vlastnosti se zhoršují s rostoucí vlhkostí, z tohoto důvodu jsou využívány různé hydrofobizační přísady nebo nátěry, které mají zabránit pronikání kapalné vlhkosti do materiálu (Ma a Chen, 2016).

Kearsley a Wainwright (2001, 2002) testoval materiály s přídavkem elektrárenského popílku, který zároveň vylehčovali. Ma a Chen (2017) testoval různé složení materiálů, kde klasický portlandský cement byl nahrazený fosfáto-hořečnatým cementem a mixován s dalšími přísadami, např. s popílkem. V porovnání s klasickým cementem byly u nově navrženého materiálu zlepšeny pevnostní charakteristiky. Pro různé složení směsí bylo docíleno objemové hmotnosti v rozsahu od 540 do 1600 kg/m^3 , pevnosti v tlaku po 28 dnech od $1,9$ do 43 MPa a součinitel tepelné vodivosti od $0,066$ do $0,34 \text{ W/mK}$. Obdobné principy použil Chen a Liu (2017), který testoval betony s lehčeným kamenivem a pískem. Jako minerální přísady byl použit popílek, mikrosilika a vysokopevnostní struska. Objemová hmotnost se podle složení lišila od 1430 do 1532 kg/m^3 a hodnoty pevnosti v tlaku po 28 dnech ohybovaly od 43 do 61 MPa .

Pan et al. (2014) experimentálně testoval pěnobeton s nízkou objemovou pevností od 150 do 300 kg/m^3 . Část použitého portlandského cementu byla nahrazena mikromletou struskou, k směsi byly přidávány ještě další přísady, které ovlivnily rozlivové vlastnosti a zpracovatelnost. U vyrobených vzorků se pevnost

v tlaku po 28 dnech pohybovala do 1 MPa a součinitel tepelné vodivosti od 0,05 do 0,07 W/mK. Hilal et al. (2015) se zabýval vlivem distribuce vzduchových pórů na výsledné mechanické vlastnosti pěnobetonů. V matematických modelech při teoretickém řešení existuje mnoho přístupů a metod, souhrn doposud použitých postupů publikoval ve své práci např. Nguyen et al. (2017). Chen et al. (2011) testoval pěnový beton na bázi cementu, mikrosiliky, PP vláken a popílku, který zcela nahrazoval písek ve směsi. Pro objemové hmotnosti 800 až 1500 kg/m³ stanovil hodnotu pevnosti v tlaku od 10 do 50 MPa. PP vlákna ve směsi zvýšila pevnost v tahu za ohybu a smrštění při vysychání. Poznyak a Melnyk (2014) navrhl materiál na bázi cementu, popílku, zeolitu, který byl vyztužený pomocí PP vláken, vlastnosti tohoto materiálu srovnávali s referenčním materiálem. U materiálu s objemovou hmotností 650 kg/m³ bylo dosaženo hodnoty pevnosti v tlaku 2,7 MPa. Jones a McCarthy (2004) použil popílek jako náhradu písku (až 100 %) v pěnobetonu s objemovými hmotnostmi od 1000 do 1400 kg/m³, pro tento rozsah naměřili hodnoty pevností v tlaku od 1 do 10 MPa. Z jejich výsledků je patrné, že u materiálů obsahující pouze písek, bylo maximálních hodnot pevností v tlaku dosaženo zhruba po 28 dnech a tyto hodnoty jsou přibližně poloviční, než při použití popílku. V porovnání s hodnotami pevností v tlaku u vzorků s popínkem byl zaznamenán výrazný nárůst pevnosti v tlaku i po 28 dnech. Nárůst závisel na objemové hmotnosti vzorku, u vzorků s objemovou hmotností okolo 1400 kg/m³ byl tento nárůst zhruba trojnásobný.

Hilal et al. (2015b) navrhnul několik směsí na bázi portlandského cementu, písek, mikrosiliky, popílku a superplastifikátoru. U těchto materiálů kombinoval v různém poměru jednotlivé složky a hledal optimální složení. Pro materiál s nejnižší objemovou hmotností 1300 kg/m³ dosahoval po 28 dnech pevnost v tlaku 6 MPa. Nansone et al. (2017) modifikoval portlandský cement pomocí mikrosiliky a metakaolinu, jako plnivo byl použit písek frakce 0/1 mm, směs byla doplněna i mikrovlákný na bázi polypropylenu a uhlíku. Objemová hmotnost vyrobených vzorků se pohybovala od 500 do 1360 kg/m³, výsledné pevnosti v tlaku po 28 dnech od 0,5 do 18,2 MPa, testována byla dále hloubka karbonatace a odolnost proti zmrazovacím cyklům. Liu et al. (2014) testoval materiál na bázi geopolymery s popínkem ze spalování palmových vláken, skořápek a oleje (v zahraničí označovaný jako Palm Oil Fuel Ash (POFA)) pevnost v tlaku byla okolo 10 MPa

po 28 dnech pro vzorky s objemovou hmotností 1300 až 1700 kg/m³, součinitel tepelné vodivosti od 0,05 do 0,07 W/mK pro uvedené objemové hmotnosti. Panesan (2013) testoval vliv různých pěn na proteinové a syntetické bázi na vlastnosti pěnobetonu, který se skládal z cementu, písku a vápence. Pro materiály s objemovou hmotností od 1600 do 2300 kg/m³ dosahovala pevnost v tlaku po 28 dnech hodnot 5 až 10 MPa, hodnoty součinitel tepelné vodivosti byly naměřeny v rozmezí od 0,7 do 1,1 W/mK.

Tian et al. (2016) testoval materiál na bázi Portlanského cementu, popílku, strusky a sádry, pro materiály s objemovou hmotností od 520 do 600 kg/m³ byla stanovena hodnota pevnosti v tlaku po 28 dnech od 13,5 do 15 MPa. Hodnoty součinitel tepelné vodivosti byly naměřeny v rozmezí od 0,072 do 0,190 W/mK. Jiang et al. (2016) testoval materiál na bázi portlandského cementu, urychlovače tuhnutí, superplastifikátoru a pěnotvornou přísadu. Na vzorcích vyrobených s objemovou hmotností 150 až 360 kg/m³, byla stanovena pevnost v tlaku po 28 dnech a dosahovala hodnoty od 0,12 do 0,75 MPa. Wee et al. (2006) testoval pěnobeton bez přídavku písku, který byl tvořený cementem a granulovanou vysokopecní struskou, vodní součinitel byl 0,3. Pro vzorky s objemovou pevností od 600 do 1900 kg/m³ byla stanovena pevnost v tlaku od 2 do 58 MPa. Experimentální část práce doplnil ještě o teoretickou, kde porovnával získané výsledky s materiálovým modelem, resp. s modelem vzduchovým pórů. Model byl zaměřen na predikci pevnosti v tlaku a modulu pružnosti. Abd a Abd (2017) se zabýval modelováním pevnosti v tlaku cementových materiálů vylehčených pěnou.

3. Experimentální vývoj stavebního systému s využitím mikromletých recyklovaných stavebních odpadů

Hlavní cíle předkládaného experimentálního vývoje nového typu omítek, malt, lepidel a plných a lehčených zdících prvků s využitím minerálních vedlejších produktů či minerálních stavebních odpadů lze shrnout v následujících bodech:

- Řešení založené na maximální substituci cementu nebo jiného primárního pojiva mechano-chemickou aktivací částic betonových recyklátů.
- Využití uvedeného alternativního pojiva současně jako dílčího inteligentního plniva společně s jemně mletými vápencovými odprašky či kaly, které představují v některých regionech ekologický problém.
- Substituovat těžené kamenivo drobnými frakcemi betonového recyklátu a při zahrnutí předešlého vytvořit zdící prvky s uplatněním 100% recyklace.
- Modifikovat vlhkostní vlastnosti pomocí polyvinylalkoholu.
- Identifikovat a využít co nejjednodušší systémy napěnění betonové směsi při zachování stabilního systému pěny pro výrobu lehčených zdících prvků s cílem, pokud možno při procesu pozdější výroby eliminovat nezbytnost autoklávu.

Návrh řešení se primárně zaměřuje na výzkum a vývoj nového typu kompozitního materiálu a z něho vytvořeného stavebního prvku nebo výrobní palety stavebních prvků různých velikostí a pevnostních tříd využitelné především v pozemním stavitelství. Záměrem je přitom tyto prvky, a pro ně určené kompozitní směsi, vyvíjet takovým způsobem, aby je bylo možné ve smyslu dosahovaných objemových hmotností kvalifikovat jako vylehčené. Pro tento účel budou analyzovány, posuzovány a rozvinuty vhodné systémy pěnění kompozitní směsi. Dalším aspektem, který je vhodné použít pro vymezení daného typu kompozitní směsi jako pokročilého materiálu, je snaha o sdružení a vzájemné vyvážení několika technických charakteristik a směřovat tak v konečném výsledku ke komplexnějšímu produktu, který se bude vyznačovat dobrými pevnostními charakteristikami, současně však bude mít zvýšenou odolnost proti účinkům vody (mrazu) nebo vylepšené tepelně-technické charakteristiky. Jako přidaná hodnota nad rámec uvedeného je třeba zdůraznit jeden ze základních cílů, tedy využití pokud možno výhradně recyklovaných materiálů, resp. vedlejších produktů zpracování vybraných typů minerálních materiálů (vápenec).

V rámci experimentálního vývoje stavebního systému na bázi mikromletých recyklovaných stavebních odpadů bylo celkem otestováno asi 250 různých směsí. Stavební systém se skládá z plných nebo lehčených bloků a cihel, lepidla na spojování prvků, malt pro omítání – u všech tří základních komponentů se předpokládají variantní řešení s proměnnými užitnými vlastnostmi, a to vždy v určitém logickém (reálném) rozsahu.

Navržené cementové a vápenocementové směsi byly testovány maticovým způsobem, aby bylo možno jednoznačně identifikovat vlivy jednotlivých komponentů s ohledem na zlepšení užitných vlastností pro jednotlivé prvky stavebního systému. Teprve potom byly testovány vlivy kombinací dvou nebo více složek. Jednotlivé kroky je možno rozdělit zhruba takto:

- Výběr a specifikace vstupních surovin především s ohledem na recyklované stavební materiály se zaměřením na zpracování frakce 0/1 mm. Specifikace vlastností s ohledem na předpokládané aplikace.
- Úprava recyklovaných surovin pomocí vysokorychlostního mletí a specifikace vlastností po této úpravě. Porovnání vlastností mletím upravených recyklovaných surovin a původními surovinami.
- Stanovení a návrh směsí s ohledem na poměry složek, vodní součinitel a rozlivové vlastnosti.
- Návrh a stanovení sady materiálových vlastností cementových směsí s mikromletými recyklovanými materiály.
- Modifikace vlastností pomocí vylehčení pěnou. Stanovení závislosti mezi typem směsi, pěny a objemovou hmotností, mechanickými vlastnostmi a tepelnými vlastnostmi.
- Modifikace vlastností pomocí polyvinylalkoholu a hydrofobizační přísady. Stanovení závislosti mezi množstvím PVA a mechanickými vlastnostmi.
- Praktické aplikace navržených směsí na experimentální stěně v laboratorních a v reálných podmínkách s ověřením vlivu vnějších povětrnostních vlivů.

3.1 Vstupní suroviny a jejich specifikace

Níže jsou specifikovány použité suroviny, tedy použitý cement a původní suroviny, které byly použity při dalším výzkumu. Další materiály, které byly použity při modifikaci perspektivních navržených směsí, jsou pro přehlednost specifikovány až u příslušných modifikací.

Cement (C) CEM I 42,5R (Radotín)

Jako vstupní, referenční, surovina byl vybrán portlandský cement CEM I 42,5R ze závodu Radotín, jedná se o cement, který je již dlouhodobě využíván v experimentální části výzkumu na fakultě.

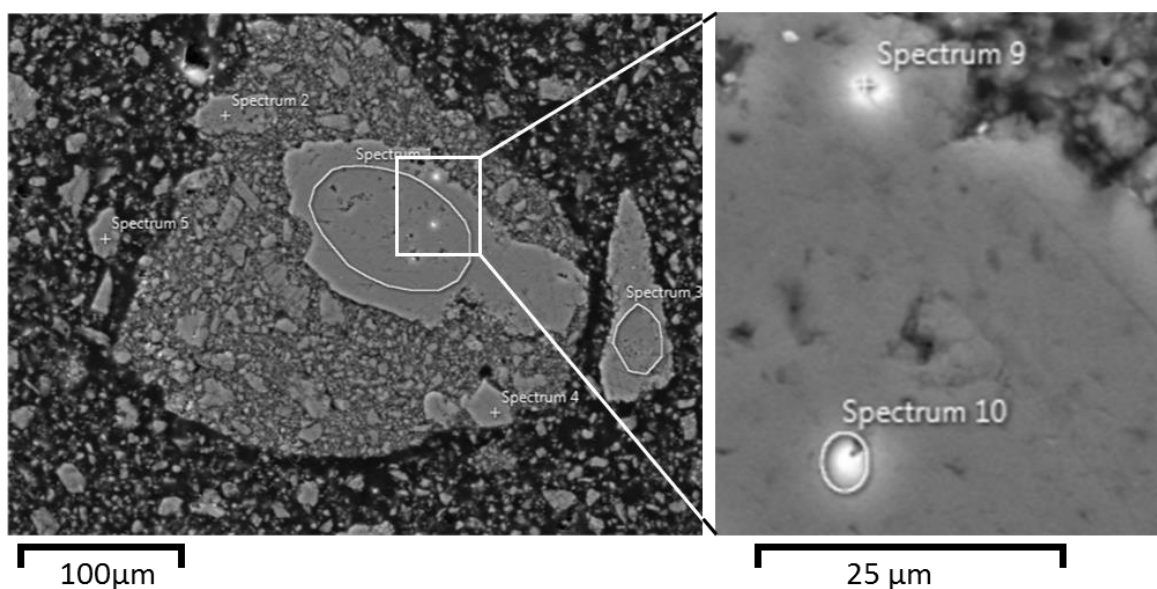
Mikromletý vápenec

Za účelem experimentálního ověření chování mikromleté vápencové moučky v kombinaci s cementem byly použity dva vzorky:

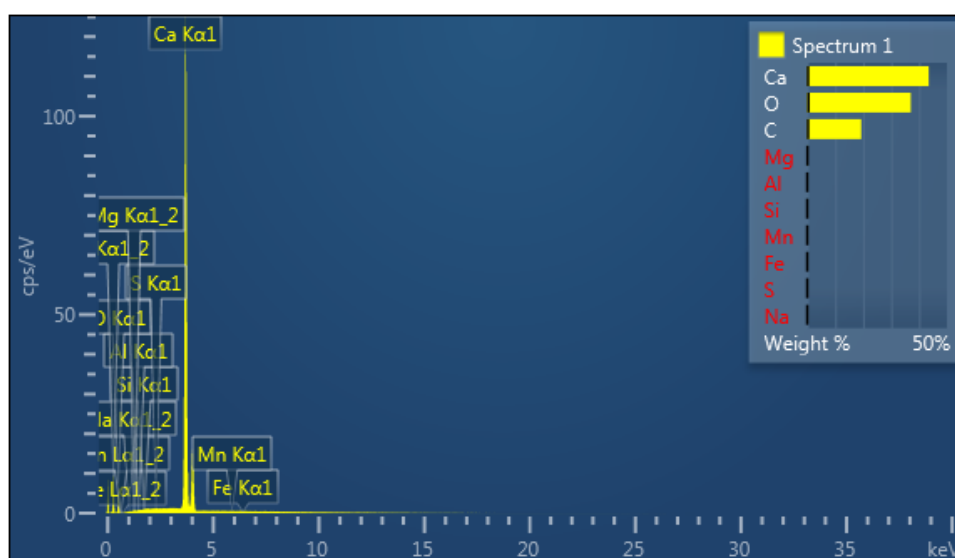
- vzorek ze západního břehu Jordánu,
- vzorek z lokality Beroun.

Vzorek ze Západního břehu Jordánu (dále bude označován jako „J“) je původem z průmyslové oblasti, kde je vápencový mramor zpracováván, především řezán, na další stavební využití. Množství drobného materiálu, který vzniká při jeho řezání a dalších úpravách, jako je leštění při mokrému procesu, se dále téměř nevyužívá a hromadí se na skládkách bez dalšího využití. Dva vzorky vysušeného kalu o celkové hmotnosti zhruba 500 kg byly do České republiky dopraveny letecky, část vzorků byla testována ve své původní podobě, tedy v jaké se nachází po svém vysušení. Při přirozeném/volném vysoušení dochází ke hrudkovatění kalu a v materiálu se nacházejí zrna různých velikostí (Obr. 4). Z důvodu přesnější specifikace chemického a mineralogického složení byly z dodaných vzorků vyrobeny nábrusy (vzorky byly zality do epoxidové pryskyřice a nařezány) a nakonec byly vzorky naprášeny vrstvou uhlíku v tloušťce 30 nm pro zlepšení vodivosti. Na nábrusech vzorků byla provedena mikroskopická prvková analýza. Pro mikroskopickou prvkovou analýzu byl použit elektronový mikroskop ZEISS Merlin s energodisperzním (EDS) a vlnově disperzním analyzátozem (WDS). Z provedené prvkové analýzy (Obr. 4, Obr. 5 a Tab. 2) je patrné, že se jedná o materiál s vysokou čistotou CaCO_3 . I ze snímků, pořízených během mikroskopické analýzy, je patrné,

že zrna se skládají převážně z jedné fáze, což potvrdila i provedená prvková analýza. Čistota CaCO_3 je vyšší než 98 hm. %. Výsledky na stejném materiálu zjištěné pomocí mikroskopické prvkové analýzy jsou ve shodě s výsledky ze spektrometrické analýzy, která byla provedena na univerzitě Birzeit (Birzeit University 2016), která specifikovala množství CaCO_3 na 98,28 hm. %.



Obr. 4: Snímek vápencové moučky (J), na vyznačených oblastech byla provedena podrobná analýza.

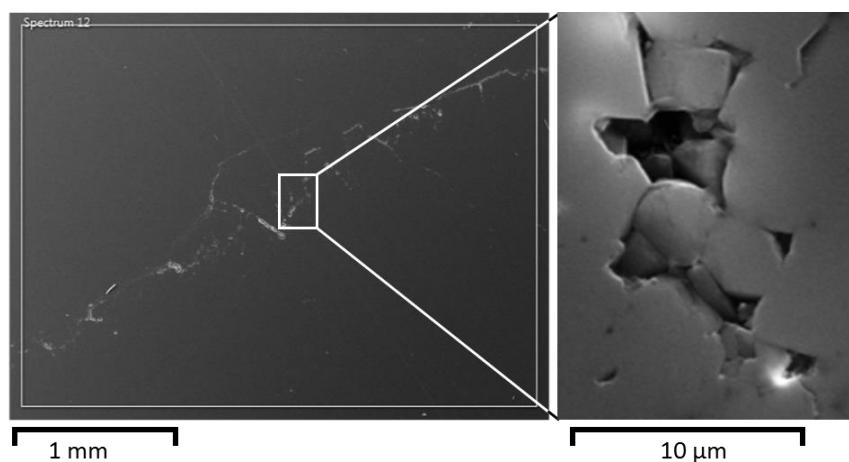


Obr. 5: Záznam z podrobné analýzy vápencové moučky (J) z jedné typické oblasti.

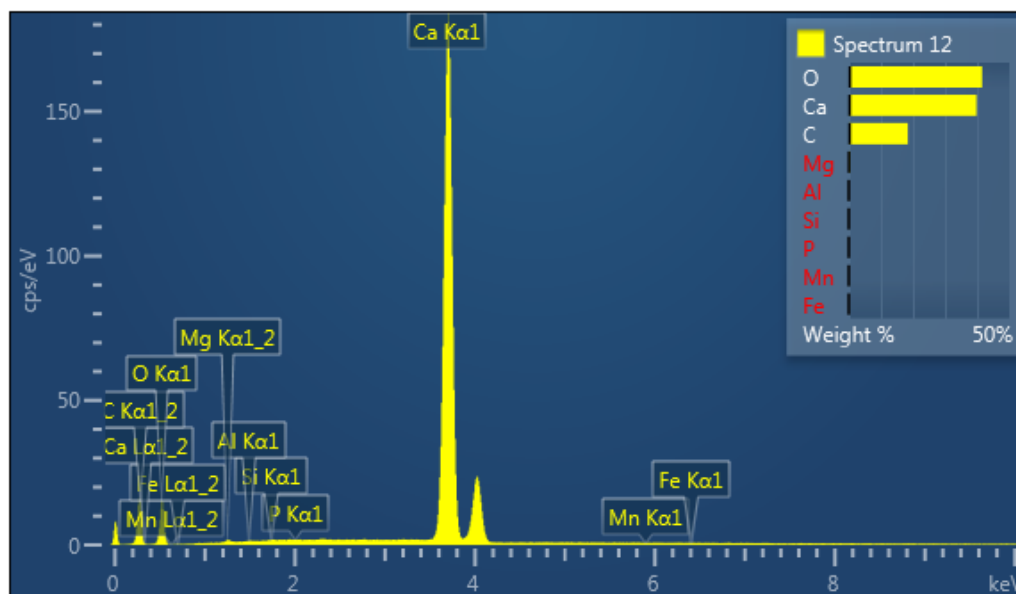
Tab. 2: Specifikace vápencového kalu (J) pomocí prvkové analýzy, se směrodatnou odchylkou SO.

Prvek	Hmotnostní [%]	SO [%]	Atomová [%]	Standard
C	19,29	0,31	32,04	C Vit
O	37,02	0,43	46,15	SiO ₂
Mg	0,23	0,04	0,18	MgO
Ca	43,46	0,32	21,63	Wollastonit
Celkem	100,00		100,00	

Vzorek z lokality Beroun (dále označovaný jako „B“) pochází z lomu firmy Jež spol. s r.o. z netříděného odpadu ze zpracování mramorového vápence. V lomu byly odebrány kusy mramorového vápence a ty byly následně podrceny v čelistovém mlýnu, takto vznikla frakce 0/4 mm, která byla dále upravována. V tomto případě je tedy vhodnější používat termín drcený vápenec. Čistá vápencová moučka nebyla z tohoto lomu k dispozici v dostatečném množství. Příprava vzorků probíhala stejným způsobem jako u mikromleté vápencové moučky. Na Obr. 6 je patrné místo, které bylo dále testováno, jedná se o nehomogenitu v zrně, výsledky provedené prvkové analýzy jsou prezentovány na Obr. 7 a Tab. 3. Z prezentovaných výsledků je zřejmé, že drcený vápenec z České republiky má obdobné složení (viz Tab. 2) jako mramorová moučka ze Západního břehu Jordánu, a to z 98 % je tvořena z CaCO₃ a zbylé 2 % tvoří minoritní složky, z nichž má největší zastoupení MgCO₃. Ze snímků (Obr. 6) je patrné, že drcený vápenec se skládá z jedné fáze a obsahuje malé póry o přibližné velikosti 5 µm.



Obr. 6: Snímek drceného vápence (B).



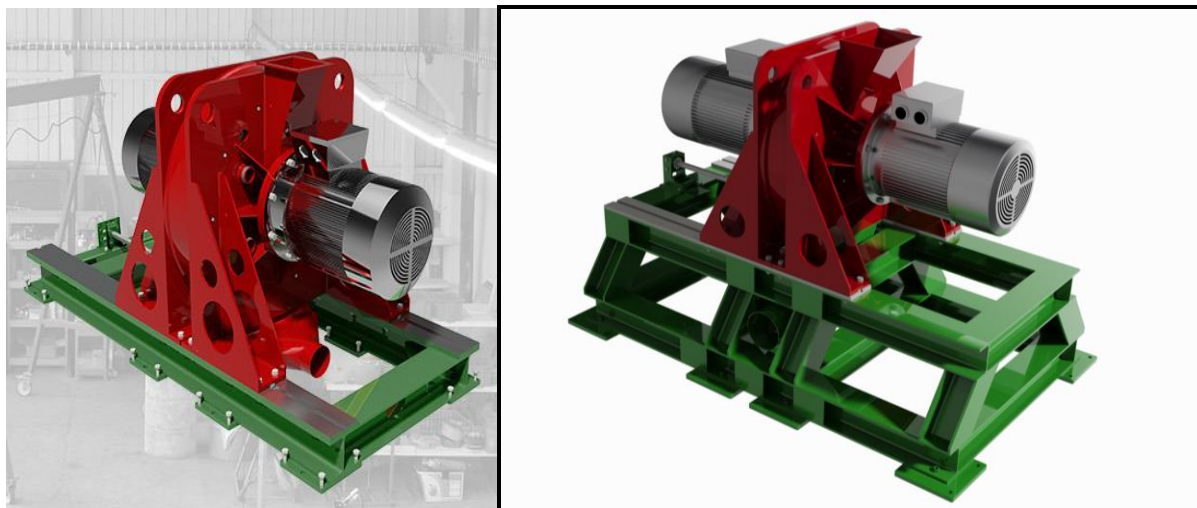
Obr. 7: Záznam z analýzy drceného vápence (B) z jedné typické oblasti.

Tab. 3: Specifikace drceného vápence (B) pomocí prvkové analýzy, se směrodatnými odchylkami SO.

Prvek	Hmotností [%]	SO [%]	Atomová [%]	Standart
C	18,37	0,25	29,81	C Vit
O	41,54	0,33	50,60	SiO ₂
Mg	0,28	0,03	0,23	MgO
Ca	39,81	0,25	19,36	Wollastonit
Celkem	100,00		100,00	

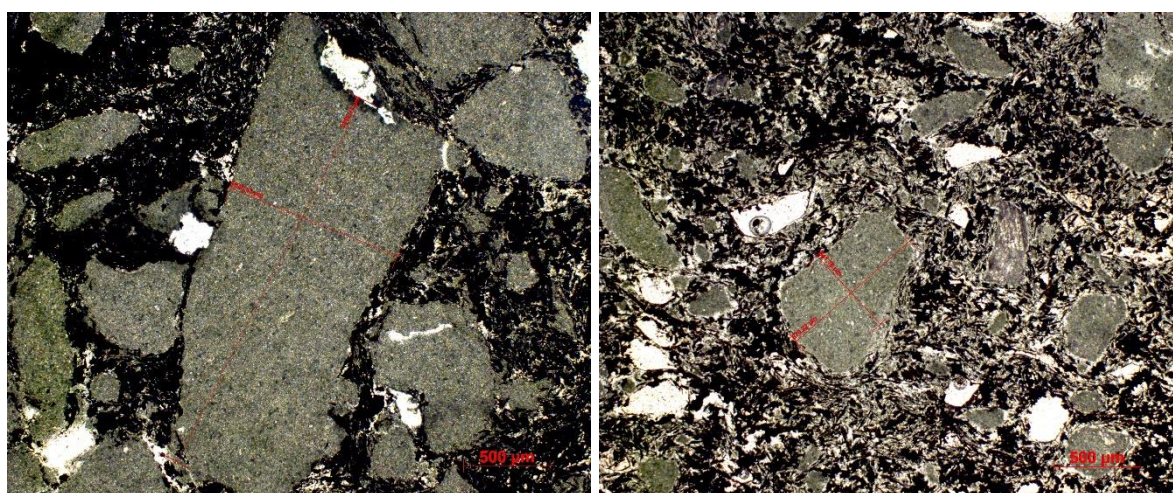
3.2 Úprava recyklovaných materiálů pomocí vysokorychlostního mletí

Oba vzorky vápence (J a B) byly z pohledu velikosti částic (granulometrie) upravené ve firmě Lavaris, s. r. o. (Libčice, Česká republika) pomocí vysokorychlostního mletí. Vysokorychlostní mletí bylo provedeno na mlýnu vlastní konstrukce a výroby této firmy (Obr. 8). Obdobně jako u jiných mlýnů vzniká uvnitř vysokorychlostních mlýnů teplo, takže materiál vkládaný do mlýna může mít i nízkou vlhkost. Další teplo, které vzniklo při mletí, je možné využít na sušení materiálu (do 5 hm. %), např. jako součást automatizované linky.

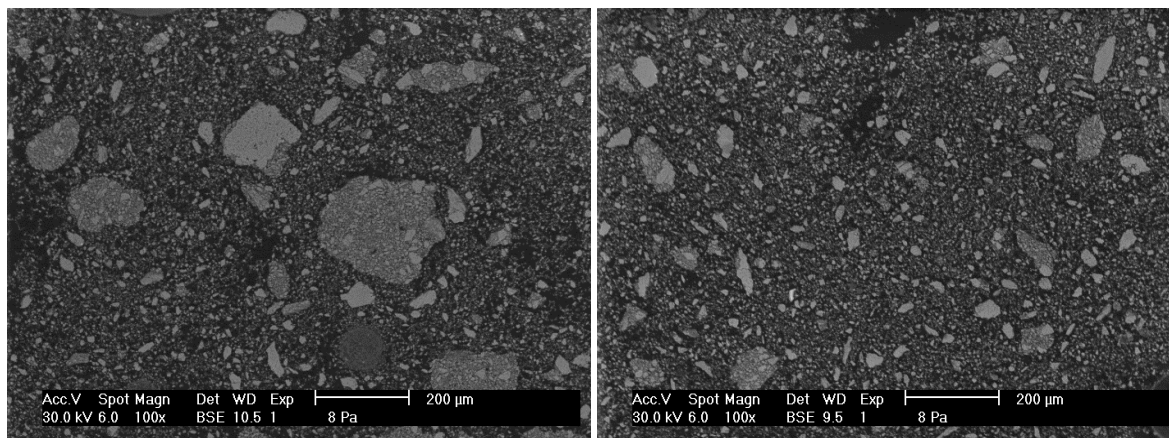


Obr. 8: Vysokorychlostní mlýny firmy Lavaris, s. r. o. (Lavaris, 2016).

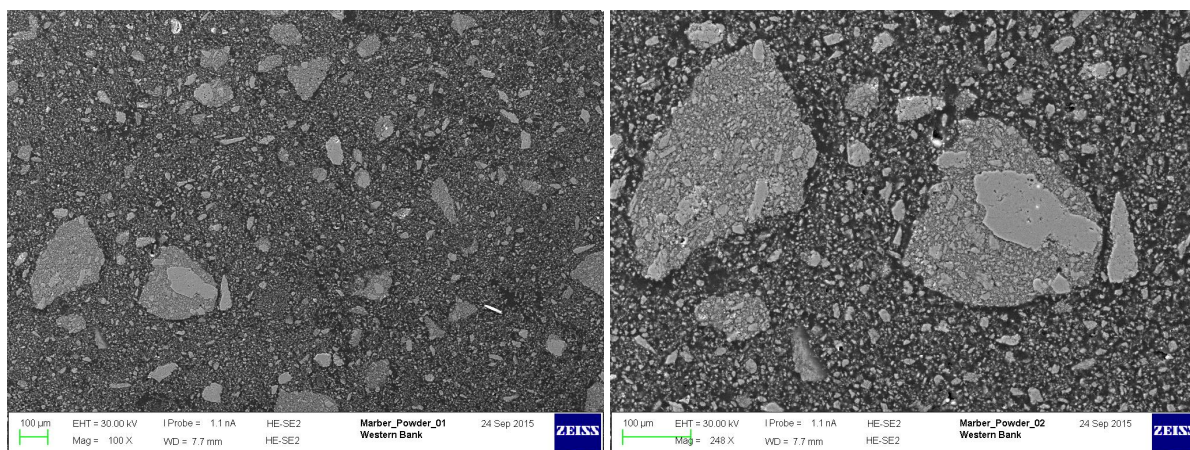
Na Obr. 9 až Obr. 12 jsou porovnány ilustrační snímky z optické a elektronové mikroskopie mikrostruktury testovaných vzorků, které ukazují optický rozdíl mezi vápencovým kalem v surové podobě a po vysokorychlostním mletí. V Tab. 4 a na Obr. 13 je porovnání vlastností cementu (C), vápencového kalu (J), mikromleté vápencové moučky (J) a mikromleté vápencové moučky (B) z analýzy distribuce velikosti částic, měrných povrchů a tvaru zrn.



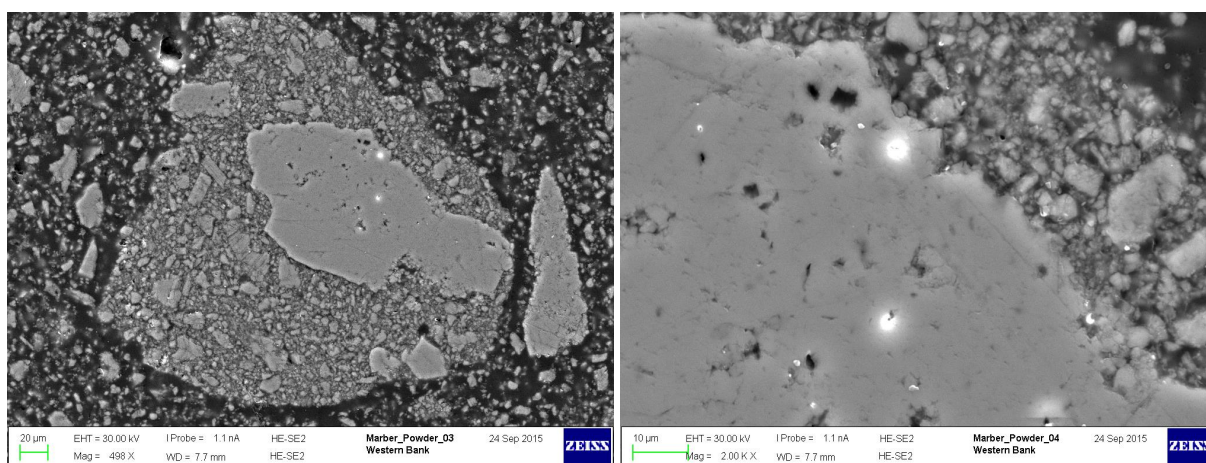
Obr. 9: Vápencový kal (J), vlevo; mikromletý vápencový kal (J), zvětšení 80× z optického mikroskopu.



Obr. 10: Vápencový kal (J), vlevo; mikromletý vápencový kal (J), zvětšení 100× pomocí elektronové mikroskopie.



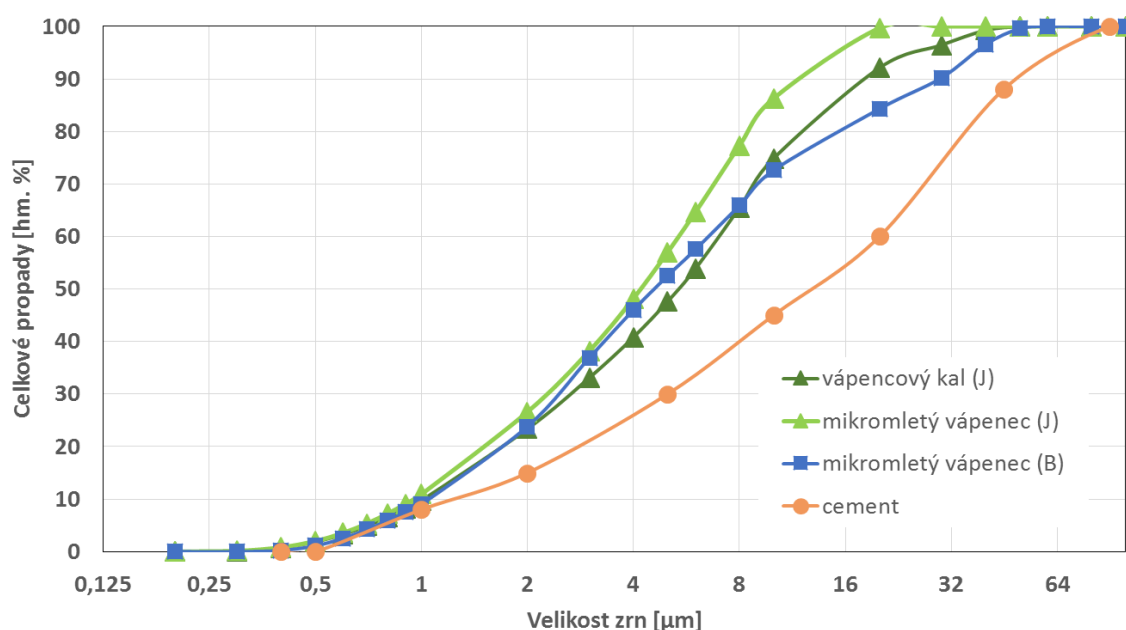
Obr. 11: SEM – mikromletý vápencový kal (J) 100× (vlevo), 250× (vpravo).



Obr. 12: SEM – mikromletý vápencový kal (J) 500× (vlevo), 2000× (vpravo).

Tab. 4: Specifikace vlastností cementu, vápencového kalu (J) mikromleté vápencové moučky (B) pomocí prvkové analýzy.

Parametr/jednotka	Cement (C)	Vápencový kal (J)	Mikromletá vápencová moučka (J)	Mikromletá vápencová moučka (B)
Měrný povrch [cm^2/cm^3]	10850	23050	25950	22500
d 50 [μm]	18	5	4	5
d 90 [μm]	50	17	11	30

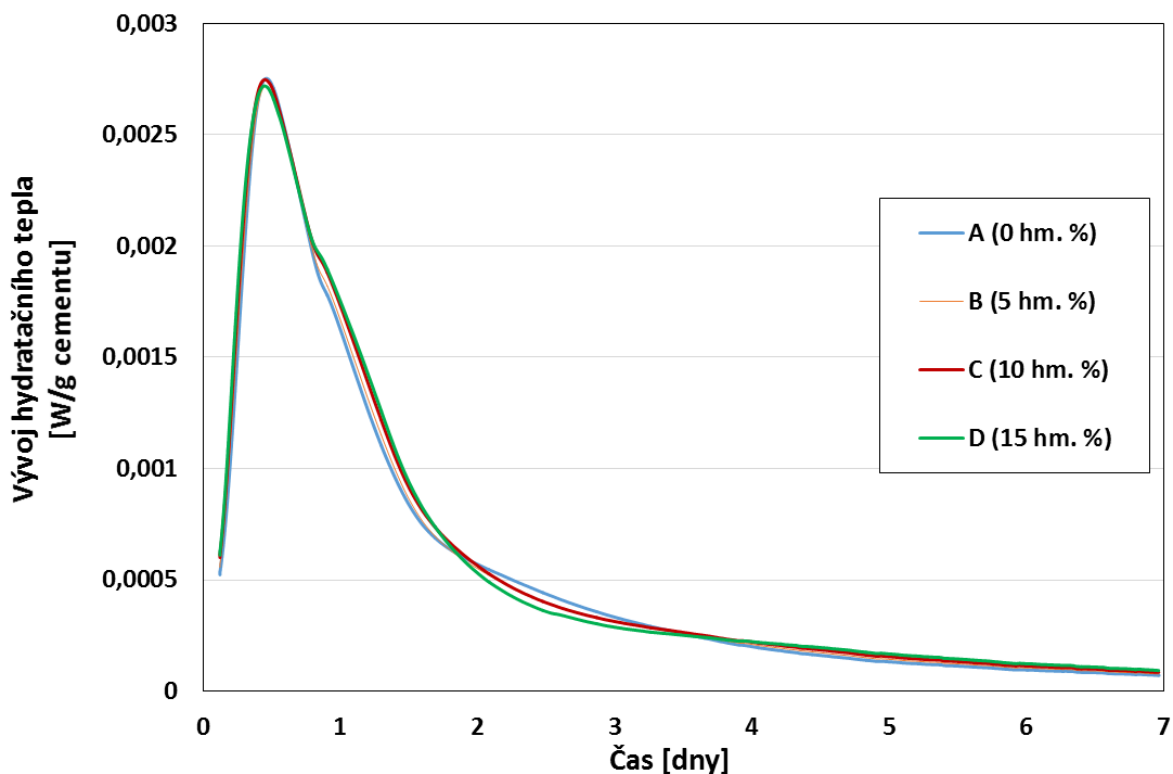


Obr. 13: Křivky zrnitosti použitého cementu (C), vápencového kalu (J), mikromletého vápencového kalu a mikromleté vápencové moučky (B).

Průběh kalorimetrického měření na (Obr. 14) prezentuje vliv náhrady cementu (C) mikromletou vápencovou moučkou na vývoj hydratačního tepla cementové pasty/malty během prvních sedmi dní. Výsledky jsou vztaženy na 1 g použitého cementu (C), díky tomu je možné zohlednit rozdílné průběhy hydratačního procesu. U směsí B, C a D s mikromletou mramorovou moučkou lze pozorovat, že po 18 hodinách od začátku míchání došlo k mírnému zvýšení tepelného toku, způsobeného pravděpodobně hydratací C_3A a C_3S .

Další rozdíl nastává po 20 hodinách, kdy je u směsí s mikromletou mramorovou moučkou nepatrně opožděná hydratace C_2S . Uvedený efekt může být způsoben buďto mramorovou moučkou nebo vlivem přidání jemně mletých částic. Rozdíly mezi

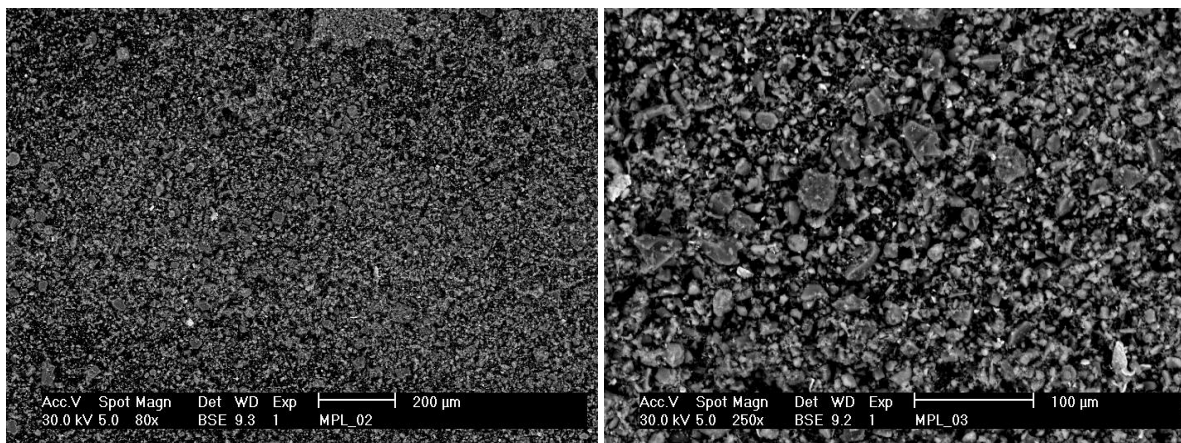
směsí bez a s mikromletou mramorovou moučkou jsou zanedbatelné. Proto lze konstatovat, že mikromletá mramorová moučka je inertní a může tvořit pouze mikroplnivo.



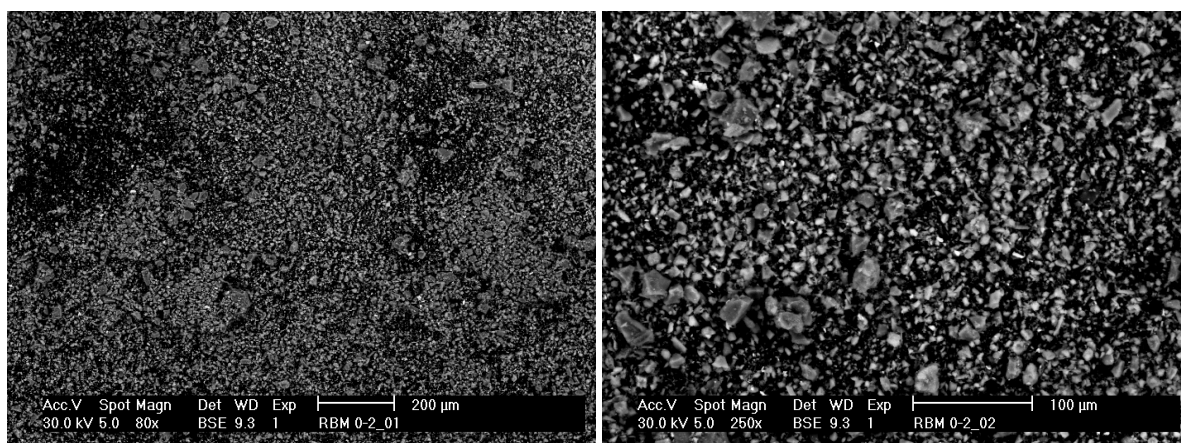
Obr. 14: Časový průběh kalorimetrického měření pro vzorky s 5, 10 a 15 hm. % náhrady cementu (C) mikromletým vápencovým kalem (J).

Mikromletý beton

Jako zdroj recyklátu pro výrobu směsí byly vybrány dva různé betonové prefabrikáty, prvním byl starý vyřazený železniční betonový (železobetonový) pražec a druhým nově vyrobený betonový žlab. Oba zdrojové „materiály“ (betonový pražec a žlab) byly nejdříve nahrubo podrceny na frakci 0/16 a byla z nich odseparována frakce 0/4 mm, která byla pomleta ve vysokorychlostním mlýnu firmy Lavaris, s.r.o. Snímky z elektronové mikroskopie v režimu BSE vzorků z mikromletého železničního pražce (P) a betonového žlabu (Z) jsou prezentovány ve dvou různých zvětšeních na Obr. 15 a Obr. 16. Pro větší názornost jsou specifikace hlavních použitých surovin uvedeny v Tab. 5. Křivky zrnitosti pro testované materiály jsou uvedeny na Obr. 17.



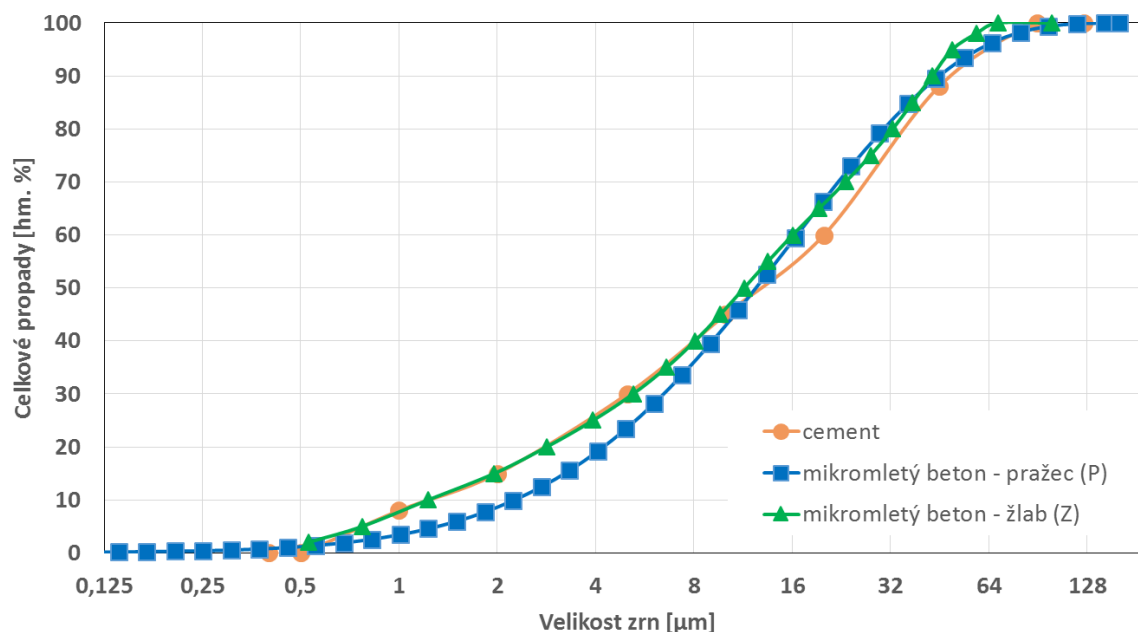
Obr. 15: Snímky z elektronové mikroskopie (režim BSE), zrna mikromletého železničního pražec (P), zvětšení 80× (vlevo) a 250× (vpravo).



Obr. 16: Snímky z elektronové mikroskopie (režim BSE), zrna mikromletého betonového žlabu (Z), zvětšení 80× (vlevo) a 250× (vpravo).

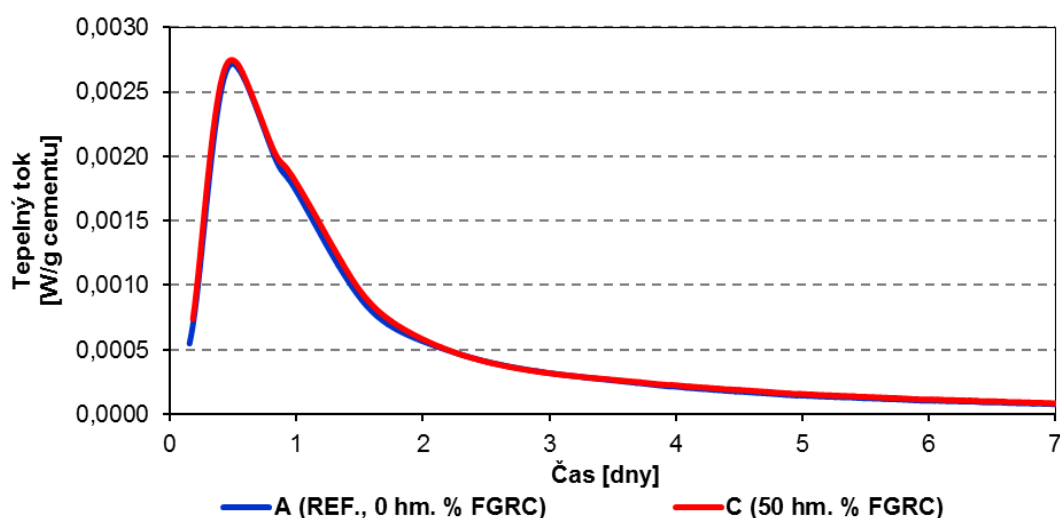
Tab. 5: Specifikace vlastností cementu a mikromletých betonů – železniční pražec (P) a betonový žlab (Z)

Parametr/jednotka	Cement (C)	Mikromletý beton – pražec (P)	Mikromletý beton – žlab (Z)
Měrný povrch [cm ² /cm ³]	10800	11750	10200
d 50 [μm]	18	12	12
d 90 [μm]	50	45	44



Obr. 17: Křivky zrnitosti použitého cementu (C), mikromletého betonového pražce a mikromletého betonového žlabu.

Průběh kalorimetrického měření na Obr. 18 prezentuje vliv náhrady cementu (C) mikromletou betonovou moučkou na průběh prvních sedmi dní cementové pasty/malty. Výsledky jsou vztaženy na 1 g použitého cementu (C), díky tomu je možné zohlednit rozdílné průběhy hydratačního procesu. V průběžích vývoje hydratačního tepla je patrné, že u vzorku s 50 hm. % mikromletého betonu (P) došlo k malému nárůstu celkového hydratačního tepla.



Obr. 18: Vývoj hydratačního tepla referenčního cementu (C) a vzorku s 50 hm. % mikromletého betonu (P). Výsledky jsou vztaženy na 1 g cementu.

3.3 Použité experimentální metody

Za účelem charakterizace mikromletých materiálů byly použity následující přístroje a vybavení:

- elektronový mikroskop,
- optický mikroskop,
- laserový granulometr,
- Bleinova metoda,
- kalorimetr.

Na mikromletých vzorcích recyklátů byla provedena mikroskopická analýza pomocí elektronové mikroskopie na přístroji XL30 ESEM-TMP FEI Philips (umístěného v mikroskopické laboratoři v Centru pro energeticky efektivních budov ČVUT v Praze). Snímky byly pořízeny detektorem zpětně odražených elektronů (BSE), kde detekované elektrony vystupují z větší hloubky (řádově desítky mikrometrů) a přináší tedy informaci o lokálních změnách materiálu. Jedná se tedy o materiálový kontrast. Snímky byly pořízeny v environmentálním režimu při nízkém vakuu (10 až 20 Pa) a urychlovacím napětí 30 kV.

Pro určení zrnitosti mikromleté mramorové moučky po procesu mikromletí a určení velikosti středního zrna byl použit laserový granulometr. Jemnost mletí recyklátu definuje měrný povrch, který byl změřen vzdušnou permeabilní metodou (Blaineova metoda) přístrojem Matest E009. Pro zjištění složení mikromleté mramorové moučky byla provedena mikroanalýza. Pro mikroskopickou prvkovou analýzu byl použit elektronový mikroskop ZEISS Merlin s energodisperzním (EDS) a vlnově disperzním analyzátozem (WDS).

Stanovení **vývinu hydratačního tepla** bylo prováděno na kalorimetru TAM Air. TAM Air je isothermní kalorimetr pro přesné stanovení tepelného toku (produkce i spotřeby) a množství vyprodukovaného tepla. Pro měření bylo použito celkem 8 komor (pro každou směs dvě komory). Směsi byly podrobeny 7 dennímu měření vývinu hydratačního tepla při stálé teplotě 20 °C. Směsi byly uloženy v plastových uzavíratelných nádobkách, které byly před vložením do kalorimetru popsány, zváženy a nakonec zhutněny. Každá nádobka obsahovala přibližně 31 až 33 g směsi. Výstupem z kalorimetrického měření byl tepelný tok ve W. Výsledky z kalorimetrického měření byly na základě hmotností směsí v nádobce převedeny

na hodnoty vztažené na 1 g cementu. Na úrovni vyrobených vzorků bylo použito následující přístrojové vybavení:

- sestava pro impulzní metodu,
- hydraulický lis.

Dynamický modul pružnosti a smyku byl měřen pomocí nedestruktivní rezonanční metody. Měřicí sestava firmy Brüel & Kjær byla tvořená měřicí ústřednou Brüel & Kjær typ 3560-B-120, snímačem zrychlení Brüel & Kjær typ 4519-003, rázovým kladívkem Brüel & Kjær typ 8206 a řídicím notebookem. Před každým měřením rezonanční metodou bylo nutné pro získání vstupních hodnot každý vzorek změřit a zvážit.

Pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku byly stanoveny za použití zařízení (hydraulického lisu) Heckert, model FP100. Pevnost v tahu za ohybu byla stanovena tříbodovou ohybovou zkouškou a pevnost v tlaku jednoosou tlakovou zkouškou. Testování bylo řízeno posunem při konstantní rychlosti 0,1 mm/s, v případě tříbodového ohybu a 0,3 mm/s pro jednoosý tlak. Vzdálenost mezi podpěrami během tříbodové ohybové zkoušky byla rovna 100 mm. Pevnost v tahu za ohybu byla měřena vždy na šesti vzorcích a pevnost v tlaku byla zjištěna z polovin vzorků (porušených během ohybové destruktivní zkoušky) s účinnými rozměry 40×40×40 mm.

Tepelné vlastnosti vzorků byly stanoveny pomocí přístroje ISOMET 2104, který vyrábí a dodává firma Applied Precision (Slovensko). Přístroj měří na nestacionárním principu a přímo měří tepelnou vodivost (W/mK) a měrnou objemovou tepelnou kapacitu (J/m³K), dopočítává hodnotu tepelné difuzivity (m²/s). Pro měření byly použity plošné sondy.

3.4 Výroba vzorků

Protože se ve všech případech jednalo o jemnozrnné materiály, byly vyráběny vzorky jemnozrnných cementových malt s různými přísadami. Vzorky byly vyrobeny v ocelových trojformách s rozměry vzorků 40×40×160 mm. Před výrobou vzorků byly formy ošetřeny separačním prostředkem.

Den po odformování byly vzorky vyjmuty z forem a popsány. Část vzorků byla následně uložena volně v laboratorním prostředí s teplotou místnosti 22 ± 2 °C a relativní vlhkostí 50 ± 3 %. Zbývající část vzorků byla uložena pod vodní hladinu,

aby se simulovalo normové uložení. Z mikromletých materiálů byly pro optickou a elektronovou mikroskopii vyrobeny nábrusy. 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 (Araldit 2020 A/B). Nábrusy byly připraveny na stroji Tegramin od firmy Struers. Vzorky byly broušeny a leštěny ve více krocích pro dosažení co nejlepší kvalitu povrchu vzorku. V prvním kroku byl použit smirkovým papír s hrubostí 220 zrn/cm², aby odstranil největší nerovnosti po řezání. V dalších krocích byl použit jemnější smirkový papír a to 500 zrn/cm² po dobu 2 minut a 1200 zrn/cm² po dobu dalších 2 minut. Celé broušení bylo prováděno pod vodou. V následujících krocích byl vzorek leštěn za použití dvou druhů emulze s obsaženými nanodiamanty a lubrikantu (DP-Lubricant green) Nejdříve byla použita emulze s nanodiamanty o velikosti 3 µm po dobu 10 minut a posléze 1 µm emulze po dobu 5 minut. Nakonec byly vzorky naprášeny vrstvou uhlíku v tloušťce 30 nm pro zlepšení vodivosti.

3.5 Návrh směsí s mikromletým materiálem a jejich materiálové vlastnosti

Mikromletý vápencový kal (J)

Koncepce u tohoto návrhu spočívala ve stanovení optimálního poměru mezi cementem a mikromletým vápencovým kalem tak, aby byl stanoven rozsah poměrů, který bude dále modifikován. V Tab. 6 je specifikováno složení testovaných směsí za účelem ověření vlivu mikromletého vápencového kalu jako substituce cementu. Referenční směs obsahovala pouze cement (C), další směsi obsahovaly mikromletý vápencový kal v množství od 15 do 95 hm. % z celé směsi (suchých složek). Vodní součinitel byl proměnný a byl upravený tak, aby rozliv čerstvé směsi na střešacím stolku byl 190 mm. V závislosti na vodním součiniteli a složení směsí se změnily parametry, jako objemová hmotnost a celková pórovitost (Tab. 7). Nejvyšší objemovou hmotnost měla referenční směs, nejnižší pak, zhruba o 500 kg/m³ směs s 95 hm. % mikromletého vápencového kalu. V Tab. 7 jsou uvedeny hodnoty smrštění stanovené po 24 hodinách od výroby vzorků. Nejnižších hodnot dosahuje referenční cementová směs, směs s obsahem mikromletého vápencového kalu 95 hm. % dosahuje hodnot smrštění téměř pětinasobných.

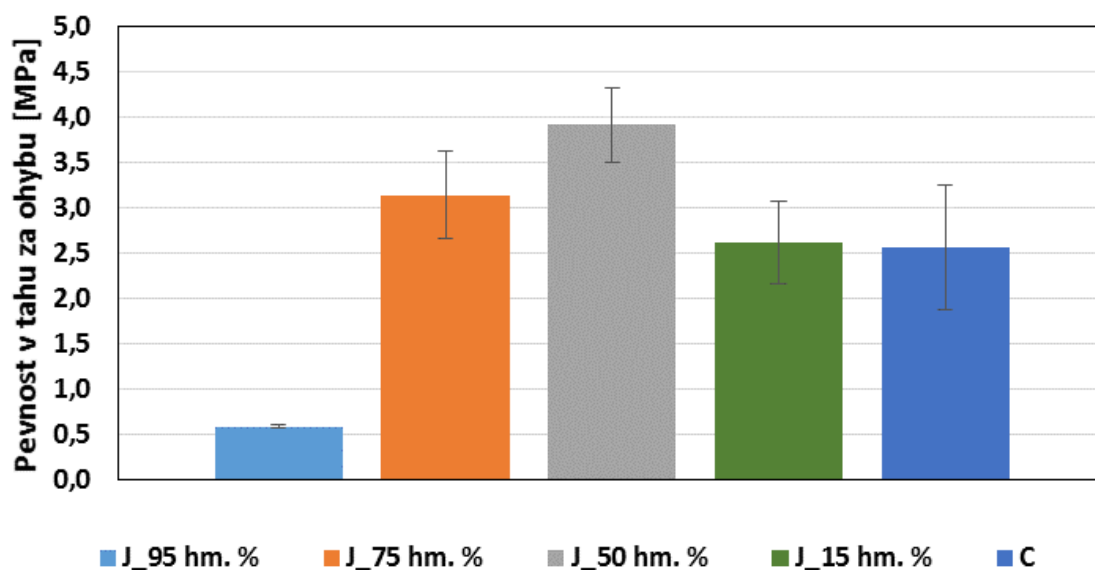
Tab. 6: Specifikace složení testovaných směsí v závislosti na množství použitého mikromletého kalu (J).

Označení	Cement/ mikromletý vápencový kal [hm. %]	Vodní součinitel [-]
C	100/0	0,35
J_15 hm. %	85/15	0,31
J_50 hm. %	50/50	0,31
J_75 hm. %	75/25	0,30
J_95 hm. %	5/95	0,29

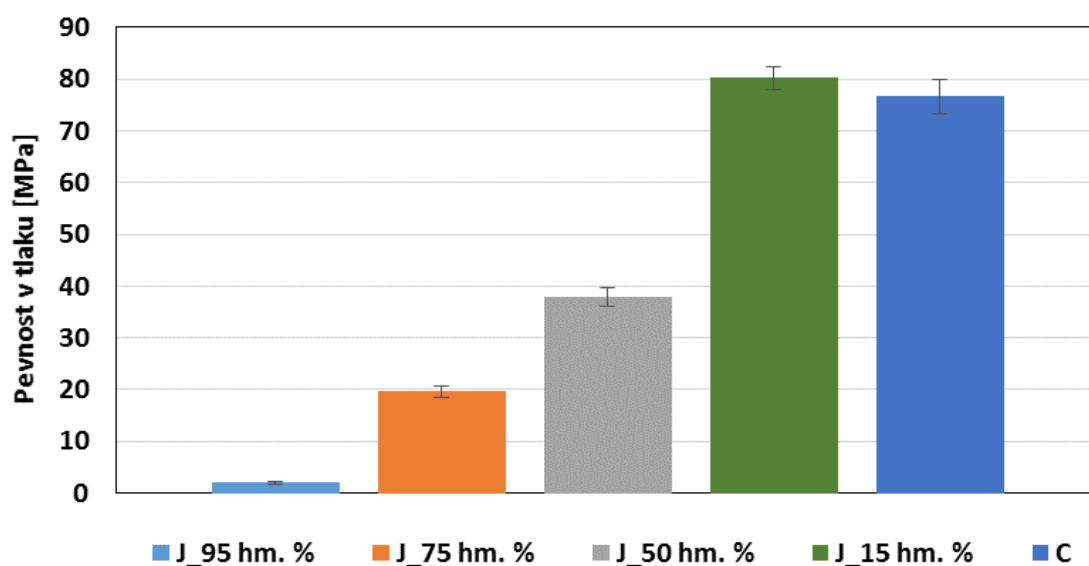
Tab. 7: Rozliv, objemová hmotnost, otevřená pórovitost a smrštění vzorků s různým množstvím mikromleté vápencové moučky (se směrodatnými odchylkami).

Označení	Rozliv (20 poklepů) [mm]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Celková pórovitost [-]	Smrštění po 24 hodinách [%]
C	190	1940 ± 10	0,20 ± 0,02	0,19 ± 0,02
J_15 hm. %	190	1920 ± 5	0,19 ± 0,01	0,20 ± 0,02
J_50 hm. %	190	1760 ± 10	0,27 ± 0,01	0,45 ± 0,01
J_75 hm. %	190	1680 ± 10	0,30 ± 0,01	0,75 ± 0,02
J_95 hm. %	190	1550 ± 5	0,35 ± 0,02	1,13 ± 0,01

Závislost pevností v tlaku za ohybu na obsahu mikromletého vápencového kalu po 28 dnech u testovaných směsí je patrná z Obr. 19. Nejvyšších hodnot, okolo 4,0 MPa, dosahuje směs s obsahem 50 hm. % cementu. Nejnižších hodnot dosahuje směs s obsahem 5 hm. % cementu. Pevnost v tlaku po 28 dnech je zobrazena na Obr. 20, nejvyšších hodnot dosahuje směs s 15 hm. % mikromleté vápencové moučky a to i vůči referenční čistě cementové směsi. Hodnoty pevnosti v tlaku korespondují s hodnotami objemové hmotnosti a celkové pórovitosti, viz Tab. 7.

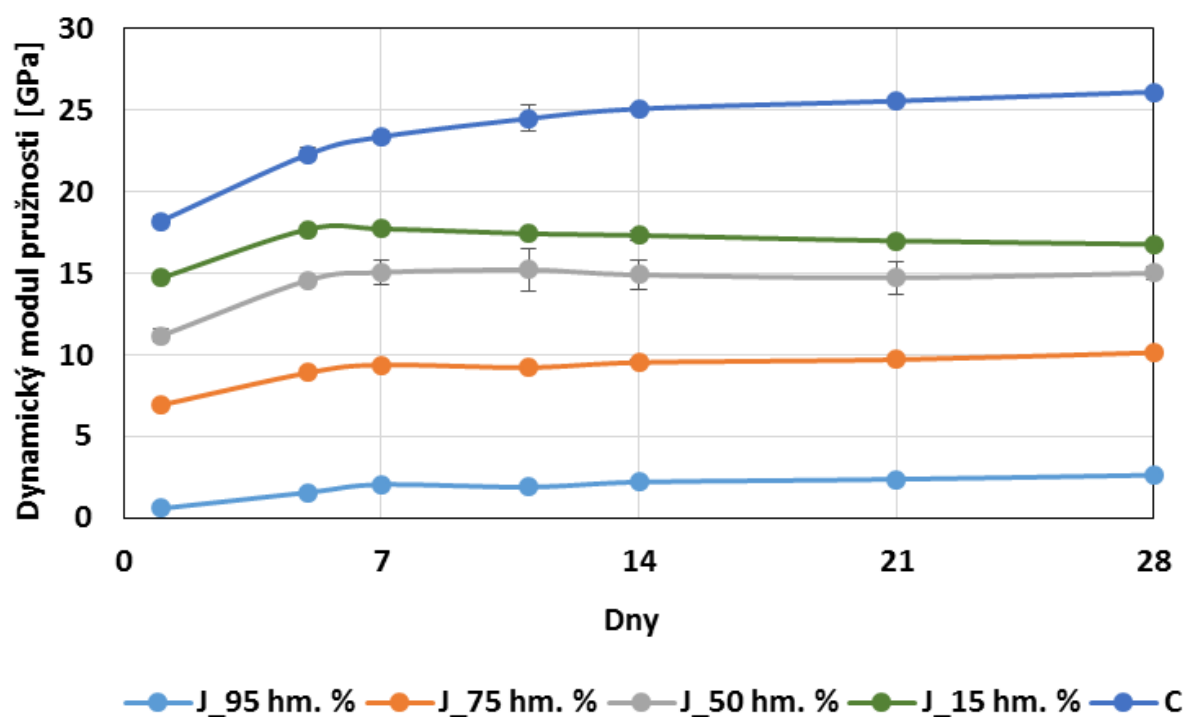


Obr. 19: Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech se směrodatnými odchylkami v závislosti na množství mikromleté vápencové moučky (J).

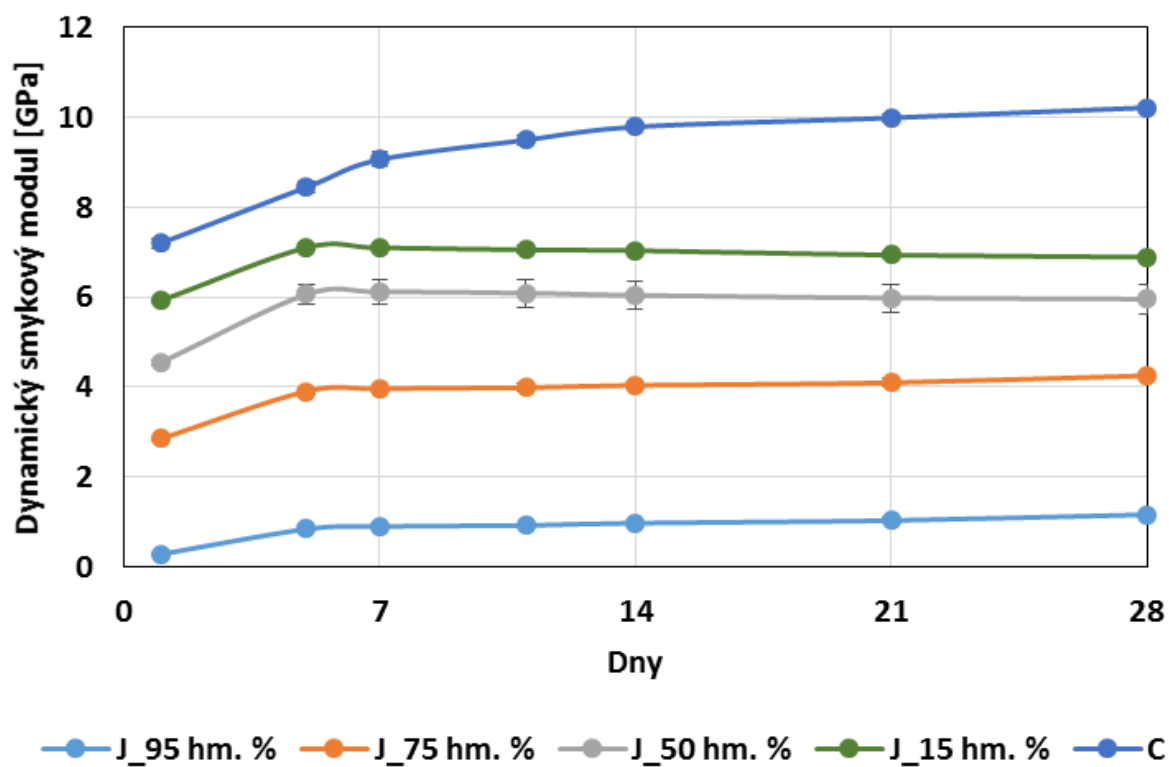


Obr. 20: Pevnost v tlaku po 28 dnech se směrodatnými odchylkami v závislosti na množství mikromleté vápencové moučky (J).

Vývoj dynamického modulu pružnosti a dynamického smykového modulu je prezentován na Obr. 21 a Obr. 22, na obou průbězích je patrné snížení hodnot modulů, s přibývajícím množstvím mikromletého cementového kalu, resp. se snižujícím obsahem cementu, je pokles výraznější. Mezi prvním a sedmým dnem dochází k nárůstu hodnot obou dynamických modulů, následně mezi 7 a 28 dnem je nárůst u většiny vzorků méně pozvolný a u některých v podstatě konstantní, v rámci směrodatné odchylky.



Obr. 21: Časový vývoj dynamického modulu pružnosti se směrodatnými odchylkami v závislosti na množství mikromleté vápencové moučky (J).



Obr. 22: Časový vývoj dynamického smykového modulu se směrodatnými odchylkami v závislosti na množství mikromleté vápencové moučky (J).

Mikromletý betonový pražec (P)

Koncepce u tohoto návrhu spočívala ve stanovení optimálního, resp. limitního možného, poměru mezi cementem a mikromletým betonovým pražcem, aby byl stanoven rozsah poměrů, který bude dále modifikován. V Tab. 8 je specifikováno složení testovaných směsí za účelem ověření vlivu mikromleté vápencové moučky jako substituce cementu.

Referenční směs obsahovala pouze cement (C), další směsi obsahovaly mikromleté vápencové moučky v množství od 15 do 65 hm. % z celé směsi (suchých složek), poslední směs obsahovala pouze mikromletý betonový recyklát bez cementu. Vodní součinitel byl proměnný a byl volen/upravený tak, aby rozliv čerstvé směsi na střešacím stolku byl 130 mm. V závislosti na vodním součiniteli a složení směsí se změnily parametry jako objemová hmotnost a celková pórovitost (Tab. 9). V Tab. 9 jsou uvedeny hodnoty smrštění stanovené po 24 hodinách od výroby vzorků.

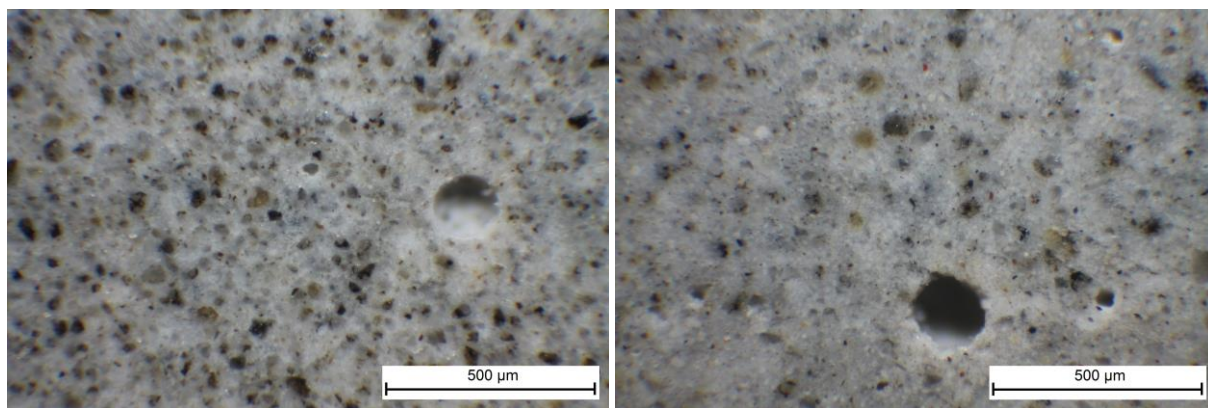
Tab. 8: Specifikace vlastností testovaných směsí v závislosti na množství použitého mikromletého betonového recyklátu (P).

Směs	Cement/mikromletý betonový pražec [hm. %]	Vodní součinitel [-]	Rozliv [mm]
C	100/0	0,350	130
P_35 hm. %	65/35	0,380	130
P_50 hm. %	50/50	0,400	130
P_65 hm. %	35/65	0,417	130
P_100 hm. %	0/100	0,430	130

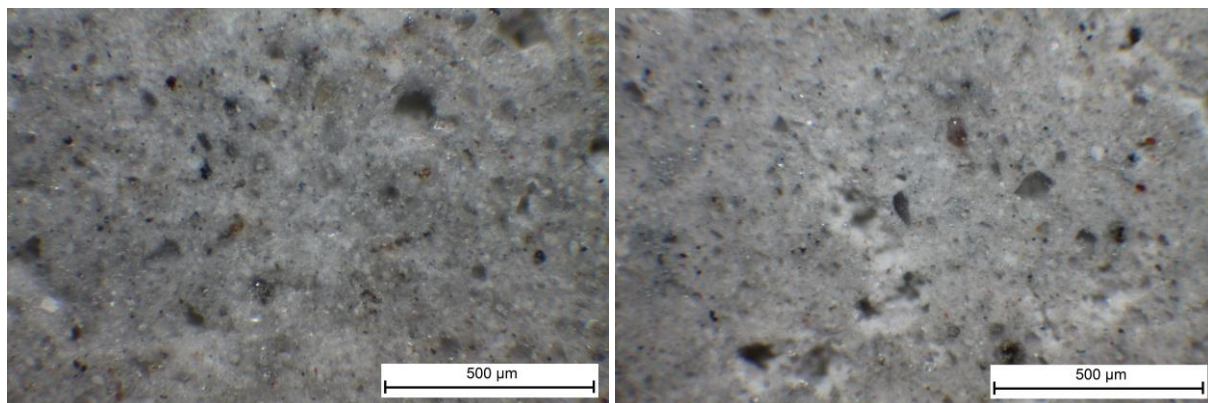
Tab. 9: Rozliv, objemová hmotnost, otevřená pórovitost a smrštění vzorků s různým množstvím betonového recyklátu (se směrodatnými odchylkami).

Označení	Rozliv (20 poklepů) [mm]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Celková pórovitost [-]	Smrštění po 24 hodinách [%]
C	130	2049 ± 5	0,14 ± 0,01	0,81 ± 0,18
P_35 hm. %	130	1906 ± 5	0,21 ± 0,01	1,74 ± 0,63
P_50 hm. %	130	1865 ± 13	0,22 ± 0,01	2,76 ± 0,65
P_65 hm. %	130	1789 ± 13	0,25 ± 0,02	3,65 ± 0,78
P_100 hm. %	130	1293 ± 7	0,46 ± 0,02	8,09 ± 0,98

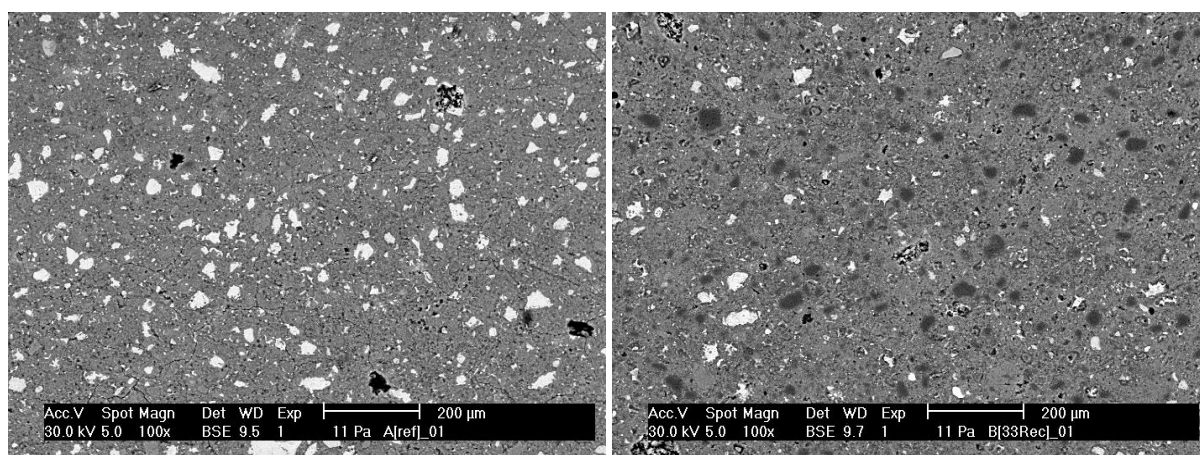
Na Obr. 23 a Obr. 24 jsou snímky z optického mikroskopu, které dokreslují vliv množství mikromletého betonového pražce (P) ve směsi s cementem (C). Obdobně jsou na Obr. 25 a Obr. 26 snímky z elektronového mikroskopu. Z obou typů snímků je patrné, že se mění mikrostruktura studovaných směsí, s přibývajícím množstvím mikromletého betonu se zvyšuje mikroporozita a materiál je méně kompaktní.



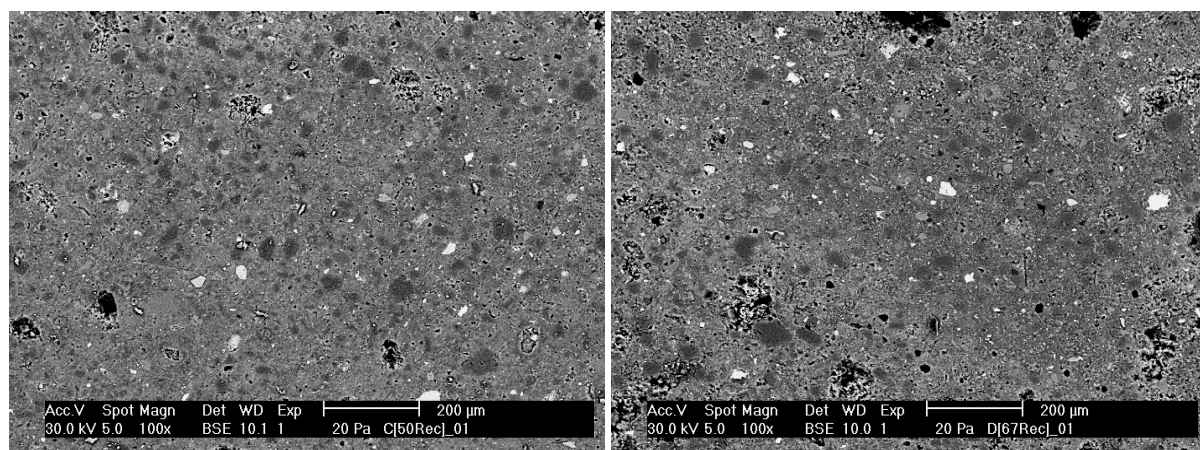
Obr. 23: Snímky z optického mikroskopu, referenční cementový vzorek (vlevo), vzorek s 35 hm. % mikromletého betonového pražce (vpravo).



Obr. 24: Snímky z optického mikroskopu, vzorek s 50 hm. % (vlevo) a s 65 hm. % mikromletého betonového pražce (vpravo).

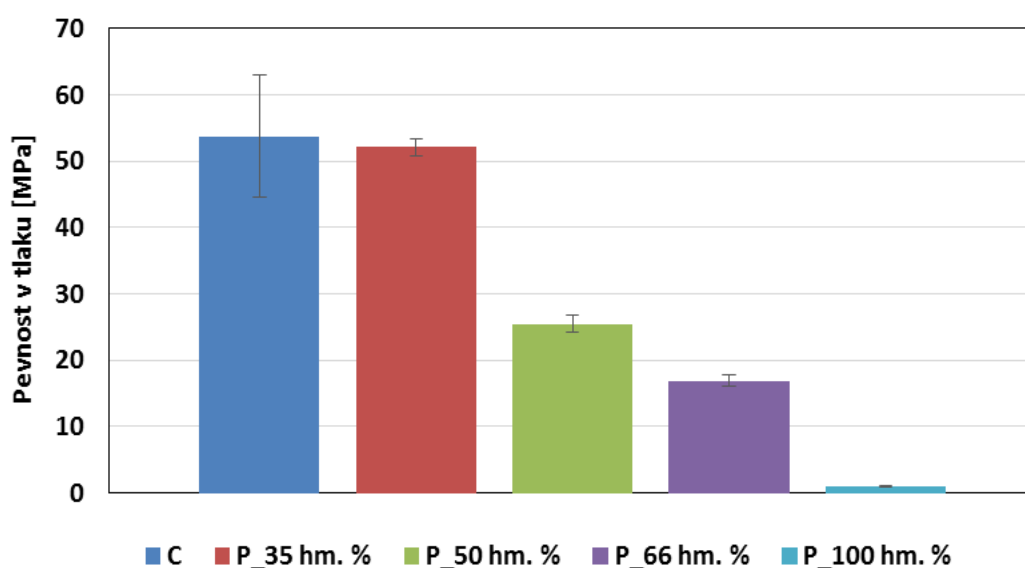


Obr. 25: Snímky z elektronového mikroskopu, referenční cementový vzorek (vlevo), vzorek s 35 hm. % mikromletého betonového pražce (vpravo).

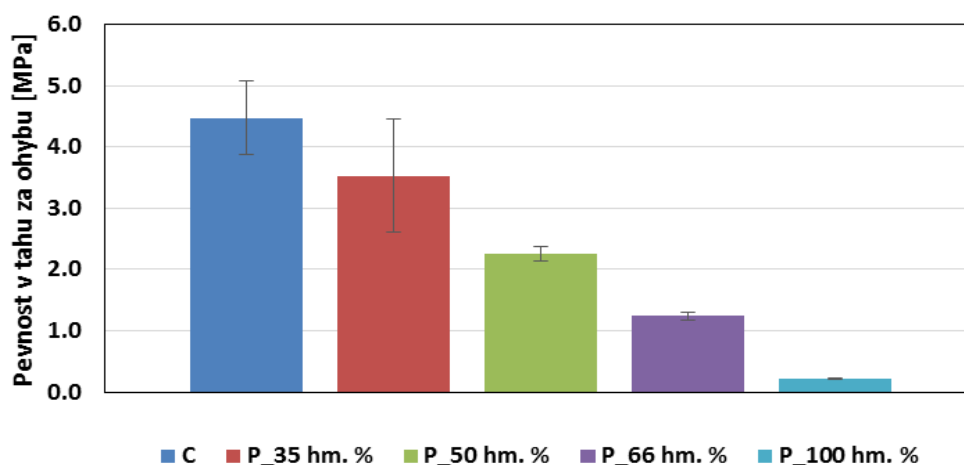


Obr. 26: Snímky z elektronového mikroskopu, vzorek s 50 hm. % (vlevo) a s 65 hm. % mikromletého betonového pražce (vpravo).

Pevnost v tlaku po 28 dnech v závislosti obsahu mikromletého betonového pražce (P) je zobrazena na Obr. 27, nejvyšších hodnot dosahuje směs s 0 a 38 hm. % mikromletého betonového pražce, k výraznému poklesu dochází až od 50 hm. % náhrady cementu. V dalším průběhu se snižujícím se obsahem cementu již pevnost v tlaku výrazně klesá. Hodnoty pevnosti v tlaku korespondují do jisté míry s hodnotami objemové hmotnosti a celkové pórovitosti, viz Tab. 9. Závislost pevností v tlaku za ohybu na obsahu mikromletého betonového pražce po 28 dnech u testovaných směsí je patrná z Obr. 28. Se snižujícím se hodnotou cementu ve směsi klesají hodnoty pevnosti v tlaku téměř lineárně.

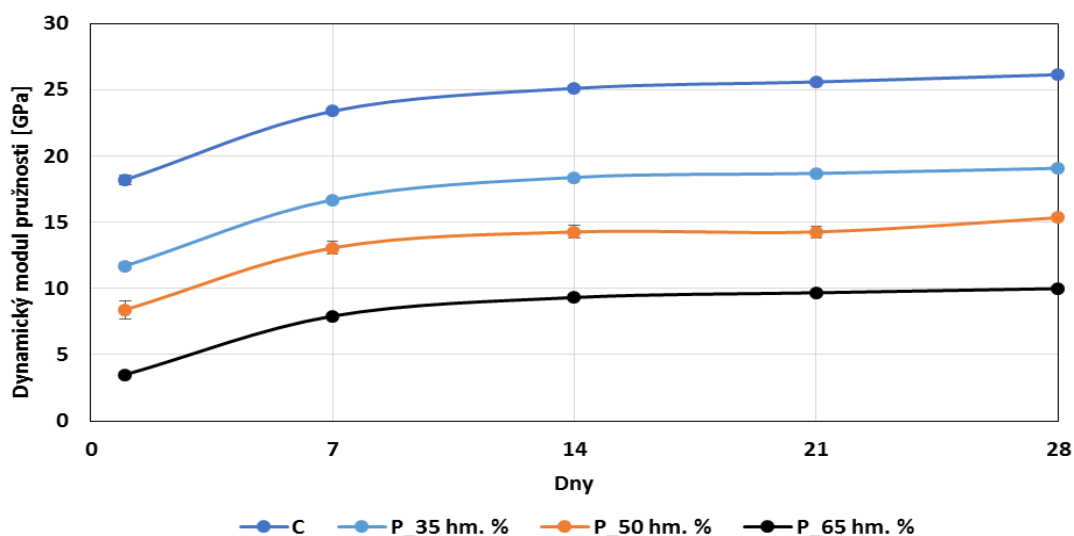


Obr. 27: Pevnost v tlaku (se směrodatnou odchylkou) po 28 dnech v závislosti na množství použitého mikromletého betonového pražce (P).

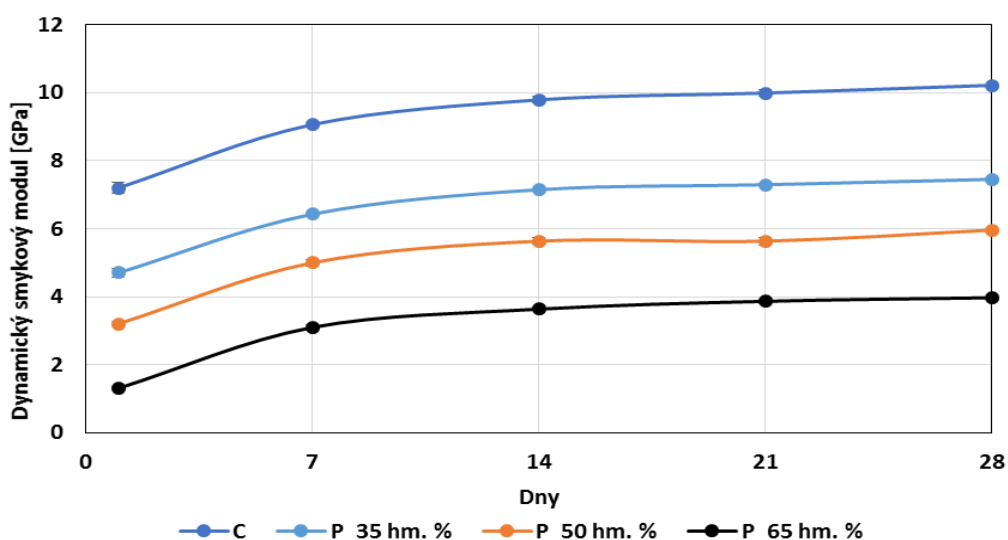


Obr. 28: Pevnost v tahu za ohybu (se směrodatnou odchylkou) po 28 dnech v závislosti na množství použitého mikromletého betonového pražce (P).

Vývoj dynamického modulu pružnosti a dynamického smykového modulu je prezentován na Obr. 29 a Obr. 30, na obou průbězích je patrné snížení hodnot modulů pružnosti s rostoucím podílem mikromletého cementového kalu, resp. s klesajícím množstvím. Mezi prvním a sedmým dnem dochází k nárůstu hodnot obou dynamických modulů, následně mezi 7 a 28 dnem je nárůst u většiny vzorků méně pozvolný a u některých v podstatě konstantní, v rámci směrodatné odchylky.



Obr. 29: Časový vývoj dynamického modulu pružnosti se směrodatnými odchylkami v závislosti na množství mikromletého betonového prázce (P).



Obr. 30: Časový vývoj dynamického smykového modulu se směrodatnými odchylkami v závislosti na množství mikromletého betonového prázce (P).

3.6 Modifikace materiálových vlastností pomocí vylehčení – pěn

Směs na bázi mikromleté vápencové moučky (J)

Řešení u tohoto návrhu spočívalo ve stanovení maximální míry vylehčení cementové matrice s mikromletým vápencovým kalem. V Tab. 10 je specifikováno složení testovaných směsí, Referenční směs obsahovala pouze 20 hm. % cementu (C) a 80 hm. % mikromleté vápencové moučky (J), další směsi obsahovaly cement a mikromletý vápencový kal ve stejném prostředí a dále pěnu, která byla vytvořena přidáním pěnotvorné přísady k záměsové vodě, pěna Mapei LP 800 je označena jako MP, pěna vyrobená navržená ve spolupráci s Technickou univerzitou ve Zlíně pak PZ. V závislosti na vodním součiniteli a množství pěny a složení směsí se změnily parametry, jako objemová hmotnost a celková pórovitost (Tab. 11). Nejvyšší objemovou hmotnost měla referenční směs, nejnižší pak, zhruba o 700 kg/m^3 , směs s pěnou PZ.

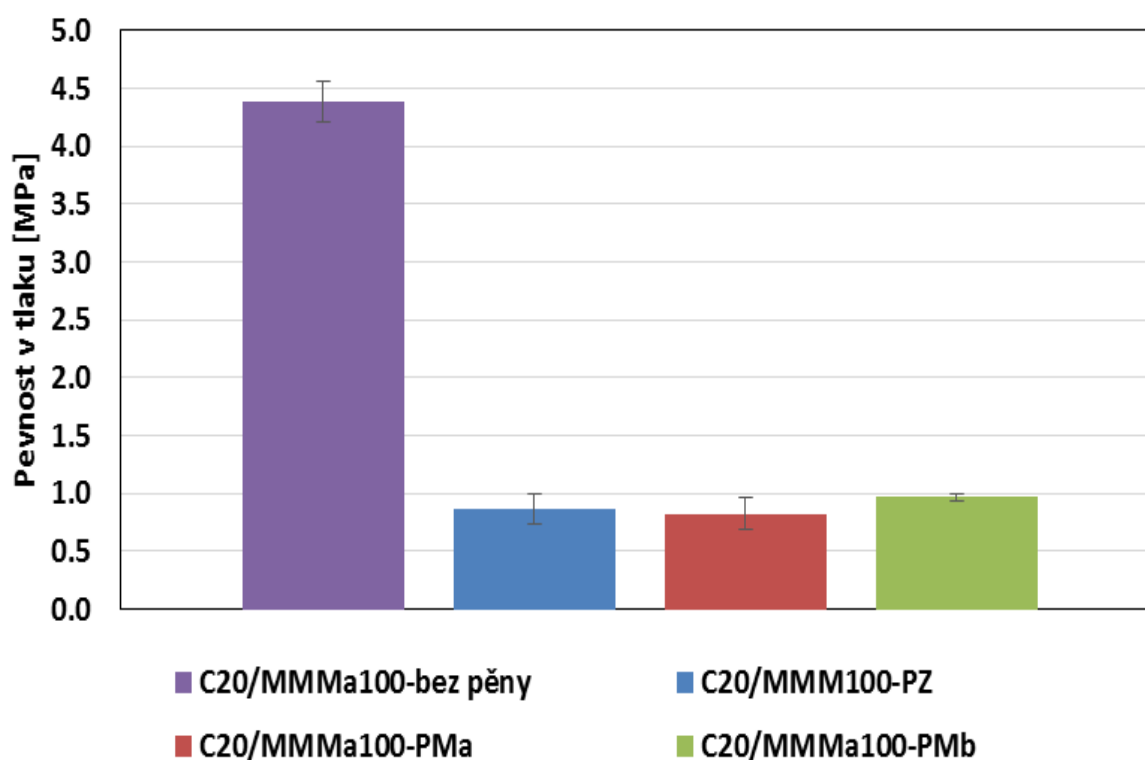
Tab. 10: Složení testovaných směsí.

Směs	Cement/ mikromletý vápencový kal [hm. %]	Vodní součinitel [-]	Množství pěny [hm. % vody]
C20/MMM100-PZ	20/80	0,34	1
C20/MMMa100-PMa	20/80	0,46	4
C20/MMMa100-PMb	20/80	0,46	5
C20/MMMa100-bez pěny	20/80	0,39	0

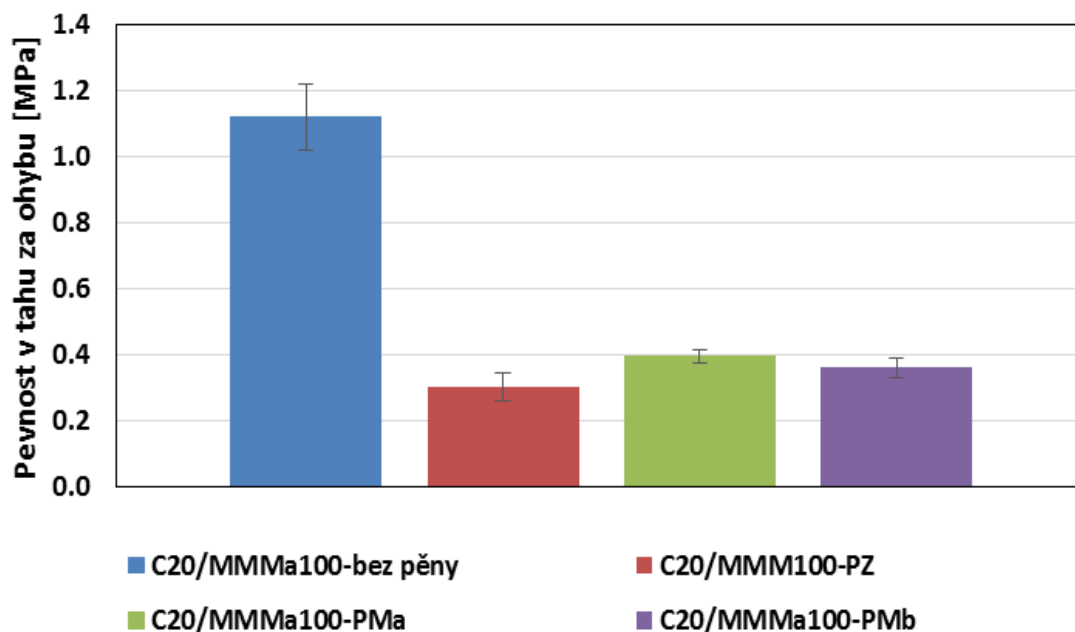
Tab. 11: Rozliv, objemová hmotnost, otevřená pórovitost a smrštění vzorků s různým množstvím PVA (se směrodatnými odchylkami).

Označení	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Celková pórovitost [-]
C20/MMM100-PZ	967 ± 10	0,60 ± 0,02
C20/MMMa100-PMa	1007 ± 5	0,58 ± 0,01
C20/MMMa100-PMb	1109 ± 9	0,54 ± 0,01
C20/MMMa100-bez pěny	1680 ± 10	0,30 ± 0,01

Pevnost v tlaku po 28 dnech je zobrazena na Obr. 31, vlivem napěnění došlo v porovnání s referenční sadou k poklesu hodnot pevnosti v tlaku ze 4,5 MPa na hodnoty pod 1,0 MPa. Hodnoty pevnosti v tlaku korespondují s hodnotami objemové hmotnosti a celkové pórovitosti, viz Tab. 11. Závislost pevností v tlaku za ohybu na aplikované pěně u testovaných směsí je patrná z Obr. 31. Nejvyšších hodnot, okolo 0,5 MPa, dosahuje směs s pěnou PZ.

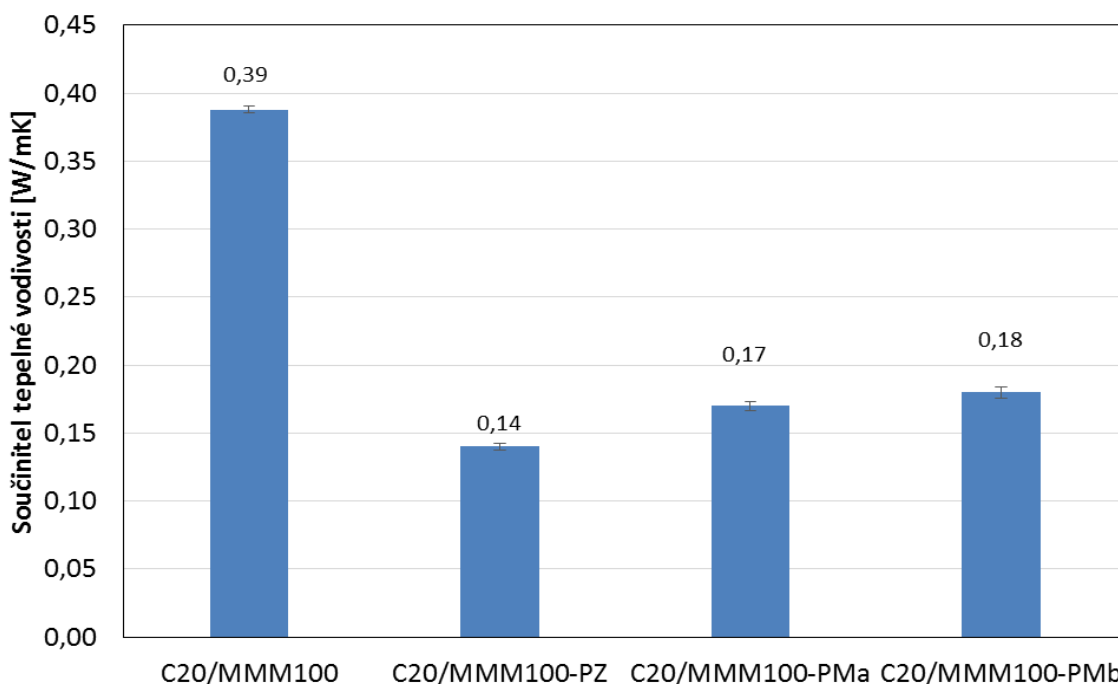


Obr. 31: Pevnost v tlaku testovaných vzorků (se směrodatnými odchylkami) po 28 dnech v závislosti na složení směsi.



Obr. 32: Pevnosti v tahu za ohybu (se směrodatnými odchylkami) po 28 dnech v závislosti na složení směsi.

Na Obr. 33 jsou porovnány hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro testované materiály. Nejnižší naměřená hodnota byla 0,14 a nejvyšší 0,39 W/mK. Hodnoty měrné objemové tepelné kapacity se pohybovaly mezi hodnotami $0,85 \text{ E}^+6$ až $1,5 \text{ E}^+6 \text{ J/m}^3\text{K}$.



Obr. 33: Porovnání hodnot součinitele tepelné vodivosti (se směrodatnými odchylkami).

RECYKLOVANÝ BETON (Z)

Na základě předchozích experimentálních výsledků s mikromletým betonovým recyklátem byla navržena modifikace, která spočívala ve vylehčení cementové matrice s recyklátem pomocí pěny, resp. pěnotvorné přísady. Jako základní materiál byl použit portlandský cement CEM I 42,5 (R) Radotín (C) a mikromletý betonový recyklát z betonového žlabu (Z). Náhrada cement tvořila 66 hm. %, množství mikromletého recyklátu bylo tedy 34 hm. %, tato hranice byla navržena na základě předchozího provedeného výzkumu. Pevnosti v tlaku po 28 dnech byly pro referenční cementové vzorky i pro vzorky s 34 hm. % mikromletého recyklátu identické (v rámci směrodatné odchylky). Na vylehčení matric byly použity dvě pěny, a ty byly dávkovány ve dvou množstvích, která jsou v označení vzorků popsána jako „a“ a „b“, pro množství „b“ bylo použito zhruba dvojnásobné množství pěny. První pěnou byla pěna Mapei, dávkování bylo provedeno podle technického listu výrobce, její označení je PM. Druhou pěnou byla pěna, které se používá při hašení požárů, označení této pěny je PH. Obě pěny byly nejdříve otestovány samostatně, byla u nich stanovena jejich stabilita a míra napěnění, výsledky byly velice podobné.

Vlastní výroba zkušebních vzorků s rozměry 40×40×160 mm byla prováděna ve třech navazujících fázích. V první fázi byla vyrobena cementová pasta a cementová malta s mikromletou betonovou moučkou s 85 % vody z navrženého vodního součinitele pomocí nástavcem na vrtačce. Následně byla vyrobena pěna pomocí speciálně vyrobeného nástavce na napěnění v množství 50 a 75 ml vody (odpovídající 15 % z hodnoty vodního součinitele). Dávkování bylo na základě předchozích experimentů stanoveno tak, aby v nádobě na míchání pěny nezůstala žádná použitá voda, ale pouze hustá pěna. Hustá pěna byla přidána do nádoby s cementovou pastou nebo maltou a zhruba tři minuty homogenizována pomocí nástavce na vrtačce. Celkem bylo vyrobeno 10 různých směsí, které se liší svým složením a množstvím pěny, resp. vodním součinitelem. Výsledné složení vzorků je uvedeno v Tab. 12.

Tab. 12: Složení testovaných směsí z betonového mikromletého recyklátu (Z) vylehčeného pěnou (PM a PH).

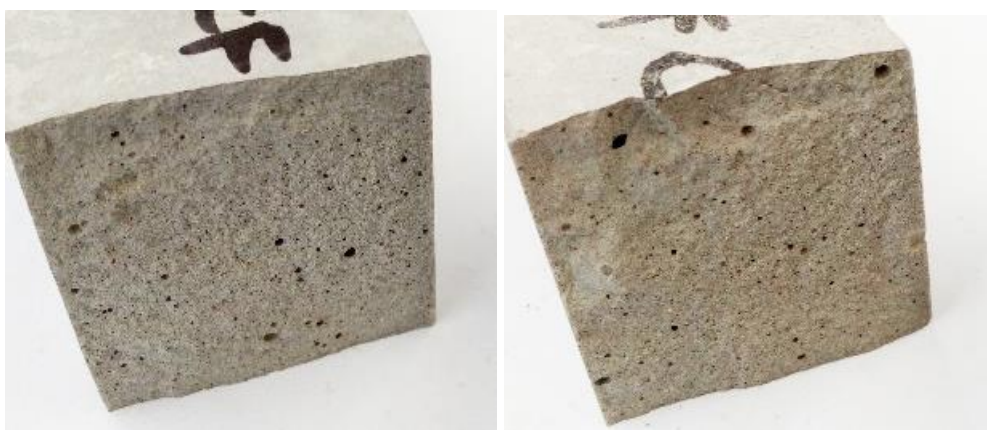
Směs	Cement/betonový recyklát [hm. %]	Vodní součinitel [-]	Množství pěny [hm. % vody]
C100	100	0,35	0
C100/PM_a	100	0,35	5
C100/PM_b	100	0,35	5
C100/PH_a	100	0,40	5
C100/PH_b	100	0,40	5
C66/Z34	66/34	0,39	0
C66/Z34/PM_a	66/34	0,35	5
C66/Z34/PM_b	66/34	0,35	5
C66/Z34/PH_a	66/34	0,40	5
C66/Z34/PH_b	66/34	0,40	5

V Tab. 13 jsou porovnány objemové hmotnosti a celková pórovitost testovaných směsí, z tabulky je patrná závislost na složení uvedené v Tab. 12. Maximální hodnoty objemových hmotností dosahovaly referenční materiály, nejnižší hodnoty jsou okolo 700 kg/m³.

Tab. 13: Porovnání objemových hmotností a hodnot celkové pórovitosti testovaných vzorků (hodnoty jsou uvedeny se směrodatnými odchylkami).

Směs	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Celková pórovitost [%]
C100	1850 ± 10	37,5 ± 1,5
C100/PM_a	1390 ± 10	42,1 ± 1,2
C100/PM_b	900 ± 10	62,5 ± 1,5
C100/PH_a	1330 ± 10	42,5 ± 1,1
C100/PH_b	680 ± 15	71,5 ± 1,8
C66/Z34	1840 ± 10	31,7 ± 1,6
C66/Z34/PM_a	1460 ± 20	39,6 ± 1,4
C66/Z34/PM_b	1170 ± 10	62,5 ± 2,0
C66/Z34/PH_a	1450 ± 15	39,5 ± 1,5
C66/Z34/PH_b	1175 ± 15	55,5 ± 1,9

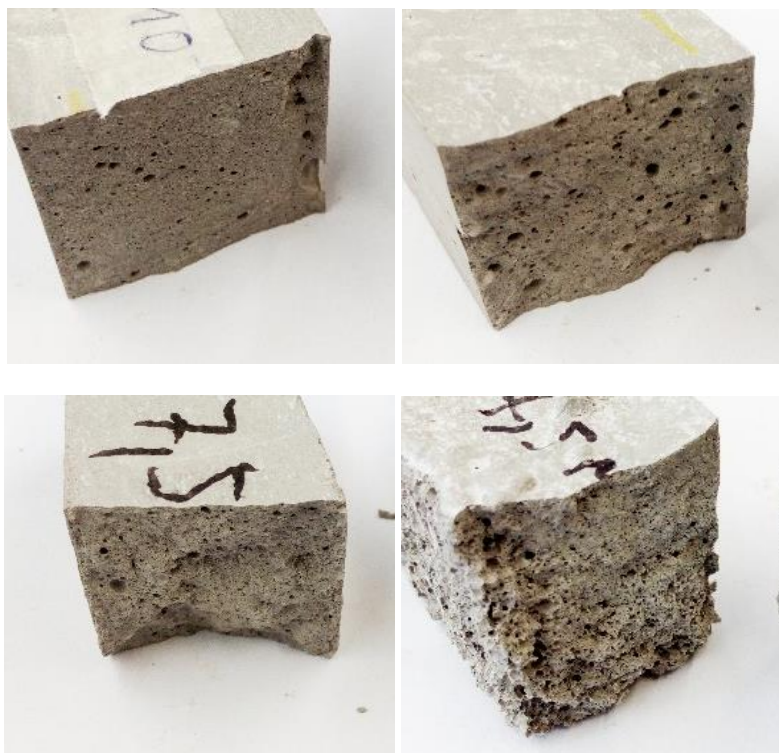
Na Obr. 34 až 36 jsou snímky typických lomových testovaných vzorků po provedení zkoušky pevnosti v tahu za ohybu. Ze snímků je patrný vliv množství použité pěny na porézní systém vzorků. Na horních řadách Obr. 35 a Obr. 36 jsou patrné malé póry, které ovlivňují mikrostrukturu materiálu, jedná se o relativně malé a po celé ploše (objemu) rozptýlené póry a mikropóry. Mikrostruktura referenčních vzorků na Obr. 34 je v porovnání s nimi kompaktnější a pórů je výrazně méně. V dolních řadách na Obr. 35 a Obr. 36 jsou patrné větší póry, které vznikly spojením malých pórů, a struktura již není kompaktní.



Obr. 34: Snímky lomových ploch testovaných vzorků: referenční vzorky C100 (vlevo) a C66/R34 (vpravo).

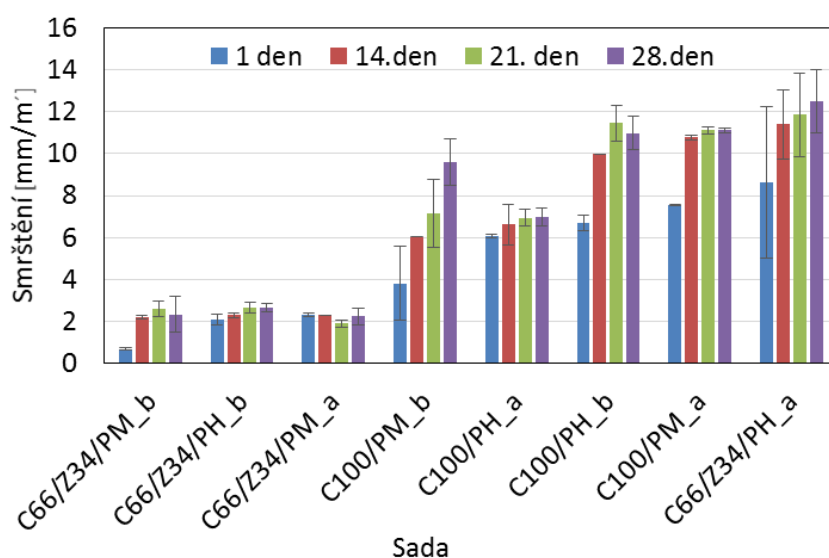


Obr. 35: Snímky lomových ploch testovaných vzorků, horní řada: C100/PH_a (vlevo) a C100/PM_a (vpravo), dolní řada: C100/PH_b (vlevo) a C100/PM_b (vpravo).



Obr. 36: Snímky lomových ploch testovaných vzorků, horní řada: C66/R34/PH_a (vlevo) a C66/R34/PM_a (vpravo), dolní řada: C66/R34/PH_b (vlevo) a C66/R34/PM_b (vpravo).

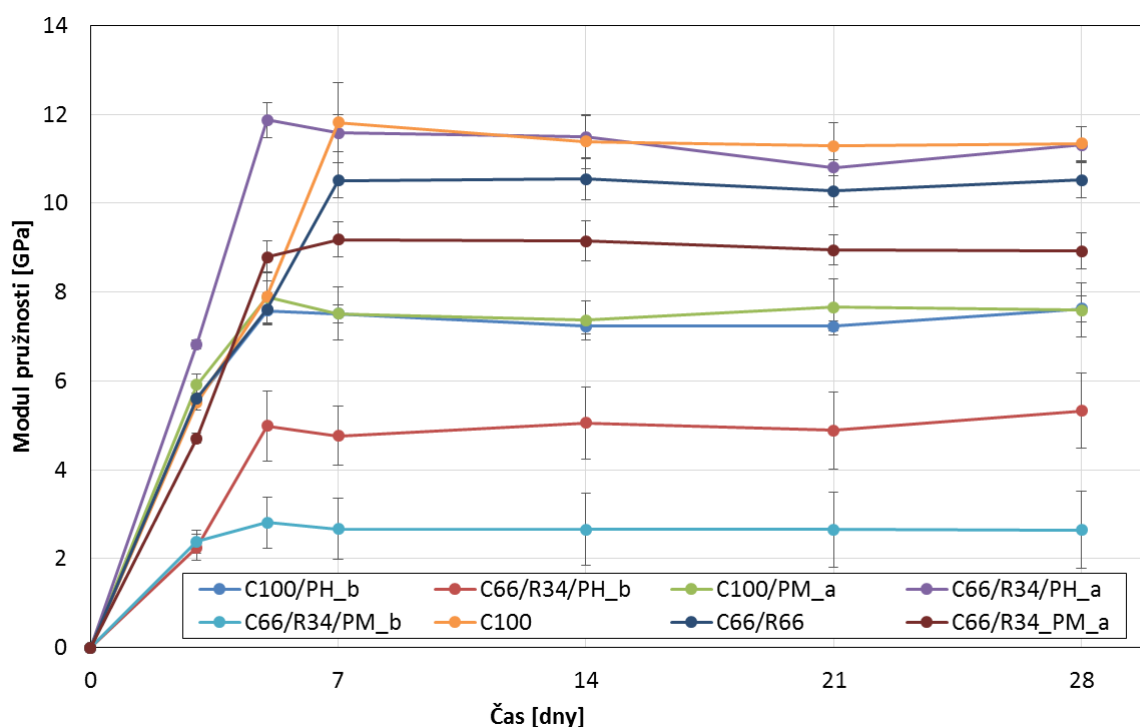
Na Obr. 37 jsou porovnány smrštění pro vylehčené materiály, z výsledků je patrné, že vyšších hodnot dosahují převážně materiály pouze s cementem. Na druhou stranu je nutno poznamenat, že vzhledem k nízkým hodnotám pevností v tlaku bylo měření podélných rozměrů problematické, a proto jsou hodnoty spíše orientační.



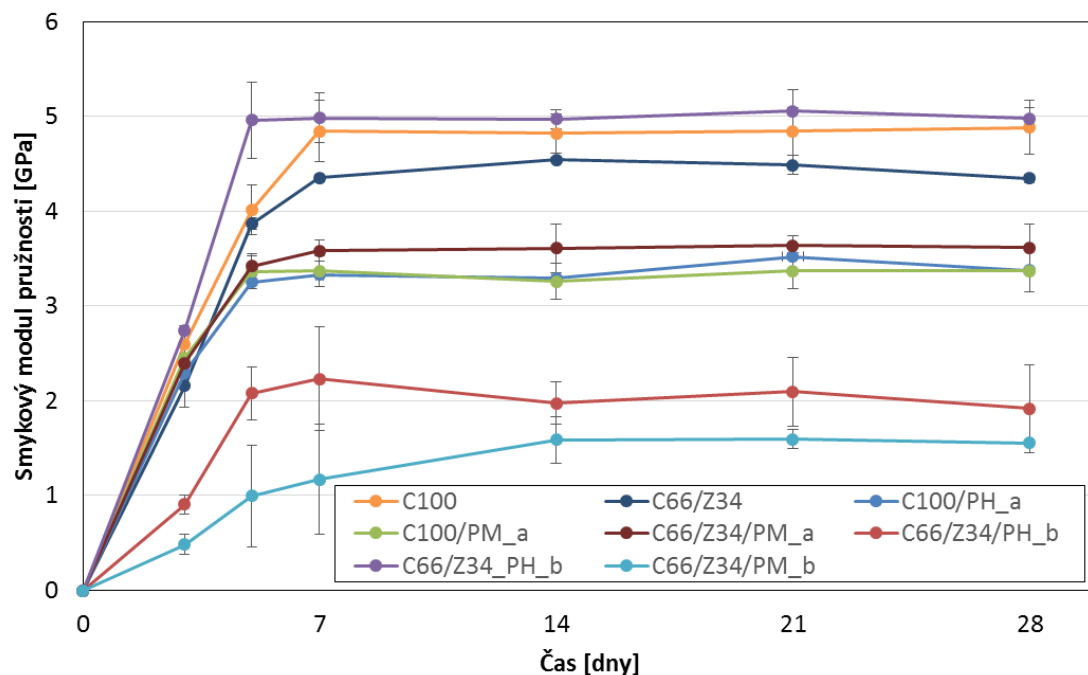
Obr. 37: Časový vývoj hodnot smrštění testovaných směsí (hodnoty jsou uvedeny se směrodatnými odchylkami).

Na Obr. 38 je časový vývoj dynamického modulu pružnosti a na Obr. 39 časový vývoj smykového modulu pružnosti pro testované směsi stanovený impulzní metodou, nejsou zde uvedeny výsledky pro všechny směsi, protože u směsí s nízkou objemovou hmotností již tuto metodu nešlo použít. Na

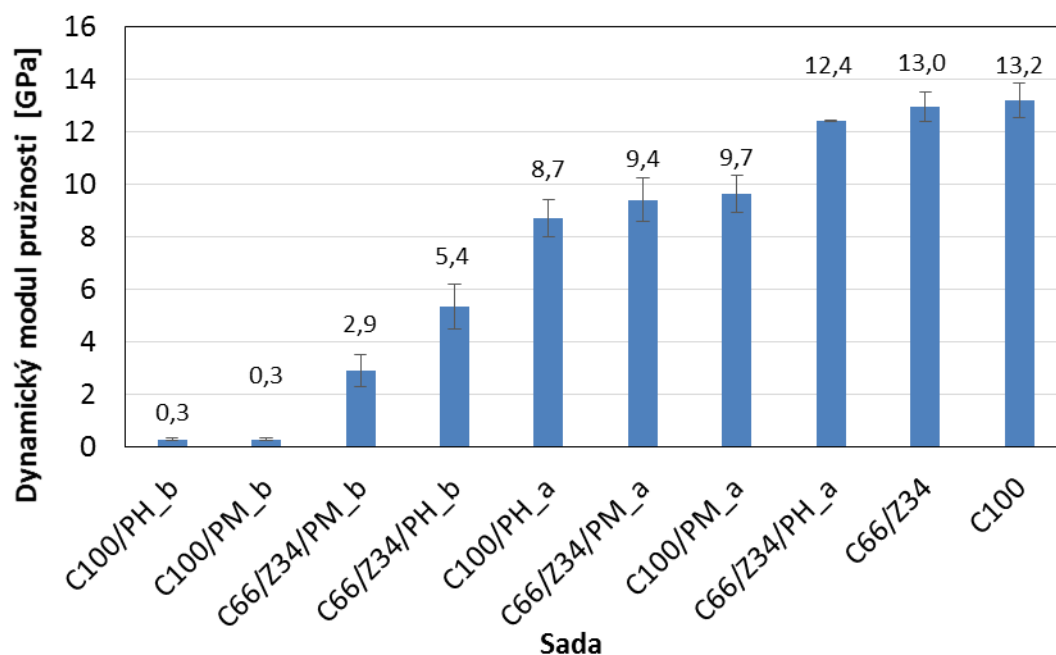
Obr. 40 jsou uvedeny hodnoty dynamického modulu pružnosti stanovené 28 dní po výrobě vzorků pro všechny testované sady. Z výsledků jsou patrné velmi podobné trendy vývoje smykového i dynamického modulu pružnosti, po 7 dnech jsou hodnoty modulů v podstatě již konstantní. Poměrné rozdíly mezi hodnotami dynamických a smykových modulů pružnosti stanovených 28. den impulzní metodou jsou velmi podobné hodnotám naměřeným pomocí ultrazvukové metody.



Obr. 38: Časový vývoj hodnot dynamického modulu pružnosti testovaných směsí stanovený impulzní metodou (hodnoty jsou uvedeny se směrodatnými odchylkami).



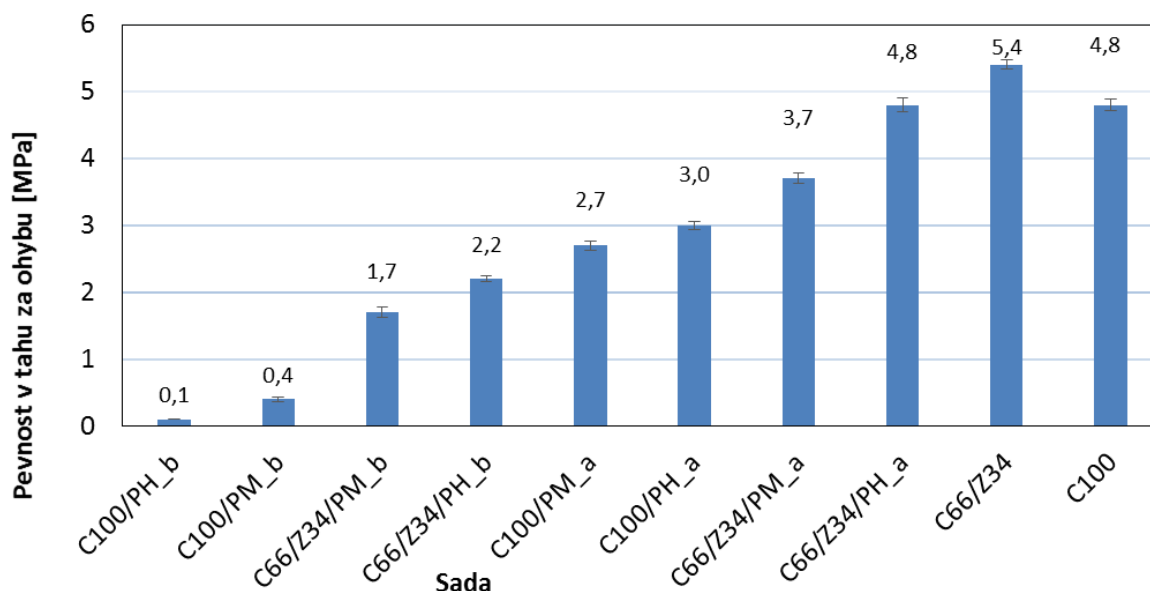
Obr. 39: Časový vývoj hodnot smykového modulu pružnosti testovaných směsí stanovený impulzní metodou (hodnoty jsou uvedeny se směrodatnými odchylkami).



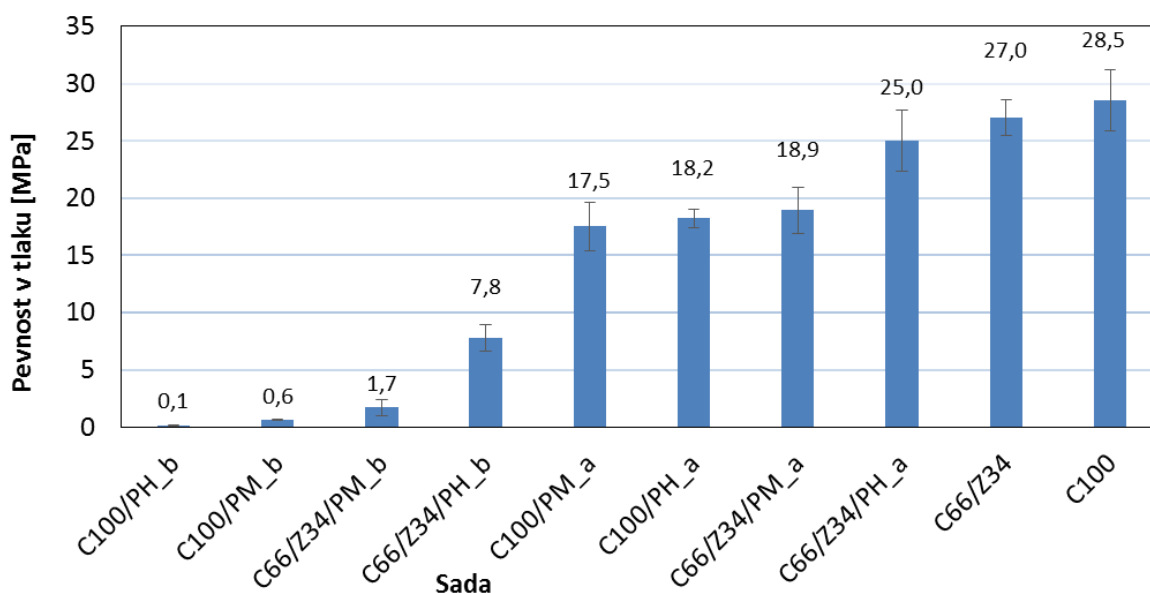
Obr. 40: Porovnání hodnot dynamického modulu pružnosti testovaných směsí stanoveného ultrazvukovou metodou (hodnoty jsou uvedeny se směrodatnými odchylkami).

Na Obr. 41 jsou uvedeny hodnoty pevností v tlaku pro vzorky staré 28 dní. Maximální hodnoty se pohybují okolo 5,0 MPa, nejnižší okolo 0,1 MPa. Obdobně jsou na Obr. 42 porovnány hodnoty pevností v tlaku. Maximální hodnoty v tlaku jsou

28,5 a 27,0 MPa pro referenční vzorky bez vylehčení. U obou pevností jsou hodnoty závislé na množství pěny přidávané do směsi, resp. na hodnotách objemových pevností pro jednotlivé sady. Poměr mezi pevností v tlaku a pevností v tahu za ohybu se u většiny vzorků pohybuje okolo jedné pětiny. U vzorků s nízkou objemovou hmotností tento poměr již není zachován.

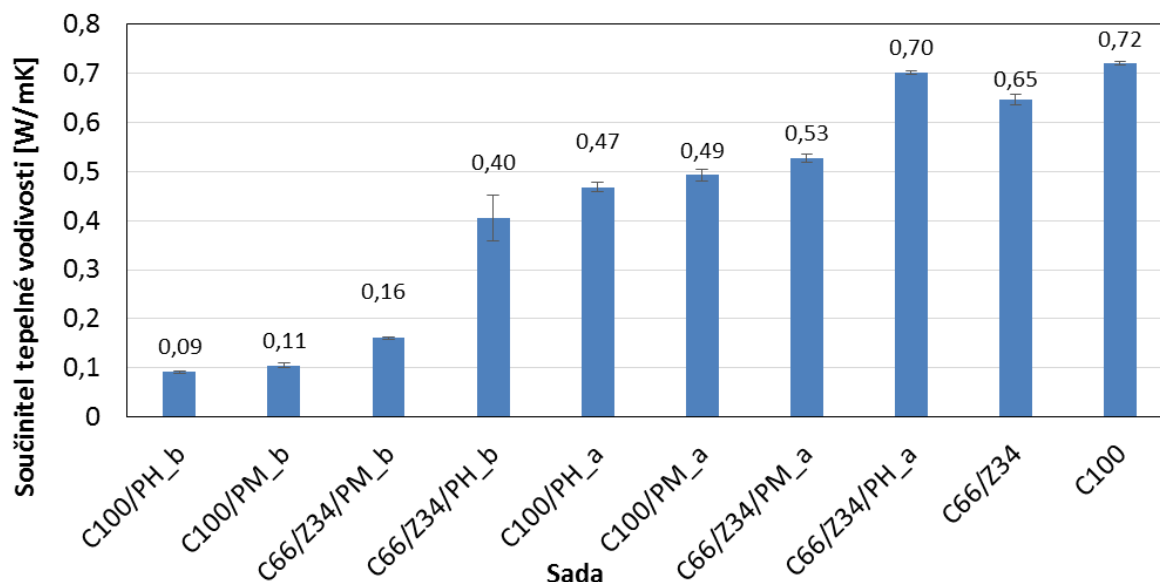


Obr. 41: Porovnání hodnot pevností v tahu za ohybu po 28 dnech testovaných směsí (hodnoty jsou uvedeny se směrodatnými odchylkami).



Obr. 42: Porovnání hodnot pevností v tlaku po 28 dnech testovaných směsí (hodnoty jsou uvedeny se směrodatnými odchylkami).

Porovnání hodnot součinitele tepelné vodivosti pro testované vzorky je uvedeno na Obr. 43, nejvyšší naměřená hodnota je 0,72 a nejnižší 0,09 W/mK. Nejvyšších hodnot dosahují referenční sady. Hodnoty měrné objemové tepelné kapacity se pohybují v hodnotách od 1,75 do 0,69 J/m³K·E⁺⁶.



Obr. 43: Porovnání hodnot součinitele teplotní vodivosti po 28 dnech testovaných směsí (hodnoty jsou uvedeny se směrodatnými odchylkami).

3.7 Modifikace materiálových vlastností pomocí polymeru PVA

Jak již bylo zmíněno výše, polyvinylalkohol (PVA) je běžně dostupný polymer. V tomto případě byl na experimenty využit komerční výrobek – 16% vodný roztok PVA. Výrobek je dodáváný pod obchodním názvem Sloviol R16 a dodává ho firma Fichema, s.r.o., v baleních po 1 kg. Vodný roztok je možno přidávat rovnou do suchých směsí nebo je možné ho naředit vodou a upravit tak vodní součinitel.

Směs na bázi mikromletého betonu

Na bázi mikromletého betonového žlabu (Z) a cementu CEM I 42,5R bylo vyrobeno celkem 5 různých sad s různým obsahem suchého PVA vůči suché směsi. Všechny směsi obsahují poměr mezi cementem a mikromletým betonovým žlabem (Z) v hmotnostním poměru 65/35 %, tento poměr byl zvolen na základě předchozího experimentálního výzkumu, např. Topič et al. (2014a) a Topič et al. (2015). Jedna

ze směsí neobsahovala PVA a byla použita jako referenční, další sady obsahovaly proměnný obsah pevného PVA o obsahu 1,4 až 5,6 hm. %. Obsah PVA 5,6 hm. % je vyšší, než je běžně testováno, ale byla použito záměrně, protože k suché směsi je přidáván jen 16% polymerní roztok PVA, bez přídavku další dodatečné vody. U dalších směsí s PVA byla dodatečná voda přidávána. Experimentální měření bylo v tomto případě koncipováno tak, aby byl zachován vodní součinitel u všech testovaných směsí jako společný parametr. Rozliv na stříšacím stolku byl potom použit jako jeden ze sledovaných parametrů. Specifikace složení testovaných sad je uvedena v Tab. 14.

Tab. 14: Specifikace vlastností testovaných směsí.

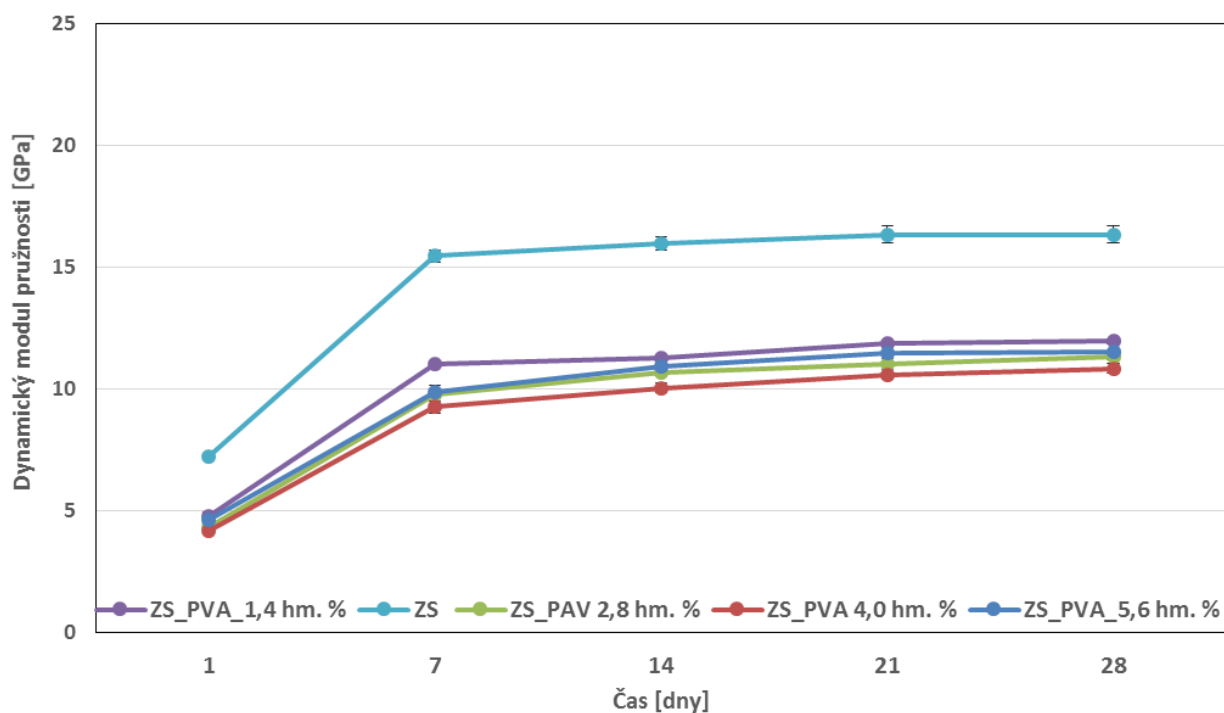
Označení	Cement/ mikromletý beton [hm. %]	Vodní součinitel [-]	Množství pevného PVA [hm. %]
ZS/V	65/35	0,35	0,0
ZS/V_PVA_1,4 hm. %	65/35	0,35	1,4
ZS/V_PVA_2,8 hm. %	65/35	0,35	2,8
ZS/V_PVA_4,0 hm. %	65/35	0,35	4,0
ZS/V_PVA_5,6 hm. %	65/35	0,35	5,6

Na základě rozboru rozlivových zkoušek je opatrné, že s množstvím PVA ve vzorcích se zpracovatelnost, zhoršuje. Pro referenční směs bez PVA byl rozliv 240 mm a u směsi s nejvyšším množstvím PVA (5,6 hm. %) jen 136 mm (Tab. 15). Složení použitých směsí (množství použitého PVA a vody) ovlivnilo hodnoty objemové hmotnosti a celkové pórovitosti (Tab. 15). Pro testované množství PVA platí, že s rostoucím množstvím PVA klesá objemová hmotnost vzorků a roste hodnota celkové pórovitosti. Výjimkou je chování vzorku s 5,6 hm. % PVA, kde jsou trendy odlišné z důvodu horší zpracovatelnosti. Z hodnot smrštění stanovených 24 hodin od výroby (Tab. 15) je patrné, že s množstvím PVA se jeho hodnota snižuje, až na směs s nejvyšším obsahem PVA.

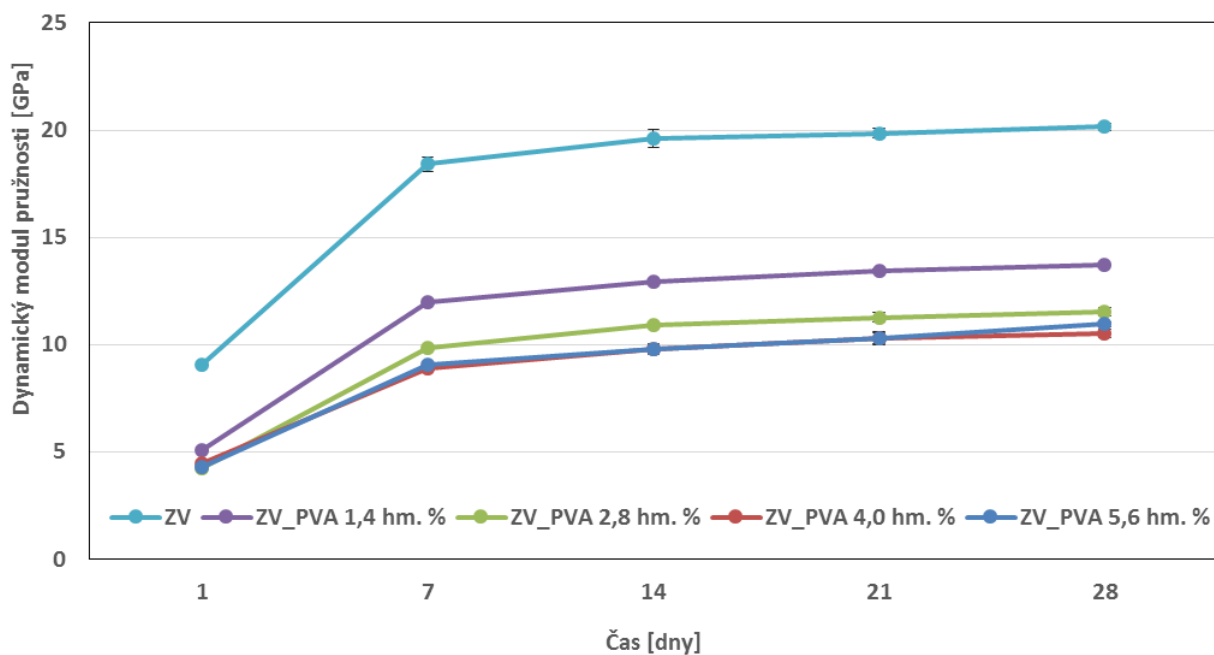
Tab. 15: Rozliv, objemová hmotnost, otevřená pórovitost a smrštění vzorků s různým množstvím PVA (se směrodatnými odchylkami).

Označení	Rozliv (20 poklepů) [mm]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Celková pórovitost [-]	Smrštění po 24 hodinách [mm/m]
Z	240	1820 ± 40	0,24 ± 0,09	0,18 ± 0,01
Z_PVA_1,4 hm. %	230	1620 ± 35	0,29 ± 0,08	0,13 ± 0,02
Z_PVA_2,8 hm. %	190	1590 ± 38	0,31 ± 0,07	0,12 ± 0,01
Z_PVA_4,0 hm. %	179	1540 ± 31	0,33 ± 0,08	0,09 ± 0,01
Z_PVA_5,6 hm. %	136	1663 ± 50	0,27 ± 0,07	0,24 ± 0,01

Z mechanických vlastností byl na vzorcích s poměrem cement/mikromletý beton (Z) 65/35 hm. % stanoven časový vývoj dynamického modulu pružnosti. Na Obr. 44 jsou porovnány hodnoty pro vzorky uložené v laboratorním prostředí, na Obr. 45 pro vzorky uložené pod vodní hladinou. Z obou průběhů je patrný nárůst hodnot mezi druhým a sedmým dnem, po sedmém dni dochází již jen k mírnému nárůstu hodnot až do maxima (po 28 dnech). Rozdílné prostředí uložení vzorků (laboratoř a vodní lázeň) měla u referenčního vzorku bez PVA zásadní vliv na výsledné hodnoty modulu pružnosti, rozdíl hodnot byl 4,3 GPa. U vzorků uložených v suchém prostředí je vliv množství PVA na dynamický modul asi 1 GPa. Pro vzorky uložené ve vodní lázni je tento rozdíl okolo 2,5 GPa.



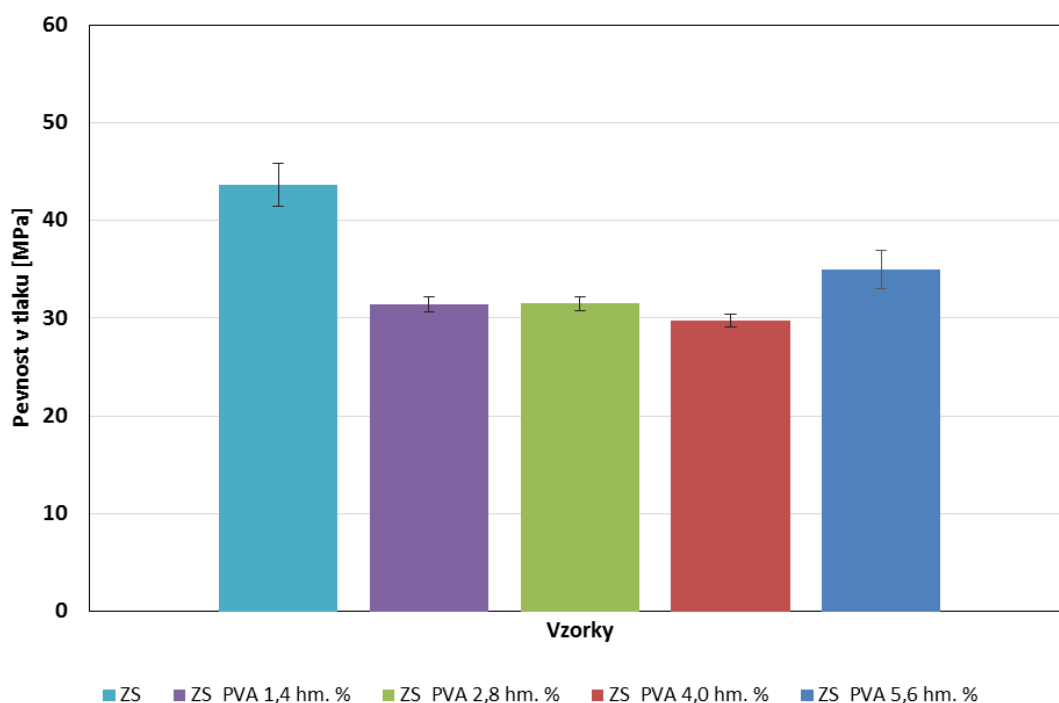
Obr. 44: Vývoj dynamického modulu pružnosti v čase se směrodatnými odchylkami v závislosti na množství PVA, vzorky uloženy volně v laboratorním prostředí (se směrodatnými odchylkami).



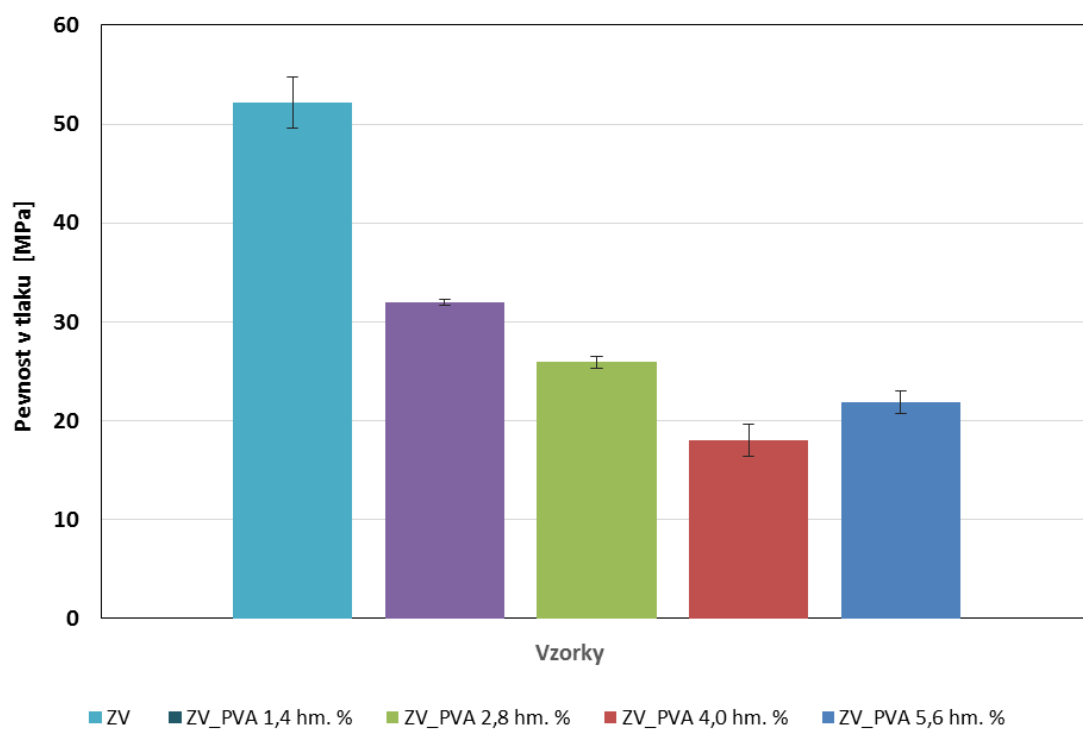
Obr. 45: Vývoj dynamického modulu pružnosti v čase se směrodatnými odchylkami v závislosti na množství PVA, vzorky uloženy pod vodní hladinou (se směrodatnými odchylkami).

Na Obr. 46 a Obr. 47 jdou porovnány hodnoty pevností v tlaku po 28 dnech pro obě použítá prostředí. Nejvyšších hodnot dosahuje referenční vzorek bez PVA. S rostoucím množstvím PVA ve směsi u vzorků uložených v laboratorním prostředí pevnost v tlaku klesá na hodnotu 30 MPa, naproti tomu směs s nejvyšším obsahem PVA má pevnost v tlaku 35 MPa. Pro vzorky uložené pod vodní hladinou je tento efekt podobný, referenční vzorek dosahuje hodnot okolo 52 MPa, s množstvím PVA hodnoty klesají až na 18 MPa, u vzorku s nejvyšším obsahem PVA je tato hodnota 22 MPa. S uložením pod vodní hladinou souvisí i snížení hodnot pevností v tlaku u vzorků s obsahem PVA nad 4 hm. %.

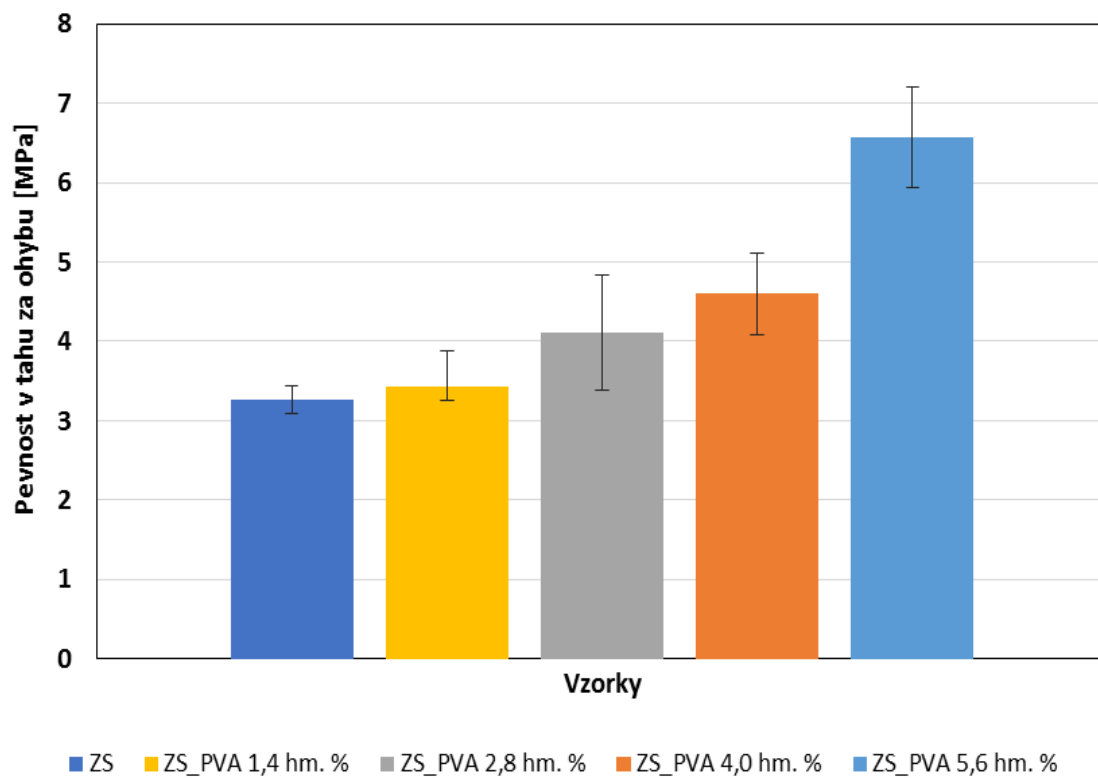
Výsledné hodnoty pevností v tahu za ohybu po 28 dnech jsou uvedeny na Obr. 48 a Obr. 49. V porovnání s referenční směsí bez PVA má směs s 5,6 hm. % PVA hodnotu pevnosti v tlaku zhruba dvojnásobnou. Mezilehlé hodnoty pro nižší množství použitého PVA včetně referenčního vzorku jsou téměř lineární. U vzorků uložených pod vodní hladinou jsou trendy podobné. Nejvyšší hodnoty opět dosahuje vzorek s nejvyšším množstvím PVA, nejnižší hodnotu měl vzorek s obsahem PVA 2,8 hm. %.



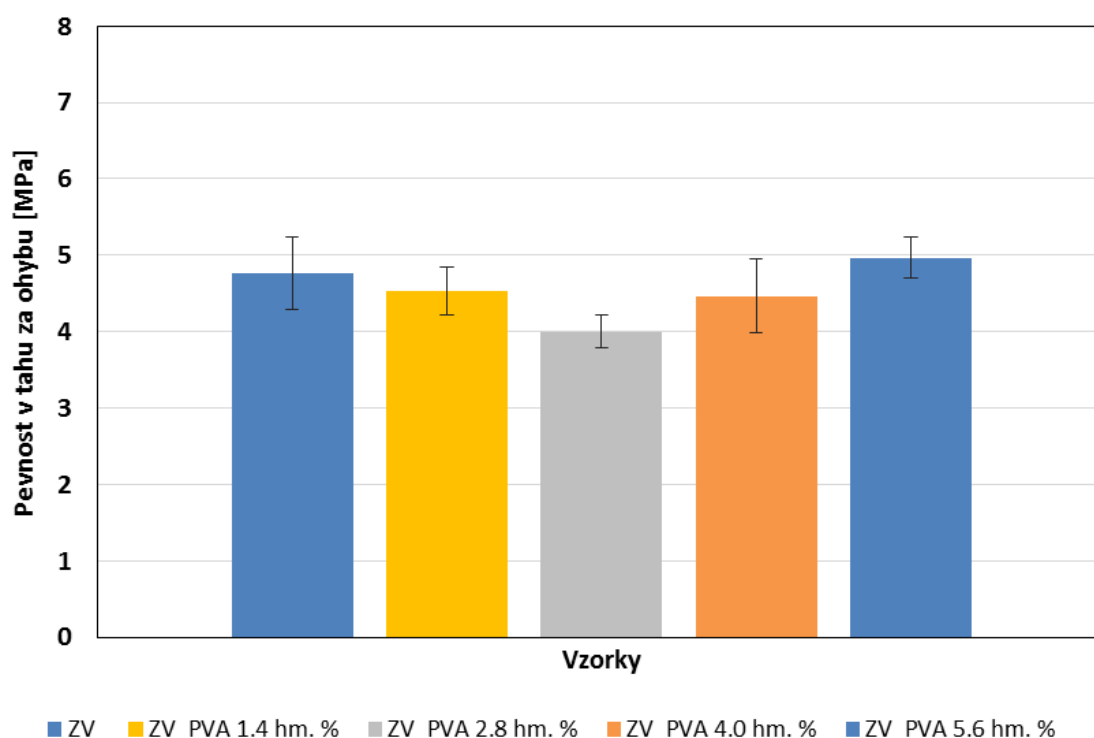
Obr. 46: Pevnost v tlaku po 28 dnech se směrodatnými odchylkami v závislosti na množství použitého PVA, vzorky uložené v laboratorním prostředí.



Obr. 47: Pevnost v tlaku po 28 dnech se směrodatnými odchylkami v závislosti na množství použitého PVA, vzorky uložené ve vodní lázni.



Obr. 48: Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech se směrodatnými odchylkami v závislosti na množství použitého PVA, vzorky uložené v laboratorním prostředí.



Obr. 49: Pevnost v tahu za ohybu (se směrodatnými odchylkami) po 28 dnech v závislosti na množství použitého PVA, vzorky uložené ve vodní lázni.

3.8 Další možnosti modifikace vlhkostních vlastností

V rámci ověření možnosti úpravy vlhkostních vlastností byl proveden experiment, při kterém byly hydrofobizační přísadou ošetřeny vzorky cementové malty s mikromletou vápencovou moučkou frakce 0/0,03 mm a kamenivem frakce 0/2 mm tvořeným pískem nebo drceným vápencem. Hydrofobizační přísada určená pro kompozitní cementové materiály v podobě vodného roztoku od firmy Nanoservice (ČR) byla aplikována dvěma různými způsoby. V prvním případě byla použita 2D hydrofobizace, která byla nanášena na povrch již vyrobených vzorků, které byly 28 dní staré, a to v podobě 2% vodného roztoku. V druhém případě byla hydrofobizační přísada aplikována 3D, byla přidána do záměsové vody v dávkování 1 g roztoku na 100 g cementu. První experiment spočíval v nanesení tří (šesti) kapek na povrch vzorku s porovnáním smáčivosti povrchu ošetřeného a neošetřeného. Z výsledků prezentovaných na Obr. 50 až Obr. 52 je patrné, že při tomto experimentu byla efektivní varianta povrchové hydrofobizace než objemová varianta.



Obr. 50: Příklad povrchové hydrofobizace: vzorek referenční (vlevo) a ošetřený vzorek (vpravo).



Obr. 51: Příklad povrchové hydrofobizace: vzorek referenční (vlevo) a ošetřený vzorek (vpravo).



Obr. 52: Příklad objemové hydrofobizace: vzorek referenční (vlevo) a ošetřený vzorek (vpravo).

Při druhém experimentu byly vzorky hydrofobizační přísady plošně nanесeny na část experimentální stěny po 28 dnech od nanесení omítky. Aplikace byla provedena pomocí ručního postřikovače, v nádobce postřikovače byla voda smíchaná s hydrofobizační přísadou. Po 48 hodinách byl na stěně uměle simulován déšť. Na Obr. 53 je patrné rozhraní mezi ošetřenou (vlevo) a neošetřenou částí (vpravo).



Obr. 53: Pohled na systém omítek nanesených na experimentální stěně. Hydrofobizační přísadou ošetřená část je vlevo a stékají po ní kapky při simulaci deště. Vpravo je neošetřená část, která je mokrá od simulovaného deště.

4. Diskuse výsledků

4.1. Materiály pro recyklaci a jejich úprava pomocí vysokorychlostního mletí

V rámci této práce bylo testováno několik materiálů frakce 0/1 mm, které jsou České republice v současné době určitým způsobem opomíjeny, resp. spíše představují problém v recyklačních centrech nebo v lomech a továrnách na zpracování kamene, které si s nimi neví rady. Chemické rozborů nevykázaly u těchto materiálů výskyt nadlimitního množství žádné látky, která by bránila použití v betonech. Jedná se především o chloridy, sírany, organické látky atd. (ČSN EN 206 (2014), ČSN EN 12620+A1 (2008)).

Vybrané materiály byly dále upraveny mletím, v počátečních fázích pomocí laboratorních mlýnů, jednalo se o relativně malá množství a mikromletý materiál nebyl příliš homogenní. S takto upraveným materiálem byly provedeny jen základní orientační testy (Zobal et al. 2010).

Jako referenční materiál byl použit cement CEM I 42,5R (Radotín) a to z toho důvodu, že se u nás, ale i v zahraničí jedná o nejpoužívanější cement. Důvodem je především jeho vysoká čistota portlandského slínku a tedy možnost lépe identifikovat vlivy dalších přidávaných komponentů (např. Demirel 2010, Shui et al. 2011, Kwon et al. 2015, Aliado et al. 2014). Modifikace vlastností byla ve všech experimentech prováděna na recyklovaném mikromletém materiálu, který neprošel tepelnou úpravou, resp. v mlýnu byla teplota max. 80 °C, v tomto případě se tedy nejedná o tepelné ošetření, které je někdy používáno (Schoon et al. 2012, Florea et al. 2014, Gastaldi et al. 2015).

V druhé fázi experimentálního vývoje byly využity možnosti vysokorychlostního mletí ve firmě Lavaris, která se touto problematikou již několik let zabývala. Výhodou bylo především množství mikromletého materiálu, protože zde bylo možno připravovat mikromletý recyklovaný materiál v desítkách až stovkách kilogramů. Díky této firmě byla také možnost dostat se k netradičním materiálům ze Středního Východu, konkrétně se jednalo o písek z Pásmu Gazy a vápencové moučky ze Západního břehu Jordánu. Z našeho pohledu jde o zajímavé materiály, ale výzkum s těmito materiály byl již prováděn (Birzeit University 2016). Co se týká obsahu cizorodých látek nevhodných do betonu, tak i u zahraničních vzorků nebylo shledáno nic závažného, i když např. v Egyptě se jednotlivá ložiska od sebe velmi liší

(Mashaly et al. 2012). Materiály od firmy Lavaris doplnily „domácí“ zástupce z první fáze. Všechny vytipované materiály byly následně upraveny pomocí vysokorychlostního mletí ve firmě Lavaris a byly na nich provedeny další rozborů. Podle předpokladů došlo k zjemnění křivky zrnitosti a zvýšily se hodnoty měrných povrchů. U vápencové moučky ze Západního břehu Jordánu (J) došlo ke zvětšení měrného povrchu asi o 10 %, k hodnotě měrného povrchu k cementu to byl 2,5 násobek. Především bylo docíleno odstranění hrudek a materiál nehrudkovatěl ani při dlouhodobějším uskladnění v porovnání s původním materiálem. U mikromletého betonového recyklátu ze železobetonového pražce (P) upraveného z frakce 0/1 mm byla hodnota měrného povrchu vyšší (o 10 %) než pro referenční cement, u mikromletého recyklátu z betonového žlabu byla tato hodnota nižší (o 6 %). Výraznější změny jemnosti mletí u vápencové moučky než u betonového recyklátu souvisejí především s vyšší tuhostí zrn plniva (písek a štěrk). Velikost původního zdroje může mít určitý vliv, ale všechny materiály s velikostí zrna vyšší jak 1 mm, byly nejdříve pomlety nahruho, stejně jako vápenec (B) z lokality Beroun. Z pohledu různých tuhostí zrn směsného materiálu – beton + vápencová moučka se nabízela možnost využít této rozdílné vlastnosti a pomlít obě suroviny najednou. Měrný povrch výsledné směsi zůstal stejný a vliv na mechanické vlastnosti (pevnost v tlaku a v tahu za ohybu) nebyl žádný.

Z výsledků provedených kalorimetrických měření je možné konstatovat, že mikromletý recyklovaný beton ovlivňuje průběh vývoje hydratačního tepla i celkové množství hydratovaného tepla řádově do 5 % od referenčního cementu CEM I 42,5 R. U mikromleté vápencové moučky (J) nebyl patrný žádný vliv na vývoj hydratačního tepla.

Z pohledu využití upravených recyklovaných materiálů se vysokorychlostní mletí jeví jako efektivní varianta, která přináší určité výhody související se zvýšením užité hodnoty recyklátu a jeho použitím jako mikroplniva (v případě vápencové moučky) a mikroplniva s pojivovými vlastnostmi (recyklovaný beton). Obecně se hovoří o možnostech redukce použití a výroby cementu, který není z environmentálního příliš vhodná. A to především s ohledem na produkci CO₂, která je při výrobě cementu vysoká (Topič 2016). Zvýšení pojivových vlastností recyklovaného betonu pomocí vysokoteplotních úprav se také nejeví jako příliš ekologické (Topič 2015 d).

4.2 Vliv mikromletých recyklovaných materiálů na zpracovatelnost a mechanické vlastnosti

V první části tohoto výzkumu byl nejdříve ověřen vliv efektivnosti využití mikromletých recyklovaných materiálů na vlastnosti cementového kompozitu s různým typem plniva. Jako plnivo byl použit písek z Pásmu Gazy (G) frakce 0/4 mm, vápencová moučka ze Západního břehu Jordánu (J) a písek ze Zálezlic (Z) frakce 0/4 mm. U všech směsí bylo použito stejné množství cementu a plniva.

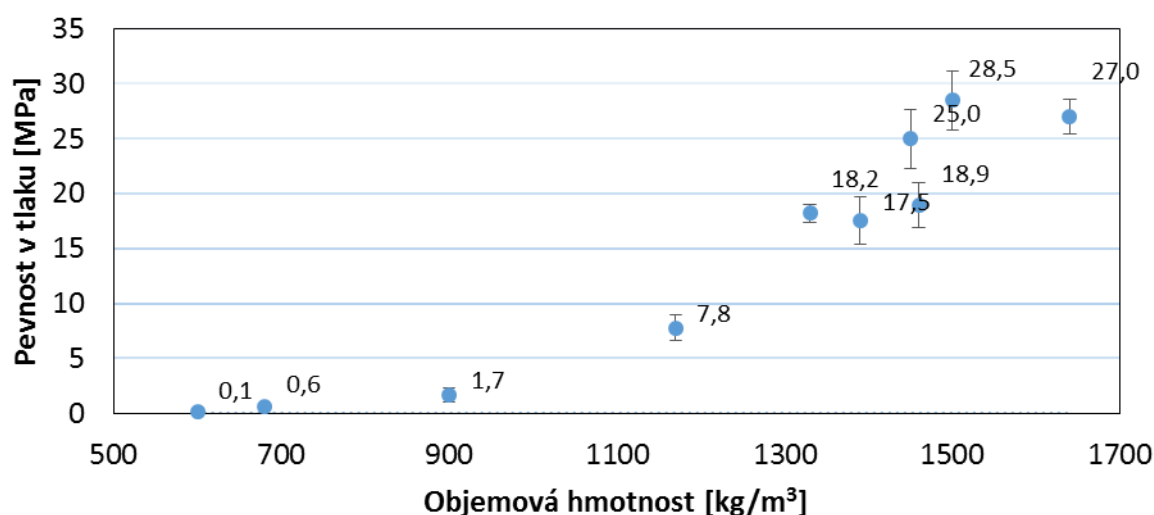
Při porovnání všech tří plniv a mikromleté vápencové moučky byly výsledné hodnoty pevností v tlaku po 28 dnech nejvyšší, při porovnání hodnot mikromleté a původní vápencové moučky byl tento nárůst okolo 20 %, pro další materiály výrazně vyšší. Důvodem je kompaktnější hmota a vliv zde může mít u nižší tuhost vápencové moučky v porovnání s pískem (Nežerka et al. 2014), která lépe odolává mechanickému namáhání. U směsi s neupravenou vápencovou moučkou byla problémem pravděpodobně hrudkovitost, a proto nebyla směs tak kompaktní.

Mikromletá vápencová moučka zvyšuje zpracovatelnost ve směsi s cementem, redukuje množství záměsové vody a tím i hodnotu vodního součinitele, tento jev je v souladu s jinými publikovanými experimentálními výsledky, např. Aliado et al. (2014). Obdobného výsledku bylo dosaženo i při použití mikromletého betonu (Topič et al. 2016).

Z pohledu zjednodušeného systému mikrostruktury máme dva komponenty cement a kamenivo, vlastnosti výsledného kompozitního materiálu závisí na vlastnostech (nejčastěji modul pružnosti a Poissonovo číslo) obou složek a poměru obou složek, resp. tří složek (vzduchové póry) (Topič et al. 2015c, Topič et al., 2016b, Nežerka et al. 2014, Prošek et al. 2016b). Jak již bylo několikrát naznačeno, principy využití mikromletých stavebních materiálů lze uplatnit i v dopravní infrastruktuře. Dílčí výstupy tohoto projektu byly využity i při modifikacích vlastností asfaltového pojiva (Valentin et al. 2016a, Valentin et al. 2016b)

4.2 Modifikace vlastností pomocí pěny

Zcela logickým krokem pro stanovení vlivu mikromleté betonové a vápencové moučky na mechanické vlastnosti bylo pokusit se plné bloky nebo cihly vylehčit. Na Obr. 54 závislost mezi objemovou hmotností a pevností v tlaku pro referenční a vylehčenou testovanou cementovou pastu a cementovou maltu s mikromletou betonovou moučkou. Příklady vylehčení pro tento typ materiálu jsou na Obr. 55.



Obr. 54: Závislost mezi objemovou hmotností a pevností v tlaku pro vzorky z cementové pasty a cementové malty s mikromletou betonovou moučkou (hodnoty jsou uvedeny se směrodatnou odchylkou).



Obr. 55: Příklady vylehčení stejného základního materiálu pomocí pěny, plný referenční vzorek (vlevo), vylehčený vzorek s malým množstvím použité pěny (uprostřed) a vylehčený vzorek s vysokým stupněm vylehčení (vpravo).

K čerstvé cementové jemnozrnné maltě je možno přidávat určité (limitně omezené) množství pěny, v tomto případě při využití mikromleté betonové moučky byla pěna přidávána ve dvou množstvích, aby bylo možno ověřit její vliv na mikrostrukturu, resp. celkovou pórovitost, a následně na sledované mechanické a tepelné vlastnosti. Byl zvolen jeden z nejjednodušších způsobů s ohledem na technologickou nenáročnost (Amran et al. 2015).

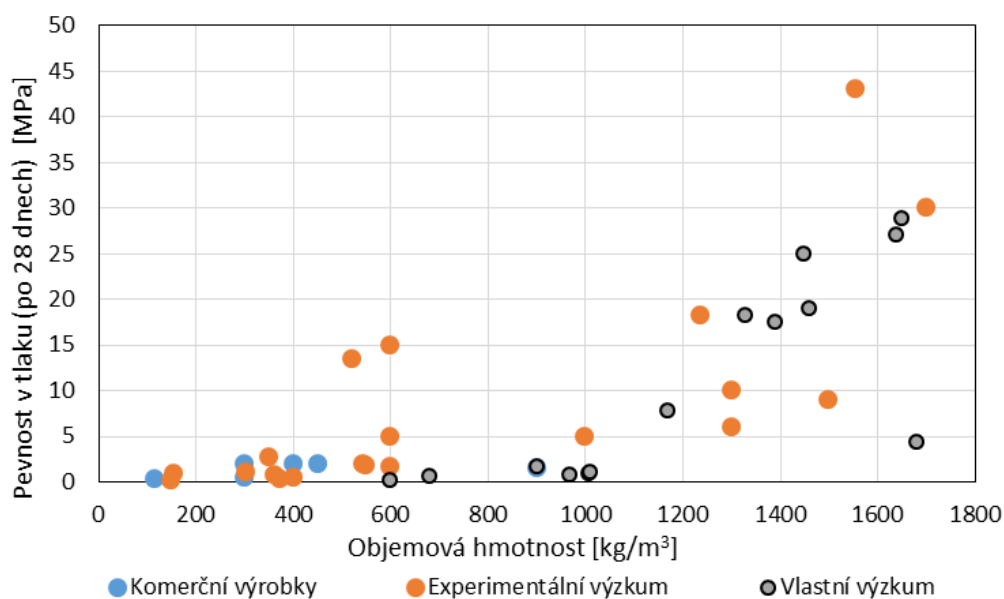
Přibližná lineární závislost pevnosti v tlaku na objemové hmotnosti platí v rozsahu cca 1000 až 1600 kg/m³, blíže viz Obr. 54 (Růžička 2017): V Tab. 16 jsou prezentovány základní vlastnosti (objemová hmotnost a pevnost v tlaku po 28 dnech) pro vybrané komerčně vyráběné lehčené bloky. Obdobně jsou v Tab. 17 porovnány hodnoty pevnosti v tlaku na objemové hmotnosti pro experimentálně testované materiály za období od roku 2010. Pro vzorky mikromletou vápencovou moučkou bylo dosaženo podobných výsledků.

Tab. 16: Základní vlastnosti komerčně vyráběných lehčených bloků/ materiálů (stručný přehled).

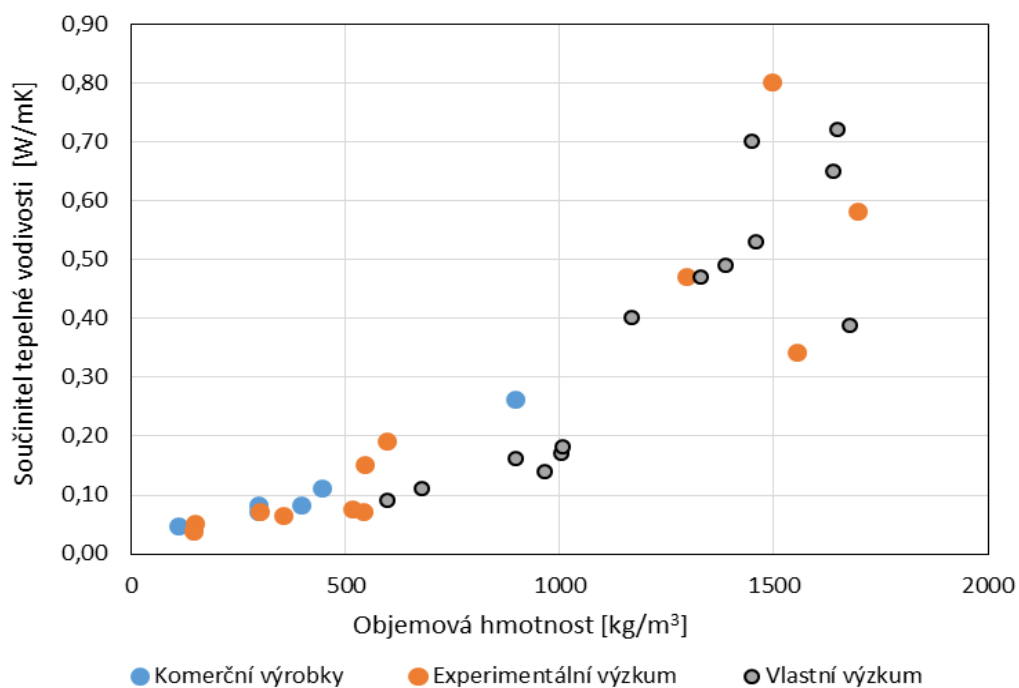
Výrobce/ název výrobku	Specifikace	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Pevnost v tlaku [MPa]	Součinitel tepelné vodivosti [W/mK]
Ytong/Multipor	Tepelněizolační deska	115	>0,3	0,045
Ytong/ Lambda YQ	Superizolační tvárnice pro jednovrstvé zdivo	300	>2,0	0,081
Hebel/ Tvárnice P2-450	Obvodové stěny	450	>2,0	0,110
Porfix/ Premium P2-400	Obvodové stěny	400	>2,0	0,081
Cemex/ Poroflow F300	Litý izolační pěnobeton	300	>0,4	0,069
Poroflow F900		900	>1,5	0,260

Tab. 17: Základní vlastnosti experimentálně vyráběných lehčených bloků/materiálů (stručný přehled od roku 2000).

Autor (rok)	Specifikace složení	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Pevnost v tlaku [MPa]	Součinitel tepelné vodivosti [W/mK]
Wee et al. 2006	cement a struska	600-1900	2-58	neuvedeno
Ma a Chen 2016	mikrosilika, PP vlákna	550	1,8	0,15
Ma a Chen 2017	hořečnatý cement	544 - 1565	1,9-43,3	0,07-0,34
Pan et al. 2014	mikromletá struska	153-303	0,95-1,00	0,05-0,07
Poznyak a Melnyk 2014	popílek, zeolit, PP vlákna	650	2,7	neuvedeno
Jones a McCarthy 2004	popílek	1000	5	neuvedeno
Hilal et al. 2015b	mikrosilika, popílek	1300	6	neuvedeno
Jiang et al. 2016	urychlovač plastifikátor	150-360	0,12-0,75	0,036-0,063
Nansone et al. 2017	mikrosilika, vlákna,	400-1360	0,5-18,2	neuvedeno
Liu et al. (2014)	popílek, geopolymery	1300-1700	10-30	0,47-0,58
Panesan 2013	vápenec	1500-2300	9-10	0,8-1,1
Tian et al. 2016	sádra, struska	520-600	13,5-15	0,072-0,190
Nguyen et al. 2017	geopolymer / popílek	372-600	0,34-1,58	neuvedeno



Obr. 56: Pevnost v tlaku po 28 dnech v závislosti na objemové hmotnosti pro komerční výrobky, zahraniční experimentální výzkum a vlastní výzkum.



Obr. 57: Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na objemové hmotnosti pro komerční výrobky, zahraniční experimentální výzkum a vlastní výzkum.

Z porovnání závislostí na Obr. 56 a Obr. 57 je patrné, že získané experimentální výsledky mají podobný charakter jako zahraniční prezentovaný výzkum v hodnotách objemových hmotností od 500 kg/m^3 . Pod tuto hranici se vlastní prováděný výzkum nedostal na rozdíl od komerčních výrobků a některých zahraničních experimentálních výzkumů. Z pohledu použitých materiálů a technologií bylo dosaženo dobrých výsledků, zcela srovnatelných s dalšími experimentálními skupinami, a to bez použití stavební chemie (např. plastifikátorů) a modifikace pojiva pomocí mikrosiliky, popílku, strusky atd. (Nansone et al. (2017), Chen a Liu 2017, Ma a Chen 2016).

Navržené směsi se jeví z pohledu omezení stavební chemie jako optimální. Zlepšení cementových matric je možno dosáhnout v obou případech (vápencová moučky i betonový recyklát) pomocí plastifikátoru nebo superplastifikátoru. Druhou možností je aktivovat mikromletý betonový prach přidáním metakaolinu, popílku atd. Pro kvalitnější matrici s vyššími hodnotami mechanických vlastností (především pevnosti v tlaku) by potom neměl být problém dosahovat optimálního poměru mezi hodnotou objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku nebo součinitele tepelné vodivosti.

Výsledné vlastnosti cementového kompozitního materiálu jsou také závislé na křivce zrnitosti a na mezerovitosti, oba parametry mohou ovlivnit kombinací dvou nebo více křivek zrnitosti a vytvořit ideální skladbu zrn (Prošek et al. 2016c, Prošek et al. 2016d). Mechanické vlastnosti cementového kompozitního materiálu se dají zlepšit i použitím rozptýlené vlákenné výztuže, resp. mikrovýztuže (Poznyak a Melnyk 2014, Ma a Chen 2016). Na příkladu cementové malty vápencovou moučkou byl testován vliv uhlíkových mikrovláken na pevnost v tlaku a v tahu za ohybu (Prošek et al. 2016a). Náhrada části písku mikromletou vápencovou moučkou snížila hodnotu vodního součinitele a bylo dosaženo i výrazně vyšších hodnot sledovaných mechanických vlastností (Tesárek et al. 2016a, Tesárek et al. 2016b). V tomto případě by bylo vhodné recyklovaných vláken, např. na bázi drátků z pneumatik. Sádrové vzorky s rozměry $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ vyztužené pomocí drátků z pneumatik byly testovány a bylo u nich docíleno vyšší houževnatosti a možnost opakovaného namáhání než u vzorků čistě sádrových, ale za cenu snížení hodnot pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu (Tesárek et al. 2014, Tesárek et al. 2015a). Obdobné výsledky byly získány na vzorcích o průměru 100 mm a výšce 200 mm (Tesárek et al. 2015b).

4.3 Modifikace pomocí PVA

Experimentální výsledky modifikace vlastností cementové malty s mikromletým betonovým recyklátem (Z) jsou ve shodě s již publikovanými články (např. Topič et al. 2014b, Topič et al. 2015b, Singh a Rai 2001). Problematické je porovnat tyto výsledky s výsledky jiných autorů, protože ti se zaměřili převážně na ošetření hrubého recyklovaného kameniva (Kou a Poon 2010) nebo jen cementové pasty (Allahverdi et al. 2010).

Zhoršující se zpracovatelnost směsí souvisí s vyšší viskozitou PVA než jakou má voda. Při hodnotách nad 2,8 hm. % PVA se výrazně mění vlastnosti cementového kompozitu v porovnání se směsmi s vyššími hodnotami. Uvedené poznatky se shodují se závěry s jinými studiemi, kde bylo PVA přidáváno k cementové pastě, např. Singh a Rai (2001), Santos et al. (1999) nebo Kim et al. (1999). Podle očekávání se s množstvím PVA snižuje hodnota objemové hmotnosti a roste celková pórovitost (Jaukl 2017). Uvedený jev ovlivňuje také hodnoty smrštění, protože pro vzorky do 4 hm. % byly stanoveny nižší hodnoty než pro referenční sadu. Pro hodnotu se 4 hm. % dokonce o polovinu, tento jev souvisí pravděpodobně s vyšší celkovou pórovitostí a se zpomalením odpařování záměsové vody ze vzorku (Topič et al. 2014a, Topič et al. 2014b, Topič et al. 2015a).

Vývoj dynamických modulů pružnosti pro vzorky uložené pod vodní hladinou i volně v laboratorním prostředí mají podobné trendy jako referenční materiál, ale hodnoty jsou nižší. V případě vzorků uložených volně v laboratorním prostředí je vliv množství PVA relativně malý (asi do 1,3 GPa) a ovlivněný hodnotami objemové hmotnosti. Pro vzorky uložené ve vodním prostředí je vliv PVA vyšší na hodnoty modulu pružnosti (asi o 4 GPa), v tomto případě se projevuje vliv PVA, které brání pronikání vody do materiálu a další hydrataci cementu stejně tak, jako je tomu u referenční sady bez PVA. Obdobné chování vykazují vzorky u smykového modulu pružnosti (Jaukl 2017). U cementových past byly v předchozích výzkumech zaznamenány poklesy pevností v tlaku s množstvím použitého PVA (Topič et al. 2015b). Uvedený předpoklad byl jednoznačně prokázán a souvisí s objemovými hmotnostmi vzorků. Trend nárůstu hodnot pevnosti v tahu za ohybu v závislosti na zvyšujícím se množstvím použitého PVA byl zaznamenán pro vzorky uložené volně v laboratorním prostředí. U vzorků uložených ve vodním prostředí nebyl tento trend zaznamenán.

5. Praktické aplikace

5.1 Grantové projekty

Interní grantové projekty

V rámci řešení dané problematiky bylo na pracovišti autora řešeno několik interních a externích grantových projektů, v rámci kterých byl prezentovaný výzkum realizován a část výzkumu byla publikována v rámci konferenčních příspěvků nebo v odborných časopisech. Z interních projektů ČVUT v Praze se jednalo o:

Pokročilé experimentální metody (2010 až 2011), hlavní řešitel Ing. Pavel Padevět, Ph.D.

Aplikace diagnostických metod u materiálů a konstrukcí a jejich verifikace, (2012 až 2013), hlavní řešitel Ing. Pavel Padevět, Ph.D.

Experimentální metody použitelné pro analýzu materiálů a konstrukcí (2014 až 2015), hlavní řešitel Ing. Pavel Padevět, Ph.D.

V současné době je řešen interní projekt **Pokročile od návrhu materiálu ke konstrukci** (2016 až 2018), hlavní řešitel Ing. Pavel Padevět, Ph.D.

Externí grantové projekty ukončené

Z externích grantů byl řešen projekt **Modifikace a vývoj variantní vápeno-cementové malty pomocí mikromleté aktivované vápencové moučky nebo kalu**, poskytovatel Karlovarský kraj, hlavní příjemce: ECOLOGICAL CONSTRUCTION GROUP s.r.o., řešitel za ČVUT v Praze Ing. Pavel Tesárek, Ph.D., období řešení projektu 2015. Cílem projektu bylo navržení vhodné maltové směsi pro zdění nebo omítání obsahující 10 až 30 % hm. vápenných odprašků v závislosti na jejich jemnosti. Záměrem bylo především snížení spotřeby cementu a vápenného hydrátu, jednak z hlediska úspory finančních prostředků na výrobu omítacích a zdících malt a tím zmenšení negativního dopadu výroby na životní prostředí. Výstupem projektu byla zpráva pro hlavního řešitele a podklady pro podání národního užitného vzoru (Valentin et al. 2015a). Dalším projektem byl **Vývoj cementových malt a stavebních lepidel s využitím mechanicky aktivovaného jemně mletého betonového recyklátu**, poskytovatel Karlovarský kraj, hlavní příjemce: Strategic Global Consultants Europe s.r.o., řešitel za ČVUT v Praze Ing. Jan Valentin, Ph.D., období řešení projektu 2015 (Valentin et al. 2015b). Cílem projektu bylo provést

rozbory dodaného mikromletého betonového recyklátu (mechano-chemicky aktivované moučky), za účelem určení jeho vlastností a stanovení jeho reaktivity (míry hydratace). Mechano-chemicky aktivovaný (jemně mletý) betonový recyklát plnil při použití v tradičních maltách převážně funkci mikroplniva, částečně se projevila i jeho úloha jak částečného substituentu hydraulického pojiva. Výstupem projektu byla zpráva pro hlavního řešitele a podklady pro podání národního užitého vzoru (Valentin et al. 2015b).

Souběžně běžícím projektem byl TA04031256 **Rozvoj mechanicky aktivovaných materiálů na bázi recyklovaného betonu pro progresivní stabilizované a za studena recyklované konstrukční vrstvy**, poskytovatel – Technologická agentura České republiky, hlavní příjemce České vysoké učení technické v Praze / Fakulta stavební, řešitel Ing. Jan Valentin, Ph.D., období řešení projektu 2014 až 2016. Projekt byl zaměřen na 4 hlavní cíle, jedním z cílů bylo stanovení procesní úpravy a další rozvoj technologie mechano-chemické aktivace pomocí vysokorychlostního mletí minerálních materiálů betonových recyklátů. Úprava materiálu spočívala v technických modifikacích a uzpůsobení stávajících mlecích zařízení s cílem dosáhnout materiálu s velikostí max. 0,2 mm. Výstupem bylo několik výzkumných zpráv z řešení projektu. Praktickým výstupem byl homogenní alternativní pojivo anebo jemnozrnné plnivo s aktivním a modifikovaným povrchem za použití stavebních zrnitých recyklátů (Valentin et al. 2016a).

Externí grantové projekty současné

Od ledna 2017 je na pracovišti autora řešen projekt **GA ČR 17-06771S Možnosti využití mikromletého recyklovaného betonu jako mikroplniva s pojivovými vlastnostmi**, v kterém je autor hlavním řešitelem. Doba řešení projektu leden 2017 až prosinec 2019. Cílem je stanovit sadu parametrů, které jsou klíčové z pohledu možnosti využití mikromletého recyklovaného betonového recyklátu v podobě pojiva a mikroplniva v cementové maltě. Dále je cílem zvýšit reaktivitu tohoto pojiva úpravou mletí a přidáním přísad jako popílek nebo hydroxidu (Tesařek et al. 2016).

MPO Trio FV20503 **Lehčené zdící materiály na bázi mikromletých minerálních vedlejších produktů s řízenými užitnými vlastnostmi** (srpen 2017-2019), Hlavní řešitel firma Lavaris, s.r.o., spoluřešitel Fakulta stavební ČVUT v Praze, řešitel Ing. Pavel Tesařek, Ph.D. Hlavní cíle projektu je vývoj nového typu lehčených zdících

prvků s využitím minerálních vedlejších produktů či minerálních stavebních odpadů „východních“ zemí jako je Rumunsko nebo Ukrajina (v souvislosti s tamními boji a poválečné rekonstrukci). Ale zejména by měly mít exportní potenciál do méně rozvinutých regionů jako je Severní Afrika (Egypt) a zemí Blízkého Východu (Jordánsko, Palestina, Saudská Arábie, Kuvajt apod.) (Karra'a et al. 2016). V přihlášce k projektu byly použity dílčí výsledky, které byly získány v předchozím výzkumu, a část z nich je publikovaná ve sbornících z konferencí nebo v odborných časopisech, další část výsledků je publikovaný v této práci.

5.2 Praktické aplikace na zkušební stěně

Při návrhu testovaných směsí byl brán ohled i na reálnou aplikaci, za tímto účelem byly hodnoty rozlivů čerstvých směsí na střešacím stolku porovnávány se zpracovatelností potřebnou pro aplikaci lepidla nebo malty na svislý povrch. Jako podklad byly nejčastěji používány pórobetonové bloky (bílé nebo šedé) nebo cihla plná pálená (CPP). Nanášení čerstvých směsí probíhalo v laboratorních podmínkách, nejdříve jen na částech bloků, později na stěně s rozměry 1000×750 mm. Obdobným způsobem byla prakticky testována lepidla. V květnu 2016 byla na zadním dvoře FSv ČVUT v Praze postavena experimentální testovací stěna s rozměry 1000×1500 mm z šedých pórobetonových tvárnic. Tvárnice byly spojeny navrženým cementovým lepidlem s mikromletou recyklovanou vápencovou moučkou. Na stěnu byla natažena navržená omítací malta s podílem mikromletého materiálu, na kterou byla aplikována další vnější vrstva hladké omítky (Obr. 58 a Obr. 59).



Obr. 58: Pohled na testovací stěnu z šedého pórobetonu s využitím navrženého lepidla (vlevo). Natahování vrstvy malty na testovací stěnu (vpravo) (stav stěny v květnu 2016).



Obr. 59: Pohled na nanesenou omítku (vlevo). Detail nanesené omítky (vpravo) (stav stěny v květnu 2016).

Obě vrstvy omítky byly s vysokým obsahem mikromleté vápencové moučky, podkladová vrstva byla tlustá cca 5 mm a obsahovala 20 hm. % cementu a 80 hm. % mikromletou moučkou, omítka určená pro povrchovou vrstvu byla tvořena z 10 hm. % cementem a 90 hm. % mikromletou moučkou, byla nanesena pouze v tloušťce několika mm. Výroba obou malt pro malty omítání byla prováděna pomocí nástavce na vrtačce a obě malty byly nanášeny „natahováním“. Plocha omítky byla cca 1000×750 mm. Druhý den po provedení byla provedena obhlídka stěny a bylo zaznamenáno na povrchu omítky jen pár vlasových trhlin. V březnu roku 2017 byly pořízeny nové snímky, které dokumentují stav experimentální stěny zhruba po roční „aplikaci“ v terénu a stav po jedné zimě (viz Obr. 60). Z nových snímků je patrná značná degradace šedých pórobetonových tvárnic, které byly v přímém kontaktu s povrchem tenisového kurtu. Na nanesených omítkách nebyly zaznamenány žádné poruchy až na vlasové trhliny, které se objevily již v květnu 2016.



Obr. 60: Pohled na nanesenou omítku (stav v březnu 2017).

5.3 Užité vzory s využitím mikromletých recyklovaných stavebních materiálů

Mikromletá vápencová moučka (J) v rámci řešeného výzkumu byly nejprve provedeny rozborů dodaných mikromletých aktivovaných vápencových mouček, za účelem určení jejich vlastností a složení. Vápencová moučka plní v maltách funkci minerálního mikropřísady. Vysokorychlostní mletí umožňuje „aktivování“ vápencové moučky a v maltě pak nedochází ke shlukování zrn a komplikacím při zpracování čerstvé maltové směsi a zpracování, jak by tomu bylo při použití nemleté moučky (z původního zdroje). Díky přidání mikromleté moučky jsou navíc zlepšeny mechanické vlastnosti (v porovnání s běžnou maltou), a je proto možné dosáhnout úspory pojiva (cementu nebo hydroxidu vápenatého). Vlastnosti ostatních surovin byly určeny na základě technických listů výrobců (cement, hydroxid vápenatý, písek). Cílem byl návrh 3 směsí malt pro zdění či omítání.

Po zvážení možných variant bylo rozhodnuto, že bude vyvinuta zdící malta pro běžné zdění s tloušťkou vrstvy do 10 mm, dále omítací malta na jádrové omítky a omítky pro finální vrstvy. Od každé varianty řešení bylo navrženo několik směsí s různým obsahem pojiv (cement, hydroxid vápenatý) a aktivované vápencové moučky. Z jednotlivých směsí byly vyrobeny vzorky, u kterých byly po 7 dnech zjišťovány jejich mechanické parametry.

Na základě těchto měření byly určeny hranice pro množství použitých pojiv tak, aby bylo dosaženo požadované pevnostní kategorie a zároveň byla udržena nižší cena směsi. Zároveň bylo určeno maximální množství aktivované moučky tak, aby nedocházelo ke zhoršení mechanických vlastností a vzniku trhlin u omítacích malt po jejich nanášení na svislý povrch. Pro zdící maltu byla vybrána směs obsahující 25,5 hm. % aktivované vápencové moučky. V případě běžné jádrové omítací malty byla zvolena směs obsahující 13 hm. % aktivované vápencové moučky, a pro finální omítací maltu (štuk) byla vybrána jako nejvhodnější směs obsahující 70 hm. % aktivované vápencové moučky.

Za účelem dosažení vhodné zpracovatelnosti a homogenity bylo u těchto směsí navrženo množství záměsové vody a technologie přípravy směsi. Dle aplikace jednotlivých směsí byla dále optimalizována metoda nanášení malt na svislé povrchy. U optimalizovaných směsí byly pro daný účel provedeny mechanické testy pro ověření funkčních vlastností směsí. Mezi sledované parametry patřila pevnost

v tahu za ohybu, pevnost v tlaku, dynamický smykový modul a dynamický modul pružnosti. Navržené směsi mají minimálně srovnatelné vlastnosti s komerčně dodávanými maltami, a díky využití mikromleté aktivované vápencové moučky dochází k úspoře pojiva (cement, hydroxid vápenatý), a tím snížení ceny navržených směsí.

Vzhledem k tomu, že vápencová moučka je před mikromletím odpadním materiálem, dochází navíc k snížení zátěže na životní prostředí a úspoře přírodních zdrojů (písek). V navržených směsích se s výjimkou směsi pro finální omítky nevyužívají žádné přísady a tím dochází ve srovnání s komerčně dodávanými směsmi k dalšímu snížení nákladů na výrobu. Při použití mikromleté vápencové moučky ve směsi pro finální omítky (štuky) mohl být také vynechán drahý křemičitý písek.

Pro využití směsí pro export mimo Evropu, byly ve finálních směsích odzkoušeny suroviny (písek, cement) z cílových zemí (Jordánsko, Egypt) a ověřeny funkční vlastnosti směsí. Bylo zjištěno, že suroviny z Jordánska a Egypta jsou vhodné do navržených směsí a mají pouze nepatrný vliv na výsledné vlastnosti a mají tak distribuční potenciál na obou trzích. Mikromleté aktivované vápencové moučky byly dodány firmou Ecological Construction Group s.r.o., na jeho úpravě spolupracovala s firmou Lavaris s.r.o., která zařízení pro úpravu (mikromletí) vyvíjí a dodává.

Návrh maltových směsí – z množství směsí vytvořených pro konkrétní variantu běžné zdící, běžné omítky a finální (štuk) omítky malty byly na základě prvotních výsledků vybrány nejvhodnější směsi. Složení vybraných směsí bylo dále optimalizováno pro dosažení funkčních charakteristik požadovaných pro konkrétní aplikaci.

Běžná zdící malta – směs navržená jako zdící malta pro běžné zdění je složena z 10 hm. % cementu CEM I 42,5R, 5 hm. % hydroxidu vápenatého, 51 hm. % písku frakce 0-4 mm a 25 hm. % mikromleté aktivované vápencové moučky frakce 0/0,06 mm s měrným povrchem $430 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$ a hmotnostní poměr vody a pojiva je 1,2 až 1,4 (viz Tab. 18).

Tab. 18: Složení navržené běžné zdící malty (J).

Jednotky	Pojivo		Plnivo		Vodní součinitel (-)
	Cement	Hydroxid vápenatý	Písek (0-4 mm)	Vápencová moučka	
[hm. %]	0,10	0,05	0,595	0,255	1,2 až 1,4
[obj. %]	0,10	0,10	0,480	0,320	1,2 až 1,4

Běžná omítací malta – směs navržená jako omítací malta určená pro jádrové omítky je složena z 10 hm. % cementu CEM I 42,5R, 5 hm. % hydroxidu vápenatého, 72 hm. % písku frakce 0/2 mm a 13 hm. % mikromleté aktivované vápencové moučky frakce 0/0,6 mm s měrným povrchem $430 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$ a hmotnostní poměr vody a cementu je 1,1 až 1,3 (viz Tab. 19).

Tab. 19: Složení navržené běžné omítací malty (J).

Jednotky	Pojivo		Plnivo		Vodní součinitel (-)
	Cement	Hydroxid vápenatý	Písek (0-2 mm)	Vápencová moučka	
[hm. %]	0,10	0,05	0,72	0,13	1,1 až 1,3
[obj. %]	0,10	0,11	0,62	0,16	1,1 až 1,3

Finální omítací malta (štuk) – směs finální omítky (štuku) určené pro finální omítky je složena z 15 hm. % cementu CEM I 42,5R, 15 hm. % písku frakce 0/1 mm a 70 hm. % mikromleté vápencové moučky frakce 0 až 0,06 mm s měrným povrchem $430 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$ a hmotnostní poměr vody a cementu je 1,5 až 1,6. Do záměsové vody jsou přidány 2 g provzdušňující přísady na 100 g cementu. Přísada umožňuje dosažení dobrých funkčních vlastností a vynechání hydroxidu vápenatého ze suché směsi, viz Tab. 21.

Tab. 20: Složení navržené finální omítací malty (J).

Jednotka	Pojivo	Plnivo		Vodní součinitel (-)
	Cement	Písek (0-1 mm)	Vápencová moučka	
[hm. %]	0,15	0,15	0,70	1,9 až 2,1
[obj. %]	0,13	0,11	0,76	1,9 až 2,1
+ 2 g provzdušňovací přísady na 100 g cementu				

Technologie výroby a zpracování maltových směsí a lepidla: Zpracování a aplikace běžné zdící malty – při výrobě musí být suchá směs nejprve řádně zhomogenizována. Teprve poté může být za průběžného míchání postupně přidávána voda. Homogenizace a samotné míchání může být v závislosti na množství prováděno ručně, pomocí metly a míchače nebo pomocí stavební míchačky. Homogenizace i míchání za pomoci metly a ruční míchačky musí probíhat alespoň 5 minut. Nanášení navržené zdící malty na zdící prvky je prováděno standardně zednickou lžící a dřevěným nebo plastovým hladítkem. Maximální tloušťka vrstvy zdící malty je 15 mm.

Zpracování a aplikace běžné omítací malty: při výrobě musí být suchá směs nejprve řádně zhomogenizována. Teprve poté může být za průběžného míchání postupně přidávána voda. Homogenizace a samotné míchání může být v závislosti na množství prováděno ručně, pomocí metly a míchače nebo pomocí stavební míchačky. Homogenizace i míchání za pomoci metly a ruční míchačky musí probíhat alespoň 5 minut. Malta slouží především jako vrstva jádrové omítky, která tvoří podklad pro finální štukové omítky. Malta se nanáší na podklad nahazováním směsi zednickou lžící. Přebytková čerstvá malta je stržena pomocí latě. Po zavadnutí je malta uhlazena dřevěným nebo plastovým hladítkem. Tloušťka malty by neměla přesáhnout 15 mm.

Zpracování a aplikace finální omítací malty (štuku): při výrobě musí být suchá směs nejprve řádně zhomogenizována. Teprve poté může být za průběžného míchání postupně přidávána voda. Homogenizace a samotné míchání může být v závislosti na množství prováděno ručně, pomocí metly a míchače nebo pomocí stavební míchačky. Homogenizace i míchání za pomoci metly a ruční míchačky musí probíhat alespoň 5 minut. Směs slouží jako finální vrstva na jádrové omítky. Malta

se nanáší na podklad natahováním směsi pomocí plastového nebo ocelového hladítka. Po zavadnutí může být malta uhlazena ocelovým hladítkem, díky čemu je dosaženo velmi hladkého povrchu srovnatelného se sádrovými omítkami. Druhou variantou je uhlazení filcovým hladítkem a dočištění molitanem, díky čemu je vytvořen hladký povrch jako u běžného štuky. Tloušťka finální vrstvy by měla být cca 2 mm.

Zkoušky vlastností malt a lepidla – na vzorcích malt ve tvaru kvádrů a rozměrech 40×40×160 mm byly následně ověřeny funkční vlastnosti směsí. Každou směs zastupovalo celkem 6 vzorků. Hlavními sledovanými parametry byly pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, dynamický modul pružnosti a dynamický smykový modul.

Shrnutí výsledků a porovnání s klasickou směsí – jednotlivé vlastnosti navržených směsí jsou souhrnně zobrazeny v Tab. 21. Navržená zdící malta vykazuje dobré vlastnosti a může být srovnávána s běžnou vápenocementovou maltou M5. Běžná vápenocementová malta M5 má pevnost v tlaku min. 5 MPa a pevnost v tahu za ohybu min. 1,5 MPa. Běžně malta M5 obsahuje 20 % cementu a 10 % hydroxidu vápenatého, kdežto navržená zdící malta obsahuje pouze 10 % cementu a 5 % hydroxidu vápenatého. Díky tomu je cena malty nižší a navíc ve vyvinuté zdící maltě je obsaženo 25 % vápencové moučky, která je odpadním materiálem. Navržená běžná omítací malta vykazuje dobré vlastnosti a může být srovnávána s běžnou jádrovou omítkou zrnitosti do 2 mm. U omítacích malt nejsou obvykle sledovány pevnostní charakteristiky, není tedy možné je v tomto ohledu porovnávat. Avšak co do složení je situace podobná jako v předchozím případě, běžná jádrová omítací malta obsahuje 20 % cementu a 10 % hydroxidu vápenatého, kdežto navržená tenkovrstvá omítací malta obsahuje pouze 10 % cementu a 5 % hydroxidu vápenatého. Díky tomu je cena malty nižší, a navíc ve vyvinuté zdící maltě je obsaženo 13 % vápencové moučky, která je odpadním materiálem. Navržená běžná omítací malta vykazuje dobré vlastnosti a může být srovnávána se štukem. U omítacích malt (štuků) nejsou stěžejním faktorem pevnostní charakteristiky, ale přesto se uvádí pevnost v tlaku do 2,5 MPa. V tomto ohledu navržená malta pro finální omítky vykazuje lepší vlastnosti. Co se týče složení je situace podobná jako v předchozím případě, štuková omítací malta obsahuje 20 % hydroxidu vápenatého, kdežto navržená malta obsahuje pouze 15 % cementu a obsahuje 70 % mikromleté

aktivované vápencové moučky. Díky tomu je cena malty výrazně nižší, k tomu přispívá i fakt, že v běžném štku je jako plnivo obsažen dražší křemičitý písek. Navíc v případě zpracování pomocí ocelového hladítka lze díky obsahu moučky dosáhnout velmi hladkých povrchů obdobně jako u sádrových omítek.

Tab. 21: Souhrnné výsledky vlastností navržených malt (J).

Charakteristika/ jednotka	Běžná zdící malta	Běžná omítací malta	Finální omítací malta
Objemová hmotnost [kg/m ³]	1771	1916	1500
Pevnost v tlaku [MPa]	5,7	10,3	6,5
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	1,3	2,5	2,2
Dynamický modul pružnosti [GPa]	6,6	12,8	4,9
Dynamický smykový modul [GPa]	2,9	5,4	2,1

V rámci výzkumu se podařilo vyvinout zdící maltu pro běžné zdění, omítací maltu pro jádrové omítky a omítací maltu pro finální vrstvy (štuk) se srovnatelnými nebo lepšími vlastnostmi, než mají běžné směsi. Použitím mikromleté aktivované vápencové moučky došlo k nahrazení běžných minerálních plniv odpadním materiálem. Přestože nebyly zjištěny pojivové vlastnosti moučky, dochází ke zlepšení funkčních vlastností díky vysokému obsahu jemných zrn, která dokonale vyplňují póry mezi většími zrny.

Díky tomuto zlepšení může být snížen obsah cementu a hydroxidu vápenatého a dochází k úspoře pojiv a snížení ceny směsi. Navíc úprava vápencové moučky vysokorychlostním mletím umožňuje její dobré zapracování do směsi bez vzniku hrudek a shluků, což jinak není téměř možné. Protože vápencová moučka je odpadní materiál, dochází navíc k šetření životní prostředí i přírodních zdrojů. Jako nejperspektivnější z hlediska použití, množství obsažené mikromleté aktivované vápencové moučky, užitných vlastností a potenciálu k exportu bylo rozhodnuto o zpracování průmyslové ochrany ve formě užitého vzoru na navrženou zdící maltu s obsahem 25 % mikromleté aktivované vápencové moučky.

Mikromletý betonový recyklát

V rámci navazující experimentální činnosti byly nejprve provedeny rozborů dodaného mikromletého betonového recyklátu (moučky), za účelem určení jeho vlastností a stanovení jeho reaktivity (míry hydratace). Jemně mletý betonový recyklát plní v maltách převážně funkci mikroplniva. Stanovení reaktivity recyklátu bylo rozhodující pro plnění pojivové funkce, díky které je možné využít tento materiál jako náhradu části cementu. Pojivová funkce recyklátu je ovlivněna množstvím nezhydratovaných cementových zrn, která by za pomoci mikromletí mohla být odhalena a byl tím umožněn přístup vody k zrnům a jejich další hydratace. Cílem navržených analýz bylo zjištění velikosti zrn mikromletého recyklátu, tudíž jestli jsou jeho zrna dostatečně malá, aby došlo k odhalení jejich nezhydratované části. Dále zjištění obsahu nezhydratovaných cementových zrn a nakonec ověření předpokladu o opětovné hydrataci. Vlastnosti ostatních surovin byly určeny na základě technických listů výrobců (cement, hydroxid vápenatý, písek). Tyto údaje byly použity jako podklad pro návrh nových maltových směsí srovnatelných s běžnými maltami.

Cílem byl návrh 3 směsí malt nebo lepidel. Po zvážení možných variant bylo rozhodnuto, že bude vyvinuta zdící malta pro běžné zdění s tloušťkou vrstvy cca 10 mm, dále tenkovrstvá omítací malta a tenkovrstvá zdící malta pro pórobetonové tvárnice. Od každé varianty řešení bylo navrženo několik směsí s různým obsahem pojiv (cement, hydroxid vápenatý) a mikromletého betonového recyklátu. Z jednotlivých směsí byly vyrobeny vzorky, u kterých byly po 7 dnech zjišťovány jejich mechanické parametry. Na základě těchto měření byly určeny „hranice“ pro množství použitých pojiv tak, aby bylo dosaženo požadované pevnostní kategorie a zároveň byla udržena nižší cena směsi. Současně bylo určeno maximální množství mikromletého betonu tak, aby nedocházelo ke zhoršení mechanických vlastností a vzniku trhlin u tenkovrstvé omítací malty.

V další fázi byly pro tři zmíněné varianty navrženy základní/prvotní směsi (z hlediska mechanických vlastností i ceny), které byly dále optimalizovány. V případě zdící malty byla zvolena směs obsahující 25 hm. % mikromletého betonového recyklátu. Jako nejvhodnější tenkovrstvá omítací malta byla vybrána směs obsahující 35 hm. % mikromletého betonového recyklátu. Vybraná směs pro lepidlo obsahovala 40 hm. % mikromletého betonového recyklátu. U těchto směsí bylo upraveno původní množství záměsové vody za účelem dosažení optimální

zpracovatelnosti potřebné pro konkrétní aplikaci. Pro dosažení vhodné zpracovatelnosti a dobré homogenity byla také nadefinována technologie výroby směsí. Dle aplikace jednotlivých směsí byla dále optimalizována metoda nanášení malt a lepidla – formou aplikace na pórobetonové tvárnice.

Poté, co byly optimalizovány pro daný účel zdění nebo omítání a byla definována technologie výroby, následovala výroba vzorků finálních směsí. Na vzorcích byly následně ověřeny funkční vlastnosti směsí. Hlavními sledovanými parametry byla pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, dynamický modul pružnosti a dynamický smykový modul.

Navržené směsi mají minimálně srovnatelné vlastnosti s komerčně dodávanými maltami a díky využití jemně mletého betonového recyklátu dochází k úspoře pojiva (cement, hydroxid vápenatý), a tím snížení ceny navržených směsí. Vzhledem k tomu, že betonový recyklát je před mikromletím odpadním materiálem, dochází navíc k snížení zátěže na životní prostředí a úspoře přírodních zdrojů (cement, písek). Zároveň díky jemnosti betonového recyklátu a jeho kladnému vlivu na reologické vlastnosti není nutné ve směsích použití chemických přísad, jako jsou plastifikátory a superplastifikátory. Maximální potenciál mikromletého betonového recyklátu byl využit v případě lepidla na plynosilikáty (pórobeton). Mikromletá moučka umožnila na místo dražšího křemičitého písku použít běžný písek, a tím bylo dosaženo další finanční úspory. Pro využití v Palestině byly ve finálních směsích využity místní suroviny (písek, cement) a byly ověřeny jednotlivé funkční charakteristiky. Na základě porovnání malt a lepidla bylo zjištěno, že vstupní materiály používané v různých regionech (ČR a Palestina) mají pouze nepatrný vliv na výsledné vlastnosti a mají tak distribuční potenciál na obou trzích.

Betonový recyklát byl dodán firmou Strategic Global Consultants – Europe s.r.o., na jeho úpravě spolupracovala s firmou Lavaris s.r.o., která zařízení pro úpravu (mikromletí) vyvíjí a dodává. Jak již bylo zmíněno dříve, z množství směsí vytvořených pro konkrétní variantu lepidla, zdící a omítací malty, byly na základě prvotních výsledků vybrány nejvhodnější směsi. Složení vybraných směsí bylo dále optimalizováno pro dosažení funkčních charakteristik požadovaných pro konkrétní aplikaci.

Zdící malta – směs navržená jako zdící malta pro běžné zdění je složena z 10 hm. % cementu CEM I 42,5R, 5 hm. % hydroxidu vápenatého, 60 hm. % písku frakce 0/2 mm a 25 hm. % mikromletého betonového recyklátu frakce 0/0,15 mm s měrným povrchem $400 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$ a hmotnostní poměr vody a pojiva je 1,2 až 1,4, viz Tab. 22.

Tab. 22: Složení navržené zdící malty (P).

Jednotka	Pojivo		Plnivo		Vodní součinitel (-)
	Cement	Hydroxid vápenatý	Písek (0-2 mm)	Betonová moučka	
[hm. %]	0,1	0,05	0,60	0,25	1,2 až 1,4
[obj. %]	0,1	0,10	0,48	0,31	1,2 až 1,4

Tenkovrstvá omítací malta – směs navržená jako tenkovrstvá omítací malta určená pro omítání přesných tvárnic je složena z 10 hm. % cementu CEM I 42,5R, 5 hm. % hydroxidu vápenatého, 50 hm. % písku frakce 0/1 mm a 35 hm. % mikromletého betonového recyklátu frakce 0/0,15 mm s měrným povrchem $400 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$ a hmotnostní poměr vody a cementu (vodní součinitel) je 1,5 až 1,8, složení viz Tab. 23.

Tab. 23: Složení navržené tenkovrstvé omítací malty (P).

Jednotka	Pojivo		Plnivo		Vodní součinitel (-)
	Cement	Hydroxid vápenatý	Písek (0-1 mm)	Betonová moučka	
[hm. %]	0,1	0,05	0,50	0,35	1,5 až 1,8
[obj. %]	0,1	0,10	0,39	0,41	1,5 až 1,8

Tenkovrstvé lepidlo pro lepení plynosilikátu (pórobetonu) – směs navržená jako tenkovrstvé lepidlo pro lepení plynosilikátu je složeno z 20 hm. % cementu CEM I 42,5R, 40 hm. % písku frakce 0/1 mm a 40 hm. % mikromletého betonového recyklátu frakce 0/0,15 mm s měrným povrchem $400 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$ a hmotnostní poměr vody a cementu je 1,5 až 1,6, složení viz Tab. 24.

Tab. 24: Složení navrženého lepidla (P).

Jednotka	Pojivo	Plnivo		Vodní součinitel (-)
	Cement	Písek (0-1 mm)	Betonová moučka	
[hm. %]	0,20	0,40	0,40	1,4 až 1,6
[obj. %]	0,19	0,32	0,48	1,4 až 1,6

Technologie výroby a zpracování maltových směsí a lepidla – Při výrobě musí být suchá směs nejprve řádně zhomogenizována. Teprve poté může být za průběžného míchání postupně přidávána voda. Homogenizace a samotné míchání může být v závislosti na množství prováděno ručně, pomocí metly a míchače nebo pomocí stavební míchačky. Homogenizace i míchání za pomoci metly a ruční míchačky musí probíhat alespoň 5 min. Nanášení navržené zdící malty je prováděno standardně zednickou lžící a dřevěným nebo plastovým hladítkem. Maximální tloušťka vrstvy zdící malty je 10 mm.

Zpracování a aplikace tenkovrstvé omítací malty: při výrobě musí být suchá směs nejprve řádně zhomogenizována. Teprve poté může být za průběžného míchání postupně přidávána voda. Homogenizace a samotné míchání může být v závislosti na množství prováděno ručně, pomocí metly a míchače nebo pomocí stavební míchačky. Homogenizace i míchání za pomoci metly a ruční míchačky musí probíhat alespoň 5 min. Nanášení tenkovrstvé omítací malty při omítání probíhá natahováním ocelovým nebo plastovým hladítkem. Omítka může sloužit jako podklad pod finální štukové omítky. Do více namáhaných míst a detailů je vhodné využít výztužnou síťku (perlinku). Tloušťka malty by neměla přesáhnout 3 mm.

Zpracování a aplikace lepidla pro lepení plynosilikátů/pórobetonů: při výrobě musí být suchá směs nejprve řádně zhomogenizována. Teprve poté může být za průběžného míchání postupně přidávána voda. Homogenizace a samotné míchání může být v závislosti na množství prováděno ručně, pomocí metly a míchače nebo pomocí stavební míchačky. Homogenizace i míchání za pomoci metly a ruční míchačky musí probíhat alespoň 5 min. Nanášení navrženého

tenkovrstvého lepidla při zdění plynosilikátových tvárnic je prováděno standardně zednickou lžící a ocelovým nebo plastovým zubatým hladítkem. Maximální tloušťka vrstvy zdící malty je 3 mm. Na vzorcích malt a lepidla ve tvaru kvádrů o rozměrech 40×40×160 mm byly následně ověřeny funkční vlastnosti směsí. Každou směs zastupovalo celkem 6 vzorků. Hlavními sledovanými parametry byly pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, dynamický modul pružnosti a dynamický smykový modul.

Shrnutí výsledků a porovnání s klasickými směsmi – jednotlivé vlastnosti navržených směsí po 28 dnech jsou souhrnně zobrazeny v Tab. 5. Navržená zdící malta, jejíž složení je uvedeno v Tab. 2, vykazuje dobré vlastnosti a může být srovnávána s běžnou vápenocementovou maltou M5. Běžná vápenocementová malta M5 má pevnost v tlaku min. 5 MPa a pevnost v tahu za ohybu min. 1,5 MPa. Běžně malta M5 obsahuje 20 % cementu a 10 % hydroxidu vápenatého, kdežto navržená zdící malta obsahuje pouze 10 % cementu a 5 % hydroxidu vápenatého. Díky tomu je cena malty nižší a navíc v případě vyvinuté zdící malty dosahují pevnosti vyšších hodnot a je v ní spotřebováván odpadní materiál.

Navržená tenkovrstvá omítací malta, vykazuje dobré vlastnosti a může být srovnávána s běžnou jádrovou omítkou zrnitosti do 1 mm. U omítacích malt nejsou obvykle sledovány pevnostní charakteristiky, není tedy možné je v tomto ohledu porovnávat. Avšak co do složení je situace podobná jako v předchozím případě, běžná jádrová omítací malta obsahuje 20 % cementu a 10 % hydroxidu vápenatého, kdežto navržená tenkovrstvá omítací malta obsahuje pouze 10 % cementu a 5 % hydroxidu vápenatého. Díky tomu je cena vyvinuté malty nižší a navíc v případě navržené malty dosahují pevnosti vyšších hodnot a je v ní spotřebováván odpadní materiál. Díky vysokému obsahu mikromletého betonu je možné dosáhnout velmi hladkých finálních povrchů (za použití ocelového hladítka), kdežto jádrové omítky slouží spíše jako podkladní vrstva pod štuk.

Navržené lepidlo (lepící malta) pro zdění plynosilikátů/porobetonů vykazuje velmi dobré vlastnosti. Při srovnání s komerčně používanými lepidly je vyvinuté lepidlo lepší jak z hlediska funkčních vlastností, tak z hlediska ceny.

Běžné lepidlo na plynosilikáty má pevnost v tlaku min. 5 MPa, kdežto vyvinuté lepidlo dosahuje pevnosti 14 MPa. Komerčně vyráběná lepidla obsahují 25 % cementu. Díky aktivitě mikromletého betonu obsahuje vyvinuté lepidlo pouze 20 %

cementu. Díky tomu je cena malty nižší, další úspora plyne z nahrazení dražšího křemičitého písku běžným pískem a mikromletou moučkou. Díky vysoké pevnosti v tlaku je možné využívat vyvinuté lepidlo i na tenkovrstvé lepení keramických tvárnic. Navíc žádná z vyvinutých malt neobsahuje chemické přísady jako u komerčně dodávaných malt a opět je dosaženo finanční úspory při výrobě směsi.

Tab. 25: Souhrnné výsledky vlastností navržených malt a lepidla (28 dní).

Charakteristika	Zdící malta	Tenkovrstvá omítací malta	Lepidlo
Objemová hmotnost [kg/m ³]	1720	1730	1740
Pevnost v tlaku [MPa]	8,3	7,1	14,1
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	2,0	1,8	3,5
Dynamický modul pružnosti [GPa]	8,9	8,1	11,2
Dynamický smykový modul [GPa]	3,8	3,4	4,7

V rámci výzkumu se podařilo vyvinout zdící maltu pro běžné zdění, tenkovrstvou omítací maltu a lepidlo se srovnatelnými nebo lepšími vlastnostmi, než mají běžné směsi. Díky použití mikromletého betonového recyklátu navíc dochází k úspoře pojiv, což vede ke snížení ceny směsi. Navíc je zpracováván odpadní materiál (beton) a je tím šetřeno životní prostředí i přírodní zdroje. Jako nejperspektivnější z hlediska použití, množství obsaženého mechanicky aktivovaného jemně mletého betonového recyklátu, jeho mechanických vlastností a konkurenceschopnosti bylo na navržené lepidlo se 40 % obsahem jemně mletého betonového recyklátu zpracována průmyslová ochrana ve formě užitého vzoru.

Shrnutí výstupů

Na základě výše uvedených poznatků a dalších výsledků ze souběžného experimentálního výzkumu (především v oblasti kombinace cementového a vápenného pojiva) v oblasti využití mikromletých stavebních odpadů bylo v druhé

polovině roku 2016 podáno pět národních užitných vzorů roku. Uvedené užitné vzory obsahují podstatnou část (ve variabilních provedeních hmotnostních podílů použitých složek) mikromletý betonový recyklát:

- Tenkovrstvá cementová malta, Czech Republic. Utility Model. CZ 29872 (2016).
- Plná betonová tvarovka, Czech Republic. Utility Model. CZ 29873 (2016).
- Běžná cementová zdící malta, Czech Republic. Utility Model. CZ 29828. (2016).
- Vápenocementová malta, Czech Republic. Utility Model. CZ 29827 (2016).
- Tenkovrstvá vápenocementová malta, Czech Republic. Utility Model. CZ 29826 (2016).

Další skupina pěti užitných vzorů obsahuje podstatnou část (ve variabilních provedeních hmotnostních podílů použitých složek) mikromleté kamenné moučky:

- Vápenocementová malta. Czech Republic. Utility Model. CZ 29870 (2016).
- Tenkovrstvá cementová malta. Czech Republic. Utility Model. CZ 29854 (2016).
- Tenkovrstvá vápenocementová malta, Czech Republic. Utility Model. CZ 29855 (2016).
- Tvarovka pro výplňové zdivo. Czech Republic. Utility Model. CZ 29871 (2016).
- Běžná cementová zdící malta. Czech Republic. Utility Model. CZ 29853 (2016).

Z názvů prezentovaných užitných vzorů, resp. jejich obsahu, je patrné, že se jedná o soubor komponentů/prvků pro stavební systém na dvou různých bázích (vápencové a betonové) s potenciálem využití v oblasti pozemního stavebnictví, konkrétně v bytové nebo průmyslové výstavbě (viz Obr. 61).

Díličí poznatky z této práce byly dále využity při návrhu modifikovaného silničního pojiva, které je možno využívat na povrchy pozemních komunikací:

- Silniční pojivo, Czech Republic. Utility Model. CZ 29910 (2016).



Obr. 61: Schematický obrázek s komponenty stavebního systému a příkladovým variantrním provedením jednotlivých součástí.

5.4 Další možnosti využití získaných dat

Ve spolupráci s firmou Lavaris je snahou vyvinout modulovou stacionární linku, která by byla upravována dle specifik pro jednotlivá variantní řešení (Obr. 62). Základní jednotkou je mlýn, který je schopný rozemlít 250 kg až 7 tun odpadu za hodinu. Podle modelu mlýnu, resp. jeho výkonu, je pak konstruována i celá navazující linka. Jak již bylo několikrát zmíněno v předcházejících částech, problematika recyklace je jednoznačně spojena i s dopravou původní a upravené suroviny. Uvedený problém je možno řešit pomocí mobilních recyklačních linek, které je možno uložit i do přepravního kontejneru. Modulární sestava kontejnerů potom může být přesunována podle aktuálního těžebního plánu a po zpracování odpadu může být přesunuta do jiné lokality (Obr. 63).



Obr. 62: Příklad stacionární varianty recyklační linky (Lavaris 2016).



Obr. 63: Příklad mobilní varianty recyklační linky (Lavaris 2016).

S efektivním využitím recyklovaného materiálu souvisí i možnost spojit recyklační linku s výrobní linkou, která by upravený odpad přímo zpracovávala. Na

Obr. 64 je uvedený příklad kombinované recyklační a výrobní linky. V druhé sekci zpředu je umístěný vysokorychlostní mlýn a sila na ukládání upraveného materiálu. V přední sekci je výrobní linka na výrobu lehčených bloků na bázi mikromletých recyklovaných odprašků. Součástí této sekce by byl automatický generátor pěny a čerstvá směs pěny a dalších složek je homogenizována a následně plněna do připravených forem. Všechny součásti linky jsou navrženy a propojeny tak, aby se eliminoval hluk a prach z výroby. V zadní části linky se nacházejí části linky na hrubé drcení a třídění odpadu podle frakcí.



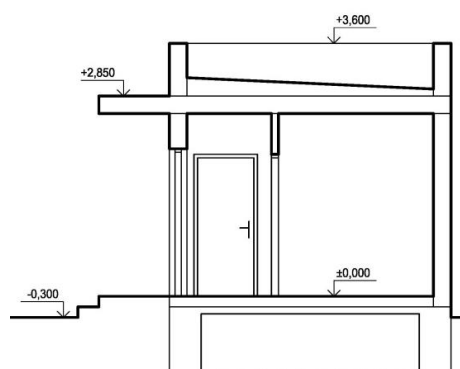
Obr. 64: Příklad sestavy výrobní linky na zpracování kamenných odprašků (Lavaris 2016).

5.5 Specifikace materiálů pro vzorový objekt

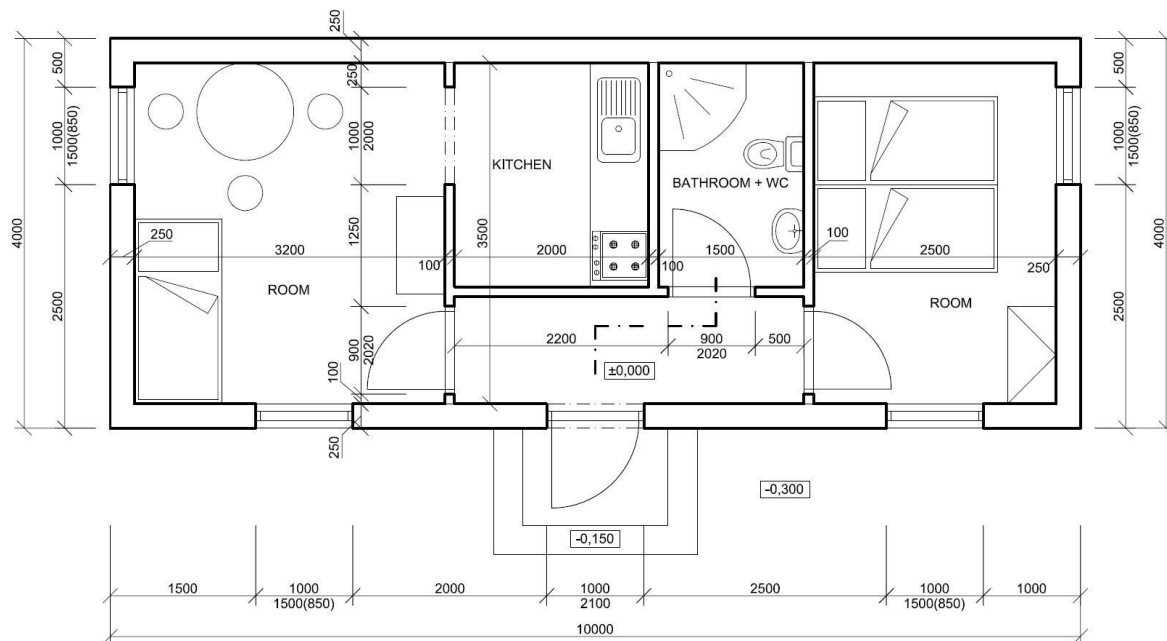
V rámci studentských projektů (Hlubocký 2016, Hrůza 2016) byl navržen nízkonákladový jednopodlažní dům pro oblast Blízkého východu (Obr. 65), variantně s úpravami (vnější zateplení, sedlová střecha atd.) by mohl být použit i v ČR, příčný řez je na Obr. 65 – vlevo a půdorys na Obr. 66. Na Obr. 67 je pohled (axonometrie) vzorového objektu a Obr. 68 je pohled kombinovaný s řezem se schematickým znázorněním nosných konstrukcí. Všechny nosné i nenosné konstrukce hrubé stavby mohou být vytvořeny z materiálů na bázi mikromletých recyklovaných surovin.

Svislé nosné a nenosné stěny mohou být vyrobeny z plných nebo lehčených bloků nebo cihel. V případě nosných stěn by konstrukce bloků mohla být tvořena kombinací nosného jádra a vylehčené vnitřní části tvárnic, tloušťka bloků pro obvodové zdivo by se lišila v závislosti na materiálových parametrech použitého materiálu nebo materiálů. Spojování nosných i nenosných prvků stěn by bylo prováděno lepidly s vysokým podílem recyklovaných mikromletých surovin, obdobně by tomu bylo i v případě vnitřních a vnějších omítek, resp. omítkových systémů.

Konstrukce základů (pasy a deska) a podlahy by byly navrženy na bázi materiálů s vysokým podílem mikromletých recyklovaných materiálů. Stropní konstrukce by byla tvořena vylehčenými dutinovými tvarovkami, mezi kterými by byla umístěna betonářská výztuž, konstrukce stropu by byla ztužena zmonolitněním, obdobně i konzola nad vchodem. Vodorovné prvky nad otvory ve svislých konstrukcích a konzola by byly vyztuženy pomocí ocelářské výztuže. Omítky by byly navrženy také s vysokým obsahem mikromletého recyklátu.



Obr. 65: Objekt z Blízkého Východu – vlevo (<http://www.maecannon.com>), příčný řez vzorovým objektem – vpravo (Hrůza 2016).



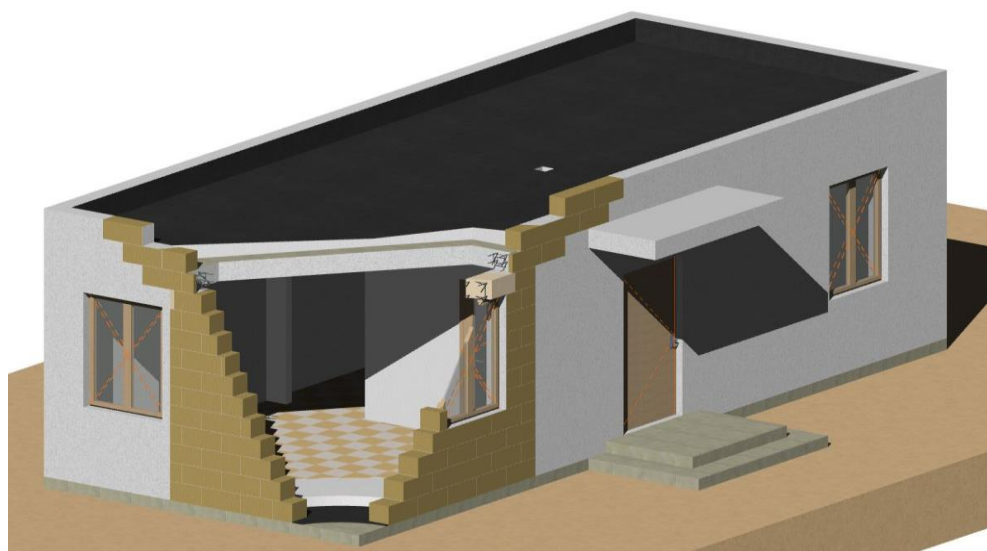
Obr. 66: Půdorys vzorového objektu (Hrůza 2016).



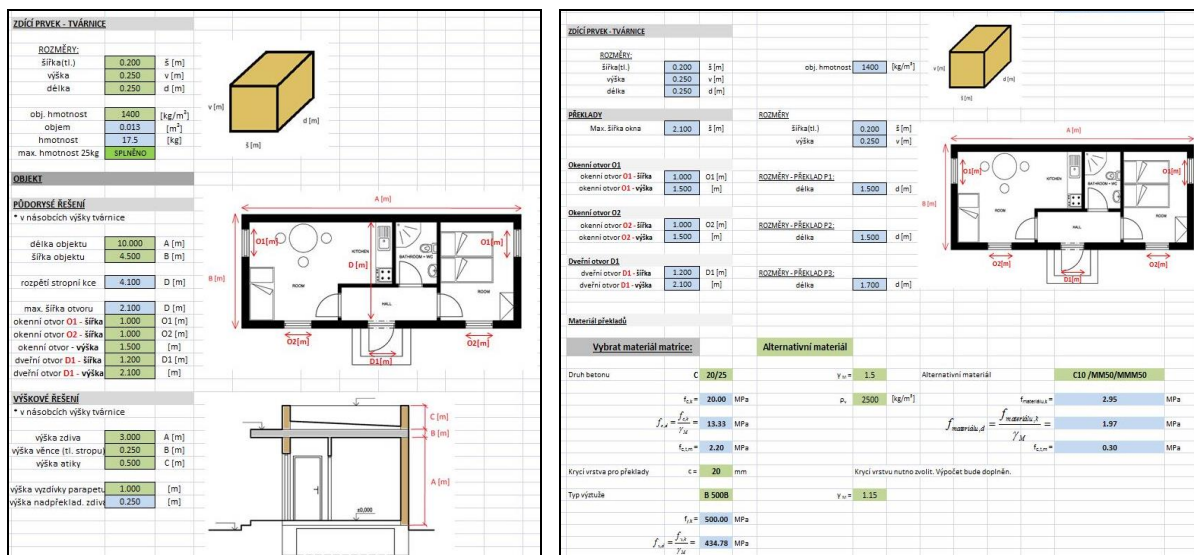
Obr. 67: Pohled na vzorový objekt (Hlubocký 2016).

Za účelem optimalizace návrhu vodorovných prvků a svislých konstrukcí byl studenty v SW Excel navržený zjednodušený statický výpočet. V rámci výpočtu je možno měnit základní rozměry vzorového objektu, včetně rozměrů otvorů (Obr. 69). Po zadání rozměrů vzorového objektu je pomocí SW stanovena minimální hodnota pevnosti v tlaku pro nejvíce zatížený prvek, kterým je v první řadě nad základovou konstrukcí. Rozměry bloků obvodového pláště jsou omezeny z pohledu manipulovatelnosti a nesmí překročit hmotnost 25 kg. V navazujícím experimentálním výzkumu by měl být tento SW aktualizován a doplněn tak, aby bylo možno vypočítat objemy materiálů potřebných pro stavbu objektu. Na základě

takovýchto dat by měla být možnost vytvořit finanční kalkulaci, pomocí které bude možné optimalizovat návrh jednotlivých prvků. Databáze materiálových vlastností bude postupně doplňována o naměřená data.



Obr. 68: Pohled na vzorový objekt se schematickým tvárněním konstrukce podlah, stěn a střechy (Hlubocký 2016).



Obr. 69: Náhledy na zjednodušený statický výpočet (Hrůza 2016, Hlubocký 2016).

6. Závěr

Na základě prezentovaných výsledků je patrné, že mikromleté materiály na bázi betonu a vápencového kalu mají velký potenciál na uplatnění pozemním stavitelství, především v oblasti systému obvodových plášťů. Systém obvodového pláště může být tvořen materiály, které obsahují významné množství mikromletých materiálů. Vlastní systém by byl tvořen plnými nebo vylehčenými tvarovkami/bloky, lepidly nebo maltami a omítkovými systémy. Výhodou tohoto řešení je kompatibilita jednotlivých prvků, které mají stejný materiálový základ a tudíž i podobné materiálové vlastnosti. K další výhodě patří i snížení nebo úplné nahrazení písku v těchto systémech. Dílčí klíčové závěry z pohledu využití mikromletých recyklovaných materiálů jako náhrady za cement nebo písek lze shrnout v následujících bodech:

- Množství náhrady mikromleté vápencové moučky nebo betonu v cementové maltě ovlivňuje zpracovatelnost, resp. rozlivy, čerstvé směsi. Množství použité vody, resp. hodnota vodního součinitele, ovlivňuje výsledné hodnoty objemové hmotnosti a celkové pórovitosti, která ovlivňuje výsledně mechanické vlastnosti.
- Směsi s mikromletou vápencovou moučkou dosahují vyšších hodnot mechanických vlastností (pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu a dynamický modul pružnosti) než původní směsi s původní vápencovou moučkou.
- Mikromletá vápencová a betonová moučka může být použita ve směsích jako částečná nebo úplná náhrada přírodního písku nebo drceného kameniva.
- Náhrada do 34 hm. % cementu mikromletou betonovou moučkou neovlivní hodnoty pevností v tlaku. Při vyšších hodnotách náhrady cementu, okolo 50 hm. %, již dochází k poklesu hodnot pevností v tlaku. Z dlouhodobého hlediska hodnoty pevností v tlaku mírně klesají (roční hodnoty), ale nejedná se o zásadní pokles.
- Dynamické moduly pružnosti klesají s množstvím použité mikromleté betonové nebo vápencové moučky.

Z pohledu modifikace vlhkostních vlastností a ochrání mechanických vlastností cementových materiálů s přidavkem mikromleté vápencové a betonové moučky pomocí objemové aplikace polymeru PVA a objemové a povrchové aplikace hydrofobizační přísady na bázi nanočástic, je možno z prezentovaných výsledků konstatovat, že:

- Modifikace cementové pasty s přídavkem mikromleté betonové moučky pomocí polymeru PVA ovlivňuje rozlivové vlastnosti čerstvé směsi, hodnoty pevností v tlaku přídavek PVA snižuje a klesají s množstvím použitého PVA, naopak dochází k nárůstu hodnot pevností v tahu za ohybu.
- Z výsledků na cementových pastách modifikovaných PVA lze očekávat stejný vliv na vlhkostní vlastnosti spojené se zabráněním pronikání kapalné vody do vzorků a k následnému zhoršení mechanických vlastností. Pozitivní vliv PVA lze očekávat i při stanovení mrazuvzdornosti.
- Hydrofobizační přísada na bázi nanočástic modifikuje vlhkostní vlastnosti lépe při povrchové aplikaci, než při aplikaci v objemu. Snímky jasně dokumentují rozdílné chování povrchu stejné omítky při ošetření a neošetření touto přísadou. Otázkou je trvanlivost v čase, po roční aplikaci na omítce na experimentální stěně, se její vlastnosti nezměnily.

Z pohledu vylehčení cementové pasty a jemnozrnné cementové malty pomocí pěn je možno konstatovat z pohledu provedených experimentů následující:

- Cementovou pastu i cementovou maltu s přídavkem mikromleté vápencové moučky je možno vylehčit pomocí pěny vytvořené rozmícháním pěnotvorné přísady ve vodě. Množstvím (objemem) pěny je možno ovlivnit objemovou hmotnost, resp. celkovou pórovitost.
- Změna objemové hmotnosti má vliv na mechanické vlastnosti – pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu a modul pružnosti. Obecně platí, že s klesající objemovou hmotností se zhoršují mechanické vlastnosti.
- Tepelné, resp. tepelně-technické, parametry se s klesající hodnotou objemové hmotnosti zlepšují.
- Pro testovaný systém se jako zásadní nejeví původ pěny, ale její vlastnosti (jako vysoká stabilita a nízká odlučivost).

Navržený stavební systém na bázi cementových a vápenocementových materiálů s využitím mikromletých recyklovaných materiálů je možno hodnotit následovně:

- Za použití technologicky nenáročných procesů a využití mikromletých recyklovaných materiálů je možno vytvořit stavební systém s nosnými i nenosnými prvky svislých konstrukcí (plné nebo vylehčené bloky a cihly), vodorovných konstrukcí (podlahy, stropy, překlady) a povrchových úprav (omítky).

- Při použití jednoho zdroje recyklované suroviny je zajištěna velká kompatibilita jednotlivých komponentů celého systému (stejně nebo velmi podobné hodnoty vlhkostní a tepelné roztažnosti).
- Na druhou stranu je možno pomocí základních modifikací (poměry složek, vodní součinitel, PVA nebo pěna) měnit materiálové vlastnosti v určitých rozmezích (rozsazích), to platí pro mechanické vlastnosti, tepelné a vlhkostní vlastnosti.

Z pohledu dalšího navazujícího systému se pokusit o:

- Poloprovozně výrobu lehčených zdících prvků nastavit, optimalizovat a ověřit, včetně realizace vhodného prototypu zjednodušené výrobní linky.
- Pro zlepšení užitných vlastností betonové pěněné směsi dále optimalizovat využitím vhodných nanotechnologických řešení, které zajistí 2D nebo 3D hydrofobizaci lehčených zdících prvků.
- Z hlediska zvyšování pevnostních a deformačních charakteristik identifikovat a ověřit alespoň jeden typ vhodných vláken, které bude možné do výrobku lehčených zdících prvků přidat, přičemž tato vlákna by prioritně měla být též původem ze zpracování odpadů či vedlejších produktů.
- Výsledné produkty technicky specifikovat a ověřit způsobem, aby byly uplatnitelné nejen v ČR, ale zejména měly exportní potenciál do méně rozvinutých regionů, jako je Severní Afrika (Egypt) a zemí Blízkého Východu (Jordánsko, Palestina, Saudská Arábie, Kuvajt apod.).

Literatura

Abd, A. M., Abd, S.M. (2017): Modelling the strength of lightweight foamed concrete using support vector machine (SVM). Case studies in Constructional Materilas (3) 8-15.

Ahmari, S. et al. (2012): Production of geopolymeric binder from blended waste concrete powder and fly ash, Construction and Building Materials 35, 718-729.

Ařtcin, P.C. (2005): Vysokohodnotný beton. Informační centrum ČKAIT, Praha, červen 2005.

Agrela, F. et al. (2011): Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete. Construction and Building Materials 25, 3950-3955.

Allahverdi, A. et al. (2010). Effect of polyvinyl alcohol on flexural strength and some important physical properties of Portland cement paste, Iranian Journal of Materials Science and Engineering 7(1) 1-6.

Aliabdo, A.A. et al. (2014): Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. Construction and Building Materials 50, 28-41.

Amran M.Y.H. et al. (2015): Properties and applications of foamed concrete; a review, Construction and Building Materials 101 (1), 990-1005.

Andre, A. (2014): Durability performance of concrete incorporating coarse aggregates from marble industry waste, Journal of cleaner production 65, 389-396.

Beltrán M.G. et al. (2013): Effect of cement addition on the properties of recycled concretes to reach control concretes strengths, Journal of Cleaner Production 79, 124-133.

Birzeit University (2016): Podklady z analýzy vápencové moučky poskytnuté firmě Lavaris, s.r.o.

Bonaveti, V. et al. (2003): Lime-stone filler cement in low w/c concrete: A rational use of energy, Cement and Concrete Re-search, 33(6), 865-871.

Çakır, Ö. (2014): Experimental analysis of properties of recycled coarse aggregate (RCA) concrete with mineral additives, *Construction and Building Materials* 68, 17-25.

Cartuxo, F. et al. (2015): Rheological behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates – Influence of the superplasticizer, *Construction and Building Materials* 89, 36-47.

Cemex (2017), Varianty pěnobetonu POROFLOW, POROFLOW F Litý izolační pěnobeton (cementová pěna) Dostupné z: <<http://www.cemex.cz/varianty-penobetonu-poroflow.aspx>> [cit. 2017-03-19].

ČSN EN 12620+A1 (2008): Kamenivo do betonu, ČNI, 51 s.

ČSN EN 206 (732403) (2014): Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda, ČNI, 88 s.

Demirel, B. (2010): The effect of the using waste marble dust as fine sand on the mechanical properties of the concrete. *International Journal of the Physical Sciences*, 5(9), 1372-1380.

De Schepper, M. et al. (2013): The regeneration of cement out of Completely Recyclable Concrete: Clinker production evaluation, *Construction and Building Materials* 38, 1001-1009.

De Schepper, M. et al. (2014): The hydration of cement regenerated from Completely Recyclable Concrete, *Construction and Building Materials* 60, 33-41.

De Schepper, M. et al. (2017): Sulfates in Completely Recyclable Concrete and the effect of CaSO₄ on the clinker mineralogy, *Construction and Building Materials* 137, 300-306.

Domingo-Cabo, A. et al. (2009), Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials* 23, 2545-2553.

Ergün, A. (2011): 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.

Egyptian Environmental Affairs Agency (EEAA), 2014: Country report on the solid waste management in EGYPT. SWEEPNET.

Eurostat. Waste statistics in Europe (2015). dostupné z: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>, [cit. 08-2015].

Florea M.V.A. et al. (2014), Activation of liberated concrete fines and their application in mortars, *Construction and Building Materials* 50, 1-12.

Gayarre, F.L. et al. (2014): The effect of curing conditions on the compressive strength of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials* 53, 260-266.

Hamza, R.A. et al. (2011): Marble and Granite Waste: Characterization and Utilization in Concrete Bricks. *International Journal of Bioscience, Biochemistry and Bio-informatics*, 1(4), 286-291

Hebel (2017): Produkty, Tvárnice Hebel P2-450, Dostupné z <<https://www.hebel.cz/tvarnice-hebel-p2-450.php>>, [cit. 2017-05-21].

Hilal, A.A. et al. (2015a): On entrained pore size distribution of foamed concrete, *Construction and Building Materials* 75, 227-233.

Hilal, A.A. et al. (2015b): On void structure and strength of foamed concrete made without/with additives, *Construction and Building Materials* 85, 157-164.

Hwang S.D. et al. (2008): A study on engineering characteristics of asphalt concrete using filler with recycled waste lime, *Waste Manage* 28, 191-199.

Chen. M., Liu, J. (2008): Experimental application of mineral admixtures in lightweight concrete with high strength and workability, *Constructional and Building Materials* 22, 1108-1113.

Chen. M. et al. (2011): Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture, *Construction and Building Materials* 25, 3909–3914.

Chen, B. et al. (2011): Experimental research on properties of high-strength foamed concrete, *Mater. Civ. Eng.* 24 (1), 113-118.

Florea M.V.A et al. (2014), Activation of liberated concrete fines and their application in mortars, *Construction and Building Materials* 50, 1-12.

Gastaldi, D. et al. (2015): An investigation on the recycling of hydrated cement from concrete demolition waste, *Cement & Concrete Composites* 61, 29-35.

Gayarre, F.L. et al. (2014): The effect of curing conditions on the compressive strength of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials* 53, 260-266.

Ibrahim, M.S. et al. (2011): Health Risk Assessment of Marble Dust at Marble Workshops, *Nature and Science*, 9(11), 144-154.

Jenni A. et al. (2005): Influence of polymers on microstructure and adhesive strength of cementitious tile adhesive mortars, *Cement and Concrete Research* 35(1), 35-50.

Jiang, J. et al. (2016): Study on the preparation and properties of high-porosity foamed concretes based on ordinary Portland cement, *Materials & Design* 92, 949-959.

Jiménez, R.J et al. (2012), Utilisation of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural roads. *Resources, Conservation and Recycling* 58, 88-97.

Jones, M.R., McCarthy, A. (2004): Utilising unprocessed low-lime coal fly ash in foamed concrete, *Fucl* 84, 1398-1409.

Jones, M.R., McCarthy, A. (2005): Behaviour and assessment of foamed concrete for construction applications. In: *Proceedings of the International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction*. 2005, pp. 61-88.

Kearsley, E.P., Visagie, M. (1999): Micro-properties of foamed concrete. In: *Proceedings of international conference on specialist techniques and materials for construction*, Thomas Telford, London, pp. 173-184.

Kearsley, E.P., Wainwright, P.J. (2001): The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete, *Cement and Concrete research* 31, 105-112.

Kearsley, E.P. and P.J. Wainwright (2002): The effect of porosity on the strength of foamed concrete. *Cement and Concrete Research* 32(2), 233-239.

Kearsley, E.P. (2006): The use of foamcrete for affordable development in third world countries, *Concrete in the Service of Mankind: Appropriate Concrete Technology* 3, 232-242.

Kuzielová, E. et al. (2016): Effect of activated foaming agent on the foam concrete properties, *Construction and Building Materials* 125, 998-1004.

Kwon, E. et al. (2015): A study on development of recycled cement made from waste cementitious powder, *Construction and Building Materials* 83, 174-180.

Kim, J.H., Robertson, R.E. (1998). Effects of Polyvinyl Alcohol on Aggregate-Paste Bond Strength and the Interfacial Transition Zone, *Advanced Cement Based Materials* 8(2), 66-76.

Kim, J.H. et al. (1999): Structure and properties of poly(vinyl alcohol) – modified mortar and concrete, *Cement and Concrete Research* 29 (3), 407-415.

Kim Y.J. et al. (2012), Utilization of waste concrete powder as a substitution material for cement, *Construction and Building Materials* 30, 500-504.

Knapen, E., Gemert, D. V. (2009a): Effect of underwater storage on bridge formation by water-soluble polymers in cement mortars, *Construction and Building Materials* 23, 3420-3425.

Knapen, E., Gemert, D.V. (2009b) Cement hydration and microstructure formation in the presence of watersoluble polymers, *Cement and Concrete Research* 39, 6-13.

Kockal, N.U. (2015): Behavior of mortars produced with construction wastes exposed to different treatments, *Indian journal of engineering and materials sciences* 22(2), 203-214.

Kotecký, V. (2000): Potenciál alternative k těžbě stavebního kamene, štěrkopísku a vápenců v České republice, Hnutí DUHA, ISBN 80-902056-9-0.

Kou, S.C., Poon, Ch.S. et al. (2010): Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled, *Cement & Concrete Composites* 32, 649-654.

Kou S.C. et al. (2013), Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash, *Cement & Concrete Composites* 37, 12-19.

Li, J. et al. (2009), Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials* 23, 1287-1291.

Liu Q. et al., Investigation of using hybrid recycled powder from demolished concrete solids and clay bricks as a pozzolanic supplement for cement, *Construction and Building Materials* 73 (2014), 754-763.

Lidmila, M., Šeps, K. (2013): Použití směsí s recyklovaným betonem jako stabilizované vrstvy. In: *Konference Nanomateriály a nanotechnologie ve stavebnictví 2013*, Praha ČVUT v Praze, pp. 103-107.

Ledererová, J., Leber, P. (2008): Využití průmyslových odpadních materiálů při výrobě stavebních hmot, *Stavebnictví*, 8(04), 15-20.

Liu, Q et al. (2014), Investigation of using hybrid recycled powder from demolished concrete solids and clay bricks as a pozzolanic supplement for cement, *Construction and Building Materials* 73, 754-763.

Liu M.Y. et al. (2014) Evaluation of thermal conductivity, mechanical and transport properties of lightweight aggregate foamed geopolymer concrete, *Energy and Buildings* 72, 238-245.

Lee, Ch.H. et al. (2012), Evaluation of pre-coated recycled concrete aggregate for hot mix asphalt. *Construction and Building Materials* 28 (2012), 66–71.

Lidmila, M. et al. (2014), Utilization of Recycled Fine-ground Concrete from Railway Sleepers for Production of Cement-Based Binder, *Applied Mechanics and Materials* 486 (2014), 323–326.

Ma, C., Chen, B. (2016): Properties of foamed concrete containing water repellents, *Construction and Building Materials* 123, 106-114.

Ma, C., Chen, B. (2017): Experimental study on the preparation and properties of a novel foamed concrete based on magnesium phosphate cement, *Construction and Building Materials* 123, 160-168.

Marinković, S: et al. (2010), Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete, *Waste Management* 30, 2255-2264.

Mashaly, A.O. et al. (2012): Characterization of the Marble Sludge of the Shaq El Thoaban Industrial Zone, Egypt and Its Compatibility for Various Recycling Applications. 6(3), 153-161.

Martínez, I. et al. (2013): A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars, *Construction and Building Materials* 49, 384-392.

Matar, P. et al. (2012): Using recycled concrete aggregates in precast concrete hollow blocks, *Mat.-wiss. u.Werkstofftech* 43 (5), 388-391.

Morlat, R. et al. (2007): Reinforcement of hydrated portland cement with high molecular mass water-soluble polymers, *Journal of materials science* 42, 4858-4869.

Nansone, E. et al. (2017): Durability Properties of High Performance Foamed Concrete, *Procedia Engineering* 172, 760-767.

Narayanan, S.J., Ramamurthy, K. (2012) Identification of set-accelerator for enhancing the productivity of foam concrete block manufacture, *Construction and Building Materials* 37, 144-152.

Nguyen, T.T. et al. (2017): Experimental and numerical investigation of influence of air-voids on the compressive behaviour of foamed concrete. *Materials & Design*, In Press, Accepted Manuscript.

Omar, O.M. et al. (2012): Influence of limestone waste as partial replacement material for sand and marble powder in concrete properties. *HBRC Journal*, 8(3), 193-203.

Pan, Z., et al. (2014): Preparation and characterization of super low density foamed concrete from Portland cement and admixtures, *Constr. Build. Mater.* 72, 256-261.

Panesar, D.K. (2013): Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents, *Construction and Building Materials* 44, 575-584.

Pasandín, A.R et al. (2015), Overview of bituminous mixtures made with recycled concrete aggregates, *Construction and Building Materials* 74, 151-161.

Pavlu, T. et al. (2014): Influence of recycled aggregate quality on the mechanical properties of concrete, *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina* 16(4), 35-40.

Pavlů, T., Štefflů, M. (2014a): Experimental determination and estimation of water absorption capacity of hardened concrete with recycled aggregate. In: EAN 2014 - 52nd International Conference on Experimental Stress Analysis, pp. 117-212.

Pavlů, T., Štefflů, M. (2014b): The static and the dynamic modulus of elasticity of recycled aggregate concrete, Advanced Materials Research 1054, 221-226

Pavlů, T., Štefflů, M. (2015): Study of the strength development of the fine-aggregate concrete with recycled cement powder. In: EAN 2015 - 53rd Conference on Experimental Stress Analysis, pp. 275-278.

Pavlů, T., Štefflová, M. (2015): Study of the Freeze-Thaw resistance of the fine-aggregate concrete. In: EAN 2016 - 54th International Conference on Experimental Stress Analysis, pp. 230-233.

Pepe, M. et al. (2014): Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete, Construction and Building Materials 69, 124-132.

Pereira, P. et al. (2012): The effect of superplasticizers on the mechanical performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates, Cement & Concrete Composites 34, 1044-1052.

Petit, J.Y. et al. (2010). Effect of limestone filler content and superplasticizer dosage on rheological parameters of highly flowable mortar under light pressure conditions, Cement and Concrete Research 40(2), 235-241.

Pique, T.M., Vazquez, A. (2013): Control of hydration rate of polymer modified cements by the addition of organically modified montmorillonites, Cement and concrete composites 37, 54-60.

Poon, C.S. et al. (2004): Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates, Construction and Building Materials 18(6), 461-468.

Porfix (2017): Kompletní katalog produktů, Pískový Porfix, TVÁRNICE PORFIX PREMIUM P2 – 400. Dostupné z: < https://www.porfix.cz/produkty/tvarnice-porfix-p4-580_3/>, [cit. 2017-05-21].

Poznyak, O., Melnyk A. (2014): Non-autoclaved aerated concrete made of modified binding composition containing supplementary cementitious materials, *Budownictwo i Architektura* 13(2), 127-134.

Ramamurthy, K. et al. (2009): A classification of studies on properties of foam concrete, *Cement and Concrete Composites*, 31(6), 388-396.

Rana, A. et al. (2017): Recycling of dimension limestone industry waste in concrete, *International journal of mining reclamation and environment* 31 (4), 231-250.

Reis, J.M.L., Jurumenha, M.A.G., (2013): Investigation on the effects of polymer impregnated aggregate on polymer mortars properties, *Materials and Structures* 46, 1383-1388.

Rodrigues, F. et al. (2013): Physical-chemical and mineralogical characterization of fine aggregates from construction and demolition waste recycling plants, *Journal of Cleaner Production* 52, 438-445

Santos, R.S. et al. (1999): Macro-defect free cements influence of poly(vinyl alcohol), cement type, and silica fume, *Cement and Concrete Research* 29 (5), 747-751.

Shelke, V.M. (2012): Effect of marble powder with and without silica fume on mechanical properties of concrete, *Journal of Mechanical and Civil Engineering* 1(1) 40-45.

Shoon, J. et al. (2012): Waste fibrecement: An interesting alternative raw material for a sustainable Portland clinker production, *Construction and Building Materials* 36, 391-403.

Shoon, J. et al. (2015): Fines extracted from recycled concrete as alternative raw material for Portland cement clinker production, *Cement & Concrete Composites* 58, 70-80.

Shui, Z. et al. (2011): Activation of fly ash with dehydrated cement paste, *Aci Materials Journal* 108, 108-112.

Singh, N.B., Rai, S. (2001): Effect of polyvinyl alcohol on the hydration of cement with rice husk ash. *Cement and concrete research* 31, 239-243.

Singh, N.K. et al. (2003): Effects of hydroxyethyl cellulose and oxalic acid on the properties of cement, *Cement and Concrete Research* 33 (9), 1319-1329.

Silva R.V. et al. (2014): Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production, *Construction and Building Materials* 65, 201-217.

Soares, D. et al. (2014): Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance, *Construction and Building Materials* 71, 263-272.

Směrnice Evropského Parlamentu a rady (2008): (ES) č. 98/2008 ze dne 19. listopadu 2008 o odpadech a o zrušení některých směrnic. Evropská unie.

Stibůrek, M.: (2008), Možnosti využití stavebních odpadů. *Beton TKS* 2/2008, 45-47.

Štefflová, P. et al. (2014): Thermal properties of concrete with recycled aggregate, *Advanced Materials Research* 1054, 227-233.

Štefflová, M., Pavlů, T. (2015): Influence of partial replacement of fine natural aggregate by fine recycled aggregate on properties of fine-aggregate concrete. In: *EAN 2015 - 53rd Conference on Experimental Stress Analysis*, pp. 275-278

Štefflová, M., Pavlů, T. (2015): The mechanical properties of fine recycled aggregate concrete after Freeze – Thaw cycles. In: *EAN 2016 - 54th International Conference on Experimental Stress Analysis*, pp. 220-223.

Tekin I. et al. (2017): Concretes with synthetic aggregates for sustainability, *Construction and building materials* 133, 425-432.

Thong, C.C. et al. (2015): Application of polyvinyl alcohol in cement-based composite materials: A review of its engineering properties and microstructure behavior, *Construction and Building Materials* 107, 172-180.

Tian T. et al. (2016) Utilization of original phosphogypsum for the preparation of foam concrete, *Construction and Building Materials* 115, 143-152.

Vavruška, O. (2002): Současnost a perspektiva těžby a úpravy nerudných surovin II, *VŠB - Technická univerzita Ostrava*, 354 p.

Valcuente, M. et al. (2012): Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the shrinkage of self-compacting concrete, *Cement and Concrete Research*, 42(4), 583-592.

Viswanath, P., Thachil, E.T. (2008): Properties of polyvinyl alcohol cement pastes, *Materials and Structures* 41, 123-130.

Wang, S.X., Li, V.C. (2006): Polyvinyl alcohol fiber reinforced engineered cementitious composites: materials design and performances, *Int'l RILEM Work, HPFRCC Struct. Appl., RILEM SARL*, 2006, pp. 65-73.

Wee, T.H., et al. (2006), Air-void system of foamed concrete and its effect on mechanical properties. *ACI materials journal* 103(1), 45-52.

Yahia, A. et al. (2005): Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio, *Cement and Concrete Research*, 35(3), 532-539.

Yongjia, H.E. et al. (2011): Effect of water soluble PVA on the microstructure characteristics of C-S-H formed in $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ solution system, *Journal of Wuhan University of technology – Mater. Sci. Ed.* 26 (3), 552555.

Ytong (2017a): Obvodové stěny přehled sortimentu. Dostupné z: <<https://www.ytong.cz/prehled-sortimentu-obvodove-steny.php>>, [cit. 2017-05-21].

Ytong (2017b): Multipor tepelněizolační deska. Dostupné z: <<http://www.ytong.cz/tepelnizolacni-desky-ytong-multipor.php>>, [cit. 2017-05-21].

Zhihui, Z. et al. (2013): Evaluation of pre-coated recycled aggregate for concrete and mortar, *Construction and Building Materials* 43, 191-196.

Vlastní literatura

Hlubocký, L. (2016): Návrh, posouzení a měření prvků pro stavbu nízkonákladového RD za použití materiálu z recyklátu, Projekt k předmětu P02C, 17 s. + příloha v SW Excel, vedoucí projektu Ing. Pavel Tesárek, Ph.D.

Hrůza, J. (2016): Návrh objektu pro bydlení z bloků s recyklovaným betonem, Projekt k předmětu P02C, 12 s. + příloha v SW Excel, vedoucí projektu Ing. Pavel Tesárek, Ph.D.

Jaukl, M. (2017) Vliv PVA na vlastnosti cementového kompozitu s recyklovaným betonem, Diplomová práce Fakulta stavební ČVUT v Praze, 90 s. Vedoucí práce Ing. Pavel Tesárek, Ph.D., oponent práce Ing. Tomáš Plachý, Ph.D.

Karra'a, G., Valentin, J., Tesárek, P., Prošek, Z. (2016): Lehčené zdící materiály na bázi mikromletých minerálních vedlejších produktů s řízenými užitnými vlastnostmi, přihláška k projektu MPO Trio (2. výzva).

Lidmila, M.; Tesárek, P.; Plachý, T.; Rácová, Z.; Padevět, P.; Nežerka, V.; Zobal, O. (2014a): Utilization of Recycled Fine-ground Concrete from Railway Sleepers for Production of Cement-based Binder. In: Applied Mechanics and Materials. Uetikon-Zurich: Trans Tech Publications, pp. 323-326.

Lidmila, M., Topič, J., Plachý, T., Prošek, Z., Nežerka, V., Tesárek, P. (2014b): Mechanical Properties of Recycled Binder/Micro-Filler Cement-Based Material. In: REITERMAN, P., ed. Special Concrete and Composites 2014. 11th International Conference Special Concrete and Composites 2014. Skalský Dvůr, 16.10.2014 - 17.10.2014. Uetikon-Zurich: Trans Tech Publications. 2014, s. 234-237. Advanced Materials Research.

Nežerka, V., Slížková, Z., Tesárek, P., Plachý, T., Petráňová, V. (2014): Comprehensive study on mechanical properties of lime-based pastes with additions of metakaolin and brick dust, Cement and Concrete Research 64, 17-29.

Prošek, Z., Trejbal, J., Havrda, J., Holub, P., Tesárek, P. (2016a): SOUDRŽNOST MODIFIKOVANÝCH KARBONOVÝCH VLÁKEN S CEMENTOVOU MATRICÍ: PLAZMATICKÉ ÚPRAVY. In: 14th International Conference on New Trends in Statics and Dynamics of Buildings. 14th International Conference on New Trends

in Statics and Dynamics of Buildings. Bratislava, 13.10.2016 - 14.10.2016. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava. 2016, s. 188-191.

Prošek, Z., Topič, J., Šeps, K., Tesárek, P., Antoš, J. (2016b): Vliv drceného vápence a mikromleté mramorové moučky jako náhrady za běžně využívaný písek: Makromechanické vlastnosti. In: 13. konference Speciální betony 2016. Speciální betony 2016. Bystřice nad Pernštejnem, Lísek, 13.10.2016 - 14.10.2016. Praha: Sekurkon. 2016,

Prošek, Z., Šeps, K., Topič, J., Tesárek, P. (2016c): Effect of particle size distribution waste micronized marble powder on the mechanical properties of the cement composite. In: Experimental Stresss Analysis 2016. 54. konference Experimentální Analýza Napětí. Srní, 30.05.2016 - 02.06.2016. Plzeň: Západočeská universita, Fakulta aplikovaných věd.

Prošek, Z., Topič, J., Trejbal, J., Šeps, K., Tesárek, P. (2016d): Influence of Recycled Materials on Resulting Mechanical Properties of Cement Composites. In: PADEVĚT, P. (ed.) Modern Methods of Experimental and Computational Investigations in Area of Construction. Nano a Makro Mechanika 2015 - 6. ročník konference. Praha, 17.09.2015. Pfaffikon: Trans Tech Publications Inc. 2016, s. 53-56. Applied Mechanics and Materials Vol. 825.

Prošek, Z., Tesárek, P. (2016). Vliv hydrofobizační přísady na spárovací hmoty, Zpráva k testování hydrofobizační přísady pro firmu Nanoservice (ČR), 6 s.

Růžička, V. (2017): Lehčené bloky na bázi recyklovaného betonu, Diplomová práce, Fakulta stavební ČVUT v Praze, 81 s. Vedoucí práce Ing. Pavel Tesárek, Ph.D., oponent práce: Ing. Tomáš Plachý, Ph.D.

Tesárek, P., Novák, L., Topič, J., Prošek, Z., Nežerka, V., Lidmila, M. (2014): Performance of wire-reinforced gypsum loaded in compression. In: Experimental Stress Analysis 2014. 52nd conference on experimental stress analysis. Mariánské Lázně, 02.06.2014 - 05.06.2014. Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.

Tesárek, P., Novák, L., Prošek, Z., Topič, J., Lidmila, M. (2015a): Influence of Specimen Shape on Compressive Strength of Gypsum Composite Reinforced by Recycled Wires. In: BITTNAR, P. a PADEVĚT, P., eds. Experimental Stress Analysis 2015. Experimentální analýza napětí 2015. Český Krumlov, 01.06.2015 - 04.06.2015. Praha: Czech Technical University in Prague. 2015, s. 427-430. ISBN 978-80-01-05734-6.

Tesárek, P., Novák, L., Topič, J., Prošek, Z., Nežerka, V., Lidmila, M. (2015b): Compression Testing of Gypsum-Based Composite Reinforced by Recycled Wires from Automobile Tires. In: POLACH, P., ed. Applied Methods of the Analysis of Static and Dynamic Loads of Structures and Machines. 52nd International Conference on Experimental Stress Analysis. Mariánské Lázně, 02.06.2014 - 05.06.2014. Zürich: Trans Tech Publications Offices LTD. 2015, s. 393-396. Applied Mechanics and Materials.

Tesárek, P., Holub, P., Havrda, J., Antoš, J., Prošek, Z., Trejbal, J., Plachý, T. (2016a): Vliv uhlíkových vláken na mechanické vlastnosti cementového kompozitu. In: 13. konference Speciální betony 2016. Speciální betony 2016. Bystřice nad Pernštejnem, Lísek, 13.10.2016 - 14.10.2016. Praha: Sekurkon. 2016, ISBN 978-80-86604-70-1.

Tesárek, P., Holub, P., Havrda, J., Fládr, J., Prošek, Z. (2016b): Effect of a plasticizer and micronized stone powder on mechanical properties of a cement matrix. In: Experimental Stresss Analysis 2016. 54. konference Experimentální Analýza Napětí. Srní, 30.05.2016 - 02.06.2016. Plzeň: Západočeská universita, Fakulta aplikovaných věd.

Tesárek, P., Kopecký, L., Prošek, Z. (2016c): Možnosti využití mikromletého recyklovaného betonu jako mikroplniva s pojivovými vlastnostmi, přihláška k projektu GA ČR 2017.

Topič, J., Prošek, Z., Plachý, T., Tesárek, P. (2014a): Vliv přídavku polyvinylalkoholu na mikrostrukturu a mechanické vlastnosti cementové pasty. In: NEŽERKA, V., et al., eds. Nanomateriály a nanotechnologie ve stavebnictví 2014. Nanomateriály a nanotechnologie ve stavebnictví. Praha, 12.06.2014. Praha: České vysoké učení technické v Praze. 2014, s. 138-143.

Topič, J., Prošek, Z., Tesárek, P., Nežerka, V., Plachý, T. (2014b): Cement based composite with PVA: Development of mechanical properties. In: 52nd International Conference on Experimental Stress Analysis 2014. 52nd International Conference on Experimental Stress Analysis. Mariánské Lázně, 02.06.2014 - 05.06.2014. Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.. 2014, ISBN 978-80-231-0377-6.

Topič, J., Tesárek, P., Nežerka, V., Prošek, Z., Plachý, T. (2015a): Development of Mechanical Properties of Cement Paste with Different Addition of Polyvinyl Alcohol. In: POLACH, P., ed. Applied Methods of the Analysis of Static and Dynamic Loads of Structures and Machines. 52nd International Conference on Experimental Stress Analysis. Mariánské Lázně, 02.06.2014 - 05.06.2014. Zürich: Trans Tech Publications Offices LTD. 2015, s. 81-84. Applied Mechanics and Materials.

Topič, J., Prošek, Z., Indrová, K., Plachý, T., Nežerka, V., Kopecký, L., Tesárek, P. (2015b): Effect of PVA Modification on the Properties of Cement Composites, Acta Polytechnica 55(1), 64-75.

Topič, J., Prošek, Z., Fládr, J., Tesárek, P. (2015c): Vliv jemně mletého recyklovaného betonu na mikrostrukturu cementového kompozitního materiálu. In: Nanomateriály a nanotechnologie ve stavebnictví 2015. Nanomateriály a nanotechnologie ve stavebnictví 2015. Praha, 11.06.2015. Praha: vydavatelství ČVUT v Praze. 2015, s. 79-84

Topič, J. (2015d): Kompozitní materiály na bázi cementu: využití betonového recyklátu, Studie k odborné rozpravě, Fakulta stavební ČVUT v Praze, 40 s. Školitel: Ing. Tomáš Plachý Ph.D., školitel specialista: Ing. Pavel Tesárek, Ph.D.

Topič, J., Prošek, Z., Fládr, J., Trejbal, J., Tesárek, P., Karra'a, George (2016): Influence of Finely Ground Recycled Concrete on Microstructure of Cement-Based Composite Material. In: KOSTELECKÁ, M. a KUKLÍK, P., eds. Proceedings of the 17th Conference on the Rehabilitation and Reconstruction of Buildings (CRRB 2015). Praha, 12.11.2015 - 13.11.2015. Pfaffikon: Trans Tech Publications Inc. 2016, s. 111-115. ISSN 1662-9795. ISBN 978-3-03835-719-3. Dostupné z: <http://www.scientific.net/KEM.714.111>

Topič, J., Osvald, A., Nežerka, V., Prošek, Z., Lidmila, M., Valentin, J., Tesárek, P. (2016): Comparison of compressive strength and young's modulus of cement samples with different types of aggregate. In: REITERMAN, P., ed. Special Concrete and Composites (2015). Special Concrete and Composites 2015. Skalský Dvůr, 15.10.2015 - 16.10.2015. Zurich: Trans Tech Publications. 2016, s. 207-210. Key Engineering Materials.

Topič, J., Prošek, Z., Fládr, J., Nežerka, V., Tesárek, P. (2016): Replacement of Cement with Finely Ground Recycled Concrete: Influence on Mechanical Properties. In: PADEVĚT, P., ed. Modern Methods of Experimental and Computational Investigations in Area of Construction. Nano a Makro Mechanika 2015 - 6. ročník konference. Praha, 17.09.2015. Pfaffikon: Trans Tech Publications Inc. 2016, s. 69-72. Applied Mechanics and Materials Vol. 825.

Valentin, J., Tesárek, P., Topič, J., Prošek, Z., Nežerka, V., Fládr, J., Trejbal, J. (2015a): Modifikace a vývoj variantní vápeno-cementové malty pomocí mikromleté aktivované vápencové moučky nebo kalu, výzkumná zpráva, zadavatel ECOLOGICAL CONSTRUCTION GROUP s.r.o., 10 p.

Valentin, J., Tesárek, P., Nežerka, V., Prošek, Z., Topič, J., Trejbal, J., Fládr, J. (2015b): Vývoj cementových malt a stavebních lepidel s využitím mechanicky aktivovaného jemně mletého betonového recyklátu, výzkumná zpráva, zadavatel Strategic Global Consultants: Europe s.r.o., 9 p. 2015. MACB_01.

Valentin, J., Tesárek, P., Prošek, Z., Topič, J., Valentová, T., Suda, J., Čížková, Z. (2016a): Výzkumná zpráva o postupu prací a o dosažených výsledcích za rok 2016; projekt MACRec, Praha: 2016, MACRec_2016.

Valentin, J., Prošek, Z., Tesárek, P., Karra'a, G., Faltus, M. (2016b): Jaký je potenciál mechano-chemické aktivace u vybraných vedlejších produktů či recyklátů? In: JIRÁSKO, D., et al., eds. Podkladní vrstvy a podloží vozovek. Podkladní vrstvy a podloží vozovek. Brno, 22.11.2016. Praha 4: PRAGOPROJEKT,a.s.. 2016, s. 53-65.

Zobal, O., Padevět, P., Lidmila, M., Tesárek, P. (2010): Možnosti recyklace betonu, In: Betonářské dny 2010. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI, pp. 491-494.

Seznam tabulek

Tab. 1: Příklad využití drceného vápence při experimentálním výzkumu od roku 2000.	19
Tab. 2: Specifikace vápencového kalu (J) pomocí prvkové analýzy, se směrodatnou odchylkou SO.	36
Tab. 3: Specifikace drceného vápence (B) pomocí prvkové analýzy, se směrodatnými odchylkami SO.	37
Tab. 4: Specifikace vlastností cementu, vápencového kalu (J) mikromleté vápencové moučky (B) pomocí prvkové analýzy.	40
Tab. 5: Specifikace vlastností cementu a mikromletých betonů – železniční pražec (P) a betonový žlab (Z)	42
Tab. 6: Specifikace složení testovaných směsí v závislosti na množství použitého mikromletého kalu (J).	47
Tab. 7: Rozliv, objemová hmotnost, otevřená pórovitost a smrštění vzorků s různým množstvím mikromleté vápencové moučky (se směrodatnými odchylkami).	47
Tab. 8: Specifikace vlastností testovaných směsí v závislosti na množství použitého mikromletého betonového recyklátu (P).	50
Tab. 9: Rozliv, objemová hmotnost, otevřená pórovitost a smrštění vzorků s různým množstvím betonového recyklátu (se směrodatnými odchylkami).	51
Tab. 10: Složení testovaných směsí.	55
Tab. 11: Rozliv, objemová hmotnost, otevřená pórovitost a smrštění vzorků s různým množstvím PVA (se směrodatnými odchylkami).	56
Tab. 12: Složení testovaných směsí z betonového mikromletého recyklátu (Z) vylehčeného pěnou (PM a PH).	59
Tab. 13: Porovnání objemových hmotností a hodnot celkové pórovitosti testovaných vzorků (hodnoty jsou uvedeny se směrodatnými odchylkami).	59
Tab. 14: Specifikace vlastností testovaných směsí.	66
Tab. 15: Rozliv, objemová hmotnost, otevřená pórovitost a smrštění vzorků s různým množstvím PVA (se směrodatnými odchylkami).	67
Obr. 55: Příklady vylehčení stejného základního materiálu pomocí pěny, plný referenční vzorek (vlevo), vylehčený vzorek s malým množstvím použité pěny (uprostřed) a vylehčený vzorek s vysokým stupněm vylehčení (vpravo).	77
Tab. 16: Základní vlastnosti komerčně vyráběných lehčených bloků/ materiálů (stručný přehled).	78
Tab. 17: Základní vlastnosti experimentálně vyráběných lehčených bloků/materiálů (stručný přehled od roku 2000).	79
Tab. 18: Složení navržené běžné zdící malty (J).	89
Tab. 19: Složení navržené běžné omítací malty (J).	89
Tab. 20: Složení navržené finální omítací malty (J).	90
Tab. 21: Souhrnné výsledky vlastností navržených malt (J).	92
Tab. 22: Složení navržené zdící malty (P).	95
Tab. 23: Složení navržené tenkovrstvé omítací malty (P).	95
Tab. 24: Složení navrženého lepidla (P).	96
Tab. 25: Souhrnné výsledky vlastností navržených malt a lepidla (28 dní).	98

Seznam obrázků

Obr. 1: Procentuální zastoupení odpadů v EU podle hospodářských odvětví (Eurostat 2015).	10
Obr. 3: Ukládání mramorového kalu v okolí továren (Aliabdo et al. 2014).	14
Obr. 4: Snímek vápencové moučky (J), na vyznačených oblastech byla provedena podrobná analýza.	35
Obr. 5: Záznam z podrobné analýzy vápencové moučky (J) z jedné typické oblasti.	35
Obr. 6: Snímek drceného vápence (B).	36
Obr. 7: Záznam z analýzy drceného vápence (B) z jedné typické oblasti.	37
Obr. 8: Vysokorychlostní mlýny firmy Lavaris, s. r. o. (Lavaris, 2016).	38
Obr. 9: Vápencový kal (J), vlevo; mikromletý vápencový kal (J), zvětšení 80× z optického mikroskopu.	38
Obr. 10: Vápencový kal (J), vlevo; mikromletý vápencový kal (J), zvětšení 100× pomocí elektronové mikroskopie.	39
Obr. 11: SEM – mikromletý vápencový kal (J) 100× (vlevo), 250× (vpravo).	39
Obr. 12: SEM – mikromletý vápencový kal (J) 500× (vlevo), 2000× (vpravo).	39
Obr. 13: Křivky zrnitosti použitého cementu (C), vápencového kalu (J), mikromletého vápencového kalu a mikromleté vápencové moučky (B).	40
Obr. 14: Časový průběh kalorimetrického měření pro vzorky s 5, 10 a 15 hm. % náhrady cementu (C) mikromletým vápencovým kalem (J).	41
Obr. 15: Snímky z elektronové mikroskopie (režim BSE), zrna mikromletého železničního pražce (P), zvětšení 80× (vlevo) a 250× (vpravo).	42
Obr. 16: Snímky z elektronové mikroskopie (režim BSE), zrna mikromletého betonového žlabu (Z), zvětšení 80× (vlevo) a 250× (vpravo).	42
Obr. 17: Křivky zrnitosti použitého cementu (C), mikromletého betonového pražce a mikromletého betonového žlabu.	43
Obr. 18: Vývoj hydratačního tepla referenčního cementu (C) a vzorku s 50 hm. % mikromletého betonu (P). Výsledky jsou vztaženy na 1 g cementu.	43
Obr. 19: Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech se směrodatnými odchylkami v závislosti na množství mikromleté vápencové moučky (J).	48
Obr. 20: Pevnost v tlaku po 28 dnech se směrodatnými odchylkami v závislosti na množství mikromleté vápencové moučky (J).	48
Obr. 21: Časový vývoj dynamického modulu pružnosti se směrodatnými odchylkami v závislosti na množství mikromleté vápencové moučky (J).	49
Obr. 22: Časový vývoj dynamického smykového modulu se směrodatnými odchylkami v závislosti na množství mikromleté vápencové moučky (J).	49
Obr. 23: Snímky z optického mikroskopu, referenční cementový vzorek (vlevo), vzorek s 35 hm. % mikromletého betonového pražce (vpravo).	51
Obr. 24: Snímky z optického mikroskopu, vzorek s 50 hm. % (vlevo) a s 65 hm. % mikromletého betonového pražce (vpravo).	52
Obr. 25: Snímky z elektronového mikroskopu, referenční cementový vzorek (vlevo), vzorek s 35 hm. % mikromletého betonového pražce (vpravo).	52
Obr. 26: Snímky z elektronového mikroskopu, vzorek s 50 hm. % (vlevo) a s 65 hm. % mikromletého betonového pražce (vpravo).	52
Obr. 27: Pevnost v tlaku (se směrodatnou odchylkou) po 28 dnech v závislosti na množství použitého mikromletého betonového pražce (P).	53
Obr. 28: Pevnost v tahu za ohybu (se směrodatnou odchylkou) po 28 dnech v závislosti na množství použitého mikromletého betonového pražce (P).	53

Obr. 29: Časový vývoj dynamického modulu pružnosti se směrodatnými odchylkami v závislosti na množství mikromletého betonového pražce (P).	54
Obr. 30: Časový vývoj dynamického smykového modulu se směrodatnými odchylkami v závislosti na množství mikromletého betonového pražce (P).	54
Obr. 31: Pevnost v tlaku testovaných vzorků (se směrodatnými odchylkami) po 28 dnech v závislosti na složení směsi.....	56
Obr. 32: Pevnosti v tahu za ohybu (se směrodatnými odchylkami) po 28 dnech v závislosti na složení směsi.....	57
Obr. 33: Porovnání hodnot součinitele tepelné vodivosti (se směrodatnými odchylkami).	57
Obr. 34: Snímky lomových ploch testovaných vzorků: referenční vzorky C100 (vlevo) a C66/R34 (vpravo).	60
Obr. 35: Snímky lomových ploch testovaných vzorků, horní řada: C100/PH_a (vlevo) a C100/PM_a (vpravo), dolní řada: C100/PH_b (vlevo) a C100/PM_b (vpravo).....	60
Obr. 36: Snímky lomových ploch testovaných vzorků, horní řada: C66/R34/PH_a (vlevo) a C66/R34/PM_a (vpravo), dolní řada: C66/R34/PH_b (vlevo) a C66/34/PM_b (vpravo).	61
Obr. 37: Časový vývoj hodnot smrštění testovaných směsí (hodnoty jsou uvedeny se směrodatnými odchylkami).	61
Obr. 38: Časový vývoj hodnot dynamického modulu pružnosti testovaných směsí stanovený impulzní metodou (hodnoty jsou uvedeny se směrodatnými odchylkami).	62
Obr. 40: Porovnání hodnot dynamického modulu pružnosti testovaných směsí stanoveného ultrazvukovou metodou (hodnoty jsou uvedeny se směrodatnými odchylkami).	63
Obr. 41: Porovnání hodnot pevností v tahu za ohybu po 28 dnech testovaných směsí (hodnoty jsou uvedeny se směrodatnými odchylkami).	64
Obr. 42: Porovnání hodnot pevností v tlaku po 28 dnech testovaných směsí (hodnoty jsou uvedeny se směrodatnými odchylkami).	64
Obr. 43: Porovnání hodnot součinitele teplotní vodivosti po 28 dnech testovaných směsí (hodnoty jsou uvedeny se směrodatnými odchylkami).....	65
Obr. 44: Vývoj dynamického modulu pružnosti v čase se směrodatnými odchylkami v závislosti na množství PVA, vzorky uložené volně v laboratorním prostředí (se směrodatnými odchylkami).	68
Obr. 46: Pevnost v tlaku po 28 dnech se směrodatnými odchylkami v závislosti na množství použitého PVA, vzorky uložené v laboratorním prostředí.....	69
Obr. 47: Pevnost v tlaku po 28 dnech se směrodatnými odchylkami v závislosti na množství použitého PVA, vzorky uložené ve vodní lázni.....	70
Obr. 48: Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech se směrodatnými odchylkami v závislosti na množství použitého PVA, vzorky uložené v laboratorním prostředí... 70	
Obr. 49: Pevnost v tahu za ohybu (se směrodatnými odchylkami) po 28 dnech v závislosti na množství použitého PVA, vzorky uložené ve vodní lázni.....	71
Obr. 50: Příklad povrchové hydrofobizace: vzorek referenční (vlevo) a ošetřený vzorek (vpravo).	72
Obr. 51: Příklad povrchové hydrofobizace: vzorek referenční (vlevo) a ošetřený vzorek (vpravo).	72
Obr. 52: Příklad objemové hydrofobizace: vzorek referenční (vlevo) a ošetřený vzorek (vpravo).	72

Obr. 53: Pohled na systém omítek nanesených na experimentální stěně. Hydrofobizační přísadou ošetřená část je vlevo a stékají po ní kapky při simulaci deště. Vpravo je neošetřená část, která je mokrá do simulovaného deště.	73
Obr. 56: Pevnost v tlaku po 28 dnech v závislosti na objemové hmotnosti pro komerční výrobky, zahraniční experimentální výzkum a vlastní výzkum.	80
Obr. 57: Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na objemové hmotnosti pro komerční výrobky, zahraniční experimentální výzkum a vlastní výzkum.	80
Obr. 58: Pohled na testovací stěnu z šedého pórobetonu s využitím navrženého lepidla (vlevo). Natahování vrstvy malty na testovací stěnu (vpravo) (stav stěny v květnu 2016).	85
Obr. 59: Pohled na nanesenou omítku (vlevo). Detail nanesené omítky (vpravo) (stav stěny v květnu 2016).	86
Obr. 60: Pohled na nanesenou omítku (stav v březnu 2017).	86
Obr. 61: Schematický obrázek s komponenty stavebního systému a příkladovým variantním provedením jednotlivých součástí.	100
Obr. 62: Příklad stacionární varianty recyklační linky (Lavaris 2016).	101
Obr. 63: Příklad mobilní varianty recyklační linky (Lavaris 2016).	101
Obr. 64: Příklad sestavy výrobní linky na zpracování kamenných odprašků (Lavaris 2016).	102
Obr. 65: Objekt z Blízkého Východu – vlevo (http://www.maecannon.com), příčný řez vzorovým objektem – vpravo.	103
Obr. 66: Půdorys vzorového objektu (Hrůza 2016).	104
Obr. 67: Pohled na vzorový objekt (Hlubocký 2016).	104
Obr. 68: Pohled na vzorový objekt se schematickým tvárněním konstrukce podlah, stěn a střechy (Hlubocký 2016).	105
Obr. 69: Náhledy na zjednodušený statický výpočet (Hrůza 2016, Hlubocký 2016).	105
Obr. 1: Společný stánek firmy Lavaris a FSv ČVUT v Praze na mezinárodní výstavě Stone+tec 2015 v Norimberku. Vzorková stěna s různými omítkami a mozaikou (vpravo).	129
Obr. 3: Snímky z vyzvané přednášky na téma „Využití mikromletých recyklovaných materiálů ve stavebnictví“ (vpravo).	130
Obr. 4: Logo konference GEOMEAST2017.	130

Příloha 1: Prezentace dosažených výsledků na mezinárodních veletrzích

V rámci **mezinárodního prodejního veletrhu Stone+tec 2015**, který se konal v Norimberku (Německo) v listopadu 2014, byl připraven společný stánek firmy Lavaris a Fakulty stavební ČVUT v Praze. Veletrh je zaměřený na kámen a technologie zpracování kamene. V rámci prezentace byla představena „vzorková“ stěna s rozměry 750×1000 mm (Obr. 1). Stěna byla vyrobena z šesti tvárníc komerčně vyráběného pórobetonu, které byly spojeny navrženým lepidlem s mikromletým vápence. Na povrch stěny byla nanесena omítka s pískem a mikromletým vápencem, druhá vrstva byla tvořena tenkovrstvou omítkou s vysokým obsahem vápencové moučky a na část byla nanесena cementová omítka s 10 hm. % cementu a zbytek tvořila mikromletá vápencová moučka.



Obr. 1: Společný stánek firmy Lavaris a FSv ČVUT v Praze na mezinárodní výstavě Stone+tec 2015 v Norimberku. Vzorková stěna s různými omítkami a mozaikou (vpravo).

V září 2015 se konal v italské Veroně 50. mezinárodní prodejní veletrh **Marmomacc 2015**, se zaměřením na výrobu a spravování stavebního kamene a především mramoru. V rámci společného stánku byla představena činnost firmy Lavaris a Fakulty stavební ČVUT v Praze v oblasti využití mikromleté odpadní vápencové moučky ve stavebnictví (Obr. 2). V rámci prezentace byla přednesena vyzvaná přednáška na téma využití mikromletého vápencového odpadu v omítkových systémech v rámci tzv. Stone Academy, která probíhala během výstavy a měla za úkol formou série přednášek představit možnosti zpracování a využití kamenného odpadu ve stavebnictví a jiných průmyslech (Obr. 3).



Obr. 2: Společný stánek firmy Lavaris a Fakulty stavební ČVUT v Praze na mezinárodní výstavě Marmomacc 2015 ve Veroně (vlevo). Vzorková stěna s různými omítkami a mozaikou (vpravo).



Obr. 3: Snímky z vyzvané přednášky na téma „Využití mikromletých recyklovaných materiálů ve stavebnictví“ (vpravo).

Na obou mezinárodních výstavách byl mezi vystavovateli velký zájem o prezentované produkty. V roce 2017 je plánovaná prezentace dosažených výsledků na mezinárodním kongresu a výstavě **GEOMEAST2017** v lokalitě Sharm El-Sheik, Egypt v červenci roku 2017 (Obr. 4).



Obr. 4: Logo konference GEOMEAST2017