



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**NOVÉ LEHČENÉ PODLAHY NA BÁZI
DRUHOTNÝCH SUROVIN**

NEW LIGHTWEIGHT FLOORS WITH SECONDARY RAW MATERIALS

DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Eva Tůmová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. ROSTISLAV DROCHYTKA,
CSc., MBA

BRNO 2017

ABSTRAKT

Práce se zabývá vývojem nových druhů lehčených podlah na bázi druhotných surovin.

V úvodu jsou prezentovány současné poznatky z oblasti lehčených stavebních hmot, především potěrů a lehkých pórovitých betonů. V práci je popsána stručná historie výroby pórabetonu a její vývoj až do současnosti.

Dále je v práci popsán postup návrhu a zkoušení nových lehčených hmot pro použití do podlah. Navržené receptury byly podrobně testovány a byly vybrány nejlepší kombinace složek pro použití v podlahovém potěru na bázi lehkého pórovitého betonu. V práci je také zkoumána mikrostruktura vyvíjeného materiálu.

Hlavním výsledkem disertační práce je vyvinutá hmota, která se již využívá v praxi a je vyráběna a prodávána na trhu jako součást systému lehčených stavebních hmot pro dokončovací práce.

KLÍČOVÁ SLOVA

Podlaha, druhotné suroviny, pórabeton, potěr.

ABSTRACT

The thesis deals with the development of new type of lightweight floors based on secondary raw materials.

In the introduction, the current knowledge in the field of lightweight building materials, especially screeds and lightweight porous concrete, is presented. The thesis describes brief history of production of aerated concrete and its development up to the present.

Further, the thesis describes the procedure of design and testing of new lightweight materials for use in floors. The proposed recipe has been thoroughly tested and the best combination of components for use in lightweight porous concrete floor screed has been selected. The thesis also examines the microstructure of the material being developed.

The main result of the dissertation is the developed product, which is already used in practice and is produced and sold on the market as part of the system of lightweight building materials.

KEYWORDS

Floor, secondary raw materials, aerated concrete, screed.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Ing. Eva Tůmová *Nové lehčené podlahy na bázi druhotných surovin*. Brno, 2017. 159 s., 6 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA

PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 8. 4. 2017

Ing.
autor práce

Eva

Tůmová

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala panu prof. Ing. Rostislavu Drochytzkovi, CSc., MBA, za vedení disertační práce a také za jeho podporu, trpělivost, rady a inspiraci při vypracování této disertační práce. Rovněž patří můj dík mamince a manželovi za podporu při studiu a za vytvoření potřebného zázemí.

1.	Úvod	8
I.	TEORETICKÁ ČÁST	10
2.	Historie lehčených betonů a potěrů.....	10
3.	Podlahové systémy.....	13
3.1	Základní pojmy.....	13
3.2	Potěrové hmoty.....	14
4.	Materiály pro lehčené podlahy	18
4.1	Liaporový (keramzitový) beton	18
4.2	Polystyrenový beton.....	20
4.3	Beton z expandovaného perlitu.....	20
4.4	Pórobeton	21
5.	Vybrané komponenty pro potěry	21
5.1	Plniva	21
5.2	Pojiva a příměsi	27
5.3	Databáze surovin	33
5.4	Návrh složení potěrové směsi.....	35
6.	Vylehčování stavebních látek	40
6.1	Možnosti vylehčování stavebních látek.....	40
6.2	Vlastnosti a použití lehkých pórovitých betonů	41
6.3	Plynotvorné látky a pórobeton.....	42
6.4	Pěnobetony a pěnotvorná činidla.....	45
7.	Mikrostruktura neautoklávovaného pórobetonu	47
7.1	Velikost pórů	47
7.2	Minerály v mikrostruktuře neautoklávovaných pórobetonů	48
8.	Cíl práce	51
II.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	52
9.	Metodika práce	52
9.1	Etapa I.: Základní ověření možností vylehčení silikátových materiálů	52
9.2	Etapa II.: Návrh receptur lehčených stavebních hmot.....	52
9.3	Etapa III.: Studium mikrostruktury vybraných vzorků	53
10.	Přehled prováděných zkoušek.....	57
11.	Etapa I.: Základní ověření možností vylehčení silikátových materiálů	59
11.1	Návrh komponentů vyvíjené potěrové směsi	59
11.2	Validace vlastností komerčních směsí s daty v technických listech	59
11.3	Výběr vhodných plniv	66
11.4	Vlastnosti plniv	67
11.5	Vliv lehčených plniv na výsledné vlastnosti potěrové hmoty	69

12. Etapa II.: Návrh receptur lehčených stavebních hmot.....	79
12.1 Návrh skladby cementového potěru.....	79
13.2 Ověření dlouhodobé stability suchých směsí a určení jejich vhodnosti ke skladování.....	99
14. Etapa III.: Studium mikrostruktury vybraných vzorků	104
14.1 Vzorky pro studium mikrostruktury.....	104
14.2 Receptury s obsahem 0,2 a 1,2 g hliníkového prášku	104
14.3 Receptura s chlorovým vápnem.....	110
14.4 Receptury obsahující pěnotvorné látky B, L, G7	118
14.5 Receptury obsahující mikrosféry Q17, X24.....	125
15. Finální zhodnocení procesu vylehčení stavebních hmot.....	132
15.1 Celková diskuze dosažených výsledků.....	132
15.2 Přínos pro vědní obor a praxi.....	136
16. Závěr.....	139
Zdroje	142
Použitá literatura	142
Použité a citované normy	150
Seznam zkratk a symbolů	152
Seznam obrázků	154
Seznam tabulek.....	156
Seznam grafů	158
Přílohy	160
A. Listy surovin	160
B. Granulometrický rozbor vybraných surovin	163
C. Výpočet DTA.....	165

1. Úvod

Podlaha je jednovrstvá nebo vícevrstvá konstrukce, která tvoří vrchní část vodorovných nebo šikmých konstrukcí. Podlaha vždy bezprostředně navazuje na podkladový materiál, kterým může být v nejnižším patře podkladní betonová vrstva nebo ve vyšších patrech stropní konstrukce. Průmyslové podlahy jsou zejména podlahové konstrukce velkokapacitních objektů v továrních halách, skladech a jiných nebytových objektech, které jsou kromě statického namáhání zatěžovány i dynamickým namáháním různými manipulačními prostředky. Podlahy jsou užívány jak pěším způsobem, tak jako parkovací plochy. Rozdíl mezi průmyslovými podlahami a podlahami např. v bytové výstavbě, kancelářích a učebnách spočívá zejména v tom, že u průmyslových podlah jde o velké plochy uvnitř prostorných hal nejen jednopodlažních v úrovni okolního terénu, ale v řadě případů i vícepodlažních, a to jak v suterénní části, tak v nadzemí. Naproti tomu v případě občanských bytových staveb se jedná o podlahy s malým plošným rozsahem a rovněž s relativně malým zatížením. [1]

Ve vývoji podlahových konstrukcí se stále využívá nových stavebních hmot, přísad, plniv a druhotných surovin rozmanitých vlastností. Je možno vyvinout nové typy materiálů o různých mechanických vlastnostech, zvýšených odolnostech či snížených hmotnostech. Lehčené stavební hmoty jsou základním prvkem pro vylehčení průmyslových podlah a tím i snížení jejich hmotnosti. To je zvláště výhodné pro vícepodlažní objekty. [1]

Nároky na odolnost a trvanlivost průmyslových podlah se stále zvyšují, zároveň je ale důležitá i ekonomická výhodnost nově vyvíjených materiálů, kdy je nutné dosáhnout co nejlepších vlastností při co nejnižších nákladech. Využití odpadních látek ve stavebnictví může ve srovnání s deponováním odpadu ulehčit zátěži na životní prostředí. Druhotné suroviny lze využít ve formě samostatného materiálu, zakomponovat je do matrice stavebních hmot, případně použít dílčí suroviny vyrobené z odpadů.

Lehčeným plnivem lze snížit objemovou hmotnost stavebních materiálů a zároveň docílit zlepšení akustických a tepelně-vodivostních parametrů stavebních materiálů. To je výhodné zejména pro průmyslovou výrobu, která je doprovázena problémy se šířením hluku z provozu strojních zařízení. Bytová výstavba klade vysoké požadavky i na tepelně-izolační vlastnosti materiálů. [1]

Tato disertační práce byla realizována za finanční podpory z prostředků státního rozpočtu prostřednictvím Ministerstva průmyslu a obchodu v rámci projektu FR-TI3/742 - Systém lehčených hmot pro dokončování staveb s druhotnými surovinami a v rámci řešení projektu č. LO1408 "AdMaS UP - Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie" podporovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu „Národní program udržitelnosti I“.

I. TEORETICKÁ ČÁST

2. Historie lehčených betonů a potěrů

Lehčené betony byly používány již od dob Římského impéria: v nejstarších lehčených betonech byla, jako lehké kamenivo, použita pemza. Jako pojivová složka v těchto betonech se používalo vápno. Tyto první lehké betony svými vlastnostmi a odolností zaostávaly za tím, jaké vlastnosti jsou očekávány od betonů dnes. Přesto byly překvapivě odolné a stále existují stavby v oblasti středomoří, kde je možné je najít.

Od dob Římského impéria se lehčený beton neustále zlepšoval. Nejprve se začalo používat vápno vypalované ze „znečištěných“ surovin, které pak mělo hydraulické vlastnosti. Do betonů se dále používala přírodní lehká kameniva, jako pemza, přírodní struska (sopečného původu), sopečné škváry a vezikulární (pórovitá) láva. Žádný z těchto materiálů ale nebyl schopný s cementem vytvořit dostatečně pevný beton pro konstrukční účely.



Obrázek 1 Mrakodrap Southwestern Bell Telephone Company v Kansasu [2]

Myšlenka na kamenivo vyrobené z expandovaného jílu či břidlice se začala tvořit již na začátku 20. století a v roce 1908 byly provedeny první studie. Teprve o desetiletí později, v průběhu první světové války, se začal beton a lehčený beton používat v Americe při stavbě lodí. Menší betonové lodě se stavěly také ve Švédsku.

Zkušenosti nabité ze stavby betonových lodí byly zhodnoceny ve stavbě objektů o další dekádu později, kdy se začalo se stavbou budov z lehkého betonu. Prvním mrakodrapem z tohoto materiálu byl v roce 1929 mrakodrap Southwestern Bell Telephone Company v Kansasu (obr. 1). [2]

Pórobeton tak, jak ho známe dnes, byl vyvinut v druhé dekádě 20. století ve Švédsku a byl komerčně používán napříč Skandinávií, v Německu a Británii a v průběhu 20. let 20. století se rozšířil po celé Evropě a po celém světě pak po druhé světové válce. v počátcích byl vyráběn přímo na stavbě z portlandského cementu, vody a pěnidel a byl používán hlavně jako izolace střech, jako podlahový potěr a k podzemnímu uložení instalací. [2]

První výskyt pěnidel je datován v Rusku již před osmdesáti lety. Pěnidlo bylo vyráběno z rostliny rostoucí ve střední Asii (bohužel jméno rostliny není v současné době známé). Ve 30. letech se začali sovětské vědci zabývat myšlenkou vytvořit experimentální pěnidlo (podobné mýdlo), pro přídavek do malt, které by bylo možno průmyslově vyrábět. Výsledek tohoto nového experimentu byl nový stavební materiál. Teprve později odborníci začali tento materiál aktivně využívat v průmyslu jako pěnobeton, který vzniká smícháním cementu a chemických přísad. Na základě tohoto vývoje se v Rusku začaly dělat stavební materiály a dílce vyrobené z pěnobetonu: bloky, panely, příčky, které přesahovaly tepelně izolačními vlastnostmi výrobky z cihel a betonu zhruba třikrát až pětikrát. Pěnidla pracovala na bázi povrchově aktivních látek (tenzidů).

Koncentráty pro výrobu pěny byly představeny také ve 20. letech 20. století. Pěnidla na bázi hydrolyzovaných proteinů se začala vyrábět po 2. světové válce a poskytovala stabilní vzduchové buňky (bublínky) a dala se snadno regulovat objemová hmotnost vznikajícího betonu, právě díky jejich stabilitě. Dnes se používají pěnidla na bázi proteinů v případech, kdy je potřeba vyrobit beton s vysokou pevností tlaku.

Syntetická pěnidla byla představena v 90. letech 20. století. Také poskytují velmi kvalitní a stabilní bublinky, oproti pěnidlům na bázi proteinů také prodlužují dobu zpracovatelnosti betonu. Toho se využívá, zejména když je potřeba čerpat beton na delší vzdálenosti, do vyšších pater a pod větším tlakem.

Na začátku 21. století byly také představeny směsné koncentráty pro výrobu pěnobetonů, kde se kombinují syntetické a proteinové složky. [3]

Když hovoříme o pórobetonu či lehčeném betonu, nesmí být opomenut také autoklávovaný pórobeton. Jeho historie sahá do roku 1880, kdy německý vědec Michaelis patentoval parní ošetření a vytvrzení betonu. Český vědec Hoffman v roce 1889 úspěšně otestoval provzdušnění betonu oxidem uhličitým. Američané Aylsworth a Dyer v roce 1914 patentovali metodu provzdušnění pomocí hliníkového prášku.

Důležitý krok kupředu k modernímu pórobetonu učinil v roce 1920 Švéd Axel Eriksson, který si nechal patentovat směr pórobetonu z vápence a mleté břidlice (tzv. vápenná formule). Opravdový průlom přišel v roce 1923, kdy Eriksson objevil, že vlhkou napěněnou hmotu lze ošetřovat parou pod tlakem a tímto procesem dojde k rychlému vytvrdnutí a minimalizaci smrštění. Erikssonův úspěch okamžitě vzbudil zájem mezi potencionálními výrobci a v roce 1929 byla otevřena první továrna na výrobu pórobetonových bloků "Yxhults Stenhuggeri Aktibolag" pod obchodním názvem Yxhult. v roce 1940 byl Yxhult přejmenován na YTONG, kvůli lepší výslovnosti. v roce 1932 začala továrna Carlsro Kalbruk Skovde vyrábět pórobeton pod názvem Durox. v roce 1934 se konkurence dále rozrostla vznikem tvárnic pod názvem Siporit (od r. 1937 známé také pod názvem Siporex). Siporex byl také první, který představil, v roce 1935, vyztužené prvky pro střešní a podlahové panely a překlady. Výroba pórobetonu se rychle šířila po západní Evropě a v samotném Švédsku bylo brzy již 6 továren.

Začátek výroby byl dán krizí ve Švédsku, kdy se dovážely velmi draze suroviny pro výrobu energie, jako je uhlí a oleje. Následkem bylo hledání materiálu, který by uspořil velké množství energie, a to jak při výrobním procesu, tak i při jeho dlouhodobém používání. Vzhledem k nehostinnému prostředí ve Skandinávské oblasti byly náklady na vytápění tradičních staveb z masivních zdicích materiálů opravdu velké, proto vznikl vizionářský stavební materiál – pórobeton s velkými vzduchovými dutinami s velmi dobrými tepelně izolačními vlastnostmi. Masově se začal vyrábět v roce 1929. u nás je za začátky výroby pórobetonu považována produkce z roku 1958.

S mezinárodním úspěchem a dalším rozvojem byly technologie patentovány a bylo jen několik hlavních hráčů na poli autoklávovaného pórobetonu. Siporex a Ytong patřily Švédům, Durox byl koupen Holanďany a Hebel byl německým výrobkem. V průběhu 20. století všichni výrobci úspěšně prodávali licence po celém světě a zároveň se věnovali vylepšování technologie. Ytong byl spojen především se zdicími prvky, Durox, Siporex a Hebel byly zaměřeny kromě výroby zdicích bloků,

také na výrobu vyztužených prvků. Německo, Británie, Švédsko, Dánsko a Nizozemí se staly hlavními producenty pórobetonu. Od 80. let 20. století se dominance Švédů postupně zmenšovala a na malém trhu docházelo k „válce patentů“. Aktivita Siporexu se stáhla na minimum a od roku 1990 nebyly otevřeny žádné nové továrny. V 80. letech 20. století Němci převzali od Švédů Ytong a vylepšili know-how. i přes velkou konkurenci byly otvírány mnohé továrny v Asii, Středním Východě a ve Východní Evropě. Krátce po roce 1990 otevřel Ytong první továrnu v Číně. V roce 2014 bylo po celém světě více než 3000 továren a pórobeton s kapacitou více než 450 milionů m³ nevyztužených bloků za rok. [4][5][6]

3. Podlahové systémy

Podlaha je součástí horizontální konstrukce stavebního díla. Její základní funkcí je přenos zatížení. Minimálním užitným zatížením 5 kN.m⁻² a zároveň pojezdem zařízením o užitné hmotnosti vyšší nebo rovné 10 kN je rozlišena průmyslová podlaha od podlah občanské výstavby. Na jednotlivé druhy podlah jsou kladeny požadavky především z pohledu na typ výstavby. Mezi sledované vlastnosti patří kročejová neprůzvučnost, pokles dotykové teploty, požární odolnost, odolnost proti obrušování i řada dalších.

Výchozí normou pro podlahové systémy je ČSN 74 4505 „Podlahy – společná ustanovení“. Pojem podlahové systémy shrnuje jednotlivé typy izolačních a nášlapných hmot a materiálů využívaných v průmyslové i bytové výstavbě.

3.1 Základní pojmy

Podlaha – sestava podlahových vrstev uložených na nosném podkladu (např. na stropu, nebo jiné nosné konstrukci) a zabudovaných podlahových prvků, dilatačních a pracovních spár, které zajišťují požadované funkční vlastnosti podlahy.

Oddělovací vrstva – vrstva, která zamezuje spojení mezi potěrem a podkladem.

Spojovací vrstva – vrstva, která zlepšuje přídržnost potěru k podkladu.

Vyrovňovací vrstva – vrstva sloužící k vyrovnání nerovností a výškových rozdílů v podkladu nebo kolem potrubí a upravující výšku povrchu.

Roznášecí vrstva – vrstva umožňující rozptýlení lokálně (např. bodově) působícího namáhání do rozměrově příznivější plochy.

Izolační vrstva – vrstva zajišťující požadované tepelně izolační, popř. akustické vlastnosti podlahy.

Spádová vrstva – vrstva zajišťující požadovaný sklon nášlapné vrstvy podlahy.

Nášlapná vrstva – nejvýše položená vrstva podlahy, zajišťující některé požadované funkce podlahy jako např. vzhled, barevnost, čistitelnost, obrusnost, protiskluznost apod.

Podlahovina – výrobek pro nášlapnou vrstvu podlahy, buďto zhotovovaný na místě aktivací a vytvrzením příslušných směsí, nebo pokládkou předem vyrobených podlahových krytin (pásů, dlaždic, vlysů, panelů).

Potěr – vrstva nebo vrstvy potěrového materiálu pokládané na stavbě, spojené nebo nespojené s podkladem nebo nanesené na dělicí nebo tlumicí vrstvu pro zabezpečení jednoho nebo více následujících požadavků: dosažení předepsané výšky, umožnění konečné úpravy povrchu podlahy a k bezprostřednímu použití.

Vsyp – výrobek určený pro zušlechťení povrchů průmyslových podlah

Pórobeton – výrobek vyrobený z písku/popílku vápna, cementu a nakypřujících činidel

Pěnobeton – skládá se z pojiva (cement), vody, přísad a technické pěny. Obsahuje uzavřené vzduchové póry

Cementový potěr – potěr, v němž je hlavním pojivem cement. [8]

3.2 Potěrové hmoty

Potěrové hmoty řadíme společně s mazaninami, stěrkami a druhotně lehčenými betony do skupiny podkladních vrstev podlah.

Obecné pojmy z oblasti potěrových hmot jsou předmětem normy ČSN EN 13318 „Potěrové materiály a podlahové potěry – Definice“. Jednotlivé požadavky a celkově vlastnosti lze nalézt v normě ČSN EN 13813 „Potěrové materiály a podlahové potěry – Potěrové materiály – Vlastnosti a požadavky“. Důležitými faktory při výběru potěrové hmoty jsou maximální síla vrstvy potěru, jeho zrnitost, vliv plniv i aditiv, stejně jako i doba tuhnutí a zrání, přilnavost k povrchu, objemová stálost a především pevnostní charakteristiky. Pro řešení pevnostních tříd potěrových hmot jsou vhodné zkoušky pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku odpovídající příslušné normě ČSN EN 13892 „Zkušební metody potěrových materiálů – Část 2: Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku“. Zkoumány jsou zároveň hmotnostní a vodivostní charakteristiky. Pro potěrové hmoty je také vhodné provést zkoušky obrusnosti.

3.2.1 Rozdělení potěrů dle pojivové báze:

- cementový potěr
- anhydritový potěr a potěry na bázi síranu vápenatého
- asfaltové potěry
- hořečnaté potěry
- potěry na bázi syntetických pryskyřic

Anhydritové potěry lze provádět v malých tloušťkách bez nutnosti dodatečně vyrovnávat povrch podlahy. Potěry na bázi síranu vápenatého jsou však oproti cementovým potěrům výrazně náchylné k poklesu pevnostních charakteristik v kontaktu se zvýšenou vlhkostí (tab. 1). Z ekonomického hlediska jsou cenově výhodnější potěry cementové, je však nutné brát v potaz větší smrštění hmoty a dále nutnost ošetřování v délce dva až tři dny. Asfaltových potěrů lze využít především pro zvýšení požární odolnosti konstrukce. [10]

Tabulka 1 Požadavky na vlhkost potěrů při pokládce dle ČSN EN 74 4505

Nášlapná vrstva	Cementový potěr	Potěr na bázi síranu vápenatého
Plná nebo keramická dlažba	5,00 %	5,00 %
Syntetické lité podlahoviny	5,00 %	nelze provádět
Paropropustné textilie	4,00 %	0,50 %
PVC, linoleum, guma, korek	3,50 %	0,50 %
Dřevěné podlahy, laminátové podlahy	2,50 %	0,50 %

3.2.2 Rozdělení cementových potěrů dle plniv

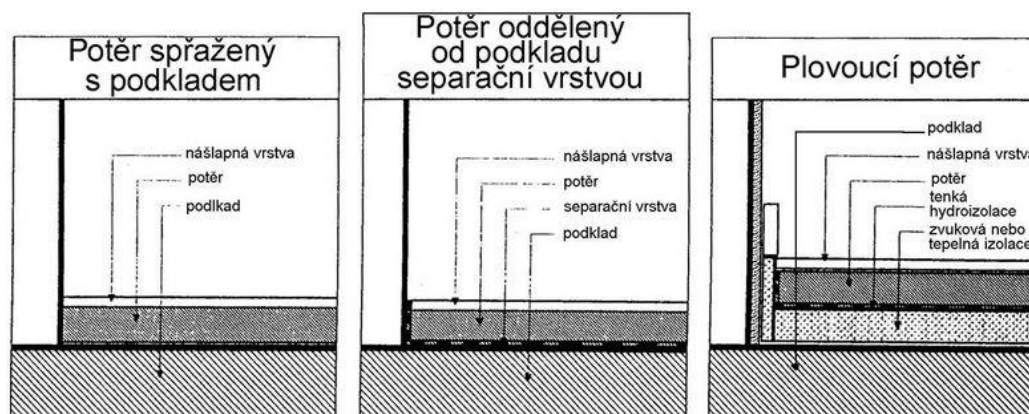
- potěr pískocementový
- potěr popílkocementový
- potěr perlitocementový

3.2.3 Rozdělení potěrů dle konzistence

- zavlhlý potěr
- litý potěr

Lité potěry dnes zastupuje celá škála jemnozrnných směsí s pojivy na bázi síranu vápenatého. Zavlhlými potěry se uvažují především hmoty s cementovou pojivovou bází a jemnozrnnými plnivy. Zavlhlé potěry je nutné, vzhledem k jejich konzistenci, hutnit. Při hutnění plovoucích potěrů je však nutno brát v úvahu tlumící efekt podkladní izolace ovlivňující konečné zmonolitnění prvku. [11]

Využitím vhodných příměsí a silně ztekucujících přísad lze připravit tzv. litý samonivelační potěr. [2]



Obrázek 2 Rozdělení potěrů dle typu funkce [10]

3.2.4 Rozdělení potěrů dle typu konstrukce

- potěr spřažený s podkladem
- potěr na oddělovací mezivrstvě
- plovoucí potěr

Spřažený potěr s maximální tloušťkou 60 mm (obvykle 10 – 30 mm) se používá především pro dosažení požadované kvality povrchu při betonáži. Naopak potěr oddělený separační vrstvou se využívá především při vyrovnání nerovností stropních konstrukcí, a to v tloušťce 35 mm až 50 mm. Plovoucí potěr přibližné tloušťky 40 mm je vhodný pro překrytí tepelné izolace, nesouvisí však nijak s ostatními konstrukcemi a je samostatně pohyblivý. [10][12]

3.2.5 Rozdělení potěrů dle uplatnění

- potěry pro bytovou výstavbu
- potěry pro průmyslovou výstavbu

Vysoké nároky na potěrové hmoty jsou kladeny především v oblasti průmyslové výstavby. Mimo základních pevnostních charakteristiky je ověřována odolnost proti obruš metodou Böhme dle ČSN EN 13892-3 „Zkušební metody potěrových materiálů - Část 3: Stanovení odolnosti proti obruš metodou Böhme“ a odolnost proti obruš metodou BCA dle ČSN EN 13892-4 „Metody zkoušení potěrových materiálů - Část 4: Stanovení obrušnosti přístrojem BCA“, dále odolnost proti valivému zatížení dle ČSN EN 13892-5 „Zkušební metody potěrových materiálů - Část 5: Stanovení odolnosti potěrů, sloužících jako užitková vrstva, proti opotřebení“.

valivým zatížením“, případně ČSN EN 13892-7 „Zkušební metody potěrových materiálů - Část 7: Stanovení odolnosti potěrů s podlahovou krytinou proti opotřebení valivým zatížením“ a pevnost povrchu dle ČSN EN 13892-6 „Zkušební metody potěrových materiálů - Část 6: Stanovení tvrdosti povrchu“.

3.2.6 Dělení potěrů dle využitelnosti otopných systémů

- vyrovnávací potěr
- vytápěcí potěr

Využitím cementových potěrů může docházet k špatnému přenosu tepla mezi otopným tělesem a potěrovou hmotou. Problém zvýšené pórovitosti cementového tmele včetně problému vzniku hluchých míst v oblastech styku s otopným tělesem lze řešit plastifikačními přísadami. v oblasti podlahových topení je vhodné využívat anhydritové potěry. [30]

3.2.7 Cementové potěry

Na rozdíl od klasického betonu cementové potěry neobsahují hrubou frakci plniva. Oproti tomu se také uvádí omezení maximální tloušťky potěru, a to přesněji maximálním zrnem 4 mm při tloušťce potěru do 40 mm a maximálním zrnem plniva 8 mm celkově při vyšší tloušťce potěru. [12]

Cementové potěry lze zhotovovat nejen jako vyrovnávací podklad pod izolační vrstvu, ale i jako ochrannou vrstvu nad samotnou izolací, případně je lze využít ke klasickému vyrovnávání povrchu. [7]

Vzhledem k vývoji kompozitů nové generace se jeví jako příznivé vylepšovat vlastnosti cementových potěrů přidávkem vláken snižujících efekt objemových změn a zároveň zvyšujících kvalitativní vlastnosti vzniklého kompozitu. Vhodné jsou především vlákna polypropylenová, a to v rozmezí dávky 0,8 až 1,1 kg na m³ směsi. Nesmí však být opomíjena jednotlivá aditiva, a to především plastifikační přísady. [12]

3.2.8 Lehčené cementové potěry

Využitím nepřímého vylehčení lze vylepšit teplotní i akustické vlastnosti potěrových materiálů vhodných pro aplikace do občanské výstavby. Zkoumán je především součinitel tepelné vodivosti kompozitu a jeho akusticky-izolační schopnosti z hlediska vzduchové a kročejové neprůzvučnosti dle normy ČSN 730532

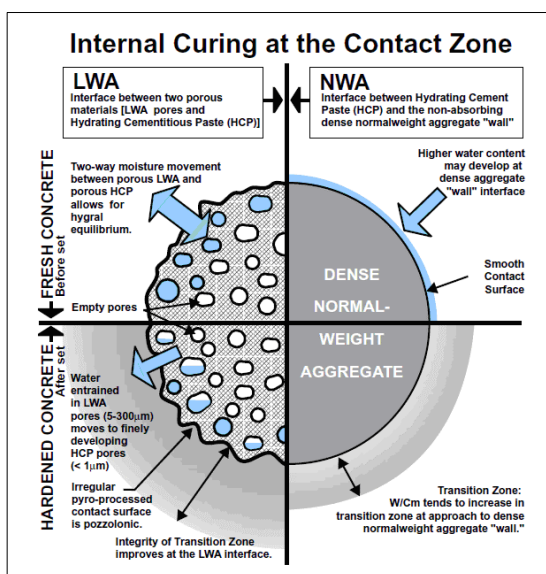
„Akustika - Ochrana proti hluku v budovách a posuzování akustických vlastností stavebních výrobků – Požadavky“.

Efekt samoošetřování

Předvlhčením řady pórovitých plniv předcházíme hydratačním problémům a lze uvažovat i o podpoření samotné hydratace, a to vzhledem k přístupu hydratačních látek vodě obsažené v pórovém systému plniva (obr. 3). [12]

Efekt samovakuování

Lehčená plniva mohou obsahovat otevřený pórovitý systém schopný okamžitě nasáknout velké množství tekutin a tím odebrat cementové směsi potřebnou záměsovou vodu. Tento problém lze řešit předvlhčením pórovitých plniv těsně před aplikací do vytvářené směsi. Upravené plnivo by mělo být pouze povrchově nasáklé, a to tak, aby neodebíralo směsi záměsovou vodu a zároveň nevytvářelo její nadbytek.



Obrázek 3: Efekt samoošetřování [31]

4. Materiály pro lehčené podlahy

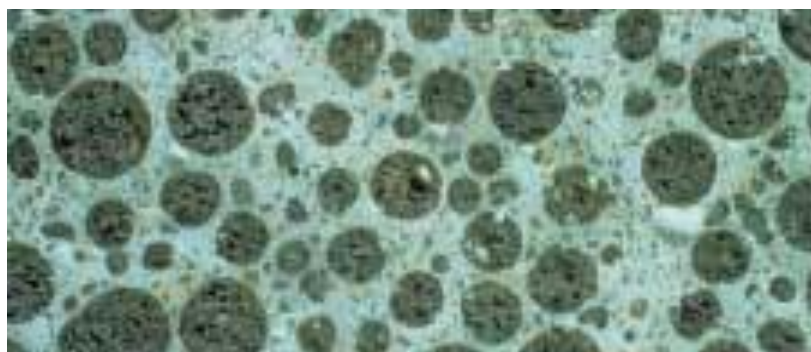
4.1 Liaporový (keramzitový) beton

Liaporový beton je cementový beton, u kterého je jeho hlavní složka, tedy hutné kamenivo, nahrazeno Liaporem (keramzitem). Horní hranice objemové hmotnosti lehkých betonů obecně je dána kritériem norem, tedy na 2000 kg.m^{-3} . Liaporový beton je rozdělen podle struktury na hutné lehké betony a na mezerovité lehké betony.

U hutných lehkých betonů z Liaporu je možné dosáhnout pevností od 5 do 60 N.mm⁻² a při použití speciálních přísad a postupů až 100 N.mm⁻². Pevnost hutného lehkého betonu z Liaporu závisí přímo úměrně na jeho objemové hmotnosti, ale i na použitém druhu Liaporu, na celkové křivce zrnitosti kameniva, na složení směsi atd., což umožní při stejné objemové hmotnosti dosáhnout různých pevností. Lze se dostat na hodnotu objemové hmotnosti až 800 kg.m⁻³. Při kombinaci Liaporu s Liaverem může být dolní hranice ještě nižší. Rozhodujícím požadavkem u lehkých mezerovitých betonů není pevnost, ale spíše nízká objemová hmotnost a s ní spojené dobré tepelně-izolační vlastnosti. v těchto betonech je podstatně méně drobného kameniva a pojiva než v hutném lehkém betonu. Pokud zůstane prostor mezi zrny Liaporu nevyplněný maltou, hovoříme o betonu s přirozenou mezerovitou strukturou. Pokud je prostor mezi zrny zaplněn maltou, do které byly uměle vneseny vzduchové póry pomocí napěňovací přísady, hovoříme o lehkých betonech s napěňenou strukturou. Mezerovité lehké betony z Liaporu mohou být vyráběny v pevnostech od 2 do 15 N.mm⁻² a objemových hmotnostech od 550 kg.m⁻³. [7][18]



Obrázek 4 Mezerovitá struktura [18]



Obrázek 5 Hutná struktura [18]

4.2 Polystyrenový beton

Polystyrenový beton obsahuje polystyren ve formě expandovaných granulí, které se přimíchávají do cementového betonu nebo mléka, tím jej vylehčují a zajišťují snížení součinitele tepelné vodivosti λ . Vzhledem k velmi nízké objemové hmotnosti polystyrenových granulí a také strukturální charakteristice této směsi, je obsah polystyrenu rozhodujícím faktorem celkové objemové hmotnosti a také tepelné vodivosti. Polystyrenbeton není určen jako nosný prvek, ale spíše jako výplňový, tepelně izolační prvek. Polystyrenové betony s objemovými hmotnostmi 850 kg.m^{-3} a více, lze vyrábět v běžných betonárnách a jsou čerpatelné pumpami na beton, přičemž nedochází k segregaci. Betony s nižší objemovou hmotností je třeba vyrábět pomocí speciálního zařízení, nejlépe přímo na místě zpracování.



Obrázek 6 Polystyrenbeton [20]

4.3 Beton z expandovaného perlitu

Perlitový beton vyniká nízkou hmotností, zvukovou pohltivostí, požární odolností a tepelně-izolační schopností. Podle místa použití lze přizpůsobit množství pojiva a vytvořit tak beton s potřebnou pevností v tlaku. Pro volbu typu a množství perlitu je rozhodující požadavek na tepelně-izolační vlastnosti podkladní vrstvy a její pevnost či únosnost. Perlit musí být při dávkování do míchačky předem máčen ve vodě, až je zcela nasycen. Jedná se o křehký materiál, proto se při prodlužování míchání mělní a ztrácí svou původní zrnitou skladbu. Použitím perlitu se může hodnota součinitele tepelné vodivosti λ dostat až na $0,45 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

4.4 Pórobeton

Pórobetony jsou tvořeny jemnozrnnou maltou, která je prostoupená velkým množstvím drobných pórů. Tím je dána jejich nízká objemová hmotnost a také nízká hodnota součinitele tepelné vodivosti. Podle velikosti pórů rozdělujeme tyto látky na makropority, které jsou charakteristické svými póry o průměru několika desetin mm nebo nanejvýš několika mm. Látky s póry menšími než 0,1 μm se nazývají mikropority. Makropórovité betony se pak dále dělí podle toho, jakým způsobem byly póry v maltovinné hmotě vytvořeny před jejím zatuhnutím. Póry mohou vznikat chemickou cestou, tj. uvolňováním bublinek různých plynů v pórobetonové směsi chemickou reakcí přidávaných látek, zejména mezi cementem a přidanou příměsí. Dále také póry vznikají mechanickým zaváděním do betonové směsi vhodných pěnidel, které v ní pomáhají vytvářet bublinky vzduchu. Podle tohoto hlediska dělíme makropórovité betony na plynobetony a pěnobetony. [18]

5. Vybrané komponenty pro potěry

5.1 Plniva

V silikátových kompozitech tvoří plnivo kostru materiálu. Při výběru plniva uvažujeme především jeho fyzikálně-mechanické vlastnosti vzhledem k jeho užití. Nemalou roli však hraje i chemické složení ovlivňující vlastnosti výsledné hmoty. Plnivo do betonu musí vyhovovat normě ČSN EN 12620 „Plnivo do betonu“. Lehčené plnivo musí vyhovovat požadavkům normy ČSN EN 13055-1 „Pórovité plnivo - Část 1: Pórovité plnivo do betonu, malty a injektážní malty“.

5.1.1 Expandovaná plniva z přírodních surovin

Přírodní suroviny schopné expanze za zvýšené teploty je možné přetvářet na zrnitá plniva nízkých objemových hmotností.

5.1.1.1 Expandované slídy

Expandovaný vermikulit vzniká procesem exfoliace za zvýšené teploty. Tepelným přechodem mezivrstvé krystalické vody za teploty 1100 °C na vodní páru dochází v jílovém minerálu k lokálním expanzím a následnému oddělování okolních laminárních vrstev. [32]

Běžově zbarvený expandovaný vermikulit dosahuje sypné hmotnosti od 80 do 130 kg.m⁻³ dle požadované frakce. Bod tání vermikulitu je určen na 1250 °C, součinitel tepelné vodivosti na 0,065 W.m⁻¹.K⁻¹ a hodnota pH na 8,5 až 10. [32]

Ve stavebnictví nalézá expandovaný vermikulit využití pro lehčené a tepelně izolační malty a betony o objemové hmotnosti od 350 kg.m⁻³. [13]

5.1.1.2 *Expandovaná vulkanická skla*

Kyselé vulkanické sklo perlit obsahuje 2 - 5 % vázané vody, kterou je možné zahřátím za teplot 900 °C až 1300 °C uvolnit za přítomného nadýmání suroviny a současně zvětšení objemu 5 až 10 krát. Expandovaný amorfnní křemičitan hlinitý má teplotu tání 980 °C až 1260 °C a je využitelný do teplot 900 °C. Šedobílé plnivo vykazuje vynikající sorpční vlastnosti, hodnota pH je udávána na 7,1. [32]

5.1.1.3 *Expandovaný křemičitý písek*

Porézní materiál SioPor je vyráběn expanzí speciálního druhu křemičitého písku. Na trhu dostupné plnivo vykazuje sypnou hmotnost 60 až 80 kg.m⁻³ a součinitel tepelné vodivosti 0,042 až 0,044 W.m⁻¹.K⁻¹. Beton připravený z napěněného plniva SioPor dosahuje objemové hmotnosti 220 až 600 kg.m⁻³ o součiniteli tepelné vodivosti 0,08 až 0,13 W.m⁻¹.K⁻¹.

S využitím cementového pojiva pevnostní třídy 32,5 N.mm⁻² v množství 300 kg.m⁻³ dosahuje beton připravený ze SioPoru pevnosti v tlaku do 1,5 N.mm⁻². Bod měknutí materiálu SioPor je udáván na 700 °C.[34]

5.1.1.4 *Expandované jíly*

Lehčené plnivo Liapor z expandovaných jílu je na trhu dostupné v podobě oválných až kulovitých zrn, případně drcené. Frakce kulových zrn se pohybují v rozmezí 0 až 16 mm, přičemž sypná hmotnost frakce 0 - 4 mm se pohybuje v rozmezí 450 až 625 kg.m⁻³. Liapor je plnivo nasákavé, nasákavost určená hmotnostně po 30 minutách je 3 - 4 %. Součinitel tepelné vodivosti frakce 0 - 4 mm činí 0,11 W.m⁻¹.K⁻¹. Plnivo je využitelné do teplot 1050 °C.[35]

5.1.2 **Druhotné suroviny**

Moderní vyspělá industrializovaná společnost se stále ve větší míře potýká s obecným problémem odpadů, zejména při nakládání s nimi. Komunální i průmyslové odpady jsou produkovány v čím dál větších množstvích a vedle zásadní

otázky celkového objemu odpadů narůstá vážný problém jejich vlivu na životní prostředí. Odstraňování odpadů není jednoduchou záležitostí a je předmětem systémového řešení v souvislosti s koncepcí jednotlivých oblastí či regionů. [73]

Někteří autoři rozvádějí myšlenku použití odpadních materiálů dále, než je běžné a obvyklé. Např. Aslam et al. (2016) ukazuje na možnosti využití odpadů ze spalování zbytků palmy olejně jako lehkého kameniva. Belhadj et al. (2014) se ubírá podobným směrem, kdy uvažuje použití ječmenné slámy společně s dřevěnými hoblinami do lehkého betonu. Tuto kompozici pojmenovává jako „eko-beton“ a výsledky jeho výzkumu jsou zatím spíše pozitivní. Celá řada autorů se pak zabývá možnostmi využití nejrůznějších organických odpadů jako např. odpadního ethyl-vinyl-acetátu (EVA) (Dulsang et al (2016), Lima et al. (2010)), Lv et al. (2015) se zabývá využitím odpadního gumového granulátu také do lehčeného betonu, Saikia et al. (2014) uvažuje jako plnivo do lehčeného betonu také mleté PET lahve. Makul et al. (2016) přidává do pěnobetonu odpad z filtrů při zpracování cukrové třtiny. [54][55][56][57][58][59][60]

5.1.2.1 Průmyslové odpady

Průmyslová výroba vytváří výrobky, odpady a meziprodukty. Vzniklé odpady se zpracovávají buď přímo vrácením do výroby, nebo se vracejí do výroby po vytrídění, popřípadě se po vytrídění prodávají jako druhotné suroviny. Průmyslové odpady se pro další nakládání dále upravují některými specifickými metodami. [73]

Tabulka 2 Příklady odpadů vhodných pro použití při vývoji podlah

Odpadní plniva	
Odpad z praní drceného vápence	Odpadní křemelina
Odpadní propírka Želešice	Odpadní písek
Brusné a řezné kaly	Odpadní lupek
Popílek Dětmárovice	Ocelářenská struska
Popílek Hodonín	Odpad z pěnového skla Recifa
Plniva vyrobená z odpadních látek	
Rugen	Refaglass
Liaver	Geocell
Poraver	Mikrosféry - plavený popílek

5.1.3 Plniva z odpadních surovin

Odpadní suroviny mohou nalézt využití v podobě lehčených i nelehčených plniv do stavebních kompozitů. U lehčených plniv organického původu je nutné brát zřetel na požární bezpečnost.

5.1.3.1 *Abrazivní materiál AMT*

V průběhu spalování černouhelného prachu ve výtavných ohništích elektráren vzniká odpadní struska. Po prudkém ochlazení strusky vodou a následném drcení a třídění získáváme sklovitý materiál s obsahem volných bublinek po plynech. Z uhelné pecní strusky elektrárny Třebovice je vyráběn zelenohnědý abrazivní materiál o tvrdosti 6 až 8. Mineralogicky je složen z 99 % oxidického silikátového skla, přičemž SiO_2 ve volné formě je obsaženo pouze stopově. Abrazivní materiál AMT dosahuje sypané hmotnosti 1320 kg.m^{-3} a je dostupný v zrnitosti 0,2 až 1,6 mm vhodný pro aplikace do cementových směsí.

5.1.3.2 *Odpadní lupek*

Lupek vznikající jako úletový materiál při úpravě a výpalu lupků a kaolinů. Při výpalu lupku v rotační peci jsou hrubé úlety zachycovány cyklóny a jemné úlety zachycované tkaninovými filtry. Firma České lupkové závody a.s. dodávají lupky v základních zrnitostech 0-30/5-30/3-5/0-3 mm, tak i jemně tříděné na zrnění 0.1/0.2/0-0.5/0.5-1/0-1/1-3/3-5 mm.

Z mineralogického hlediska se jedná především o mullit, v menší míře pak o cristobalit a křemen.

5.1.4 Lehčená plniva vyráběná z odpadních surovin

Nejen přírodní, ale i odpadní suroviny je možné za specifických podmínek přetvořit na lehčené zrnité hmoty vyhovující požadavkům na plnivo do betonu.

5.1.4.1 *Kamenivo vyráběné „studenou cestou“ - Rugen*

Pro kamenivo Rugen je specifická nízká energetická náročnost výroby. Základní surovinou pro výrobu kameniva Rugen jsou jemné anorganické odpadní materiály (JAOM) vznikajících v energetickém průmyslu a při zpracování stavebních surovin. Surovinovou vsázkou bývá obvykle 60 až 100 % JAOM. Nedílnou součástí směsi pro výrobu kameniva Rugen jsou mimo vedlejší energetické produkty (VEP) také vzdušná a hydraulická pojiva (vápenný hydrát a cementy), příměsi, přísady

a voda. Dle vstupních surovin lze u kameniva Rugen dosáhnout sypané hmotnosti 500 až 1200 kg.m⁻³ při pevnostech 0,5 až 3,5 N.mm⁻². Dodáváno je jak ve formě kulových, tak ve formě nepravidelných zrn. [13]

Kamenivo Rugen RU vyhovuje ČSN EN 13055-1: „Pórovité kamenivo – Část 1: Pórovité plnivo do betonu, malty a injektážní malty.“ [15]

5.1.4.2 Kamenivo z expandovaného skelného odpadu - Liaver

Pod obchodní značkou Liaver nalézáme anorganické tepelně expandované sklo založené na obalovém recyklovaném skle. Expanze probíhá za teplot 750 až 900 °C za vzniku uzavřených lehčených zrn světle šedé až šedé barvy. Hodnota pH činí 7, sypaná hmotnost 200 až 500 kg.m⁻³ a součinitel tepelné vodivosti činí u kameniva Liaver 0,07 W.m⁻¹.K⁻¹. [35]

5.1.4.3 Granulát z expandovaného tříděného skelného odpadu Poraver

Poraver je krémově bílé porézní plnivo hodnoty pH 9 až 12 s pevností udávanou na 0,5 až 6,5 N.mm⁻². Vyrábí se z recyklovaného skla a zejména ze střepů nevyužitelných pro výrobu láhví. Poraver dosahuje vysoké tepelné odolnosti 700 °C.

Lehčené plnivo vyrábí firma Dennert Poraver GmbH v různé zrnitosti od 0,04 mm do 16 mm. Objemová hmotnost Poraveru se dle zrnitosti pohybuje v rozmezí 140 až 400 kg.m⁻³. Sypaná hmotnost Poraveru je v rozmezí 410 až 850 kg.m⁻³.

5.1.4.4 Plnivo z expandovaného skelného odpadu a skelná moučka - Refaglass

Plnivo Refaglass vyrábí společnost RECIFA a.s. z odpadních střepů obalového skla. Expanzí recyklovaného skla vzniká řada uzavřených buněk zaručujících nulovou nasákavost plniva a zároveň nízkou objemovou hmotnost a vysoké tepelně izolační vlastnosti za přijatelných pevnostních charakteristik. Sypaná hmotnost šedě zbarveného plniva Refaglass činí 150 až 180 kg.m⁻³. Dodáván je v zrnitosti 30 až 60 mm o pevnostech 0,64 až 1,3 N.mm⁻². Součinitel tepelné vodivosti je 0,075 W.m⁻¹.K⁻¹. Vysoká teplotní odolnost je dána bodem měknutí nad 700 °C. v současnosti slouží plnivo Refaglass především jako zásypový lehčený materiál s výbornými tepelně izolačními vlastnostmi. Jeho možné úpravy a celkovou využitelnost v podobě plniva v cementových kompozitech je nutné prokázat, a to především vzhledem ke vzniku alkalicko-křemičité reakce. [36]

Lze využít i skelné moučky Refaglass, a to především s ohledem na možné pucolánové vlastnosti skelného filleru. Během výroby jsou různobarevné střepy z obalového skla semlety v kulovém mlýnu na frakci pod 90 μm a následně převedeny na rotační síto a odstředěním zbaveny nečistot. Samotná moučka je mezistupněm při výrobě pěnového skla. [36][16]

5.1.4.5 Plnivo z expandovaného skelného odpadu - Geocell

Dalším výrazným produktem vyráběným z odpadního skla a zároveň dostupným na českém trhu je sklopěnový recyklát Geocell. Jedná se o nenasákavý, vodě propustný materiál. Uzavřené buňky materiálu Geocell byly vytvořeny úmyslným pnutím. Sklopěnový recyklát dosahuje objemové hmotnosti 150 kg.m^{-3} a dodáván je v zrnitosti 10 až 60 mm. Součinitel tepelné vodivosti je udáván na $0,08 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Plnivo Geocell je dle technického listu dlouhodobě odolné proti alkáliím. [37]

5.1.4.6 Lehčená struska

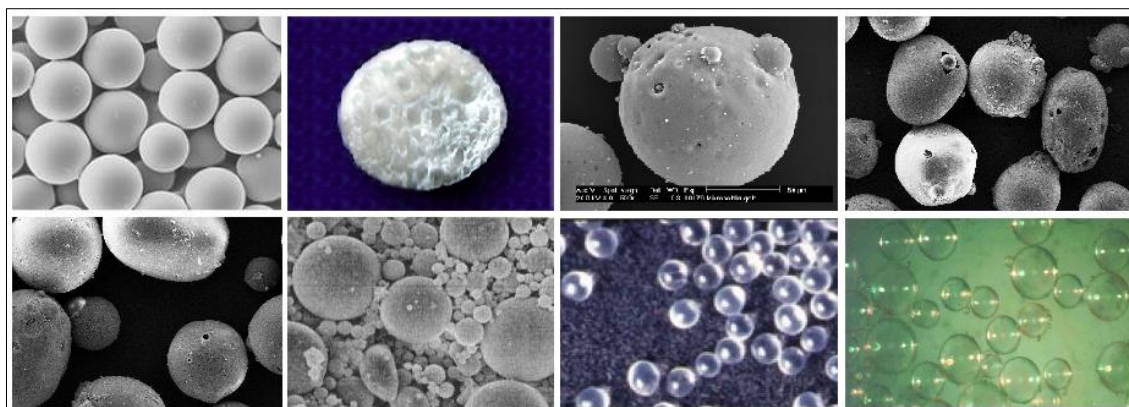
Pro zpěněnou strusku vyráběnou z kyselé struskové suroviny je typická mikropórovitost, rozhodujícím faktorem pro použití v potěrech a betonech je především velikost otevřených pórů. Velké otevřené póry odebírají směsi cement. Tímto způsobem se i přes jejich sníženou objemovou hmotnost zvyšuje výsledná objemová hmotnost materiálu (otevřená pórovitost se zaplní cementovým tmelem). Zároveň se tak snižuje i pevnost materiálu. [18]

5.1.4.7 Mikrosféry

Plavený popílek je separovaný křemičitý materiál kulového tvaru o nízké objemové hmotnosti s uzavřenou pórovitostí či zcela dutý. Na trhu jsou plavené popílký uváděny pod názvem mikrosféry, které dále dělíme na cenosféry a plerosféry. Cenosféry nalézají využití v podobě vylehčujícího a často i multifunkčního plniva různých zpracovatelských odvětvích. Hlavními kvalitativními přínosy pro použití cenosfér ve stavitelství jsou jejich hmotnostní, tepelně i zvukově izolační vlastnosti a dále zvýšení žáruvzdornosti prvku. Plavený popílek je nízkoreaktivní a lze jej považovat za inertní surovinu vzhledem k alkalicko-křemičité reakci. Z mineralogického hlediska se jedná o amorfni oxid křemičitý vykazující pucolánovou aktivitu. [38][40]

Měrná hmotnost cenosfér se pohybuje v rozmezí $450 - 750 \text{ kg.m}^{-3}$, sypaná hmotnost volně sypaná v rozmezí $350 - 450 \text{ kg.m}^{-3}$. [40]

V ČR operuje na trhu s plaveným popílkem firma Jet Company, s.r.o. s výrobkem Cenoféry, jedná se o základní plavený popílek. v zahraničí se setkáváme s plaveným popílkem Fillite firmy Omya CZ s.r.o. i s různými jinými dodavateli cenosfér. Významným dodavatelem je firma Omega Minerals vystupující na trhu s pestrou škálou mikrosfér (obr. 7). Produkt E-Spheres SL nalézá mnoha využití a má vysokou teplotní i mechanickou stabilitu. Dodáván je čistě bílý, částečně průhledný. Výrobek Omega Bubbles má oproti ostatním mnohobuněčnou strukturu a značnou velikost zrn $0,04$ až 4 mm . Cenově přijatelný je lehčený filler Isospheres velikosti zrna 110 až $310 \text{ }\mu\text{m}$ a funkční filler Omega-Sil velikosti zrna 1 až $90 \text{ }\mu\text{m}$. v nabídce jsou multifunkční fillery Q-Cel a Sphericel či lehčené fillery Omega Spheres s velikostí zrna 60 až $550 \text{ }\mu\text{m}$ a Omega Spheres W s velikostí zrna 60 až $230 \text{ }\mu\text{m}$. Tržní cena mikrosfér se pohybuje v rozmezí $11\,000$ až $38\,000 \text{ Kč.t}^{-1}$. [38][39][40]



Obrázek 7 Mikrosféry firmy Omega (postupně zleva doprava: E-Spheres SL, Omega Bubbles, IsoSpheres, Omega Spheres, Omega Spheres W, Omega-Sil, Q-Cel, Sphericel; [40])

5.2 Pojiva a příměsi

Pojiva ve stavebních kompozitech s cementovou matricí tvoří složku mezi jednotlivými zrny plniva, přenášející na zrna vyvolaná vnější napětí. v případně horší zrnitosti vstupu se pojiva podílí na vyplnění mezer v kompozitu. Cementovým pojivem rozumíme pojivo s vysokým obsahem slínekových minerálů, případně jiných složek schopných tvořit obdobné sloučeniny.

Příměsi v silikátových kompozitech zlepšují vlastnosti během zpracování i vlastnosti konečné. S rostoucím měrným povrchem dochází ke zvyšování aktivity jak pucolánových, tak latentně hydraulických příměsí, ovšem na úkor energetické náročnosti zdobňovacích procesů. S vyšším měrným povrchem je však nutné

počítat i s vyšší spotřebou záměsové vody, a to vzhledem k přístupu hydratační vody k hydrataci schopným složkám směsi.

Obecně příměsi zlepšují reologické vlastnosti směsi, a to především její zpracovatelnost a celkovou soudržnost. Nemalý vliv mají příměsi i na segregaci částic během zpracování a zároveň na postupný bleeding. v konečném stádiu fungují aktivní příměsi jako utěsňující složky, při vyšších množstvích je však nutné počítat i s větším smrštěním během zrání betonu.

5.2.1 Cement

Podle ČSN EN 197-1 musí cement označovaný jako cement CEM splňovat všechny požadavky pro použití pro výrobu betonu nebo malt. [49] Portlandský cement (PC) je chemicky tvořen kombinací surovin obsahujících oxid uhličitý CaO , oxid křemičitý SiO_2 , oxid hlinitý Al_2O_3 a oxid železitý Fe_2O_3 , výpalem a mletím této směsi, tj. portlandského slínku vzniká výsledný produkt. [43]

5.2.1.1 Druhy cementů a jejich vlastnosti

Volba druhu cementu závisí na účelu konstrukce, teplotě prostředí při výrobě a zpracování betonu, vývoji hydratačního tepla, požadované rychlosti tuhnutí a tvrdnutí a expozičním prostředí [51], které bude působit na stavební konstrukci či betonový prvek. Nejběžnějším hydraulickým cementem používaným v konstrukcích je v současnosti PC označovaný CEM I. [43] Všechny další cementy, které jsou dostupné, obsahují kromě základní složky portlandského slínku další doplňující složky. Typ cementu závisí na minerální příměsi, která je k portlandskému cementu přidávána. [44] Nejčastěji jsou přidávány jemnozrnné minerální příměsi ve formě elektrárenských popílků, vysokopeční strusky, křemičité úlety, přírodní pucolány a vápenec. Takovéto typy cementů jsou obecně označovány jako cementy směsné a jsou děleny podle procentuálního zastoupení jednotlivých složek. Cementy pro obecné použití se rozdělují na následujících pět základních druhů:

- CEM I Portlandský cement
- CEM II Portlandský směsný cement
- CEM III Vysokopeční cement
- CEM IV Pucolánový cement
- CEM V Směsný cement

Cementová zrna mají zpravidla velikost 0,005 až 0,1 mm při různé zrnitosti. [46] Specifická hmotnost PC se pohybuje v rozmezí 3 000 až 3 300 kg/m³. Tuto hodnotu v případě směsných cementů ovlivňuje druh a množství použité jemnozrné příměsi (elektrárenský popílek, vysokopeční struska, křemičité úlety, vápenec, aj.) a pohybuje se mezi 2 700 až 3 000 kg.m⁻³. Sytná hmotnost cementu se pohybuje v rozmezí od 900 do 1 400 kg.m⁻³ a v setřeseném stavu v rozmezí od 1 400 do 1 900 kg.m⁻³. Množství uvolněného hydratačního tepla závisí na mineralogickém složení slínku, jemnosti mletí, obsahu přísad, příměsí apod. [42]

Cementy jsou vyráběny v pevnostních třídách 32,5, 42,5, 52,5 v modifikaci N a R, resp. normálně a rychle tuhnoucí cement. Portlandský cement CEM I je vyráběn v pevnostní třídě 42,5 N, R a 52,5 N, R. Volbu třídy cementu ovlivňuje požadavek na konečnou pevnost betonu nebo požadavek z hlediska trvanlivosti konstrukce. [51] Současná evropská harmonizovaná norma ČSN EN 197-1 poskytuje možnost výroby 27 druhů cementů, pro výrobu betonů a malt je však používáno pouze omezené množství. Stávající nejběžněji používané typy cementů jsou rozšířeny o využívání portlandských cementů směsných, typu CEM II/A-M, B-M (S-V-LL) a o portlandské cementy s vápencem CEM II/A-L, LL. [52] Výroba cementů s více hlavními složkami nabývá mimořádného významu především z důvodu snižování emisí CO₂.

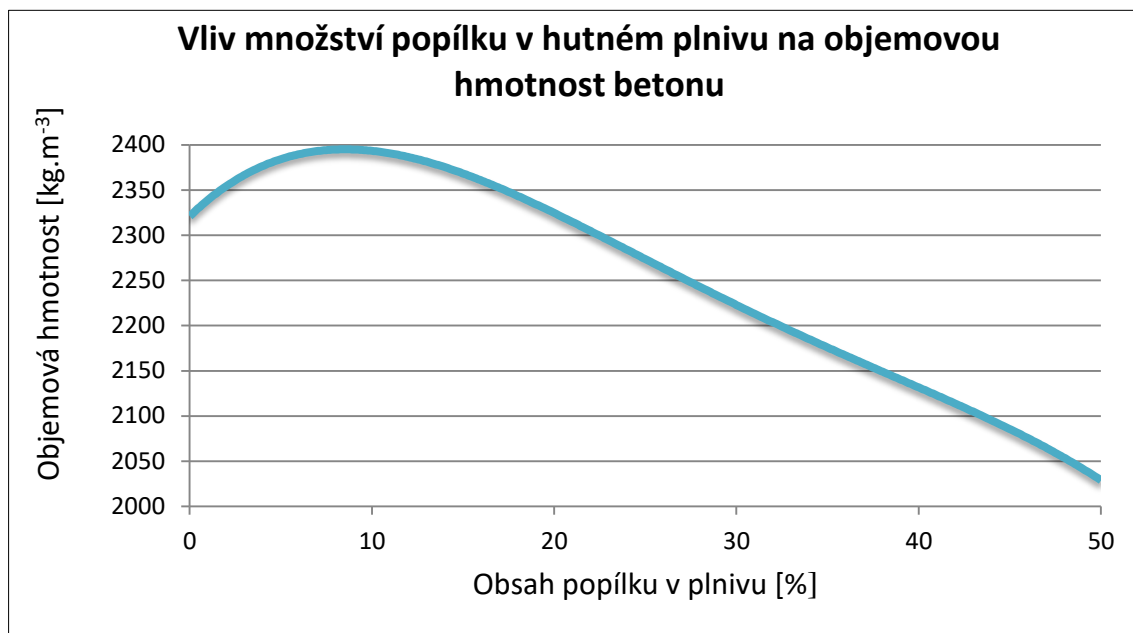
5.2.2 Popílek

Při spalování tuhých paliv v jemně mletém stavu vzniká mimo škváru i odpad ve formě plných či dutých kuliček křemičitého skla o nízké objemové hmotnosti. Jedná se o vedlejší energetický produkt. Kulovitá zrna o průměru 0,001 až 0,1 mm a specifického povrchu dle Blaina 200 až 300 m².kg⁻¹ vznikají ztuhnutím taveniny během spalovacích procesů. Rozeznáváme několik druhů popílků. Jde především o popílků vzniklé klasickým způsobem z vysokoteplotního spalování paliv a o popílků ze spalování fluidního.

Využití popílku jako náhrady silikátové pojivové složky je možná pouze do 50 % z hmotnosti slínku, dále se již popílek uplatňuje ve formě mikroplniva. Maximální množství aktivního popílku je dáno hmotnostním podílem popílku a cementu rovným či nižším než 0,33. v ČR se setkáváme především s hnědouhelným popílkem nepravidelného tvaru zrn a spotřebou 18 až 20 % vápenatého iniciátoru. Překročení 20% hranice přídatku vápenatého iniciátoru

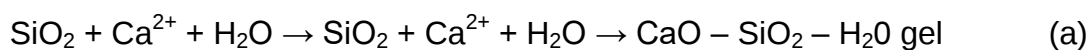
zvyšuje nebezpečí rozpadu zatvrdlého kompozitu. Hlavní výhodou v menší míře vznikajícího černouhelného popílku je mimo specifické složení také granulometrie kulových zrn.

Popílek částečně snižuje objemovou hmotnost hmoty (graf 1) a v prvních fázích zrání zpomaluje tvrdnutí a tuhnutí cementové směsi. [18]



Graf 1 Vliv množství popílku v hutném plnivu na objemovou hmotnost betonu [17]

Vzhledem k mineralogickému složení vykazují popeloviny pucolanitu, tj. schopnost amorfního oxidu křemičitého vytvářet reakcí s vodou za přítomnosti vápníku z přítomného hydroxidu vápenatého hydratované křemičitany vápenaté. Pucolanita popílku je závislá především na měrném povrchu suroviny a zároveň na vysokém obsahu amorfního oxidu křemičitého (rovnice a).



Technogenní popílkový pucolán se v silikátových kompozitech reakčně projevuje až 28. dnem zrání, přičemž zvyšování pevnosti probíhá nadále i po 90 dnech zrání. Objemová hmotnost volně sypaného popílku se pohybuje v rozmezí 550 až 900 kg.m⁻³. Z mineralogického hlediska se jedná především o křemen a mullit, v menším obsahu jiné minerály a nespálené složky.

5.2.2.1 Vysokoteplotní popílek

Vysokoteplotní spalování probíhá za teplot 1200 až 1700 °C, při něm vzniká popílek s vysokým obsahem oxidu křemičitého a mullitu, přičemž obsah sklovité fáze

neklesá pod 50 %. Rozeznáváme dva typy popílku z vysokoteplotního spalování, a to na základě součtu oxidů křemíku, hliníku a železa, tj. zbytkovým obsahem oxidu vápníku. Suma kvalitativních oxidů hodnot 50 % je typická pro popílky typu C vzniklé spalováním méně kvalitního hnědého uhlí a především lignitu. Popílek typu C obsahuje až 20 % volného oxidu vápníku. Naopak vysokoteplotním spalováním kvalitního černého uhlí, případně antracitu, vzniká popílek typu F s obsahem kvalitativních oxidů 70 % a s obsahem volného oxidu vápníku do 3 %. [21]

5.2.2.2 Fluidní popílek

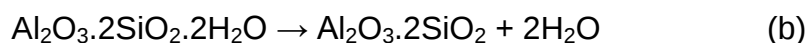
Fluidní popílek vzniká spalováním méně kvalitních paliv společně s vápencem, případně dolomitem při teplotě 850 °C v cirkulující vrstvě, kde se přítomné oxidy síry váží na přítomný vápník za vzniku bezvodého síranu vápenatého, čímž dochází k odsiřování vzniklých spalin. Popílek z fluidního spalování tudíž obsahuje mimo křemičité složky a zbytky spalin i anhydrit, bezvodý síran vápenatý, volný oxid vápníku, případně uhličitany vápenaté, avšak neobsahuje mullit. Rozeznáváme dva základní druhy fluidního popílku, a to popílek ložový a popílek z odlučovačů. Popílek z odlučovačů lze dále dělit na hrubý popílek z mechanických odlučovačů (cyklóny) o sypné hmotnosti 900 až 1200 kg.m⁻³ a jemný popílek z elektrofiltrů, případně filtrů tkaninových o objemové hmotnosti 800 kg.m⁻³. Fluidní popílek s až 20% obsahem siřičitanů, až 15% obsahem volného CaO a až 15% ztrátou žíháním není vhodný pro výrobu silikátových směsí vzhledem k vysokým obsahům cizorodých látek. [18][21]

5.2.3 Mikromletý vápenec

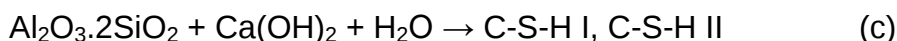
Drcením a mletím vápence vzniká vápenné mikroplnivo urychlující hydrataci trikalciumsilikátu. Urychlením hydratace trikalciumsilikátu (alitu) lze dosáhnout rychlejšího vývoje počátečních pevností betonu. Reakce je závislá především na měrném povrchu. Obecný požadavek uvádí min. 70% propad mikromletého vápence sítem 0,063 mm při zkoušce zrnitosti.[12]

5.2.4 Metakaolin

Metakaolin je hlavním výrobním produktem. Vysoce reaktivní metakaolinický pucolán se vyrábí kalcinací kaolinitických jílu při teplotách 600 až 900 °C (rovnice b).



Oxidy hlinité a křemičité jsou doprovázeny dalšími oxidy, a to oxidem železitým, oxidem titaničitým, alkáliemi a volnými oxidy vápníku a hořčíku. Metakaolin lze využít v podobě minerální přísady do betonů a malt, částečně může nahradit cement v rozmezí 5 až 15 % a využití nalézá i v podobě aktivní příměsi do betonu, přičemž lze aplikovat i hrubší frakce metakaolinu v rozmezí 20 až 25 % (rovnice c).



Měrný povrch se pohybuje v rozmezí 2 000 až 20 000 m².kg⁻¹. Metakaolin mírně snižuje počátek a dobu tuhnutí a ve vybraných aplikacích lze metakaolinem nahradit mikrosiliku. [12][23]

Hlavními dodavateli metakaolinu v ČR jsou Sedlecký kaolin a.s. v Božičanech u Karlových Varů, mostecký Keramost, a.s. a České lupkové závody, a.s. v Novém Strašecím u Prahy. České lupkové závody, a.s. dále zpracovávají z úlů při výrobě kaolinitu odpadní odprašky.

5.2.5 Mikrosilika

Křemičité úlky (mikrosilika) jsou vedlejším výrobním produktem při výrobě křemíku a jeho slitin. S obsahem 80 až 98 % amorfního oxidu křemičitého v podobě dokonale kulovitých zrn průměru 0,1 až 0,2 μm vykazuje výborné pucolánové vlastnosti. Předností je především velký měrný povrch 15 000 až 30 000 m².kg⁻¹. Plná reakce se projevuje do 18% obsahu křemičitých úlů. [18]

Na trhu jsou dostupné křemičité úlky pod obchodními názvy Sioxid, Fesil Silica, Microsilica či Micropoz. Mikrosilika vnáší nemalé klady do výroby silikátových kompozit, její nevýhodou je však vysoká pořizovací cena 20 000 Kč.t⁻¹ a více, což tuto surovinu vytlačuje z pozice odpadních látek a mikrosilika se stává přirozeným výrobním produktem.

5.2.6 Struska

Struska a především vysokopecní granulovaná struska, jakožto vedlejší produkt hutní výroby, je jediným známým zástupcem latentně hydraulických látek. Skryté hydraulické schopnosti se plně projevují přidáním budící látky. Základními budiči jsou cement, vápno, hydroxid sodný a některé siřičitany. Z chemického hlediska vzniká hydro-kalcium-silikátová báze. Reaktivita strusky roste s modulem aktivity a modulem bazicity. Modul aktivity je definován jako molární poměr oxidu hlinitého a oxidu křemičitého (vztah 1).

$$M_a = \frac{Al_2O_3}{SiO_2} \quad (1)$$

Vhodnost využití strusky jako lehčeného plniva je dána vlastní bazicitou strusky. Modul bazicity nám právě určuje poměr zásaditých oxidů obsažených ve strusce vůči oxidům kyselým (vztah 2).

$$M_z = \frac{CaO+MgO}{SiO_2+Al_2O_3} \quad (2)$$

Zásaditá struska je vhodná k výrobě zpěněné strusky. Zásaditá struska v podobě granulátu je vhodná k výrobě směsného cementu.

Z mineralogického hlediska se jedná především o melilith (gehlenit a ackermanit), dále larnit, šannonit, mervinit aj. Struska může podléhat samovolnému rozpadu. Jedná se především o rozpad silikátový a rozpad železomanganitý.

V čerstvém betonu zvyšuje struska zpracovatelnost, zároveň je ale zvyšováno riziko rozměšování. Dávkování probíhá v rozmezí 100 až 300 kg.m⁻³ směsi.

5.3 Databáze surovin

Protože byla disertační práce řešena hlavně v rámci projektu zabývajícím se vývojem nových lehčených stavebních materiálů, kde právě část týkající se podlah a odpadů byla základním kamenem celého projektu, byla vytvořena databáze vhodných odpadních plniv a dalších surovin, které byly dále používány, jak v rámci etapy, týkající se podlah, tak i v dalších částech projektu. V tab. 3 je vidět přehled všech uvažovaných materiálů. v první fázi se uvažovalo i o použití odpadů na bázi organických plniv (odpad z výroby gumy atd.), protože mnoho autorů se již touto problematikou zabývalo, např. Dulsang, Lima, Lv a další. [56][57][58][59]

Nicméně v dalším postupu bylo od toho upuštěno a zmíněné materiály byly použity pro návrh jiných hmot. V příloze je pak uvedeno několik příkladů, jak vypadaly odpadové a surovinové karty, které byly součástí databáze použitelných plniv.

Tabulka 3 Databáze surovin

Materiál		Vzdálenost od závodu [km]	Dodavatel
Popílek		155	ČEZ, a.s.(Cz, Dětmorovice)
Popílek		175	ČEZ, a.s.(Cz, Hodonín)
Mletá ocelářská struska		140	Kotouč a.s.(Cz, Štramberk)
Mletá ocelářská struska		155	Cemex CZ.(Cz, Dětmorovice)
Odpadní křemelina		395	LB MINERALS, s.r.o.(Cz, Borovany)
Odpadní vlákna		50	Ecopak, Melecky, Olpa(Cz)
Odpadní písek		37	Gorazde kruszywa (Pl, Wojczyce)
Odpad z hydrocyklonu		14	Omya a.s. (CZ, Vápenná)
Odpad z hydrocyklonu		14	Omya a.s. (Cz, Pomezí)
Odpad z drcení		198	Lomy.s.r.o, Brno (Cz, Želešice)
Odpad z drcení		179	Čmor. Štěrkovny, a.s.,(Cz,Mokrá)
Brusné kaly	Odpadní plniva a aditiva	8	Top Teramo s.r.o.,(Cz,Vápenná)
Brusné kaly Cidemat		175	Cidemat s.r.o.,(Cz Hranice)
Kaly Cembrit		60	Cembrit a.s.,(Cz Šumperk)
Slévárenský písek		185	Uxa, s.r.o. Brno, (Cz Brno)
Mica odpadní plnivo		336	EIT, a.s. Tábor (Cz,Tábor)
Energosádovec		185	ČEZ, a.s.(Cz, Chvaletice)
Odpadní antuka I		226	Maška Svémyslice, (CZ Zeleneč)
Odpadní antuka II		226	Maška Svémyslice, (CZ Zeleneč)
Ocelářská struska		179	TŽ a.s., Třinec (Cz Třinec)
Ocelářská struska		135	Mital steel a.s., (Cz Ostrava)
Popílek			ČEZ, a.s.(Cz, Chvaletice)
Ložový popílek		215	ČEZ, a.s.(Cz, Hodonín)
Fillite SG		11	Omya a.s. (CZ, Vápenná)
Rugen		365	Ekostat, a.s. (CZ, Horažďovice)
Refaglass	Plniva z odpadních materiálů	56	Dektrade, a.s. (CZ, Šumperk)
Geocell		153	Ecotechnic, s.r.o. (CZ, Pardubice)
Liaver		392	Lias, LSM, k.s. (CZ, Vintířov)
Poraver		153	Radka s.r.o.(CZ,Pardubice)
Perlit		141	Perlit, s.r.o. (CZ, Šenov o.N. Jíčín)
Perlit		232	Perlit Praha(CZ, Praha)
Vapex A		232	Perlit Praha CZ, Praha)
Zeolit	Lehká plniva z přírodních surovin	485	Zeocem, a.s. (Sk, Bystré)
Vermikulit		285	Grena, a.s., (CZ, Veselí nad Lužnicí)
SioPor		111	Nagara, s.r.o. (CZ, Olomouc)
Liapor		392	Lias LSM, k.s. (CZ, Vintířov)

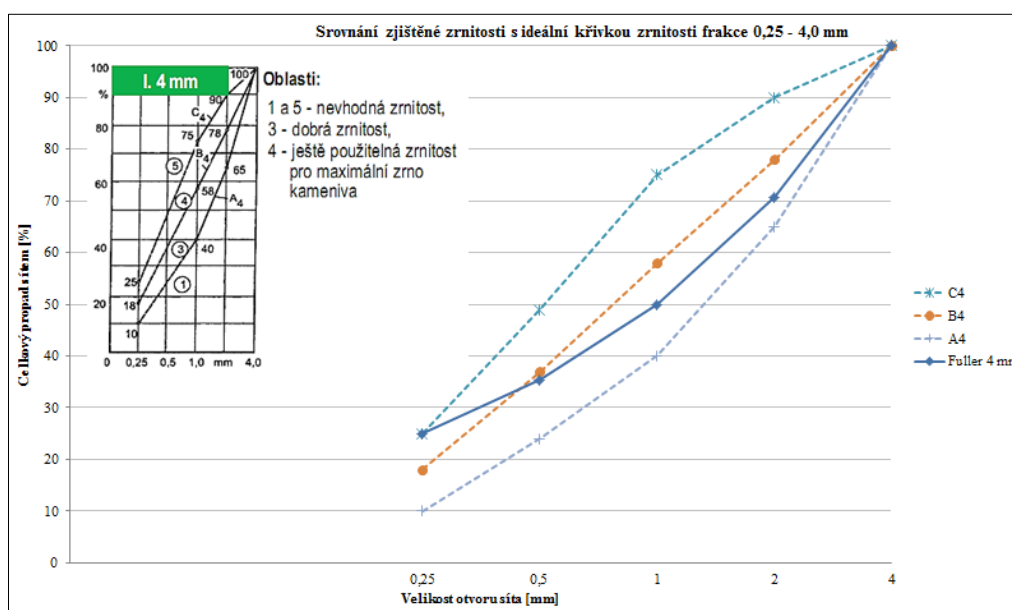
5.4 Návrh složení potěrové směsi

5.4.1 Plniva

Skladba plniva frakce 0 – 4 mm má odpovídat horní polovině křivky zrnitosti dle Fullera (vztah 3, graf 2). [12]

$$y_i = 100 \cdot \sqrt{\frac{d_i}{D_{\max}}} \quad (3)$$

(y_i – celkový propad sítím [%]; d_i – velikost zrna plniva [mm]; $D_{\max}$ – maximální zrna plniva [mm])



Graf 2 Křivka zrnitosti 0,25 - 4 mm dle Fullera

Křivka zrnitosti by měla být plynulá. Vzhledem k odlišným vlastnostem lehčeného plniva a drobného plniva projevujícího se následnou segregací směsi se jeví jako vhodné pro jednotlivé druhy plniv využít při míšení dvou nepřerušovaných křivek zrnitosti 0 – 4 mm.

Mezi sorpční vlastnosti lehčeného plniva patří zejména nasákavost vyjadřující množství vody odebrané plnivem v celém jeho objemu v závislosti na době ponoření do kapaliny. Využíváme-li lehčených plniv, je především nutné počítat s případnou zjištěnou hodnotou nasákavosti lehčeného plniva. [12]

Voda obsažená v nasáklém plnivu se může podílet na tzv. „samoošetřovacím efektu“ během zrání cementového kompozitu. Tento jev je popsán dříve, v kapitole 3.2.8 Lehčené cementové potěry. Zde je však nutný průzkum desorpčních vlastností lehčeného plniva. Při brzkém uvolnění nasáklé vody je možný vznik kapilárních dutin. [24]

Vlastnosti plniva ovlivňují výslednou mezerovitost směsi (vztah 4). Dobré zrnitosti lze dosáhnout při mezerovitosti 0,16 až 0,24. Výhodné je dosáhnout co nejnižší mezerovitosti.

$$M = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_k} \quad (4)$$

(M – mezerovitost plniva [-]; ρ_s – sypná hmotnost plniva v setřeseném stavu [kg.m^{-3}]; ρ_k – objemová hmotnost plniva [kg.m^{-3}])

5.4.2 Cement

Vzhledem k ekonomické náročnosti výroby pojiva na bázi portlandského slínku, zobrazujícího se následně v tržní ceně, je nutné během návrhu omezit množství cementu na co nejmenší množství. Dávka cementu při běžné konzistenci by neměla překročit 450 kg.m^{-3} . Jeho množství musí být však dostatečné k plnému obalení zrn plniva. [12]

5.4.3 Popílek

Ekonomicky náročný cement lze vhodně nahradit popílkem do 30 % (Kind, 1958). Při návrhu směsi je však nutné počítat s jinou objemovou hmotností popílku a náhradu cementu uvažovat objemově a následně přepočítat na hmotnostní podíl. [25]

Při 15% až 25% náhradě cementu popílkem vykazuje směs výbornou zpracovatelnost a vysokou soudržnost, zároveň také zabraňuje bleedingu a prodlužuje dobu tuhnutí a zpracovatelnosti. [12]

Při návrhu potěrové směsi s částečnou náhradou cementu popílkem je nutné počítat se zvýšením vodního součinitele dle vztahu 5.

$$w = \frac{m_{voda}}{m_{cement} + k \cdot m_{popílek}} \quad (5)$$

(w - vodní součinitel [-]; m_{voda} – hmotnost vody [kg]; m_{cement} – hmotnost cementu [kg]; $m_{popílek}$ – hmotnost popílku [kg]; k – normovaná konstanta pro změnu vodního součinitele)

Dle ČSN EN 450 se při návrhu betonu s využitím CEM 42,5 volí konstanta $k = 0,4$. Dále by se obsah cementu neměl snížit o více než je minimální obsah cementu násobený koeficientem k a zároveň je podmiňující platnost vztahů 6 a 7. [27]

$$\frac{m_{cement} + m_{popílek}}{m_{cement, minimum}} > 1 \quad (6)$$

(m_{cement} – hmotnost cementu [kg]; $m_{\text{popílek}}$ – hmotnost popílku [kg]; $m_{\text{cement,minimum}}$ – minimální požadovaná hmotnost cementu [kg])

$$\frac{m_{\text{popílek}}}{m_{\text{cement}}} \leq 0,33 \quad (7)$$

(m_{cement} – hmotnost cementu [kg]; $m_{\text{popílek}}$ – hmotnost popílku [kg])

Vzhledem k vysoké ceně portlandského cementu pevnostní třídy 42,5 je vhodné využít 25% náhrady cementu popínkem.

5.4.4 Mikrosilika

Křemičité úlety vykazují v porovnání s cementem vyšší spotřebu vody. Koeficient k ve vztahu 8 činí pro CEM i 42,5 celých 2.

$$w = \frac{m_{\text{voda}}}{m_{\text{cement}} + k \cdot m_{\text{mikrosilika}}} \quad (8)$$

(w - vodní součinitel [-]; m_{voda} – hmotnost vody [kg], m_{cement} – hmotnost cementu [kg]; $m_{\text{mikrosilika}}$ – hmotnost křemičitých úletů [kg]; k – normovaná konstanta pro změnu vodního součinitele)

Návrh skladby směsi s využitím mikrosiliky a obsahem cementu v množství nad $300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ směsi by neměl snižovat obsah cementu o více než $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ směsi. Dále je maximální obsah mikrosiliky omezen dle vztahu 9. [27]

$$\frac{m_{\text{mikrosilika}}}{m_{\text{cement}}} \leq 0,11 \quad (9)$$

(m_{cement} – hmotnost cementu [kg]; $m_{\text{mikrosilika}}$ – hmotnost křemičitých úletů [kg])

Využití mikrosiliky do 3 % z hmotnosti cementu má vždy příznivý vliv na výsledné vlastnosti betonu. Snížení ekonomického dopadu ceny křemičitých úletů lze redukovat využitím na trhu dostupných méně kvalitních typů mikrosiliky. v případě náhrady méně kvalitní surovinou lze zároveň počítat i se snížením kvalitativních vlastností výsledného kompozitu.

5.4.5 Návrh skladby

Při návrhu skladby potěrové hmoty se snažíme snížit potřebné množství cementového pojiva na minimum. K výpočtu minimálního množství cementové matrice je nutné znát fyzikální charakteristiky užitých plniv, včetně jejich poměrů vyplývajících z křivek zrnitosti. v případě zvýšené mezerovitosti je nutné počítat se zvýšeným podílem cementového tmele.

Při návrhu ideální skladby plniv lze dojít k uvažované křivce několika způsoby:

5.4.5.1 Výpočtové rovnice pro mísení plniv dvou frakcí

Výsledky zrnitosti poslouží k návrhu skladby plniva. Pro jednotlivé typy plniv bude vypočteno číslo zrnitosti k (Abrams). Za pomoci hodnoty „ k “ se vypočte poměr mísení plniv s přihlédnutím na křivku zrnitosti dle Fullera, případně se stanoví nejvhodnější poměr mísení plniv.

5.4.5.2 Čistě matematický přístup při mísení více frakcí plniv

Známe-li zrnitosti vstupu i požadovaného výstupu dle jednotlivých normových sít, lze přistoupit k matematickému výpočtu optimální zrnitosti. Výstupem matematického výpočtu musí být nezáporné hodnoty, v jiném případě je výsledek nepoužitelný. [27]

5.4.5.3 Teoretický model

Teoretický model výpočtu vychází ze zpracování křivek zrnitosti v softwaru s granulometrickým grafickým výstupem. Nutným požadavkem je znalost zrnitosti jednotlivých vstupů a očekávané zrnitosti.

Principem této metody je stanovení požadované křivky zrnitosti a následné určování podílu jednotlivých plniv vzhledem ke změnám výsledné křivky zrnitosti v porovnání se zrnitostí požadovanou.

5.4.5.4 Výpočet obálky cementového tmele

Potřebné množství cementu je závislé na měrném povrchu plniva. Plnivo je nutné obalit cementovým tmelem, jehož objem lze vypočítat dle vztahu 10, případně 11.

$$V_{ct} = \frac{m_c}{\rho_c} + \frac{w \cdot m_c}{\rho_v} + \frac{m_p}{\rho_p} + \frac{p_{0,25} \cdot m_k}{100 \cdot \rho_k} \quad (10)$$

(V_{ct} – objem cementového tmele [m^3]; m_c – obsah cementu [kg]; ρ_c – objemová hmotnost cementu [$kg \cdot m^{-3}$]; w – vodní součinitel [-]; ρ_v – objemová hmotnost vody [$kg \cdot m^{-3}$]; m_p – hmotnost příměsí [kg]; ρ_p – objemová hmotnost příměsí [$kg \cdot m^{-3}$]; $p_{0,25}$ – podíl jemných částic pod 0,25 mm [%]; m_k – hmotnost plniva [kg]; ρ_k – objemová hmotnost plniva [$kg \cdot m^{-3}$])

$$V_{ct} = v \cdot M \quad (11)$$

(V_{ct} – objem cementového tmele [m^3]; v – nadbytek cementového tmele [-]; M – mezerovitost směsi plniv [m^3])

Nadbytek cementového tmele v se doporučuje v rozmezí 1,05 až 1,40 (výjimečně se udává 1,5).

Návrh skladby potěrové směsi může probíhat metodou podle CH. T. Kennedy. Potřebné množství cementu se vypočítá zvlášť pro každou směs, a to především

v závislosti na různých hodnotách výpočtových součinitelů (vzhledem k různorodým tvarovým vlastnostem využitých lehčených plniv).

Křivka zrnitosti odpadního písku by měla vyhovovat horní části křivky zrnitosti dle Fullera (tab. 5).

Tabulka 4 Propady sítem při zrnitosti dle Fullera

Síto [mm]	Propad sítem [%]
0,063	13
0,125	18
0,25	25
0,5	35
1	50
2	71
4	100

Výpočet povrchové plochy zrn plniv uvádí vztah 12.

$$F = f \cdot \left(\frac{\rho_{k,t}}{\rho_k} \right) \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{p_i}{d_i} \right) \quad (12)$$

(F – povrchová plocha plniva [m²]; f – koeficient tvaru zrn (6 – plnivo těžené, kulového tvaru; 8 – plnivo těžené; 12 – plnivo drcené); $\rho_{k,t}$ – objemová hmotnost plniva [kg.m⁻³]; $\rho_{k,t}$ – sypaná hmotnost plniva v setřeseném stavu [kg.m⁻³]; p_i – nadsítový zbytek plniva[%]; d_i – průměrná velikost zrna nadsítového zbytku [cm])

Potřebný obsah cementového tmele (vztah 13) je závislý nejen na povrchu plniva a vrstvě samotného tmele, ale zároveň závisí i na mezerovitosti plniva (uvažujeme potěrovou hmotu bez dutin a kaveren).

$$V_{ct} = M + F \cdot \delta \quad (13)$$

(V_{ct} – objem cementového tmele [m³]; M – mezerovitost plniva [m³]; F – povrchová plocha plniva [m²]; δ – tloušťka cementového tmele [m])

Vypočteme vodní součinitel dle Bolomeye (vztah 14).

$$R_{B,28} = \alpha \cdot R_c \cdot \left(\frac{1}{w} - 0,5 \right) \quad (14)$$

(α – konzistenční součinitel dle zkoušky sednutí kužele [m]; R_c – pevnost cementové matrice v tlaku [N.mm⁻²]; w – vodní součinitel [-])

Vodní součinitel je nutné upravit dle vzorců 3 a 6. Hmotnost cementu vypočítáme ze vztahu 15. [28]

$$m_c = \frac{V_{ct}}{\left(\frac{w}{100} + \frac{1}{\rho_c} \right)} \quad (15)$$

(V_{ct} – objem cementového tmele [m³]; w – vodní součinitel [-]; ρ_c – měrná hmotnost cement [kg.m⁻³])

Množství vody pro danou záměs vypočteme ze vztahu 16 a přičteme množství vody odpovídající nasákavosti lehčeného plniva určené po 30 minutách. Následně provedeme kontrolu minimálního množství vody (vztah 17) potřebné na hydrataci cementu a k smáčení plniva. [18]

$$m_v = w \cdot m_c \quad (16)$$

(m_v – hmotnost vody [kg]; w – vodní součinitel [-]; m_c – hmotnost cementu)

$$m_v = 0,23 \cdot m_c + 0,35m_p + m_k \cdot \sum m_{vvi}, \text{ kde } m_{vvi} = \frac{p_i \cdot n}{100} \cdot \sqrt[3]{d_i \cdot d_{i+1}} \quad (17)$$

(n – spotřeba vody na ovlhčení 1 kg plniva od velikosti nad 0,25 mm [kg.kg⁻¹] ($n = 0,23$ pro jemné plnivo a $n = 0,30$ pro popílek))

Z rovnice absolutních objemů (vztah 18) určíme potřebné množství plniva.

$$\frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_v}{\rho_v} + \frac{m_k}{\rho_k} + \frac{m_p}{\rho_p} = 1 - \frac{V_{vz}}{100} \quad (18)$$

V případě znalosti pevnostních charakteristik využitého plniva lze dle Bacha zjistit přibližnou pevnost cementového kompozitu (vztah 19).

$$\sigma_{bpk} = (\sigma_{cm})^{V_{cm}} \cdot (\sigma_{pk})^{V_{pk}} \quad (19)$$

(σ_{bpk} – pevnost v tlaku betonu s pórovitým plnivem [N.mm⁻²]; σ_{cm} – pevnost v tlaku cementové malty při daném vodním součiniteli [N.mm⁻²]; σ_{pk} – válcová pevnost pórovitého plniva [N.mm⁻²]; V_{cm} – poměrný objem cementové malty [-]; V_{pk} – poměrný objem pórovitého plniva [-])

Podíl mikrosiliky a popílku bude uvažován ve změně vodního součinitele.

5.4.5.5 Návrh na základě stejného množství pojivové báze

V tomto případě je při mísení rozhodující především znalost podílu dodaného plniva, který musí zůstat při návrhu konstantní. Nadále však nepočítáme s povrchovou plochou plniv, nýbrž rovnou srovnáváme výsledky jednotlivých receptur a následně snižujeme obsah pojivové báze, případně volíme složení pojivové báze tak, aby vyhovovalo fyzikálním i chemickým požadavkům na potěrovou hmotu.

6. Vylehčování stavebních látek

6.1 Možnosti vylehčování stavebních látek

Přímé – vylehčení se dosahuje při výrobě vytvořením pórů přímo do vlastní hmoty. Vylehčení přímé může být dosaženo odpařením vody nebo únikem jiných plynů zachycených v základní hmotě lehčeného materiálu. Tím dochází k tvorbě vzduchových dutinek a snížení hmotnosti. Často se také dosahuje přímého vylehčení

napěněním materiálů (pěnový stav). Vzniklé dutiny jsou rozloženy rovnoměrně, a proto je struktura dané látky homogenní. Jako přímé vylehčení lze chápat i mezerovitý beton. [18]

Nepřímé – vylehčení se dosahuje snížením objemové hmotnosti použitím lehkých pórovitých látek a to jak na organické bázi (dřevo, korků, hoblin, pazdeří atd.), tak i nerostné bázi (křemelina atd.). Zde se uplatňují i nejrůznější lehká kameniva, jako např. keramzit. Vzduchové dutiny jsou obsaženy v zrněné výplni a jsou tedy rozloženy nerovnoměrně. [18]

Ve skladbě konstrukce – vylehčení se dosáhne záměrnou skladbou konstrukce a volbou vhodného materiálu (polystyren, dřevo, desky, vzduchové mezery, zasypy atd.). Je důležité zvláště dbát na materiál a jeho vlastnosti (např. nenasákavé desky), abychom omezili následné negativní chování podlahové konstrukce a následné znehodnocení.

6.2 Vlastnosti a použití lehkých pórovitých betonů

Lehký pórovitý beton je ve srovnání s obyčejným betonem relativně homogenní materiál, protože v něm není obsažena hrubá frakce kameniva. Zároveň lehké pórovité betony (pórobetony) vykazují velké odlišnosti ve fyzikálně-mechanických vlastnostech. Tyto vlastnosti u pórobetonu závisí především na jeho mikrostruktuře (pórovém systému) a na složení, které je ovlivněno typem použitého pojiva, způsobem tvorby pórů a také způsobem vytvrzování. Přestože původně byl pórobeton vyvíjen s myšlenkou na dobrý izolační materiál, postupně se zvedal také zájem o jeho možné použití ve stavebních jako konstrukčního materiálu, díky nižší hmotnosti, úspoře na materiálu a také širokému spektru možného využití popílků. [62][63]

Pórobeton je vyráběn buď na bázi cementové, nebo vápenné malty. Jedná se o lehčený beton, ve kterém jsou vzduchové póry zachyceny v pojivové matici. Tyto póry jsou vytvořeny pomocí vhodných pórotvorných činidel. Autoklávovaný pórobeton se liší od neautoklávovaného způsobem ošetření po ztuhnutí a odformování směsi. Autoklávovaný pórobeton je dále ošetřen v autoklávu za zvýšené teploty a tlaku tak, aby došlo vlivem hydrotermálních reakcí ke zlepšení jeho fyzikálně-mechanických vlastností a trvanlivosti. Tato disertační práce se nezabývá problematikou autoklávovaných pórobetonů ani autoklávováním jako takovým.

Obecně se dá říci, že je možné rozlišit dva druhy lehkých pórovitých betonů. Jedná se o pórobeton (autoklávovaný či neautoklávovaný) a o pěnobeton. Hlavní výhodou pórobetonu je nízká hmotnost, díky které dochází k úsporám na konstrukčních částech budov, včetně základů a zdiva v nižších patrech. Podle způsobu výroby je možné dosáhnout na širokou škálu objemových hmotností ($300 - 1800 \text{ kg.m}^{-3}$), to umožňuje značnou flexibilitu při výběru a produkci výrobků pro různá použití. [63]

V základu můžeme odlišit dvě metody výroby neautoklávovaného pórobetonu. První z nich je metoda založená na vstupu vzduchových pórů do matrice pomocí uvolňovaného plynu, tzv. plynobeton. K tomuto způsobu se nejčastěji využívá hliníkový prášek, dále pak reakce chlorového vápna s peroxidem. Druhou metodou je využití pěny a pěnidel, výsledný produkt se pak nazývá pěnobeton. Je to nejlevnější a ekonomicky nejméně náročný proces vnesení pórů do matrice materiálu. Jedná se také o proces jednoduchý a dobře kontrolovatelný, jelikož nedochází k žádným chemickým reakcím. Jako pěnidla se používají nejrůznější látky na bázi detergentů, pryskyřic, hydrolyzovaných proteinů jako je např. keratin, atd. [66]

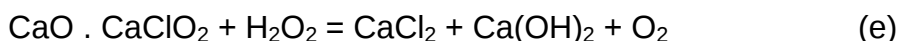
6.3 Plynotvorné látky a pórobeton

Při výrobě se nejběžněji využívá jako plynotvorná látka hliníkový prášek. Dále se dají používat i další prášky (vápník, zinek, hořčík, baryum a lithium). Je možné využívat i jiná nakypřující činidla, jako je peroxid vodíku a chlorové vápno, močovina a chlornan sodný, karbid vápníku za přídavku křihu nebo kovový prášek a vápenný hydrát. Principem kynutí směsi a tvorbou pórů ve struktuře je uvolňování plynů.

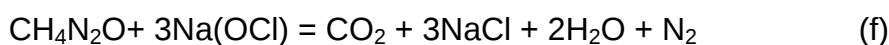
Al prášek nebo pasta



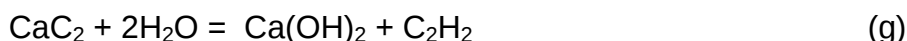
Chlorové vápno a peroxid vodíku



Močovina a chlornan sodný



Karbid vápníku za přídavku křihu



Pórobetony vyráběné ze základních složek a plynotvorné přísady obsahují makropóry tvořící až 80% celkového objemu. Plynotvorná přísada po přimísení do směsi reaguje s alkalickým prostředím a za uvolňování vodíku způsobuje nakynutí dané směsi. [18]

Při tvorbě plynobetonových směsí se nejběžněji využívá jako plynotvorná látka hliníkový prášek. Obsah aktivního hliníku v hliníkovém prášku musí být alespoň 94 % z celkového množství s kolísáním menším, než 1 %. Pro komerční využití se dále využívají i prášky jiných látek jako vápníku, zinku, hořčíku, barya nebo lithia. Dále je možné využívat jiných nakypřujících směsí jako peroxidu vodíku a chlorového vápna močoviny a chlornanu sodného, karbidu vápníku za přídavku křihu nebo kovového prášku a vápenného hydrátu. Pro praktickou tvorbu směsí byl používán pouze hliníkový prášek. V celkovém obsahu směsí bylo neměnná receptura až na množství přidaného hliníkového prášku. Hlavním sledovaným faktorem bylo objemová hmotnost, pevnost v tlaku a tahu za ohybu, tvrdost povrchu a míra nakypření. Očekávaným výsledkem bude ekonomické vyhodnocení pro danou recepturu, u které stanovíme přesné poměrové množství účinného hliníkového prášku v závislosti na procentuálním vylehčení, charakteru pevností a dalších zkoumaných vlastností plynobetonu. Druhým zkoumaným plynobetonem v této práci bude směs chlorového vápna a peroxidu vodíku. Optimální funkční poměry nejsou z dostupné literatury patrné, proto se tato otázka stane předmětem podrobného zkoumání. Suroviny použité k dalšímu zkoumání budou takové, které se nacházejí na trhu přístupnému běžnému zákazníkovi.

6.3.1 Hliníkový prášek

Pro tento kov platí známá chemická rovnice pro nakypření betonu (d).

Hliníkový prášek je jednou z hlavních průmyslově využívaných výrobních plynotvorných látek. Distribuované balení výrobci na trhu je různé od jednotlivých balení až po průmyslové zásilky.

Z výše uvedené rovnice nakypření je patrné, že vznikajícím expanzním plynem pro vylehčení matrice je vzdušný vodík. v běžném výrobním procesu se využívá na 1 m³ okolo 0,1-0,5 kg.m⁻³ odmaštěného hliníkového prášku. Z důvodů možnosti samovznícení či výbuchu se do vyráběného hliníkového prášku přidává minerální olej nebo tuky bránící nechtěným reakcím. Tyto látky vytvoří povrchový film, který brání negativním vlivům. Tento postup je nutný z důvodů snadné oxidace

hliníkového prášku. Prvním krokem při výrobě plynobetonu je proto odmaštění hliníkového prášku. Odmaštění probíhá chemickou reakcí alkalickými látkami, nejčastěji jsou využívány mazlavá mýdla, klišopryskyřičné emulze, louhy či soda. Tyto látky povrchový film zmýdelní, a tím i odstraní. Při výrobě, kde se používá hliníkový prášek je nutné tento krok provádět těsně před přidáním do výrobní směsi. Dokonale odmaštěný Al prášek lze poznat tak, že se ve vodě disperguje a sedimentuje, místo toho aby se vznášel na hladině.

U průmyslově používaného hliníkového prášku je hlavním kritériem množství a rychlost vývoje vylehčujícího plynu, který je určován alkalitou, eventuálně přímo obsahem alkálií. Při výrobě plynobetonů je výhodné přidání nehaseného vápna nebo hydroxidu sodného. Přidání zvyšuje teplotu vznikající směsi a zaručuje co možná nejlepší využití hliníkového prášku pro vývoj expanzního plynu.

6.3.1.1 Požadavky pro používání hliníkového prášku

Při výrobním procesu musí hliníkový prášek splňovat daná kritéria, kvůli zajištění kvality výrobního procesu. Hliníkový prášek s horšími vlastnostmi může způsobit degradaci celkové směsi.

Hliníkový prášek musí být velmi jemný, protože se s jemností velmi urychluje vývoj plynu. Specifický povrch se má pohybovat od 700-1200 m².kg.

Hliníkový prášek se musí skládat z rovnoměrně velkých stříbrošedých částic šupinového tvaru, vzniklých rozmačkáním při mletí a tudíž majících co největší reaktivnost. Dále prášek nesmí obsahovat slepené hrudky nebo kulovitá zrna, vznikající rozprášením tekutého hliníku a mající relativně malý reaktivní povrch, případně část zrn o větším průměru, protože reagují méně dokonale a plynové bublinky na nich se vyvíjející by byly příliš velké a struktura pórobetonu potom nerovnoměrná.

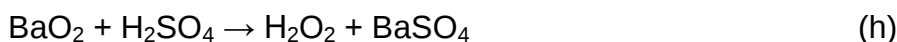
Obsah tuku nemá překročit 1,3 %, aby nenastávaly potíže při odmašťování, eventuálně opožděný vývoj plynu.

Vlhkost hliníkového prášku nesmí být vyšší než 0,2 %.

6.3.2 Chlorové vápno a peroxid vodíku

Reakce chlorového vápna a peroxidu vodíku je v praxi běžně nepoužívaná metoda naplynění matrice vyráběného materiálu. V odborné literatuře je možné nalézt výše vypsanou rovnici reakce chlorového vápna a peroxidu vodíku (e).

Na pohled je chlorové vápno bílé nebo nažloutlé ve formě prášku se silnými oxidačními účinky. Chlorové vápno se využívá k dezinfekci, bělení, čištění povrchů a textilu. Od ostatních druhů vápen je možné chlorové vápno rozlišit už podle typického zápachu chlóru. Chlorové vápno má nepříznivé účinky na zdraví při větším množství nebo při vdechnutí. Druhou složkou z výše zmíněné reakce je peroxid vodíku, lidově nazývaný kysličník. Jde o čirou kapalinu s viskozitou větší než voda, která má silné oxidační, ale i redukční účinky. Využívá se k dezinfekci, k odbarvování vlasů i například jako součást pohonu různých bojových raket či torpéd za druhé světové války. Poprvé byl peroxid vodíku připraven v roce 1818 kyseliny sírové s peroxidem barnatým a odpařením nadbytečné vody za sníženého tlaku dle rovnice:



Při vyšších koncentracích peroxidu vodíku je nutné dodržovat bezpečnostní předpisy, kvůli možnému poleptání kůže, možnému samovznícení, žíravosti nebo vzniku výbušných par.

6.4 Pěnobetony a pěnotvorná činidla

6.4.1 Pěnobeton

Hmoty vylehčené pomocí pěny za přídavku pěnotvorného činidla a většinou portlandského cementu nazýváme pěnobetony. Výroba pěnobetonů vmísením předem vytvořené pěny do hmoty se nejčastěji využívá při tvorbě in situ. Tento krok je podmíněn výkonným míchacím zařízením, které zlepšuje celkové procentuální vylehčení vytvořené směsi a zároveň umožňuje danou hmotu přivádět na místo zpracování. Sjednocení zařízení mísícího pěnu a zároveň plnicí funkci čerpadla je in situ velmi výhodné, dochází k ušetření pracovních nákladů za techniku, pracovní síly a manipulaci. Velkou nevýhodou jsou počáteční vstupní náklady spojené s koupí zařízení a příslušenství. Druhou možností tvorby pěnobetonu je výroba přímo na lince, kde takto vzniklý pěnobeton je využíván převážně k tvorbě tvárnic, bloků, panelů atd. Suchá pěnidla se dávkuje na celkové množství cementu v dané výrobní směsi. Základní rozsah zaručených vlastností pracovních teplot je v rozmezí mezi + 5 do + 30 °C. Povrch je možné chránit fóliemi nebo rohožemi, a to jak proti odpařování, tak proti osychání povrchové vrstvy vlivem slunečního záření.

6.4.1.1 *Výhody lehkých betonů pro podlahy*

- nízká objemová hmotnost
- vysoká tepelně izolační schopnosti
- nehořlavost
- dlouhodobá stálost
- propustnost pro páru
- odolnost proti rázům a plísním
- dobrá mechanická pevnost v závislosti na objemové hmotnosti
- odolnost proti zmrazovacím a rozmrazovacím cyklům [35]

6.4.2 **Pěnotvorné přísady - pěnidla**

Pěnotvorná přísada způsobuje, že při míchání se do betonu fyzikální cestou dostává velké množství dostatečně pevných a stálých vzduchových bublin – vzniká pěnobeton. [18]

6.4.2.1 Pěnidla na bázi bílkovin

Pěnotvorné látky na bázi bílkovin se vyrábí hydrolýzou živočišných bílkovin obvykle z rohů, krve, kostí popřípadě podobných odpadů z chovu skotu, prasat či jiných dalších živočišných schránek. Tato výroba je nepřesná a vzhledem k měnícím se vlastnostem surovin dochází ke kolísání kvality konečného výrobku. Dalším faktorem je velmi nepříjemný zápach z těchto produktů.

6.4.2.2 Pěnidla na bázi povrchově aktivních látek

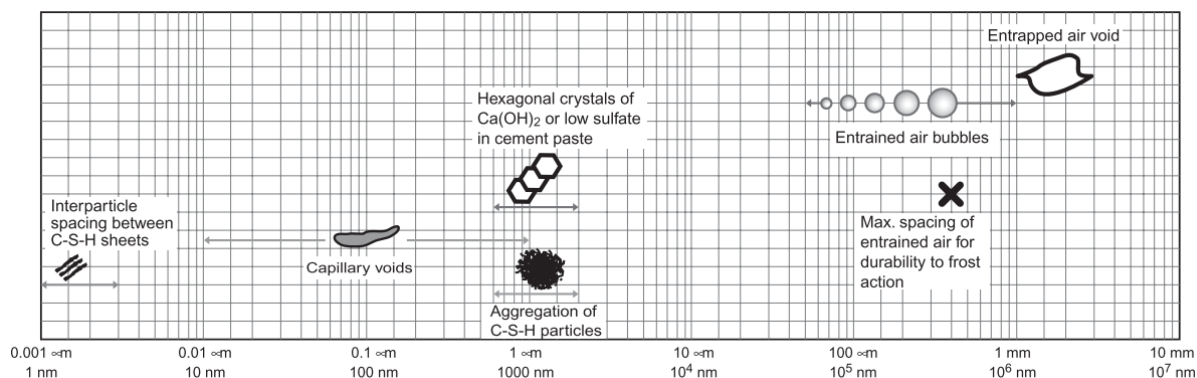
Syntetické pěnotvorné látky jsou čistě chemického původu s konstantní kvalitou. Povrchově aktivní látky se hromadí na rozhraní kapaliny či plynu a vytváří stabilizující film. Pro dobré pěnidlo je nutná schopnost filmu reagovat s dostatečně velkou změnou povrchového napětí v roztoku. Velmi významnou roli hraje rychlost difúze těchto povrchově aktivních látek.

6.4.2.3 Pěnidla na enzymové bázi

Enzymatické pěny jsou výsledkem nejnovějšího vývoje. Skládají se převážně z vysoce aktivních bílkovin rostlinného původu. Dosahují optimální kvality bez typického zápachu. [18]

7. Mikrostruktura neautoklávovaného pórobetonu

Mikrostrukturu a makrostrukturu pórobetonu ovlivňuje způsob vnesení pórů do matrice materiálu. Materiálová struktura pórobetonu je charakteristická pevnou matricí s mikropóry a makropóry. Makropóry vznikají díky expanzi hmoty při procesu vnášení vzduchových pórů, mikropóry se objevují ve stěnách mezi makropóry. v případě pórobetonu se za makropóry uvažují póry větší než 60 μm . [62]



Obrázek 8 Pórová struktura a mikrostruktura [77]

7.1 Velikost pórů

Typické rozložení pórů ve vytvrzené cementové matrici je široké, s velikostí pórů od 10 μm až do 0,5 nm. Větší póry velikosti 10 μm – 10 nm jsou tvořeny zbytkovým nevyplněným prostorem mezi částicemi cementu, tzv. kapilární póry. Nejjemnější póry od 10 μm do 0,5 nm nazývány jsou gelové póry, protože jsou tvořeny interní porozitou C-S-H gelu. Toto je ovšem jen základní rozdělení pórů a je nutné mít na paměti, že velikosti jak gelových, tak kapilárních pórů se překrývají. v tabulce 4 jsou uvedeny typy pórů s jejich základními vlastnostmi [78]

Tabulka 5 Velikost mikropórů [78]

Typ pórů	Popis	Velikost	Způsob detekce	Vlastnosti
Kapilární póry	velké	10 μm - 50 nm	REM, OM	propustnost, pevnost
	střední	50 - 10 nm	REM	propustnost, pevnost, smrštění
Gelové póry	malé	10 - 2,5 nm	adsorpce	smrštění
	mikropóry	2,5 - 0,5 nm	adsorpce	smrštění, dotvarování
Póry v mezivrstvách C-S-H gelu	strukturní	$\leq 0,5$ nm	adsorpce	smrštění, dotvarování
Ostatní	mikrotrhliny	50 - 200 μm	REM, OM	propustnost, pevnost

7.2 Minerály v mikrostruktuře neautoklávovaných pórobetonů

Albit nízkoteplotní, nižší, & (Albite low) - $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, triklinická krystalová soustava, skupina živců - plagioklasů. Je teplotně stabilní až do teploty tavitelnosti kolem 1200°C s omezenou mísivostí s draselnými živci. Tavením vzniká plagioklasové sklo, které má homogenní optické vlastnosti. Albit vytváří zrnité agregáty tence i tlustě tabulkovitých krystalů bílé barvy, které jsou většinou navzájem různě orientovány. Většina krystalů je v těchto agregátech zpravidla částečně vyvinutá. v našem případě se albit vyskytuje ve formě ojedinělých drobných vtroušenin.

Alit – (hatrurit) - Ca_2SiO_5 ; $(3\text{CaO}.\text{SiO}_2)$. Je to jedna ze složek portlandského cementu. Málo prozkoumaný nerost, který tvoří pseudohehexagonální krystaly

Anortit - $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, triklinická krystalová soustava, skupina živců - bazický plagioklas. Je to jedna ze složek portlandského slínku. Vytváří krystaly obdobného tvaru jako albit.

Cristobalit nízkoteplotní, nižší, & (Cristobalite low) - SiO_3 , tetragonální krystalová soustava. Tato modifikace je stabilní do teploty 180°C , kdy v intervalu teploty 180 až 270°C přechází do vysokoteplotní modifikace s kubickou krystalovou soustavou.

Ettringit - $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$, hexagonální krystalová soustava. Tvoří se ve vodním prostředí v pórech betonu během zkoušky mrazuvzdornosti, kde

vytváří jemně vláknité, tyčinkovité a tabulkovité krystalky, které bývají často degradovány do nepravidelného tvaru. Struktura ettringitu je velmi flexibilní, schopná akceptovat určité změny ve složení, aniž by došlo k její změně. Substitucí iontů se mění chemické složení krystalů. Ionty vhodné pro tuto substituci jsou Ca^{2+} , Al^{3+} , SO_4^{2-} a OH^- . Izomorfní substituce Al^{3+} v oktaedru je možná skrze Fe^{3+} , Si^{4+} , Mn^{4+} , Cr^{3+} . [83]

Vyskytuje se v paragenezi s thaumasitem, portlanditem, kalcitem a sádrovcem. Vzniká jako produkt degradačních procesů betonu. v první fázi, při hydrataci slínkových minerálů cementu, způsobuje efekt oddálení počátku tuhnutí portlandského cementu. Je také produktem sulfatačních reakcí v betonu. Při přechodu v ettringit zvětší svůj molární objem přibližně osmkrát. Vlivem toho dochází k velmi intenzivní destrukci betonu.

Gehlenit - $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSi})_2\text{O}_7$, tetragonální krystalová soustava. Většinou vytváří tlustě tabulkovité krystaly. Je to jedna ze složek portlandského slínku. Ve struskách se nachází jako výrobní produkt.

Kalcit - CaCO_3 , trigonální krystalová soustava. Během zahřívání při teplotách okolo hodnot 650 až 750°C uvolňuje CO_2 a vzniká CaO . Bod tavení CaO je 897°C. CaO je velmi nestabilní a velmi reaktivní s ostatními složkami cementu. Kalcit vykazuje zpravidla štěpnost a tvar klence.

Křemen nízkoteplotní, nižší, & (Quartz low) - SiO_2 , trigonální krystalová soustava. Jedná se o stabilní modifikaci křemene do teploty 573°C. Při této teplotě se mění na hexagonální modifikaci vysokoteplotního, vyššího, β křemene. Tvoří většinou zrna nepravidelného tvaru šedé barvy s typickým lasturovitým tvarem vnějších ploch.

Amorfní forma křemene pochází z popílků jednak ve formě cenosfér a jednak v podobě amorfních kulovitých útvarů.

Portlandit - $\text{Ca}(\text{OH})_2$, hexagonální krystalová soustava. Svým chemickým složením odpovídá "hašenému vápnu". Pozvolna se rozpouští ve vodě. Je jednou ze složek portlandského cementu. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (hašené vápno) se taví při teplotě 547 °C, což je blízká teplota tavení křemene (573 °C). Pak může nastat překrývání obou reakcí během ohřevu.

Vaterit - CaCO_3 , hexagonální krystalová soustava. Jedná se o metastabilní nerost (t.j. nestálá modifikace CaCO_3 - za normálních podmínek není v termodynamické rovnováze), který zvolna přechází do kalcitu s trigonální

krystalovou soustavou. Tento přechod na stabilní kalcit probíhá v plném rozsahu při teplotě 400°C. Vaterit tvoří kulovité agregáty nebo sférolity drobných jehliček.

Vermikulit - $(\text{MgCa})_{0,33}(\text{MgFe}^{3+}\text{Al})_3(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, monoklinická krystalová soustava. Patří do skupiny jílových slíd (hydroslád) s trojvrstevnou strukturou, blízkou trioktaedrickému illitu. Při zahřívání se ploché šupinky vermikulitu od sebe vzdalují a červíkovitě se kroutí. Současně dochází ke zvětšení celkového objemu minerálu. Kromě šupinek vytváří tabulkovité krystaly. Vrstevnatá struktura umožňuje poměrně dobrou vyměnitelnost kationtů Mg^{2+} za Ca^{2+} a vyšší obsah molekulární vody. Zvýšený obsah Mg, z důvodu přítomnosti vermikulitu, způsobuje zhoršenou kvalitu cementů.

Zeolity - mají chemické složení blízké skupině živců, ale s tím rozdílem, že ve své krystalové mřížce obsahují 10 % H_2O (v tzv. kanálových dutinách). Tato zeolitová voda uniká při postupném zahřívání zeolitů při teplotách 45 °C, 300 °C a 400 °C. Přitom nedochází k rozpadu strukturní mřížky zeolitů. Zeolity mají schopnost ve vlhkém prostředí za normálních podmínek zpětně zeolitovou vodu vrátit do kanálových dutin. Kromě zeolitové vody se do kanálových dutin mohou dostat další cizorodé látky, pro které je omezujícím faktorem průměr kanálových dutin. Zeolity krystalují ve všech osmi krystalových soustavách. Všechny zeolity se snadno taví, přičemž se pění a dekrepitují. Během dekrepitace explodují kanálové dutiny zeolitů a tím dochází k dalším změnám jejich objemu. Pokud ohřev nastává rychle, nestačí zeolitová voda kanálové dutiny opustit a pak způsobuje dekrepitaci. Zeolity rovněž působí jako měniče iontů a absorbenty.

8. Cíl práce

Cílem disertační práce je vyvinout nový lehčený potěrový materiál pro podlahy s použitím druhotných surovin a lehčených plniv s důrazem na vnesení mikropórů do matrice potěru již vylehčeného lehčeným kamenivem případně lehkými odpady. Tento proces bude řešen, jak použitím pěnidel, tak i pomocí nakypřovacích procesů založených na reakcích mezi chemickými látkami, které se používají při výrobě autoklávovaného i neautoklávovaného pórobetonu. Oba tyto způsoby budou optimalizovány pro možnost výroby konečného výrobku in situ, především z pytlovaných směsí, nejlépe bez přidání tekutých aditiv nebo pěny vyráběné na staveništi. Takto vznikne zcela nový výrobek na trhu, který bude schopný tzv. samonakypření nebo samonapěnění přímo na stavbě.

Dalším cílem disertační práce je prozkoumat mikrostrukturu takto vyvinuté směsi a rozkrýt pochody a mechanismy, které provázejí tento typ vylehčení stavební hmoty na silikátové bázi. Hlavní důraz bude kladen na zjištění distribuce mikropórů vnesených reakcemi nebo pěnidlem ve struktuře matrice obsahující větší množství pórovitého kameniva, hlavně mikrosfér z plaveného popílku a jemných granulátů z expandovaného skla, ověřit, do jaké míry je pórová struktura ovlivněna metodou vnesení pórů. Pórová struktura bude zkoumána mikroskopicky pro zachycení rozdílů ve velikostech mikropórů.

II. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

9. Metodika práce

9.1 Etapa I.: Základní ověření možností vylehčení silikátových materiálů

Cílem této etapy je vybrat vhodné způsoby vylehčení potěrového materiálu pro podlahy s obsahem druhotných surovin. Nejprve budou, na základě předešlého teoretického studia, vybrána vhodná plniva a pojiva pro vývoj lehčené podlahoviny. Budou vybrána jak přírodní a průmyslově vyráběná lehčená kameniva, tak i druhotné suroviny používané přímo a kameniva vyrobená z druhotných surovin různými průmyslovými procesy.

Dále budou vybrány ze známých a dostupných způsobů vnesení mikropórů do matrice cementového tmele ty nejvhodnější. Budou navrženy základní receptury, na kterých byla ověřena vhodnost jednotlivých plniv a jejich kombinací pro použití v dalších návrzích receptur. Stejným způsobem budou ověřeny i možnosti napěnění a nakypření směsi.

Na vzorcích budou provedeny základní zkoušky – stanovení objemové hmotnost, pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu. Z vyhodnocení praktických zkoušek v této etapě budou vybrány suroviny a postupy pro další návrhy receptur potěrových hmot pro podlahy.

9.2 Etapa II.: Návrh receptur lehčených stavebních hmot

Na základě výsledků předchozí etapy budou navrženy receptury pro lehčené potěrové hmoty pro podlahy. Vývoj receptur bude směřován především k tomu, aby mohly být průmyslově vyráběné do pytlů nebo sil kompletně, bez další potřeby přídavku tekutých aditiv či pěny vyráběné na staveništi.

Nejprve budou navrženy tři typy receptur. První skupinou budou receptury na bázi pěnobetonu za přídavku práškových pěnidel. Tato skupina vzorků bude kontrolována jednak pomocí referenční receptury nijak nevylehčené a jednak pomocí receptur, do kterých bude přidána vyrobená pěna. Dalším typem budou receptury na bázi plynobetonu – neautoklávovaného pórobetonu, vyrobeného standardními postupy pro pórobeton – pomocí nakypřovacích reakcí (hliníkový prášek, močovina + chlornan sodný, karbid vápníku, chlorové vápno + peroxid vodíku). Posledním typem receptur v této části etapy budou receptury obsahující nejruznější

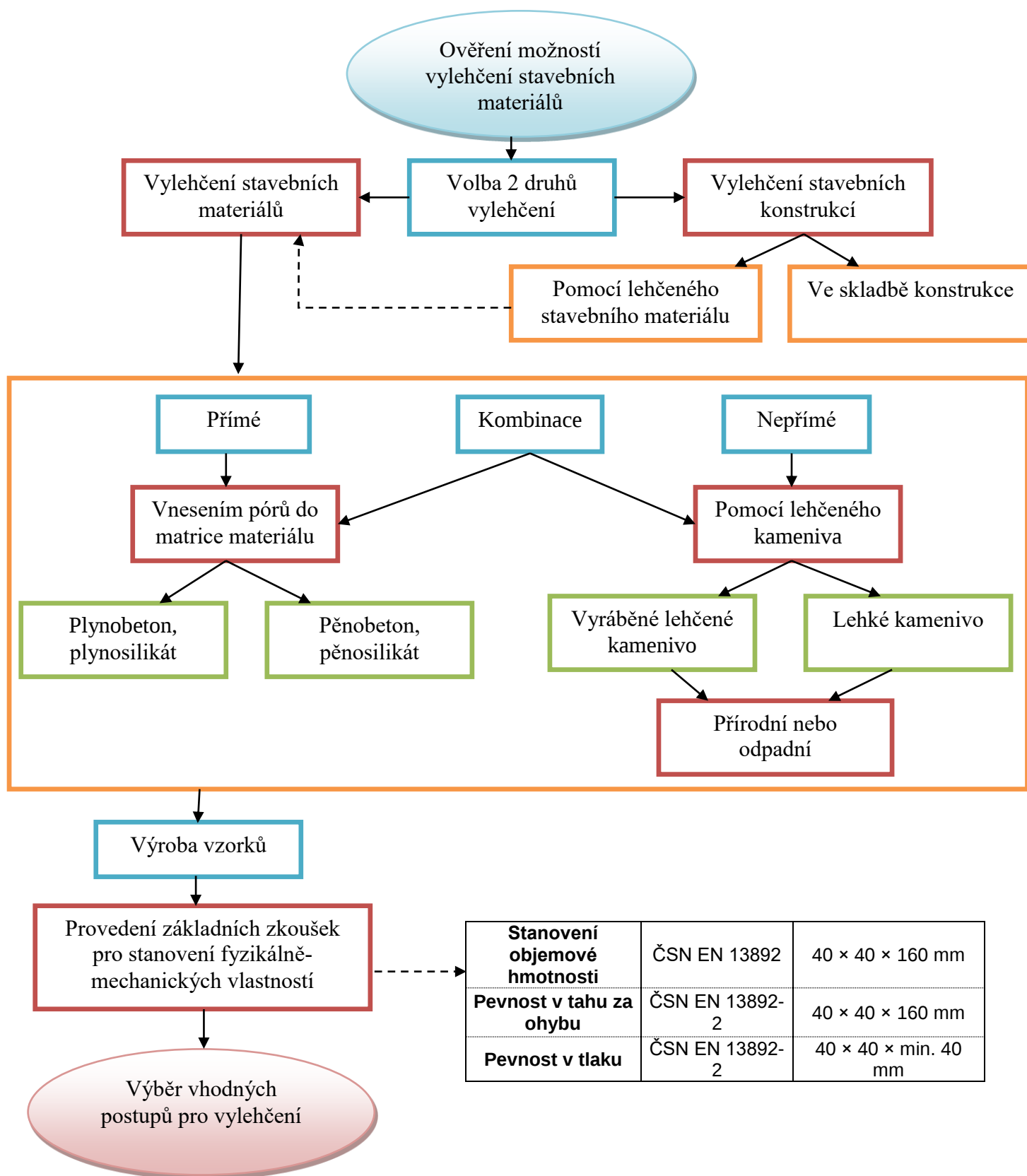
druhy lehčeného a lehkého plniva, a to jednak plniva z přírodních surovin (Perlit, Liapor, Vermikulit), dále pak plniv vyrobených z druhotných surovin (Liaver, Poraver, Refaglass, Geocell, mikrosféry a cenosféry) a odpadních plniv (odpadní křemelina, odpadní písek, odpadní lupek, ocelářská struska, brusné a řezné kaly atd.). Následně bude navrženo několik receptur, které budou kombinovat jednotlivé typy vylehčení: lehké kamenivo + nakypřovací reakce, lehké kamenivo + přísada pro napěnění.

Na vzorcích vyrobených z těchto receptur budou stanoveny fyzikálně-mechanické vlastnosti (objemová hmotnost, pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, odolnost proti obrusu, součinitel tepelné vodivosti, mikrotvrdost povrchu). Po vyhodnocení výsledků budou vybrány nejlepší receptury na základě kritéria pevnosti v tlaku při co nejnížší objemové hmotnosti (KK – koeficient konstruktivnosti), případně budou receptury upraveny a odzkoušeny ještě jednou pro výběr nejvhodnějších receptur a vyhodnocení úspěšnosti vylehčení. V rámci této etapy bude také zkoumání vlivu dlouhodobého uložení suché směsi v pytlech na vlastnosti výsledného produktu.

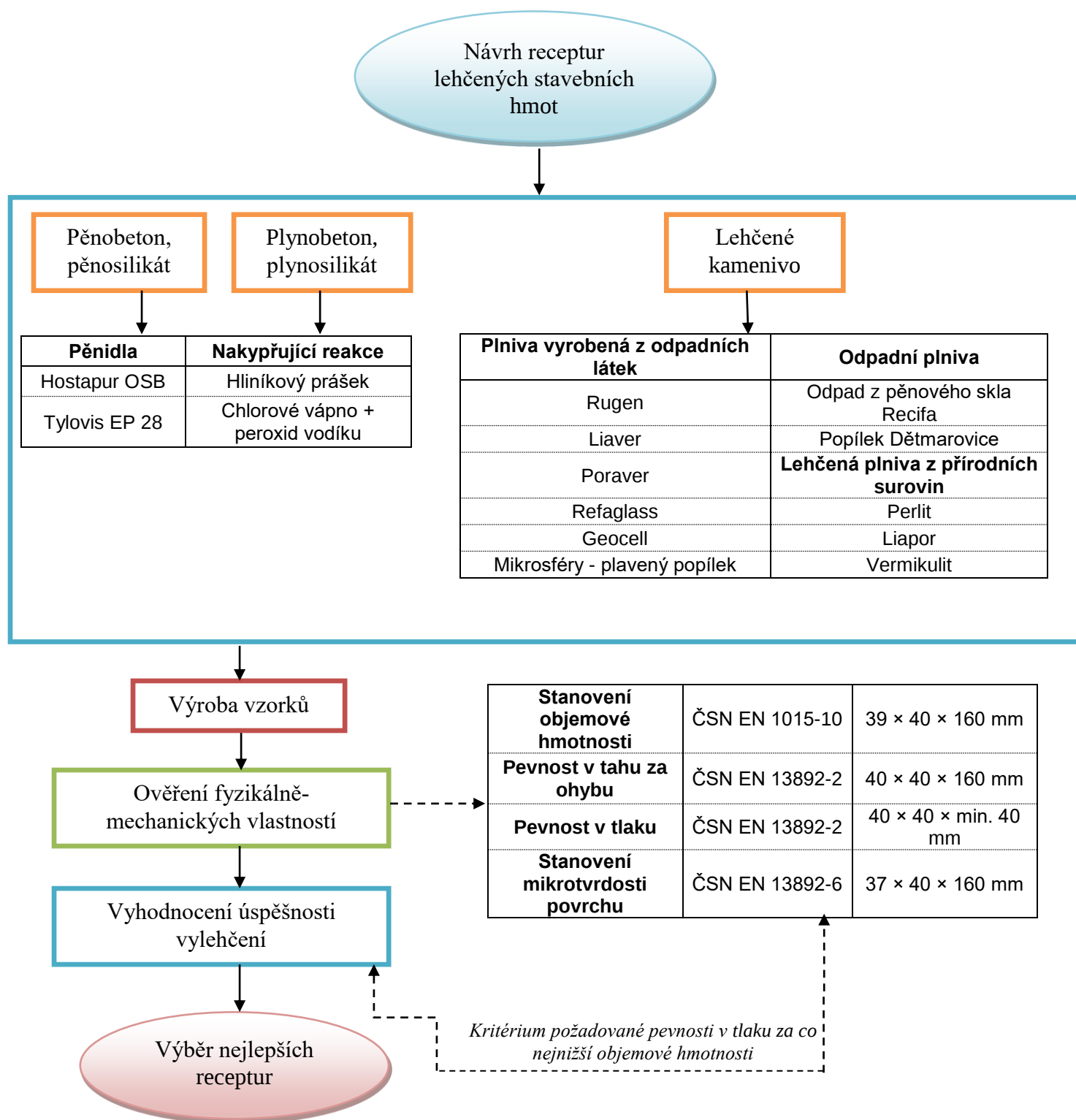
9.3 Etapa III.: Studium mikrostruktury vybraných vzorků

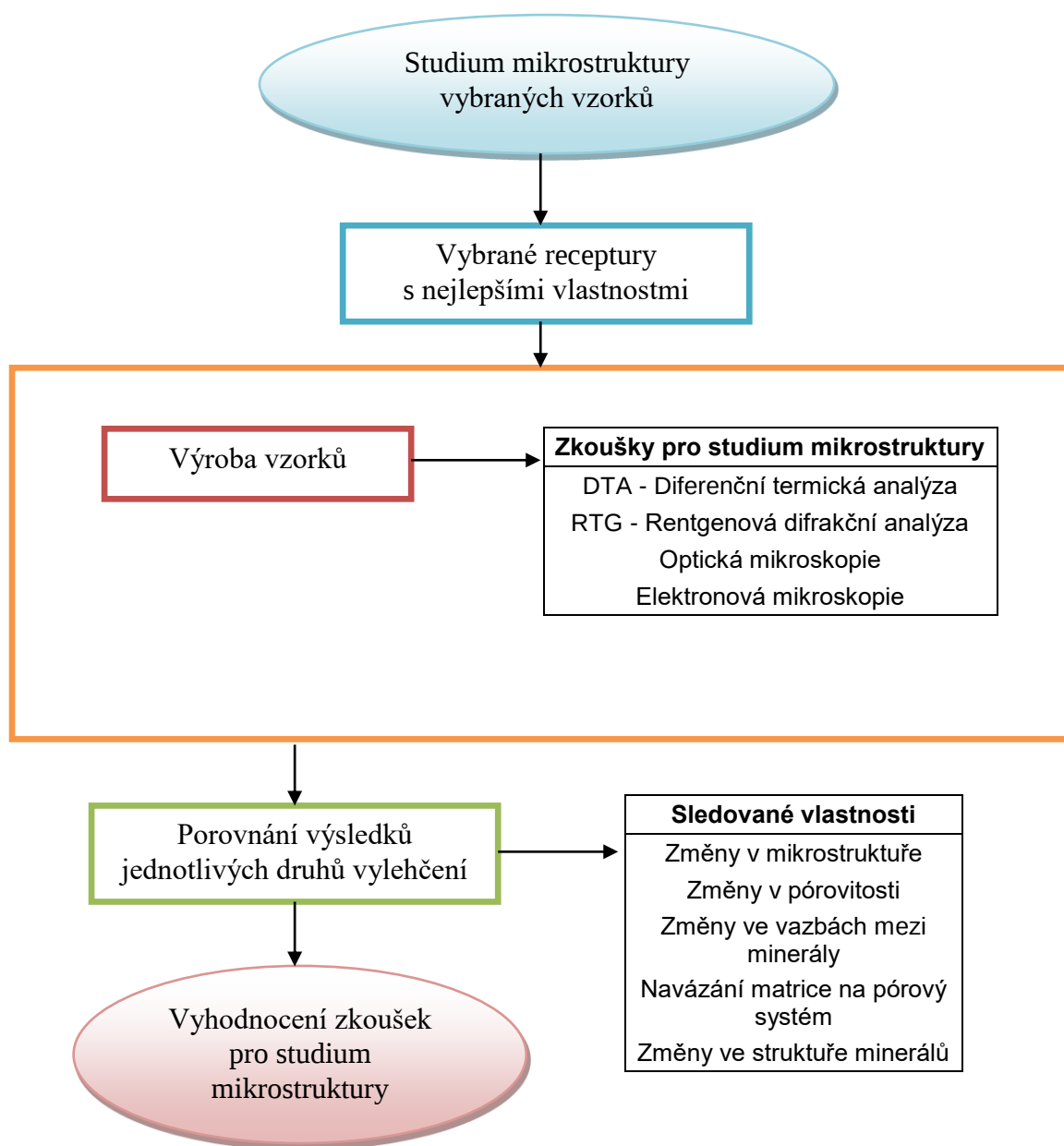
Tato etapa bude zaměřena na studium mikrostruktury vybraných receptur. Pro tyto zkoušky budou vybrány receptury z předchozí etapy, které byly vyhodnoceny jako nejlepší nebo nejvhodnější. Budou vyrobeny vzorky, které budou uloženy v laboratorním prostředí na dobu zrání minimálně 28 dní. Vzorky budou podrobeny podrobné analýze pro prozkoumání jejich vnitřní struktury – bude na nich provedena diferenční termická analýza, rentgenová difrakční analýza, optická a elektronová rastrovací mikroskopie. Výsledky zkoušek na jednotlivých recepturách budou porovnány s důrazem zejména na změny v mikrostruktuře, změny v pórovitosti, změny ve vazbách mezi minerály, navázání matrice na pórový systém a změny ve struktuře minerálů v závislosti na druhu vylehčení. Bude kladen důraz hlavně na analýzu způsobu distribuce mikropórů vnesených plynatvornými reakcemi nebo pěnidlem do struktury matrice s obsahem pórovitého plniva. Nově získané poznatky a pravidla chování pórového systému budou prozkoumány a vysvětleny.

Etapa I. – Základní ověření možností vylehčení silikátových materiálů



Etapa II. – Návrh receptur lehčených stavebních hmot



Etapa III. – Studium mikrostruktury vybraných vzorků

10. Přehled prováděných zkoušek

Stanovení objemové hmotnosti

Zkouška byla prováděna v souladu s normou ČSN EN 1015-10 - Zkušební metody malt pro zdivo - Část 10: Stanovení objemové hmotnosti suché zatvrdlé malty.

Stanovení pevnosti v tlaku

Zkouška byla prováděna v souladu s normou ČSN EN 13892-2 - Zkušební metody potěrových materiálů - Část 2: Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku.

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu

Zkouška byla prováděna v souladu s normou ČSN EN 13892-2 - Zkušební metody potěrových materiálů - Část 2: Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku.

Stanovení odolnosti proti ohrusu

Zkouška byla prováděna v souladu s normou ČSN EN 13892-3 - Zkušební metody potěrových materiálů - Část 3: Stanovení odolnosti proti ohrusu metodou Böhme.

Stanovení mikrotvrdosti povrchu

Zkouška byla prováděna v souladu s normou ČSN EN 13892-6 - Zkušební metody potěrových materiálů - Část 6: Stanovení tvrdosti povrchu.

Rentgenová difrakční analýza

Metoda rentgenové difrakční analýzy (RTG) byla použita ke stanovení mineralogického složení látek krystalického charakteru, v souladu s Metodickým postupem VUT FAST, č. 30-33/1.

Diferenční termická analýza

Diferenční termická analýza (DTA) je založena na měření rozdílů teplot mezi zkoušeným vzorkem a inertním standardem, byla prováděna v souladu s Metodickým postupem VUT FAST, č. 30-33/1.

Rastrovací elektronová mikroskopie

Analýza mikrostruktury vzorků byla prováděna rastrovacím elektronovým mikroskopem (REM) v souladu s Metodickým postupem VUT FAST, č.30-33/1.

Optická mikroskopie

Analýza mikrostruktury vzorků je prováděna optickým mikroskopem (OM) v souladu s Metodickým postupem VUT FAST, č.30-33/1.

11. Etapa I.: Základní ověření možností vylehčení silikátových materiálů

11.1 Návrh komponentů vyvíjené potěrové směsi

Jednotlivé komponenty suché potěrové směsi byly zvoleny na základě předešlých výzkumů v oblasti potěrových hmot a dále s přihlédnutím na využití odpadních surovin, a to primárně v podobě lehčených plniv.

11.2 Validace vlastností komerčních směsí s daty v technických listech

Pro validaci vlastností byla zvolena na trhu dostupná potěrová směs pro výrobu lehčeného cementového potěru třídy CT-C12-F3. Pro doplnění byla vyvíjená receptura srovnávána i s nelehčenými cementovými potěrovými směsmi třídy byla CT-C20-F4, CT-C30-F5 a cementovou potěrovou směsí vyztuženou vlákny třídy CT-C35-F5. Třídy a vlastnosti potěrových hmot jsou dle normy ČSN EN 13813 „Potěrové materiály a podlahové potěry – Potěrové materiály – Vlastnosti a požadavky“.

11.2.1 Vlastnosti srovnávacích směsí

Komerční cementové potěrové směsi obsahují cementové pojivo, přísady pro zlepšení zpracovatelnosti, plnivo v podobě tříděných písků a případné příměsi. Skladba směsi pro výrobu lehčeného cementového potěru je deklarována obdobným složením, je však využito lehčeného plniva v kombinaci s křemičitým pískem. Jednotlivé spotřeby pro aplikace potěru vrstvy 40 mm uvádí tabulka 6. Technické listy použitých komerčních potěrů jsou uvedeny v příloze.

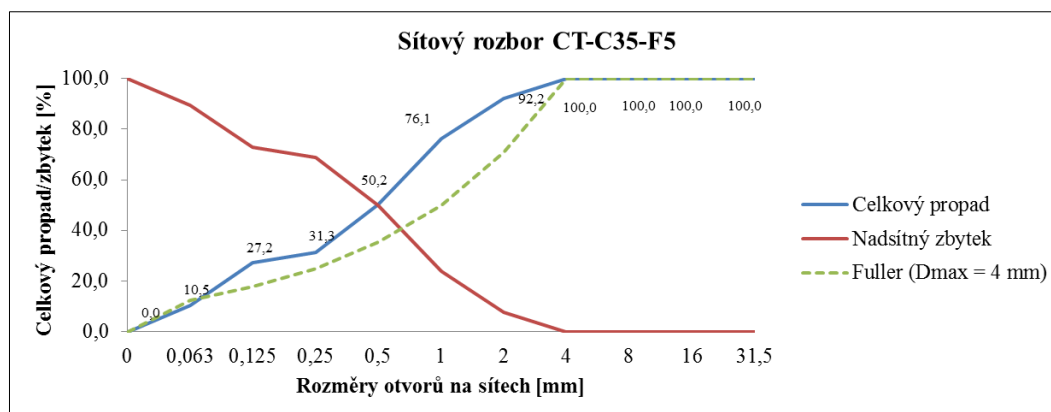
Tabulka 6 Technické údaje komerčních potěrových hmot

Třída komerční směsi	Vydatnost [dm ³ .kg ⁻¹]	Spotřeba směsi na tloušťku potěru 40 mm [kg.m ⁻²]	Spotřeba záměsové vody na 30 kg [l]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]
CT-C12-F3	1	40	3,6 - 4,8	1100
CT-C20-F4	0,53	77	3,5 - 4,5	2100
CT-C30-F5	0,53	77	3,5 - 4,5	2100
CT-C35-F5	0,5	80	3,5 - 4,0	2200

Cementový potěr třídy CT-C3-F5 obsahuje skleněná vlákna a je vhodný do provozů s vysokým mechanickým namáháním. Cementový potěr značení CT-C20-F4 obsahuje mimo drobné plnivo také polystyrenové kuličky snižující objemovou hmotnost výsledné hmoty.

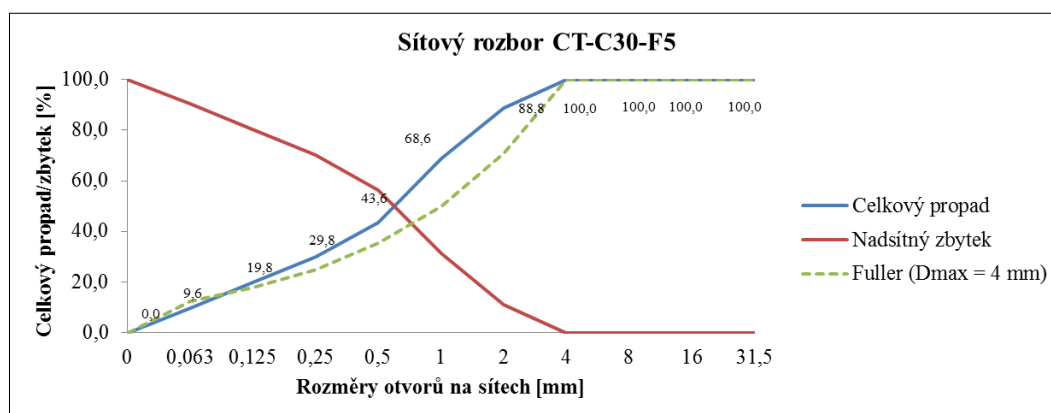
11.2.2 Sítový rozbor komerčních směsí

Jednotlivé komerční směsi byly podrobeny granulometrické analýze v návaznosti na normativní požadavky ČSN EN 933-1 „Zkoušení geometrických vlastností plniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor“. Výsledky jednotlivých granulometrických analýz uvádí níže uvedené grafy 3 až 6.



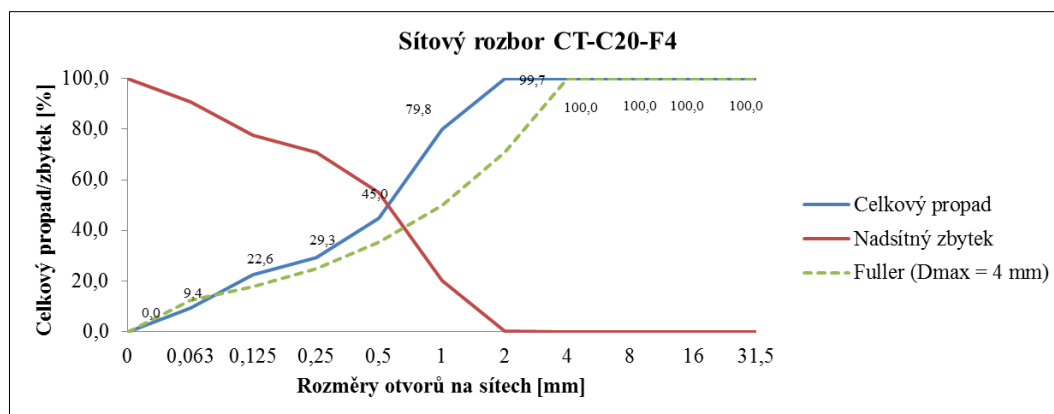
Graf 3 Sítový rozbor komerční potěrové hmoty třídy CT-C35-F5

Komerční potěr třídy CT-C35-F5 se vyznačuje sníženou zrnitostí v oblasti pod 0,25 mm, a to především v oblasti 0,125 – 0,25 mm. Vzhledem k přítomnosti pojiva v sítovém rozboru lze usuzovat na velmi malé množství zrn plniva v podobě filleru.



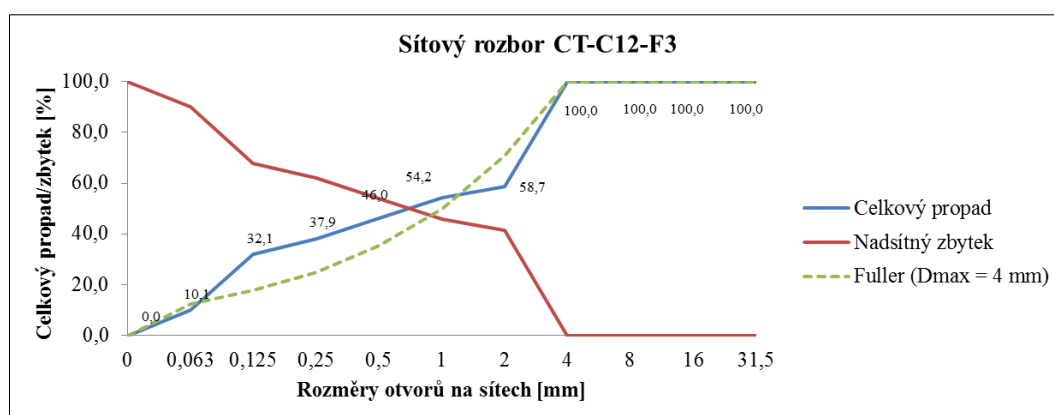
Graf 4 Sítový rozbor komerční potěrové hmoty třídy CT-C30-F5

Oproti ostatním komerčním směsím vykazuje směs CT-C30-F5 ideální zrnitost vzhledem ke srovnání s křivkou zrnitosti dle Fullera. U této směsi je patrné snížení obsahu plniva v oblasti pod 0,125 mm.



Graf 5 Sítový rozbor komerční potěrové hmoty třídy CT-C20-F4

Cementová potěrová směs CT-C20-F4 obsahuje vysoké procento plniva zrnitosti 0,5 – 1 mm a nízký obsah plniva zrnitosti pod 0,125 mm. Obdobně jako u předešlých směsí zde však hraje významnou roli i obsah suché pojivové části. Vzhledem k tomuto faktu je nutné brát zjištěné hodnoty pouze informativně. Uspokojivě však lze odhadnout poměry jednotlivých frakcí plniv mimo plnivo v obsažené ve směsi v podobě filleru.



Graf 6 Sítový rozbor komerční potěrové hmoty třídy CT-C12-F4

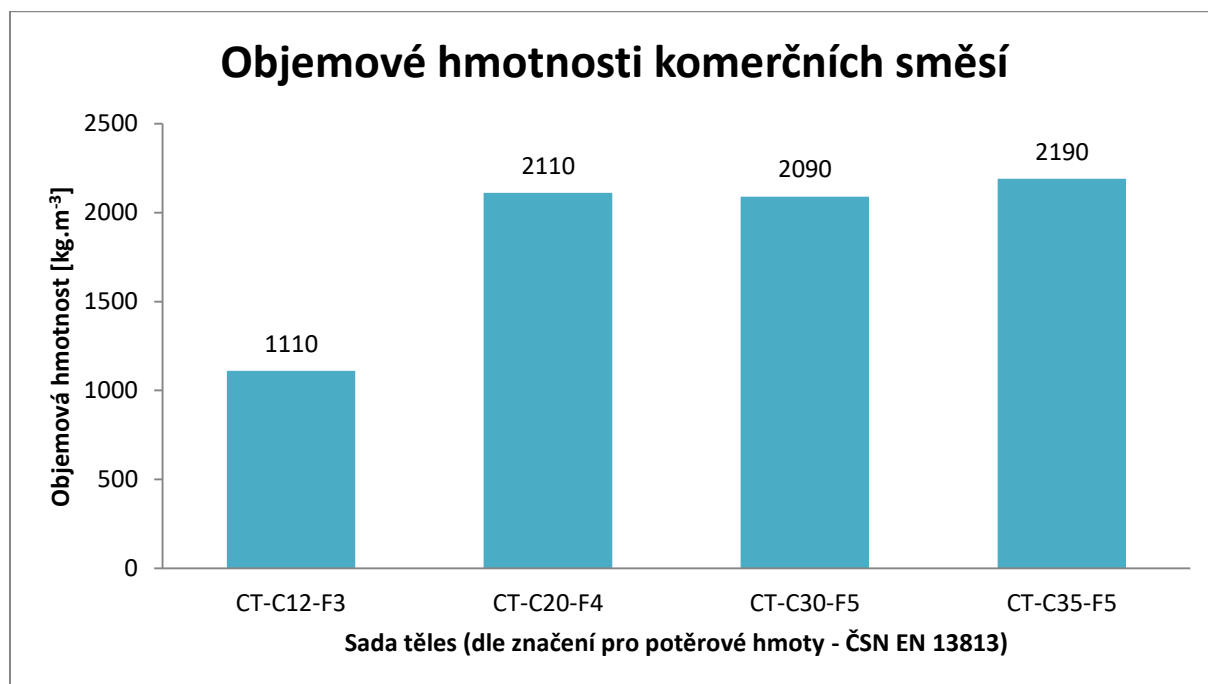
Lehčená potěrová komerční směs s obsahem plniva Liapor vykazuje oproti předchozím směsím zcela odlišnou zrnitost. Křivka zrnitosti je závislá především na hmotnosti užitého plniva, kdy dochází k částečným rozdílům mezi plnivem hutným a lehčeným. Křivka zrnitosti komerční směsi pro přípravu lehčeného potěru je však závislá především na vysokém obsahu hrubého plniva zrnitosti 0,063 až 0,25 mm a dále vysokém obsahu lehčeného plniva zrnitosti 2 až 4 mm.

Tabulka 7 Výsledky stanovení fyzikálně-mechanických vlastností komerčních směsí

Třída potěru	CT-C12-F3	CT-C20-F4	CT-C30-F5	CT-C35-F5
Objemová hmotnost [kg.m^{-3}]	1110	2110	2090	2190
Mikrotvrdost povrchu [N.mm^{-2}]	1,20	3,44	3,68	2,63
Pevnost v tahu za ohybu 7. den [N.mm^{-2}]	3,0	4,5	5,6	5,0
Pevnost v tahu za ohybu 28. den [N.mm^{-2}]	3,6	5,7	6,3	6,6
Pevnost v tahu za ohybu 90. den [N.mm^{-2}]	4,6	8,9	10,0	8,1
Pevnost v tlaku 7. den [N.mm^{-2}]	8,7	14,8	21,5	17,4
Pevnost v tlaku 28. den [N.mm^{-2}]	10,9	25,3	31,4	30,4
Pevnost v tlaku 90. den [N.mm^{-2}]	13,0	42,1	47,0	43,9
Koeficient konstruktivnosti 7. den [-]	10,8	0,7	1,0	0,8
Koeficient konstruktivnosti 28. den [-]	1,0	1,1	1,5	1,4
Koeficient konstruktivnosti 90. den [-]	1,2	1,9	2,2	2,0

11.2.3 Stanovení objemové hmotnosti

Stanovení objemové hmotnosti proběhlo na trámcích o rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm připravených pro zkoušku pevnosti v tahu za ohybu. Měření proběhlo v souladu s požadavky ČSN EN 13892 „Zkušební metody potěrových materiálů“.

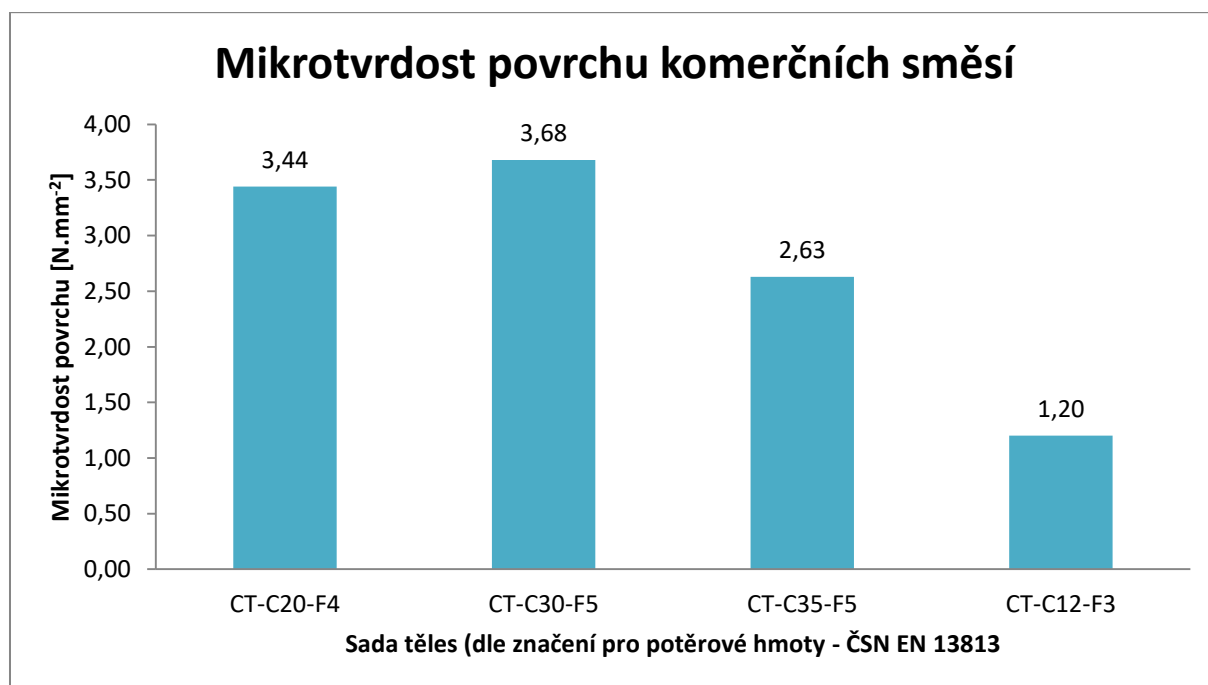


Graf 7 Objemová hmotnost komerčních potěrových hmot

Objemová hmotnost lehčeného potěru třídy CT-C12-F3 je snížena vysokým obsahem kameniva Liapor (graf 7). Při srovnání ostatních komerčních potěrů byla zaznamenána také nižší objemová hmotnost potěru CT-C30-F5 obohaceného lehčeným plnivem. Vzhledem k velmi malému množství lehčeného plniva ve směsi CT-C30-F5 však nelze usuzovat na snížení objemové hmotnosti právě užitým plnivem.

11.2.4 Stanovení mikrotvrdosti povrchu

Stanovení povrchové tvrdosti proběhlo v souladu s požadavky ČSN EN 13892-6 „Zkušební metody potěrových materiálů - Část 6: Stanovení tvrdosti povrchu“. Pro zkušební metodu bylo využito Höpplerova konzistometru.



Graf 8 Mikrotrvdost povrchu komerčních potěrových hmot

Určení celkové povrchové tvrdosti je problematické především u hmot s obsahem lehčeného plniva, kde jsou výsledky ovlivněny především obsahem cementového tmele a zároveň tvrdostí samotného lehčeného plniva. Nízká povrchová pevnost hmoty třídy CT-C35-F5 je ovlivněna jak granulometrií směsi CT-C35-F5, tak i tvarem převládajících drcených zrn plniva obsaženého ve směsi (graf 8).

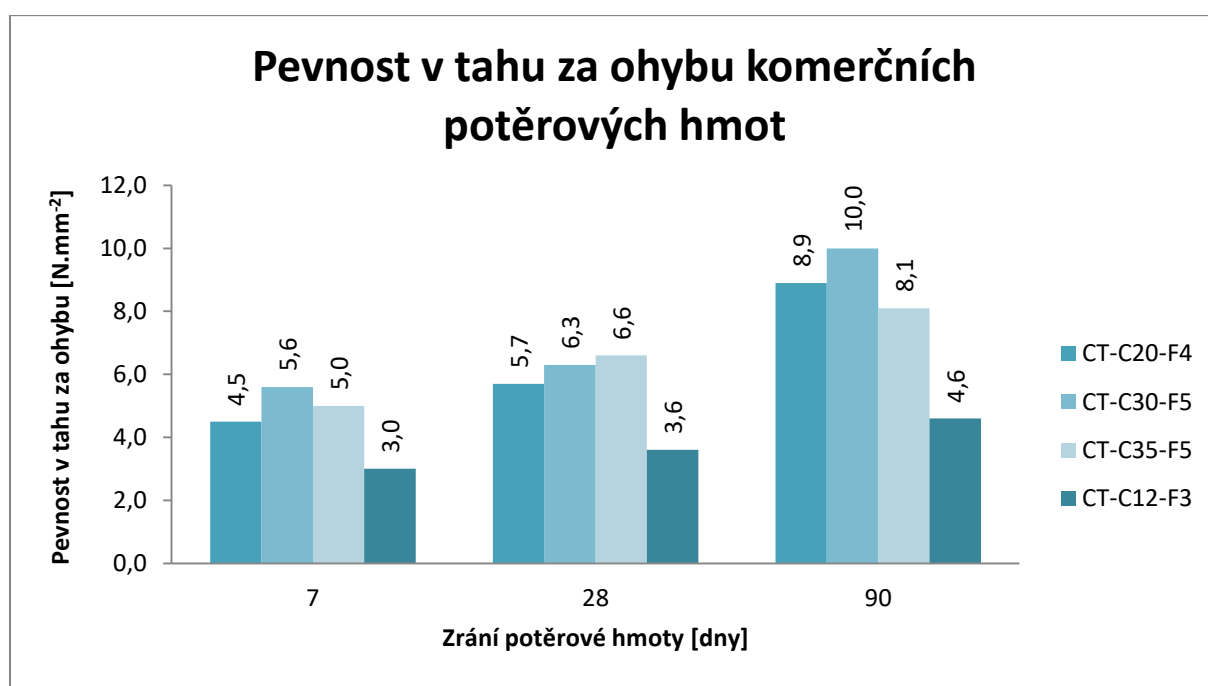
11.2.5 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku

Pevnost v tahu za ohybu byla zkoušena na trámčích 40 × 40 × 160 mm v 7. a dále v 28. dnu zrání. Pro zkoušky pevnosti v tlaku bylo využito úlomků těles ze

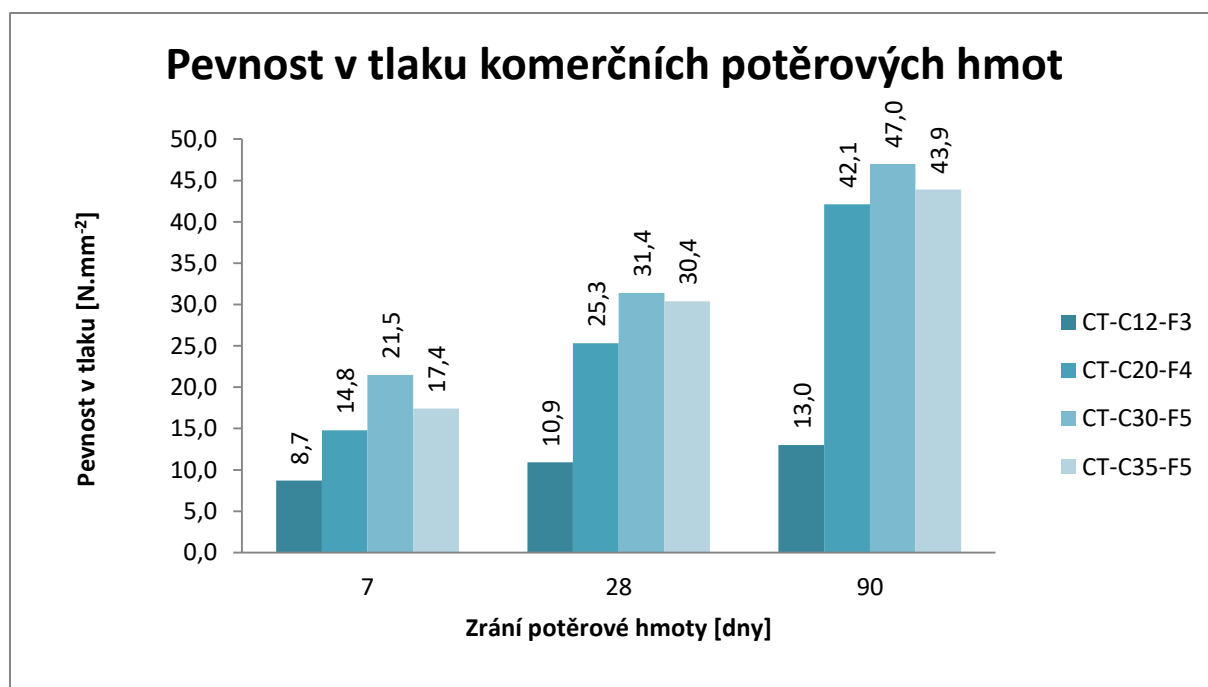
zkoušky pevnosti v tahu za ohybu. Laboratorní ošetření vzorků před zkouškou a samotné zkoušky proběhly v souladu s požadavky ČSN EN 13892 „Zkušební metody potěrových materiálů“.

Lehčená potěrová hmota třídy CT-C12-F3 dosahovala své deklarované pevnosti v tahu za ohybu již sedmý den zrání. Oproti pevnosti v tahu za ohybu vykazovala lehčená potěrová hmota třídy CT-C12-F3 snížené počáteční pevnosti v tlaku (Graf 9, 10).

Nelehčené potěrové hmoty vykazovaly obdobné nárůsty pevností ve srovnání s lehčenou potěrovou hmotou. Pozdní vývin pevností může být ovlivněn přidavkem pucolánů, přičemž lze sledovat vysoký nárůst pevností až do 90. dne zrání.



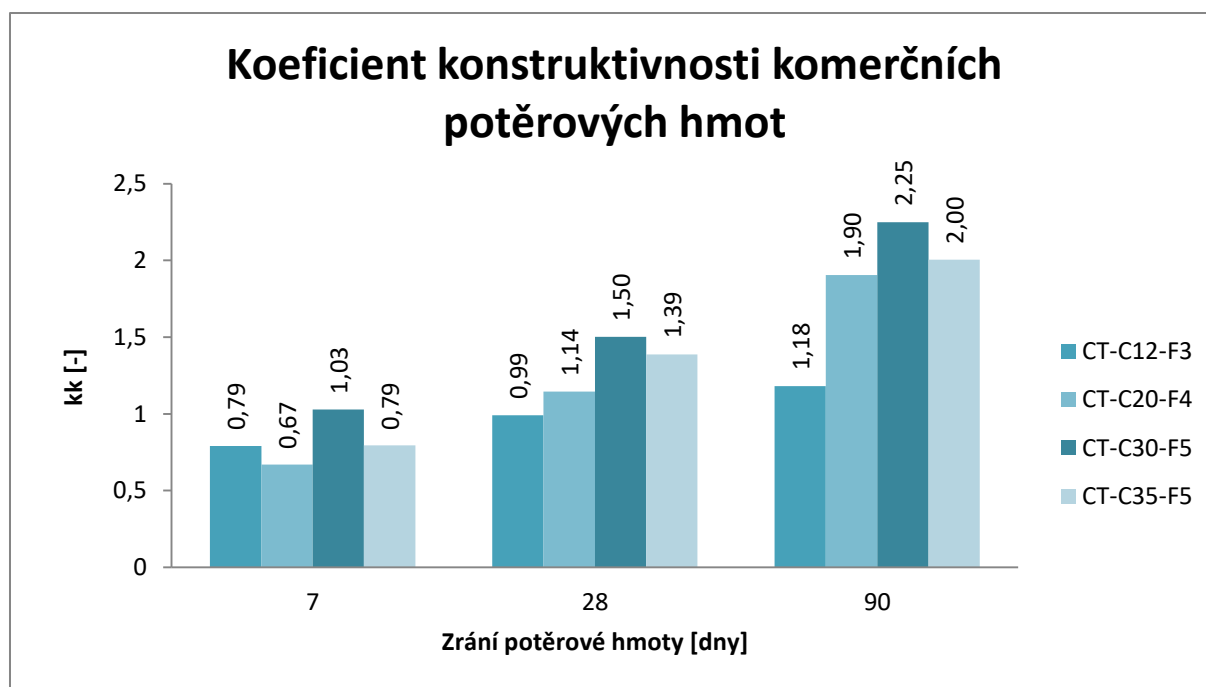
Graf 9 Srovnání pevností v tahu za ohybu komerčních potěrových hmot



Graf 10 Srovnání pevností v tlaku komerčních potěrových hmot

11.2.6 Stanovení koeficientu konstruktivnosti komerčních hmot

Na základě výsledků měření objemové hmotnosti a zároveň výsledků destruktivních zkoušek potěrové hmoty byl pro jednotlivé vzorky komerčních potěrů vypočten koeficient konstruktivnosti. Vzhledem k opožděnému vývinu pevností se nízký součinitel během zrání až zdvojnásobil, jmenovitě lehčený potěr třídy CT-C12-F3 z 0,78 v 7. dnu zrání na 1,17 v 90 dnu zrání. Komerční potěr CT-20-F4 z 0,70 v 7. dnu zrání na 2,00 v 90. dnu zrání, potěr CT-C30-F5 z 1,03 v 7. dnu zrání na 2,25 a potěr třídy CT-C35-F5 z 0,79 v 7. dnu zrání na 2,00 v 90. dnu zrání (graf 11).



Graf 11 Srovnání konstruktivnosti komerčních potěrových hmot

11.3 Výběr vhodných plniv

Výběr vhodných plniv využitelných jako náhrada původního plniva (sklářský písek) probíhal na základě průzkumu trhu s plnivem využívaných či využitelných ve stavebních hmotách, a to především s přihlédnutím na využití lehčených plniv vyráběných z odpadních látek. Popis procesu výběru plniv, popis všech uvažovaných plniv a jejich základní vlastnosti jsou popsány v kapitole 5.1 Plniva.

11.3.1 Požadavky na lehčená plniva využitelná v potěrové hmotě

Základním požadavkem na potěrovou hmotu byla především požární bezpečnost, dále byla vzhledem ke kročejové neprůzvučnosti a tepelným ztrátám konstrukce řešena i objemová hmotnost potěrové hmoty. Dále byly uvažovány i pevnostní charakteristiky a celková konstruktivnost hmoty. Potěrové hmoty jsou ve srovnání s klasickým betonem definovány především nulovým obsahem hrubé frakce plniva, tudíž bylo pohlíženo i na zrnitost jednotlivých dostupných plniv, případně na možnost úpravy zrnitosti drcením. Primární však zůstává dostupnost vybíraných plniv, a to především k možnostem výzkumu vlastností jednotlivých komponent. Opomíjeny však nebyly ani celkové vlastnosti plniv (nasákavost, obsah cizorodých látek, toxicita a především vlhkost při dodání) s ohledem na celkovou trvanlivost potěrové hmoty.

11.3.2 Výběr plniv

Při výběru byly vynechány organické materiály s nízkou tepelnou odolností, s obsahem škodlivých látek a především na trhu nedostupná plniva.

Výběrovým kritériím nejvíce vyhovovalo kamenivo Liapor, a to především k jeho dostupnosti, pozitivnímu vlivu na kompozit díky ideálně tvarovanému zrnku, a dále procentu využití v dnešní zástavbě. Dále byl vybrán expandovaný perlit s přihlédnutím na zhoršení zpracovatelnosti směsi a k vysoké nasákavosti, ale zároveň i vysokému využití ve stavebnictví. Ze stejného důvodu bylo vybráno i plnivo vermikulit (expandovaný vermikulit), a to v návaznosti na dřívější využití tohoto plniva. Vzhledem k využití odpadních látek bylo preferováno pěnové sklo Geocell, u kterého je však nutné počítat s úpravou zrnitosti. Bez úpravy zrnitosti lze využít skleněného recyklátu v podobě plniva Poraver a Liaver. Využito bylo také možnosti úpravy vlastností potěrové hmoty mikrosférami, tj. separovaným a upravovaným popílkem značky Q-CEL-7014 a Omega-SPHERES W300.

11.3.3 Zhodnocení výběru plniv

Vybíraná plniva byla preferována především z ekonomicko–technického hlediska. Upřednostňována byla plniva vyráběná z odpadních látek. Na základě požadavků uvedených dříve, byla preferována plniva mikrosférická (tzv. mikrosféry) a dále kamenivo Liapor, expandovaný perlit, vermikulit, pěnová skla Geocell a Poraver. Prioritně bylo vylehčení potěrové hmoty řešeno mikrosférami, kamenivem Liapor a pěnovým sklem Geocell. Sekundárně byla řešena částečná náhrada expandovaným perlitem a vermikulitem a zároveň vhodným typem mikrosfér.

11.4 Vlastnosti plniv

U jednotlivých plniv byly validovány základní charakteristiky uváděné v technických listech, případně byly doplněny potřebnými údaji.

11.4.1 Granulometrický rozbor

Jednotlivá plniva byla podrobena granulometrické analýze v návaznosti na normativní požadavky ČSN EN 933-1 „*Zkoušení geometrických vlastností plniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor*“.

Pěnové sklo Geocell bylo podrobeno mechanické úpravě na frakci pod 4 mm s použitím čelistového drtiče. U ostatních plniv se jedná především o sypké partikulární látky (skupenství tuhé).

Příklady granulometrického rozboru surovin jsou uvedeny v příloze B.

11.4.2 Základní fyzikálně-mechanické vlastnosti vybraných plniv

U jednotlivých vybraných lehčených plniv vyráběných z přírodních a odpadních látek byla zkoušena především nasákavost a odolnost proti drcení. Pevnostní charakteristika byla dále doplněna o sypnou hmotnost volně sypané suroviny, součinitel tepelné vodivosti, teplotu tání, pH výluhu a barevný odstín dané suroviny (tab. 8).

Tabulka 8 Základní vlastnosti vybraných plniv

Plnivo	Liapor	Poraver	Geocell	Expandovaný perlit	Expandovaný vermikulit
pH	5,5 - 11	9 - 12	7,0 - 7,3	7,1	8,5 - 10
Sypná hmotnost [kg.m ⁻³]	450 - 600	270	150	90	180
Odolnost proti drcení [N.mm ⁻²]	2,1 - 4,2	1 - 6	0,2	0,2 - 0,3	0,1 - 0,2
Nasákavost [%]	5 - 15	10 - 50	10	250 - 500	465
Teplota tání [°C]	1350	900	900	980 - 1260	1350
Součinitel tepelné vodivosti [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,09	0,07	0,04 - 0,08	0,04 - 0,06	0,04 - 0,06
Barva	Hnědá	Bílá	Šedá	Hnědobílá	Zlatohnědá

V případě cenosfér Omega-SPHERES W300 a cenosfér Q-CEL-7014 byl zaznamenán barevný odstín, dále pH výluhu, sypná hmotnost volně sypaných cenosfér, odolnost proti drcení a teplota tání (tab. 9).

Tabulka 9: Základní vlastnosti vybraných mikrosfér

Plnivo	pH	Sypná hmotnost [kg.m ⁻³]	Odolnost proti drcení [N.mm ⁻²]	Teplota tání [°C]	Barva
Omega-SPHERES W300	7 - 9,9	400	3,5	1200 - 1600	šedobílá
Q-CEL-7014	7,9	80	0,2	350	bílá

11.5 Vliv lehčených plniv na výsledné vlastnosti potěrové hmoty

Lehčená plniva vyráběná expanzí perlitu, vermikulitu, případně plavením popílku dosahují nejen nízkých objemových hmotností, ale zároveň i nízkých pevnostních charakteristik. Cílem bylo především zjištění vhodného zastoupení původního plniva plnivem lehčeným. Prioritně byl zkoumán vliv 5%, 10%, 15% a 20% náhrady původního plniva plnivem lehčeným. Náhrada plniva referenční směsí (plnivo k pojivu v poměru 3:1, bez náhrady lehčeným plnivem) probíhala objemově.

11.5.1 Vliv expandovaného perlitu na fyzikálně-mechanické vlastnosti potěrové hmoty

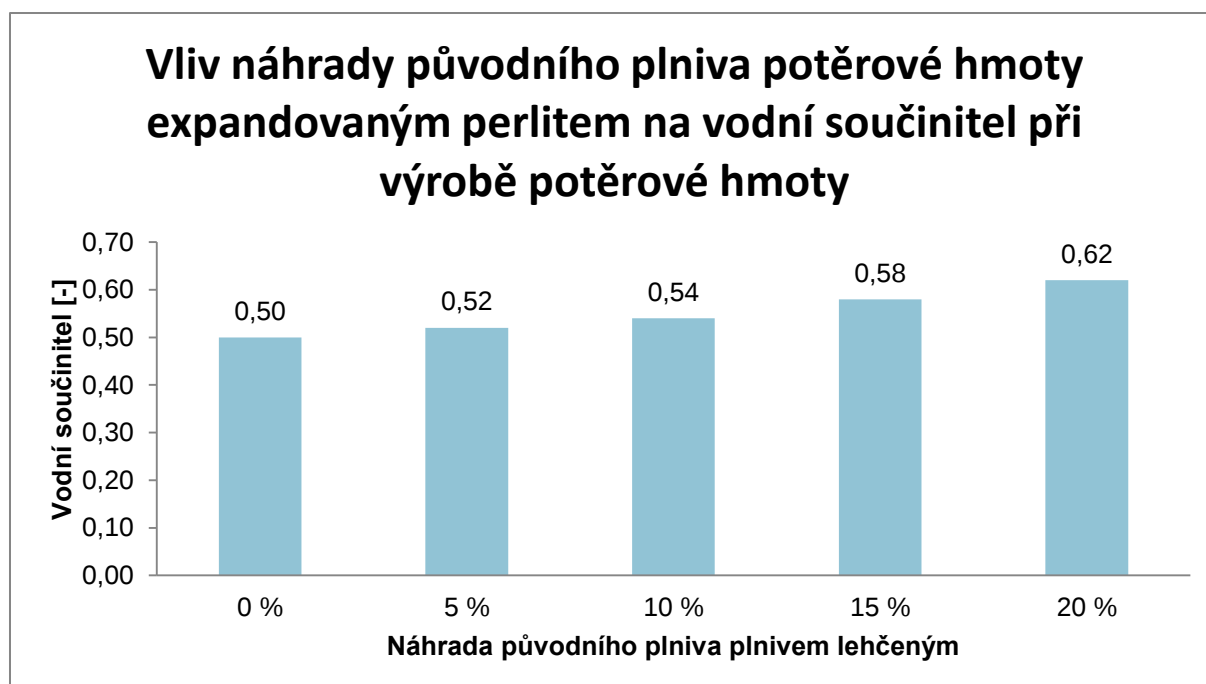
Referenční receptura pro vzorky s náhradou plniva expandovaným perlitem obsahuje plnivo v podobě přírodního drobného plniva zrnitosti 0-4 mm.

Vzhledem k plynulé křivce zrnitosti přírodního plniva frakce 0-4 mm se jeví jako vhodné provést náhradu lehčeným plnivem v plynulé křivce zrnitosti. Pro výpočet mísení jednotlivých typů expandovaného perlitu byl použit software. Dále došlo k posouzení grafického výstupu a k porovnání s požadovanou křivkou zrnitosti. Ideální křivka zrnitosti je při smísení plniv EP 180 (54 %), EP 150 (13 %) a EP 100 (33 %).

Pro objemovou náhradu plniva je nutné znát sypanou hmotnost v setřeseném stavu původního plniva a zároveň sypanou hmotnost v setřeseném stavu plniva lehčeného, případně směsi lehčených plniv. Sypaná hmotnost v setřeseném stavu směsi frakcí expandovaného perlitu činila 155 kg.m^{-3} , u přírodního plniva frakce 0 – 4 mm byla zjištěna sypaná hmotnost v setřeseném stavu 1626 kg.m^{-3} . Náhrada probíhala procentuálně 5 %, 10 %, 15 % a 20 % objemově.

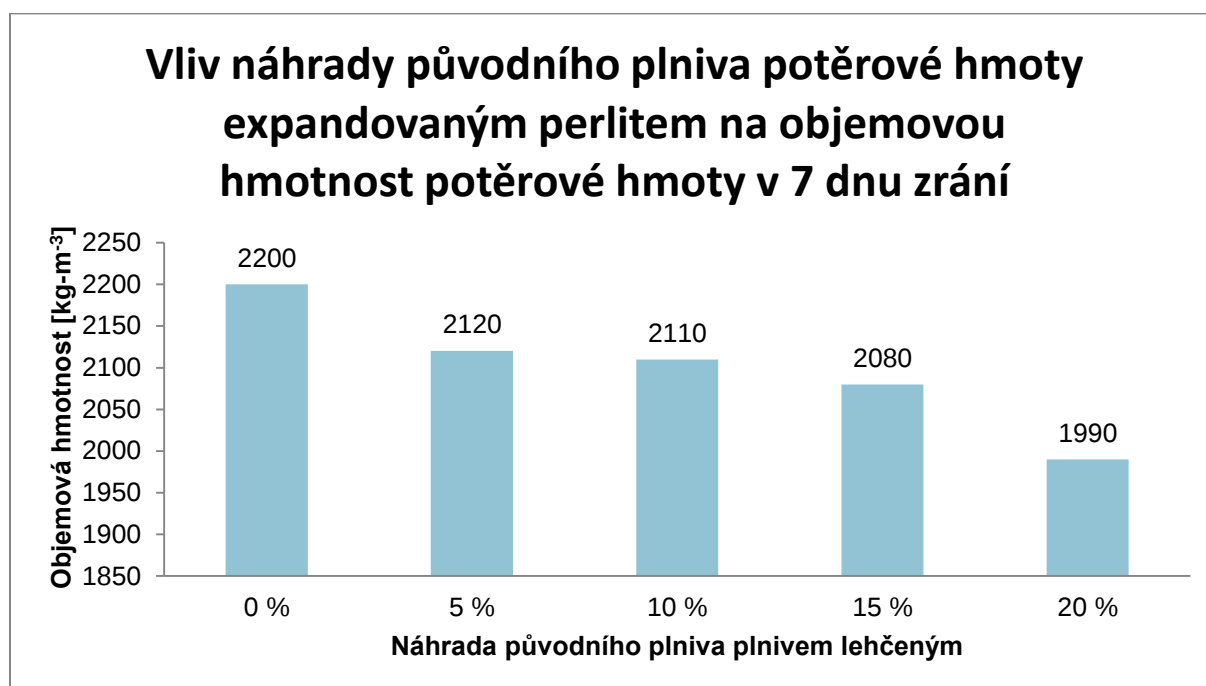
Tabulka 10 Vliv expandovaného perlitu na fyzikálně-mechanické vlastnosti potěrové hmoty

Náhrada [%]	0	5	10	15	20
Vodní součinitel [-]	0,50	0,52	0,54	0,58	0,62
Objemová hmotnost [kg.m^{-3}]	2200	2120	2110	2080	1990
Pevnost v tlaku [N.mm^{-2}]	37,5	35,9	34,8	31,1	25,7
Koeficient konstruktivnosti [-]	1,70	1,69	1,65	1,50	1,29

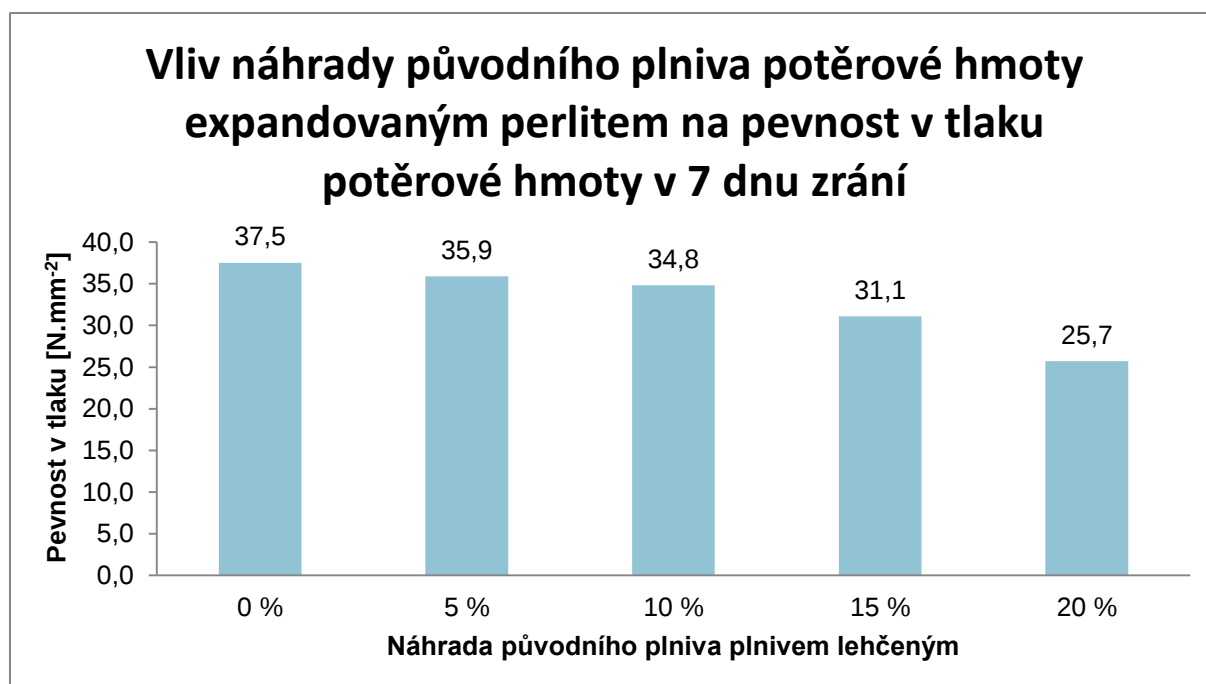


Graf 12 Vodní součinitel potěrové hmoty - průzkum vlivu náhrady plniva expandovaným perlitem

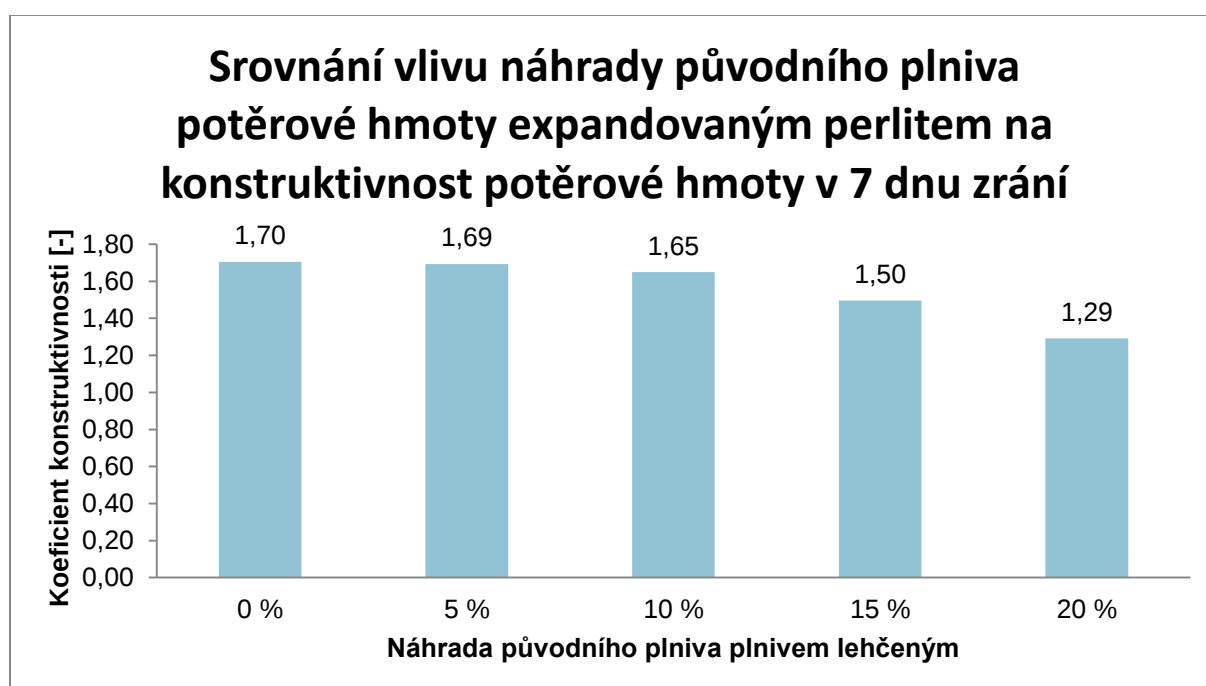
Vzorky byly ponechány v laboratorním uložení (20 ± 2 °C, 65 ± 5 % relativní vlhkosti) po dobu 7 dnů pro pevnostní zkoušky.



Graf 13 Objemová hmotnost potěrové hmoty - průzkum vlivu náhrady přírodního plniva expandovaným perlitem



Graf 14 Pevnost v tlaku potěrové hmoty - průzkum vlivu náhrady plniva expandovaným perlitem



Graf 15 Koeficient konstruktivnosti potěrové hmoty - průzkum vlivu náhrady plniva expandovaným perlitem

11.5.1.1 Zhodnocení vlivu expandovaného perlitu

Vlivem nasákavosti perlitového plniva je nutno přidávat vyšší množství záměsové vody tak, aby byla směs zpracovatelná a vykazovala konzistenci na úrovni srovnávací směsi. Přídavkem expandovaného perlitu snižujeme nejen objemovou hmotnost zatvrdlé hmoty, ale zároveň snižujeme i celkovou odolnost hmoty proti působení vnějších sil. Přídavkem expandovaného perlitu tedy zároveň snižujeme

i koeficient konstruktivnosti hmoty. Při porovnání hodnot množství záměsové vody a hodnot koeficientu konstruktivnosti lze volit pouze 10% náhradu přírodního plniva expandovaným perlitem.

Expandovaný perlit je tudíž vhodné využít do 10 % v podobě náhrady původního plniva u jednotlivých receptur, především tam, kde je síťovým rozbořem určen pouze malý podíl jemného plniva, případně jedná-li se u využívaného lehčeného plniva o přerušovanou křivku zrnitosti.

11.5.2 Vliv expandovaného vermikulitu a mikrosfér Q-CEL-7014, Omega-SPHERES W300 na fyzikálně-mechanické vlastnosti potěrové hmoty

Tabulka 11 Vliv expandovaného vermikulitu a mikrosfér Q-CEL-7014 a Omega SPHERES W300 na fyzikálně-mechanické vlastnosti potěrové hmoty

Expandovaný vermikulit					
Náhrada [%]	0	5	10	15	20
Vodní součinitel [-]	0,77	0,78	0,83	0,83	0,85
Objemová hmotnost [kg.m⁻³]	2020	1980	1950	1930	1910
Pevnost v tlaku [N.mm⁻²]	19,2	17	14,2	16,9	16
Pevnost v tahu za ohybu [N.mm⁻²]	5,5	4,9	4,6	5,6	5,3
Koeficient konstruktivnosti [-]	0,95	0,86	0,73	0,88	0,84
Mikrosféry Q-CEL-7014					
Náhrada [%]	0	5	10	15	20
Vodní součinitel [-]	0,77	0,77	0,74	0,72	0,62
Objemová hmotnost [kg.m⁻³]	2020	2020	2020	2010	1950
Pevnost v tlaku [N.mm⁻²]	19,2	20,6	20	19,4	18,9
Pevnost v tahu za ohybu [N.mm⁻²]	5,5	5,3	5,7	6,1	5,7
Koeficient konstruktivnosti [-]	0,95	1,02	0,99	0,97	0,97
Mikrosféry Omega SPHERES W300					
Náhrada [%]	0	5	10	15	20
Vodní součinitel [-]	0,77	0,81	0,85	0,93	1,01
Objemová hmotnost [kg.m⁻³]	2020	1840	1740	1640	1550
Pevnost v tlaku [N.mm⁻²]	19,2	13,5	10,4	8,8	6,9
Pevnost v tahu za ohybu [N.mm⁻²]	5,5	4,1	3,6	3,1	2
Koeficient konstruktivnosti [-]	0,95	0,73	0,6	0,54	0,45

11.5.2.1 Expandovaný vermikulit

Vzhledem k využití sklářského písku v podobě plniva nově vznikajícího kompozitu bylo zvoleno toto plnivo i pro zkoušky vlivu procentuální náhrady plniva plnivem lehčeným v podobě expandovaného vermikulitu a lehkých popelovin.

Vzhledem ke granulometrii sklářského písku byl volen typ lehčeného plniva Vermikulit Superfine. Vermikulit je v dnešní době na trhu dostupný v podobě typů

Vermikulit Large (převážně frakce 4-8 mm), Vermikulit Medium (převážně frakce 2 – 4 mm), Vermikulit Superfine (převážně frakce 0,5-1 mm) a Vermikulit Micron (převážně frakce 0,25 - 0,5 mm).

Sypná hmotnost v setřeseném stavu expandovaného vermikulitu typu Vermikulit Superfine činila 213 kg.m^{-3} , u sklářského písku byla zjištěna sypná hmotnost v setřeseném stavu $1\,610 \text{ kg.m}^{-3}$. Náhrada probíhala procentuálně po 5 %, 10 %, 15 % a 20 % objemově.

11.5.2.2 Mikrosféry Q-CEL-7014

Mikrosféry Q-CEL-7014 se vyznačují velmi nízkou objemovou hmotností v setřeseném stavu (62 kg.m^{-3}). Výroba mikrosfér Q-CEL-7014 je součástí know-how výrobce. Pro mikrosféry Q-CEL-7014 je typické jejich problematické zpracování vzhledem k samovolnému shlukování částic. Shluky částic je nutné během homogenizace komponent dispergovat v celém objemu suché výrobní směsi. Při nedostatečné dispergaci kulových částic mikrosfér Q-CEL-7014 v potěrové hmotě dochází ke vzniku nechtěných shluků silně ovlivňujících zpracovatelnost a fyzikálně-mechanické vlastnosti zatvrdlé potěrové hmoty.

V případě náhrady původního plniva mikrosférami Q-CEL-7014 bylo využito plnivo v podobě sklářského písku. Náhrada sklářského písku plnivem v podobě plaveného popílku Q-CEL-7014 probíhala procentuálně po 5 %, 10 %, 15 % a 20 % objemově.

Vodní součinitel 0,77 (pro referenční směs) byl zvyšován na základě zkoušek konzistence prováděných na střešacím stolku s přihlédnutím na ČSN EN 1015-3 „Zkušební metody malt pro zdivo - Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)“. v případě vyhovující konzistence byla pro každou procentuální náhradu plniva plnivem lehčeným zhotovena trojdílná sada těles $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ pro zhodnocení vlivu vodního součinitele a lehčeného plniva na konstruktivnost materiálu.

11.5.2.3 Mikrosféry Omega-SPHERES W300

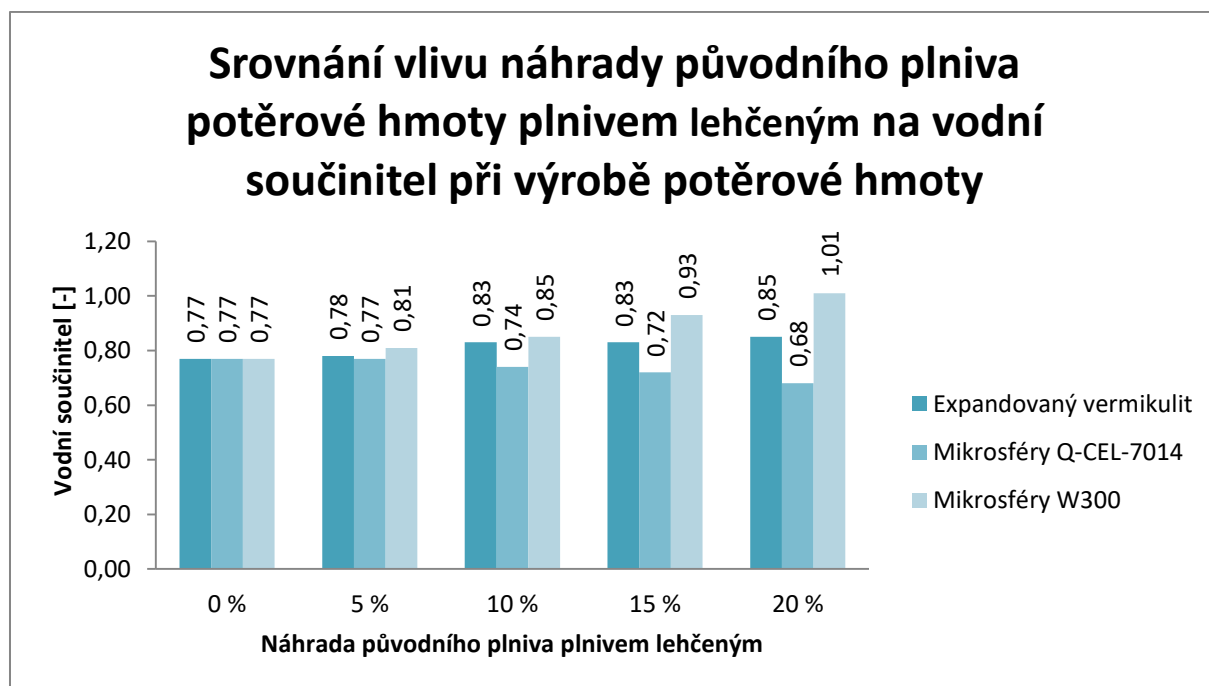
Sypná hmotnost mikrosfér W300 v setřeseném stavu činí 456 kg.m^{-3} . Mikroplnivo v podobě mikrosfér W300 vyniká nejen svou nízkou objemovou hmotností, ale především také ztekucujícím účinkem na směs pro výrobu potěrové hmoty.

Náhrada sklářského písku plnivem v podobě mikrosfér W300 probíhala procentuálně po 5 %, 10 %, 15 % a 20 % objemově.

Vodní součinitel 0,77 (pro referenční směs) byl zvyšován na základě zkoušek konzistence prováděných na střešacím stolku s přihlédnutím na ČSN EN 1015-3 „Zkušební metody malt pro zdivo - Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)“. v případě vyhovující konzistence byla pro každou procentuální náhradu plniva plnivem lehčeným zhotovena trojdílná sada těles 40 × 40 × 160 mm pro zhodnocení vlivu vodního součinitele a lehčeného plniva na konstruktivnost materiálu.

11.5.2.4 Vliv přídavku expandovaného vermikulitu a mikrosfér na vodní součinitel

Vodní součinitel 0,5 (pro referenční směs) byl zvyšován na základě zkoušek konzistence prováděných na střešacím stolku s přihlédnutím na ČSN EN 1015-3 „Zkušební metody malt pro zdivo - Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)“. v případě vyhovující konzistence byla pro každou procentuální náhradu plniva plnivem lehčeným zhotovena trojdílná sada těles 40 × 40 × 160 mm pro zhodnocení vlivu vodního součinitele a lehčeného plniva na konstruktivnost materiálu.



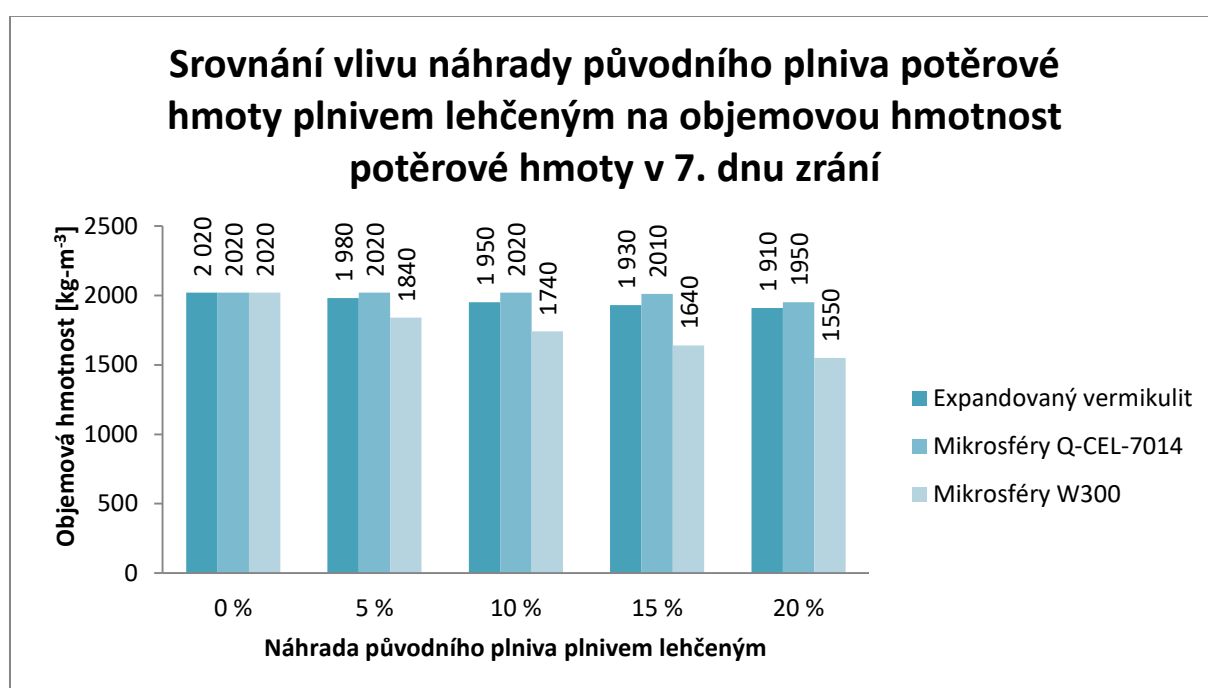
Graf 16 Vodní součinitel při výrobě potěrové hmoty - průzkum vlivu náhrady plniva expandovaným perlitem

Se zvyšující se náhradou sklářského písku expandovaným vermikulitem je nutno počítat také se zvýšením celkového množství záměsové vody pro udržení požadované konzistence.

Přídavkem mikrosfér Q-CEL-7014 snižujeme potřebné množství záměsové vody pro vytvoření hmoty o totožné konzistenci s hmotou referenční (bez náhrady plniva mikrosférami).

Mikrosféry W300 zvyšují spotřebu záměsové vody.

11.5.2.5 Vliv přídavku expandovaného vermikulitu a mikrosfér na objemovou hmotnost



Graf 17 Změna objemové hmotnosti při náhradě sklářského písku lehčeným plnivem

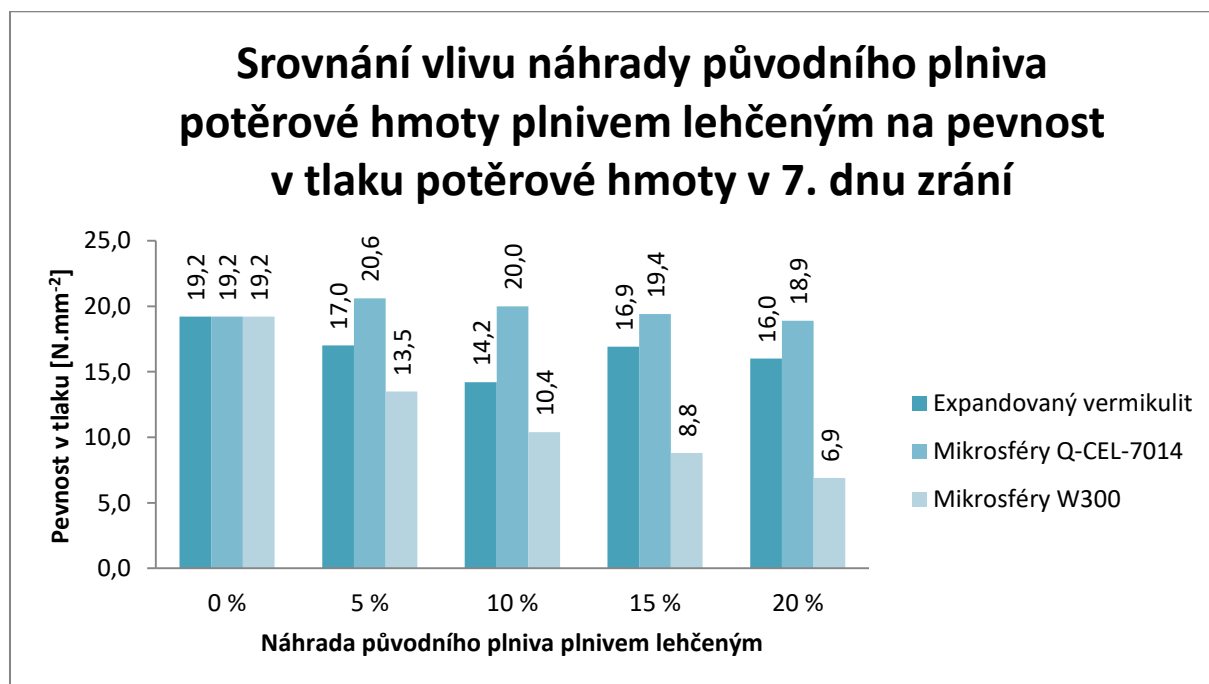
Přídavek expandovaného vermikulitu snižuje objemovou hmotnost potěrové hmoty.

Mikrosféry Q-CEL-7014 mají patrný vliv na vylehčení hmoty až při náhradě plniva v 15 % z celkového objemu plniv. Mikrosféry W300 výrazně snižují objemovou hmotnost potěrové hmoty.

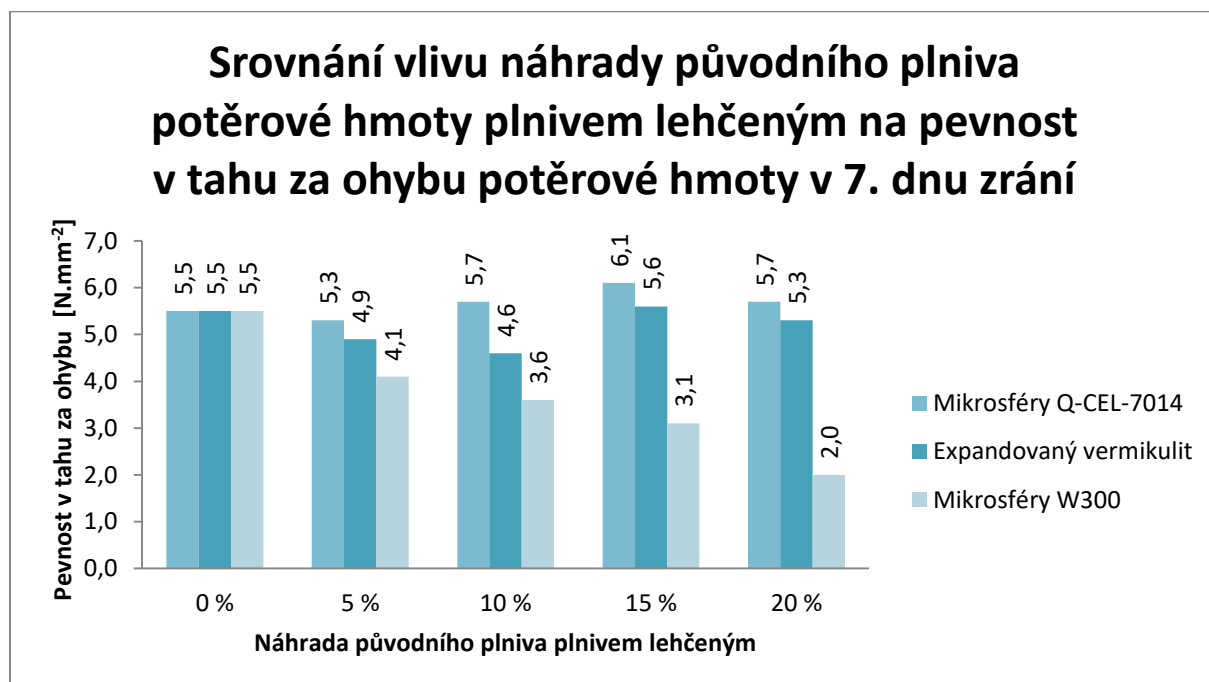
11.5.2.6 Vliv přídavku expandovaného vermikulitu a mikrosfér na pevnost v tlaku a v tahu za ohybu

Pevnost v tlaku hmoty s přídavkem expandovaného vermikulitu je ovlivněna především způsobem výroby hmoty, a to jejím hutněním, kdy dochází v povrchových vrstvách hmoty k separaci lehkých plniv vlivem různorodých objemových hmotností.

Zároveň je však nutné zohlednit vliv hutnění na pohyb zrn plniva a také odlišné fyzikálně-mechanické vlastnosti expandovaného vermikulitu vzhledem ke směru působení mechanického namáhání na jednotlivá zrna. Vzhledem k výše uvedeným faktům je problematické určit vliv náhrady původního plniva expandovaným vermikulitem. Lze však říci, že přidavkem expandovaného vermikulitu klesá odolnost hmoty vůči působení mechanického zatížení.



Graf 18 Změna pevnosti v tlaku potěrové hmoty při náhradě sklářského písku lehčeným plnivem

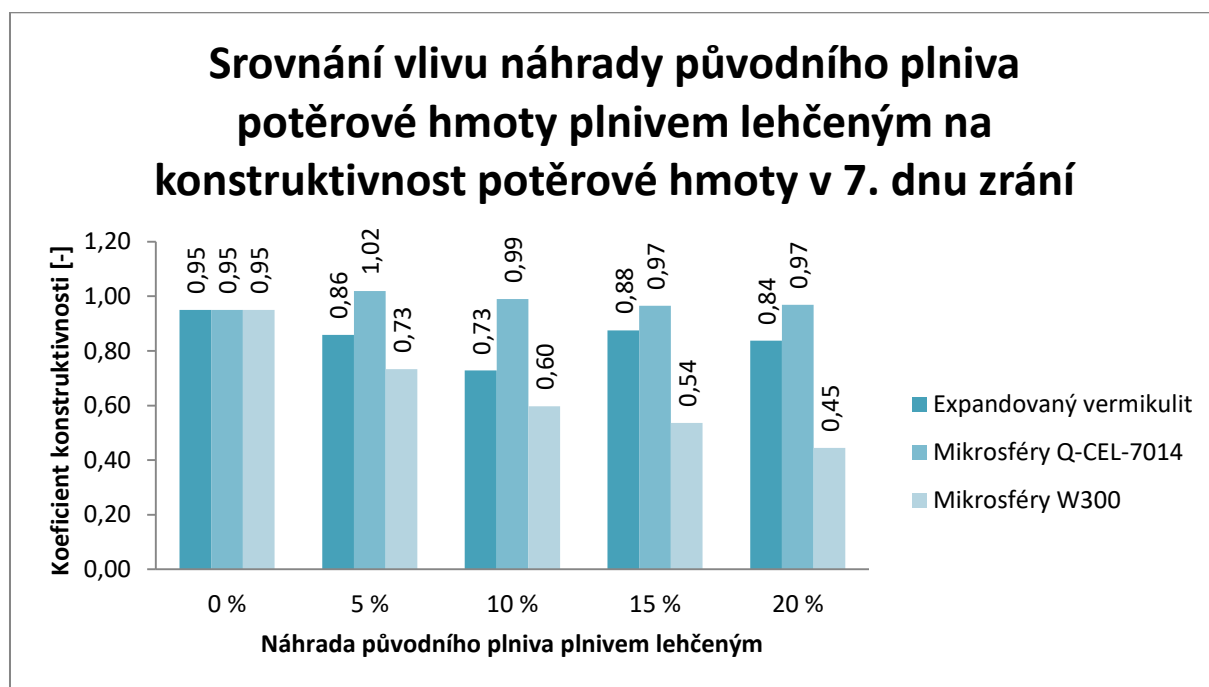


Graf 19 Změna pevnosti v tahu za ohybu potěrové hmoty při náhradě sklářského písku lehčeným plnivem

Pevnost v tlaku potěrové hmoty s náhradou plniva mikrosférami Q-CEL-7014 vykazuje vyšší hodnoty oproti referenční receptuře (bez náhrady plniva) především v hodnotách 5% až 15% náhrady plniva mikrosférami.

Mikrosféry W300 výrazně snižují výslednou pevnost potěrové hmoty.

11.5.2.7 Vliv přídavku expandovaného vermikulitu a mikrosfér na koeficient konstruktivnosti



Graf 20 Změna konstruktivnosti potěrové hmoty při náhradě sklářského písku lehčeným plnivem

Konstruktivnost potěrové hmoty s částečnou náhradou plniva expandovaným vermikulitem je závislá na změně objemové hmotnosti a mechanické pevnosti prvku. Tudiž lze uvažovat zkreslující vliv hutnění hmoty a orientaci částic expandovaného vermikulitu na výslednou konstruktivnost hmoty.

Mikrosféry Q-CEL-7014 celkově zvyšují konstruktivnost potěrové hmoty. Vzhledem k výraznému snížení pevnostních charakteristik potěrové hmoty s náhradou plniva mikrosférami W300 se snižuje i výsledná konstruktivnost hmoty.

11.5.2.8 Zhodnocení vlivu expandovaného vermikulitu

Přídavek expandovaného vermikulitu snižuje objemovou hmotnost potěrové hmoty, zároveň však snižuje i její pevnostní charakteristiky. Se zvyšujícím se množstvím obsahu expandovaného vermikulitu ve hmotě snižujeme celkovou konstruktivnost hmoty. v případě náhrady části lehčeného plniva expandovaným vermikulitem se jeví jako nejvhodnější 15% náhrada.

11.5.2.9 Zhodnocení vlivu mikrosfér Q-CEL-7014

Náhradou plniva potěrové hmoty mikrosférami typu Q-CEL-7014 lze docílit vylepšení výsledných fyzikálně-mechanických vlastností hmoty a zároveň lze také zvýšit celkovou konstruktivnost hmoty. Mikrosféry Q-CEL-7014 zlepšují zpracovatelnost hmoty a zároveň snižují množství potřebné záměsové vody pro dosažení stejné konzistence v porovnání se vzorkem referenčním (bez náhrady plniva). Vzhledem k vysoké tržní ceně mikrosfér se jeví jako vhodná především 5% náhrada plniva mikrosférami Q-CEL-7014.

11.5.2.10 Zhodnocení vlivu mikrosfér Omega-SPHERES W300

Mikrosféry W300 odebírají potěrové hmotě vysoké množství záměsové vody, a tím i přes vlastní ztekucující efekt mikrosfér dochází k výraznému zhoršení zpracovatelnosti směsi při zachování dávky vody užitě pro referenční potěrovou hmotu (bez náhrady mikrosférami). Přídavek mikrosfér W300 snižuje objemovou hmotnost hmoty, ale zároveň i výrazně snižuje její výsledné pevnostní charakteristiky v počátečním období zrání.

11.5.3 Shrnutí vlivu expandovaného perlitu, expandovaného vermikulitu a mikrosfér Q-CEL-7014, Omega-SPHERES W300 na fyzikálně-mechanické vlastnosti potěrové hmoty

Provedenými experimentálními pracemi bylo zjištěno, že vlivem nasákavosti perlitového kameniva je nutno přidávat vyšší množství záměsové vody tak, aby byla směs zpracovatelná a vykazovala konzistenci na úrovni srovnávací směsi. Přídavkem expandovaného perlitu tedy zároveň snižujeme i koeficient konstruktivnosti hmoty. Přídavek expandovaného vermikulitu snižuje objemovou hmotnost potěrové hmoty, zároveň však snižuje i její pevnostní charakteristiky. Se zvyšujícím se množstvím obsahu expandovaného vermikulitu ve hmotě snižujeme celkovou konstruktivnost hmoty. Náhradou plniva potěrové hmoty mikrosférami typu Q-CEL-7014 lze docílit vylepšení výsledných fyzikálně-mechanických vlastností hmoty a zároveň lze také zvýšit celkovou konstruktivnost hmoty.

12. Etapa II.: Návrh receptur lehčených stavebních hmot

12.1 Návrh skladby cementového potěru

Suché směsi pro přípravu komerčních potěrových hmot byly podrobeny chemickému rozboru (tab. 12).

Tabulka 12 Výsledky chemického rozboru prováděného na komerčních směsích [%]

Třída	CT-C12-F3	CT-C20-F4	CT-C30-F5	CT-C35-F5
ZŽ	19,7	15,4	18,4	10,6
SiO ₂	3,29	5,77	5,55	6,96
Al ₂ O ₃	2,44	2,56	2,63	3,49
Fe ₂ O ₃	1,59	2,25	1,93	2,66
CaO	30,8	26,1	32,9	24,5
MgO	1,59	1,48	1,36	1,62
MnO	0,04	0,06	0,05	0,06
K ₂ O	0,18	0,58	0,43	0,66
Na ₂ O	0,12	0,14	0,14	0,16
SO ₃	0,76	1,24	1,34	1,76
Chloridy	0,03	0,03	0,04	0,04
Nerozpustný zbytek	39,2	41,37	34,25	46,7

Dávka cementu byla pevně stanovena pro referenční potěrovou hmotu i hmoty modifikované. Pro referenční potěr bylo použito plniva v podobě sklářského písku, bez náhrady lehčeným plnivem. Pro potřeby práce byly vytvořeny dva druhy referenčních hmot. Byla vytvořena potěrová hmota bez náhrady cementu popílkem a referenční potěrová hmota s náhradou cementu popílkem Dětmárovice. Pro směsi modifikovaných potěrových hmot bylo nahrazováno plnivo v podobě sklářského písku lehčenými plnivy.

Popílek Dětmárovice byl přidáván v množství 20 % z obsahu cementu. Mikrosilika Sioxid Microsit byla, v závislosti na předešlé výzkumy fakulty stavební v oblasti potěrových hmot, přidávána v množství 2 % z hmotnosti cementu, plastifikátor Elotex FL 1200 v množství 0,8 % z množství cementu a Melment M10 v množství 0,2 % z hmotnosti cementu.

Množství cementu CEM i 42,5 R Hranice bylo stanoveno na základě požadavků na potěrové. Obsah cementu činí 25 %.

Obsah vody v jednotlivých směsích byl měněn na základě srovnatelné konzistence čerstvé potěrové hmoty jednotlivých receptur.

12.1.1 Výběrový proces plniva

Z důvodů velké škály možností, byl do experimentálního procesu tvorby receptur vložen rozhodovací proces, který má za cíl vybrat nejvhodnější plnivo jako plnohodnotnou náhradu.

12.1.1.1 Výběr plniva z hlediska nákladů na pořízení plniva

Tabulka 13 - Náklady na pořízení surovin

Plnivo - produkt	Cena [Kč.m ⁻³]
Mikrosféry Omega-SPHERES W300	22 000
Mikrosféry hollow cells Q-CEL-7014	7 880
Vermikulit expandovaný	600-1 260
Perlit expandovaný	2 100
Liapor frakce 0-2mm	2 050
Liapor frakce 0-4mm	2 120
Liapor frakce 4-8mm, 8-16 mm	2 110
Refaglass	1 810
Geocell	1 420
Liaver frakce 0,25-0,5mm	4 725
Liaver frakce 0,5-1mm	3 265
Liaver frakce 1-2mm	3 300
Liaver frakce 2-4mm	2 545
Poraver	5 120
Betonový recyklát	Velmi nízká podle druhu

*Zjištěné ceny jsou pouze orientační.

Z uvedených cen vyplývá, jako nejlepší volba z kategorie kameniv vyráběných, expandovaný Perlit, Vermikulit, Liapor a z kameniv vyráběných z odpadních surovin jako nejlépe vhodná varianta vyplývá kamenivo Liaver.

12.1.1.2 Výběr nejvhodnějšího plniva z hlediska stanovených kritérií

Pro výběr nejvhodnějšího plniva bylo stanoveno bodové hodnocení jednotlivá kritéria výběru. Provedení tohoto kroku bylo důležité z hlediska regulace velké škály možností na minimum. Z předešlého výzkumu fakulty byla stanovena nejvhodnější plniva. Tyto plniva byla posouzena dle zvolených kritérií jako náhrada běžného plniva do používaných receptur.

Tabulka 14 Hodnocení výběru plniva

Kritérium	Bodové ohodnocení		
	Perlit	Liapor	Liaver
Cena	7	6	4
Dostupnost	5	5	6
Pevnost v tlaku	2	5	6
Objemová hmotnost	8	6	7
Trvanlivost	7	7	7
Variabilita výběru frakcí	3	6	8
Bodový součet	32	35	38

*Plniva byla ohodnocena na bodové stupnici od 1 do 10.

Po bodovém zhodnocení kritérií předem vybraných plniv bylo jako nejvhodnější plnivo určeno plnivo Liaver. Plnivo Liaver bylo použito v navrhovaných recepturách jako celková či částečná náhrada běžně používaného kameniva. Od plniva Liaver jako náhrady je očekáváno snížení objemové hmotnosti směsí za přijatelného snížení pevnostních charakteristik. Hodnocena byla dostupnost, cena, objemová hmotnost, trvanlivost, pevnost v tlaku a možnost variace výběru frakcí.

12.1.2 Návrh a odzkoušení vhodných receptur pro pěnotvorné látky

Bylo vytvořeno několik receptur za využití suchých pěnidel s Hostapur OSB a Tylovis EP 28. Jako aditivum byla použita přísada urychlující tvrdnutí X - SEED 100. Výsledné receptury byly dále modifikovány pro zlepšení požadovaných vlastností.

12.1.2.1 Návrh vhodných receptur pro lehčené hmoty na bázi pěnobetonu

Návrh receptur byl zpracován na základě předešlých zkušeností s pěnotvornými činidly. Množství pěnotvorného činidla bylo odvozeno od celkové dávky suché směsi. Jako lehčené plnidlo bylo vybráno kamenivo Liaver frakce 0-4 mm. Receptury jsou uvedeny v tabulce 15. Pro účely disertační práce bylo vytvořeno ještě několik experimentálních receptur, určených ke zkoumání mechanismů v mikrostruktuře, především kotvení zrn v tmelu a interakce mezi uvažovanými složkami. Jejich složení je uvedeno v tabulce 16.

Tabulka 15 Návrh receptur pěnobetonů [g]

Receptura	CEM I 42,5 R	Kamenivo frakce 0-4mm	Liaver 0-4mm	Pěnidlo Hostapur	Pěnidlo Tylovis EP 28	Přísada X-SEED	Voda
REC A	250	750		0,40			139
REC B	249	746		0,40		4,97	138
REC C	250	750			0,40		139
REC D	249	746			0,40	4,97	138
REC E	313	625	63				208
REC F	312	625	62	0,37			174
REC G	313	625	63				174
REC H	333		666	0,50			292
REC I	310	621	62	0,37		6,21	172
REC J	312	625	62		0,37		174
REC K	310	621	62		0,37	6,21	172
REC L	333		666		0,50		292
REC M	333		666	0,50		9,90	292
REC N	330		660		0,50	9,90	289

Tabulka 16 Návrh receptur pěnobetonů pro analýzu mikrostruktury [g]

Receptura	CEM I 42,5 R	Popílek	Liaver 0-4mm	Vermikulit	Q-CEL- 7016	W- 300	Pěnidlo Hostapur + Tylovis EP 28 (1:1)
REC G7	330		670				0,1
REC Q17	330	80	420			170	0,1
REC X24	440	120	160	120	160		0,1

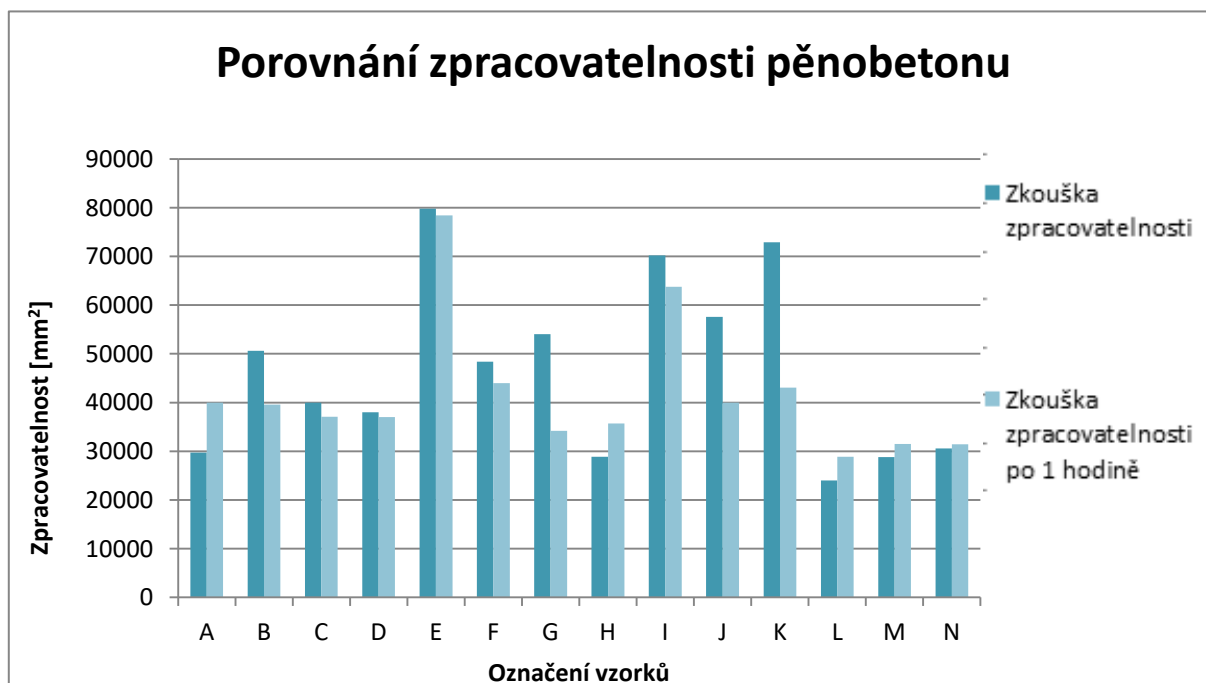
12.1.2.2 Stanovení konzistence

Pomocí stráscacího stolku byla stanovena orientační zpracovatelnost daných záměsí pěnobetonů pro porovnání jejich konzistence.

Tabulka 17 Zpracovatelnost pěnobetonů

Označení vzorku	Zkouška zpracovatelnosti [mm]	Zkouška zpracovatelnosti po 1 hodině [mm]	Zkouška zpracovatelnosti [mm ²]	Zkouška zpracovatelnosti po 1 hodině [mm ²]
A	170*175	200*200	29750	40000
B	230*220	180*220	50600	39600
C	200*200	190*195	40000	37050
D	190*200	185*200	38000	37000
E	280*285	280*280	79800	78400
F	220*220	220*200	48400	44000
G	230*235	180*190	54050	34200
H	170*170	170*210	28900	35700
I	270*260	250*255	70200	63750
J	240*240	200*200	57600	40000
K	270*270	210*205	72900	43050
L	150*160	170*170	24000	28900
M	160*180	175*180	28800	31500
N	170*180	170*185	30600	31450

Na grafickém vyhodnocení je viditelné chování použitých v závislosti na čase. Nejvíce tekutou směsí byla receptura E, zatímco nejméně vhodnou recepturou je receptura L.

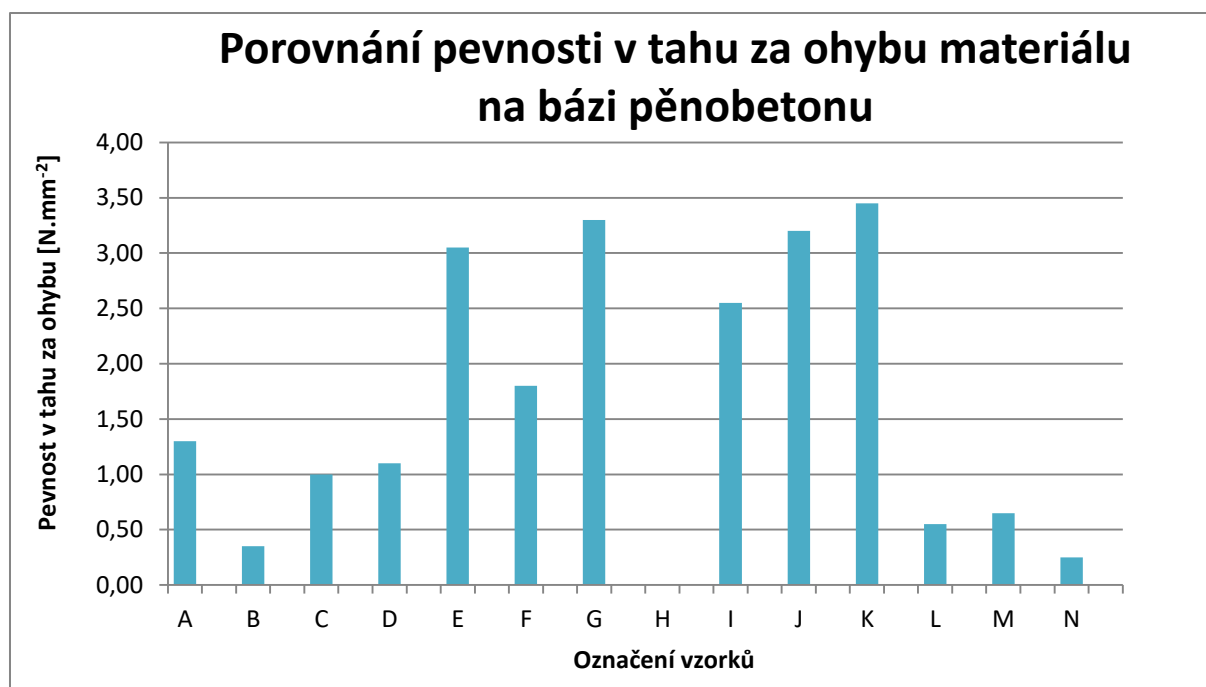


Graf 21 Zpracovatelnost směsí pěnobetonů

12.1.2.3 Fyzikálně-mechanické vlastnosti

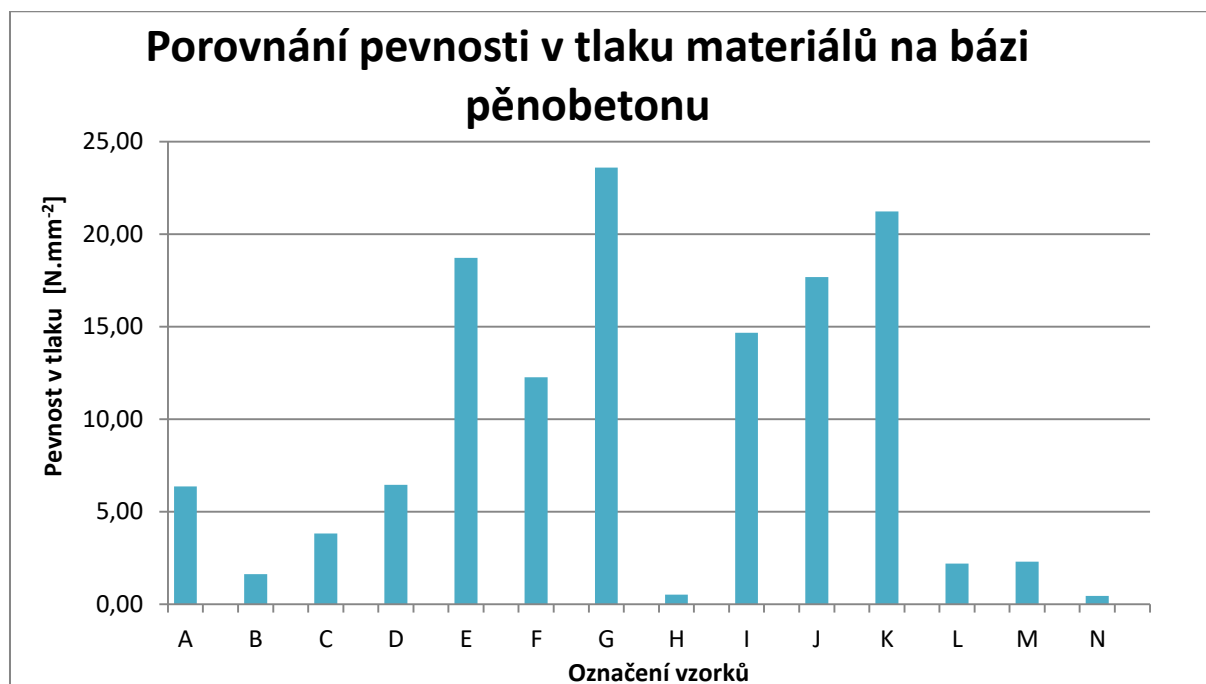
Tabulka 18 Výsledky fyzikálně-mechanických zkoušek pěnobetonů po 28 dnech

Označení vzorku	Průměrná objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Pevnost v tahu za ohybu [N.mm ⁻²]	Průměrná pevnost v tlaku [N.mm ⁻²]	Průměrná tvrdost povrchu [N.mm ⁻²]
A	1700	1,3	6,4	5,9
B	1460	0,4	1,6	6,0
C	1615	1,0	3,8	6,3
D	1720	1,1	6,5	7,9
E	1710	3,1	18,7	3,1
F	1535	1,8	12,3	7,7
G	1750	3,3	23,6	8,1
H	505	0,0	0,5	1,8
I	1475	2,6	14,7	7,9
J	1525	3,2	17,7	7,4
K	1640	3,5	21,2	4,8
L	490	0,6	2,2	2,0
M	525	0,7	2,3	0,4
N	450	0,3	0,5	1,7



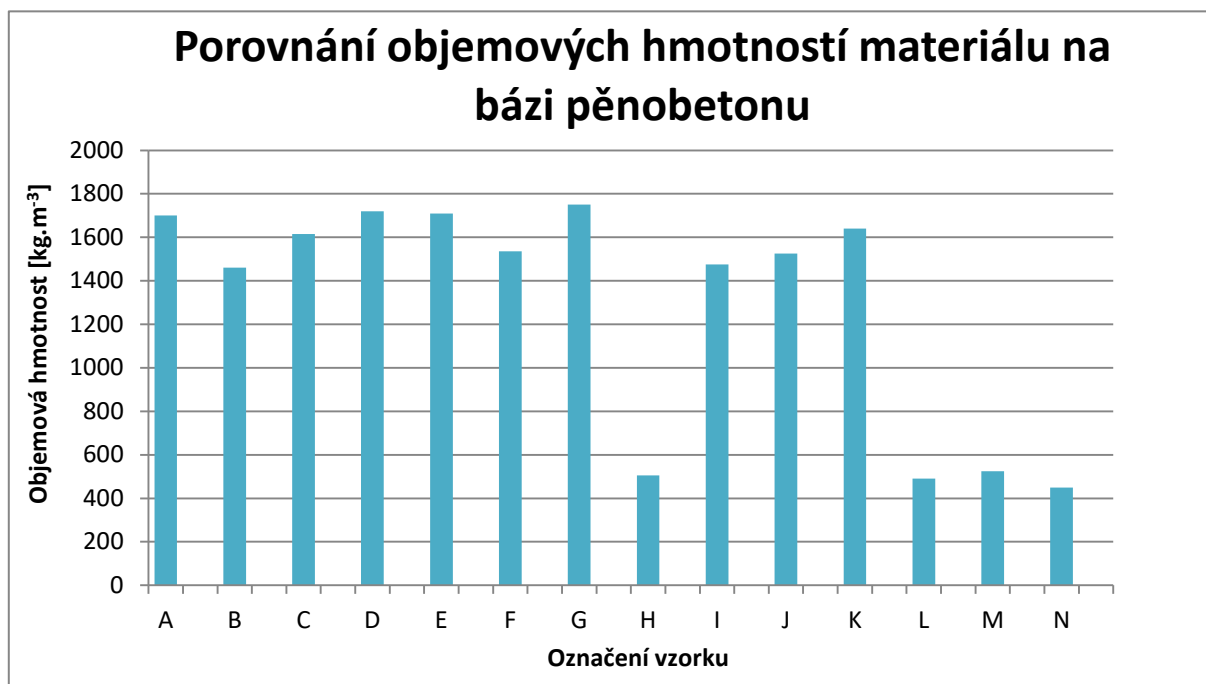
Graf 22 Pevnost v tahu za ohybu pěnobetonů

Z grafu pevností v tahu za ohybu vyplývá, že oproti recepturám E a G, u kterých není použito pěnidlo, dochází k poklesu pevností skoro u většiny receptur. U receptur obsahující zvýšené množství kameniva Liaver dochází k snížení pevností na velmi nízkou hodnotu. Nejvyšších hodnot receptur s přidanou pěnotvornou přísadou dosahují receptury I, J, K a F. Receptura K měla dokonce vyšší pevnost v tlaku, než receptury bez přidanych pěnotvorných látek.



Graf 23 Pevnost v tlaku pěnobetonů

Z grafu pevností v tlaku je patrné, že oproti recepturám E a G, u kterých není použito pěnidlo, dochází k očekávanému poklesu pevností, ty ale klesají na přijatelnou hladinu. Nahrazení klasického kameniva 0 - 4 mm kamenivem Liaver, výrazně snižuje pevnost, proto je náhrada většího množství klasického kameniva kamenivem Liaver nepříznivá pro konečné pevnosti. Nejvyšších hodnot receptur s přidanou pěnotvornou přísadou dosahují receptury I, J, K a F, kdy průměrný pokles pevnosti klesá zhruba o jednu třetinu.



Graf 24 Objemová hmotnost pěnobetonů

Přídavek či nahrazení klasického kameniva 0-4 mm kamenivem Liaver výrazně snižuje objemovou hmotnost, vyšší přídavek tohoto kameniva snížil objemovou hmotnost až pod hranici 600 kg.m⁻³. u ostatních receptur je patné snížení objemové hmotnosti se zvyšujícím se přídavkem pěnidel. Oproti referenčnímu vzorku G, E dochází k vylehčení receptur průměrně o 200 kg.m⁻³ u receptur B, F, I, J a K. u receptur H, L, M a N, s větším podílem náhrady běžného kameniva, objemová hmotnost klesá až o 1200 kg.m⁻³ oproti referenčnímu vzorku.

Receptury L, M a N měly hodnoty pevností a objemové hmotnosti nejnižší. To bylo dáno nízkou dávkou cementu a vyšším podílem lehčeného kameniva.

13.1.1 Hliníkový prášek

Tabulka 19 Základní složení receptury s hliníkovým práškem

Suroviny	Dávka
Cement 42,5R	200 g
Nehašené vápno	200 g
Kamenivo frakce 0 – 4 mm	600 g
Voda o pokojové teplotě	250 g
Odmaštěný hliníkový prášek	0,1 – 1,2 g po 0,1 g, extrémní dávka 4 g

Specifické složení vybraného Al prášku: Al min. 98,0 %; Fe max. 0,4 %; Si max. 0,4 %; Cu max. 0,02 %. Průměrná velikost částí 65 mikronů. Prášek je podle normy ČSN 42 0825 - Hliníkové prášky a pasty pro pórobeton látkou definovanou jako H228 hořlavá tuhá látka a H260 látka, která při styku s vodou uvolňuje hořlavé plyny schopné se samovolně vznítit.

Pro konstantní recepturu byly odzkoušeny postupně, po stanovených hmotnostních nárůstech, zvyšující se dávky přidávaného hliníkového prášku. Z těchto receptur byla vyrobena laboratorní zkušební tělesa 40 × 40 × 160 mm a na nich budou odzkoušeny fyzikálně-mechanické vlastnosti. Zvyšování dávek probíhalo fixní hmotnostní, a to po 0,1 g hliníkového prášku. Zjišťovanými vlastnostmi byly tvrdost, objemová hmotnost, pevnost v tlaku a v tahu za ohybu. Stanovení zpracovatelnosti je, u této technologie, v našich laboratorních podmínkách nemožné, jelikož hliníkový prášek musí reagovat ve formě, kde dochází k nárůstům (kynutí) hmoty. Reakce je natolik spontánní, že je z důvodu poškození pórů vzduchu v struktuře matrice nemožné směs uskladnit jinde než ve formě. Hmotu nelze vícekrát ukládat, jelikož tím dochází k poškození vznikajících pórů vlivem manipulace. Hmota se po nárůstu nechala zatvrdnout a přerost byl následně oříznut dle stanovené formy.



Obrázek 9 Čerstvá směs s Al-práškem



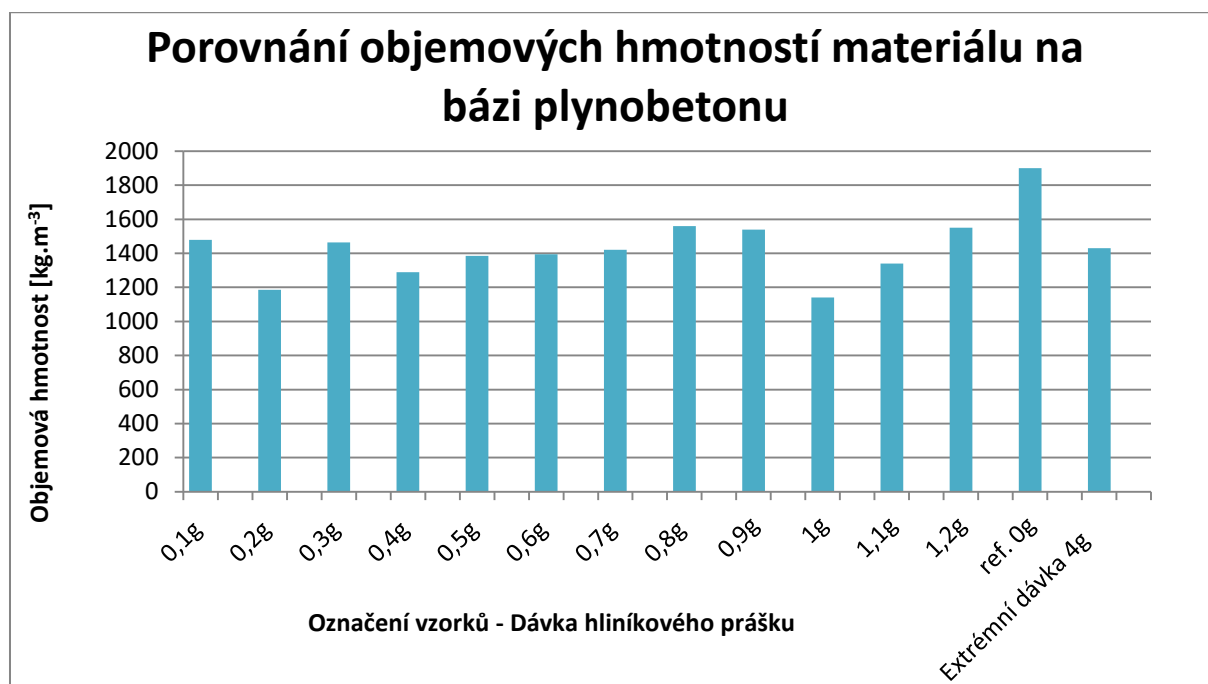
Obrázek 10 Směs a Al-práškem po nakynutí

13.1.1.1 Výsledné hodnoty mechanicko – fyzikálních zkoušek

Tabulka 20 Výsledky fyzikálně-mechanických zkoušek hliníkového prášku po 28 dnech

Dávka hliníkového prášku	Pevnost v tahu za ohybu [N.mm ⁻²]	Pevnost v tlaku [N.mm ⁻²]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Průměrná tvrdost povrchu [N.mm ⁻²]
0,1 g	0,65	3,60	1480	3,5
0,2 g	0,50	1,45	1185	1,4
0,3 g	0,70	2,50	1465	2,0
0,4 g	0,70	2,00	1290	3,3
0,5 g	0,70	2,15	1385	3,0
0,6 g	0,60	2,25	1395	2,4
0,7 g	0,55	3,00	1420	5,2
0,8 g	1,40	4,40	1560	5,5
0,9 g	1,50	3,00	1540	2,6
1,0 g	0,80	0,80	1140	0,8
1,1 g	0,30	1,50	1340	1,4
1,2 g	0,40	3,50	1550	3,0
ref. 0 g	0,70	11	1900	6,6
Extrémní dávka 4g	0,60	1,75	1430	2,4

13.1.1.2 Fyzikálně-mechanické vlastnosti



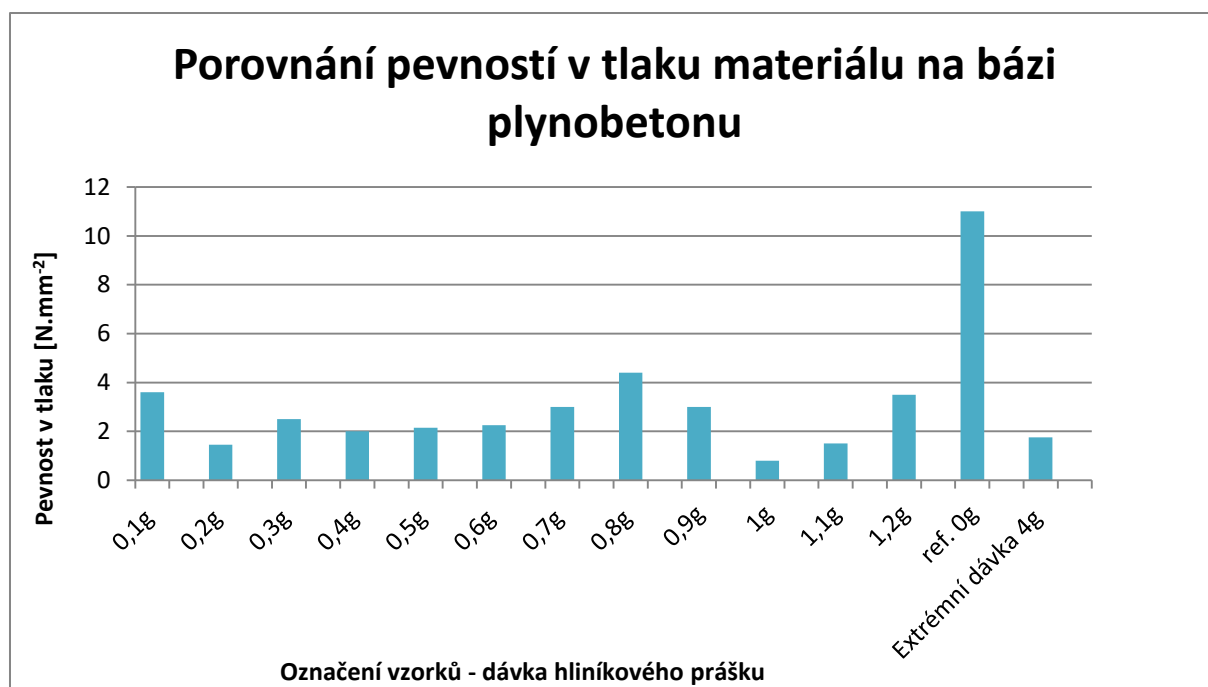
Graf 25 Objemové hmotnosti hliníkového plynobetonů

Při fixním zvyšování dávek hliníkového prášku ve směsi dochází k snížení objemové hmotnosti, ale výsledná objemová hmotnost je závislá na průběhu reakce naplynění směsi. Ale i při extrémní dávce, což je 4 g hliníkového prášku na stanovenou recepturu, nedochází k výraznějšímu snížení objemové hmotnosti. Proto je nutné stanovit optimální dávku hliníkového prášku v směsi. Nejlepších výsledků objemových hmotností dosahují směsi s dávkou 1 g a 1,1 g hliníkového prášku. Ostatní testované vzorky dosahují s jistými odchylkami stejných objemových hmotností při rozdílných dávkách hliníkového prášku. Oproti referenčnímu vzorku klesá objemová hmotnost zhruba o 400 kg.m^{-3} .



Graf 26 Pevnost v tahu za ohybu hliníkových plynobetonů

Z grafického vyhodnocení vyplývá, že dávka hliníkového prášku na směs 0,8 a 0,9 g dosahuje nejvyšších pevností v tahu za ohybu. Při nízkých hmotnostních přídavcích hliníkového prášku se snižuje výsledná pevnost. To samé platí i pro příliš vysoké dávky hliníkového prášku. Z grafu je také patrné, že pevnost v ohybu je vyšší než pevnost referenčního vzorku. v ostatních hmotnostních přídavcích jsou výsledné hodnoty v pevnosti v tahu za ohybu s minimálními odchylkami obdobné jako u referenčního vzorku, přídavek hliníkového prášku tedy v těchto případech neměl přímý vliv na pevnost v tahu za ohybu.



Graf 27 Pevnost v tlaku hliníkových plynobetonů

Z grafu je patrné, že nejlepších výsledků pevnosti v tlaku dosáhly receptury s dávkou 0,8 a 0,9 g. Tyto výsledné hodnoty jsou v souladu s pevností v tahu za ohybu, kde bylo dosaženo nejlepších výsledků také v případě dávky hliníkového prášku 0,8 a 0,9 g. Při nízkých hmotnostních přídavicích hliníkového prášku se snižuje výsledná pevnost v tlaku. To samé platí i pro příliš velké dávky. Z grafu je patrné, že došlo k velkému pevnostnímu propadu oproti referenčnímu vzorku a to až na hodnotu jeho jedné třetiny. Z výsledných hodnot grafického vyhodnocení vyplývá, že i minimální dávka hliníkového prášku způsobuje značný pokles pevnostních charakteristik. Proto je nutné použít pouze stanovenou optimální dávku pro recepturu.

13.1.2 Chlorové vápno a peroxid vodíku

Výše zmíněné suroviny jsou známy jako teoretická směs pro tvoření plynobetonu, ale v běžné praxi je nejčastěji využíván hliníkový prášek. Protože z dostupné literatury nejsou známy praktické údaje, bylo nutné tuto směs prověřit experimentálním zkoušením. K navrženým recepturám byl přidáván stále se zvyšující hmotnostní podíl peroxidu vodíku a byla sledována následná reakce. Chlorové vápno i peroxid vodíku byly zakoupeny na trhu přístupném jakémukoliv potencionálnímu zákazníkovi. Chlorové vápno se nejčastěji využívá k dezinfekčním účelům a obsahuje minimálně 30 % chlóru. Chlorové vápno je rozeznatelné od ostatních druhů vápna svým typickým zápachem. Technický peroxid vodíku 30% je běžně využíván pro čištění a bělení. Obě tyto látky jsou ve vyšších koncentracích zdraví nebezpečné.

13.1.2.1 Návrh a zkoušení vhodných receptur pro lehčené hmoty na bázi plynobetonů

Protože praktická data nejsou z přístupné literatury známa, byl návrh receptur řešen experimentální tvorbou. Receptury obsahující chlorové vápno, cement, kamenivo a vodu byly exponovány zvyšujícím se dávkám peroxidu vodíku obsaženého ve vodě, a to v pravidelných fixních přídavicích. Během experimentálního zkoušení receptury prošly částečnou úpravou podle chování čerstvé směsi. Prvotní a hlavní úpravou bylo zvýšení vodního součinitele za účelem zlepšení zpracovatelnosti směsi a zpomalení tvrdnutí. Po smísení suché směsi obsahující chlorové vápno a vody, obsahující určité procento peroxidu vodíku, dochází k bouřlivé reakci, kdy větší část produkovaného plynu (vzdušného kyslíku) odchází pryč z mísené směsi. Jen malá část plynu se zachytí v matici čerstvého materiálu. Okamžitě však dochází k zlepšení zpracovatelnosti materiálu, jelikož směs se výrazně vylehčuje a stává se plastičtější.

Velkou nevýhodou je značná tvorba tepla a velmi rychlé zatvrdnutí směsi. Vhodnou budoucí úpravou pro možnou modifikaci se jeví přidání zpomalovačů tvrdnutí, které by nahradily nutné zvýšení vodního součinitele. Toto opatření by mělo vést k celkovému zlepšení fyzikálně-mechanických vlastností daných receptur.

Tabulka 21 Navržené receptury s chlorovým vápnem a částečnou náhradou plniva (1/2)

REC	CEM I 42,5 R [g]	CHLOR. VÁPNO [g]	KAMENIVO 0-4 mm [g]	VODA [g]	PEROXID [g]	LIAVER 0-2 mm [g]	LIAVER 2-4 mm [g]
A1	260	260	780	325	10	-	-
A2	260	260	780	400	10	-	-
A3	260	260	780	400	20	-	-
A4	260	260	780	400	30	-	-
A5	260	260	780	400	40	-	-
A6	260	260	780	400	50	-	-
A7	260	260	780	400	60	-	-
A8	260	260	780	400	70	-	-
A9	260	260	780	400	80	-	-
A10	260	260	780	400	90	-	-
A11	260	260	780	400	100	-	-
B1	360	120	720	360	10	-	-
B2	360	120	720	360	25	-	-
B3	360	120	720	360	40	-	-
B4	360	120	720	360	55	-	-
B5	360	120	720	360	70	-	-
B6	360	120	720	360	85	-	-
B7	360	120	720	360	100	-	-
B8	360	120	720	360	150	-	-
B9	360	120	500	360	-	255	
B10	360	120	720	360	-	-	-
C1	120	360	720	420	10	-	-
C2	120	360	720	420	25	-	-
C3	120	360	720	420	40	-	-
C4	120	360	720	420	55	-	-
C5	120	360	720	360	70	-	-
C6	120	360	720	360	85	-	-
C7	120	360	720	360	100	-	-
C8	120	360	720	480	70	-	-
C9	120	360	720	480	120	-	-
D1	260	260	400	400	45	260	120
D2	260	260	300	400	45	80	180
D3	260	260	300	400	45	100	100
D4	260	260	140	400	45	130	130
D5	260	260	400	400	35	50	100
E1	360	120	540	420	40	90	90
E2	360	120	540	420	40	180	-
E3	360	120	540	420	40	-	180
E4	360	120	360	420	40	260	100
E5	360	120	360	420	40	100	260
E6	360	120	648	420	40	72	-

Tabulka 22 Navržené receptury s chlorovým vápnem a částečnou náhradou plniva (2/2)

REC	CEM I 42,5 R [g]	CHLOR. VÁPNO [g]	KAMENIVO 0-4 mm [g]	VODA [g]	PEROXID [g]	LIAVER 0-2 mm [g]	LIAVER 2-4 mm [g]
F1	120	360	540	420	70	90	90
F2	120	360	540	420	70	180	-
F3	120	360	540	420	70	-	180
F4	120	360	360	420	70	260	100
F5	120	360	360	420	70	100	260
F6	120	360	648	420	70	72	-

13.1.2.2 Objemová hmotnost čerstvé směsi

Pro určení orientačního chování vylehčujících pórů v čerstvé směsi chlorového vápna a peroxidu vodíku byla měřena objemová hmotnost čerstvé směsi. Jelikož v této směsi probíhá proces naplynění, bylo nutné měřit vzorky ve stejném časovém intervalu. Níže uvedené údaje jsou pouze jako orientační, a to kvůli nestabilnímu průběhu vylehčovacího procesu. Intenzita uvolňování vzdušného kyslíku reakcí peroxidu vodíku a chlorového vápna a následného zachytávání vzdušného kyslíku do matrice směsi se může s ohledem na čas a případně na další vnější činitele lišit.

Tabulka 23 Objemová hmotnost receptur chlorového plynobetonu

Objemová hmotnost čerstvé směsi [kg.m ⁻³]						
Vzorek č.	Receptura					
	A	B	C	D	E	F
1	1380	1320	1440	960	980	1160
2	1320	1500	1600	1020	1160	1160
3	1380	1820	1360	1080	940	1200
4	1900	1520	1740	980	940	980
5	1560	1600	1660	1240	820	920
6	1420	1720	1500		800	1400
7	1600	1800	1640		1280	
8	1660	1820	1400			
9	1700	1180	1420			
10	1600	1860	1700			
11	1380					



Obrázek 11 Čerstvá směs chlorového vápna a peroxidu vodíku

13.1.2.3 Výsledné hodnoty fyzikálně – mechanických zkoušek

Tabulka 24 Výsledky fyzikálně-mechanických zkoušek chlorového plynobetonů (1/2)

Receptura	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Pevnost v tlaku [N.mm ⁻²]	Pevnost v tahu za ohybu [N.mm ⁻²]	Mikrotvrdost povrchu [N.mm ⁻²]
A _{ref}	1180	0,6	0,3	2,9
A1	1340	0,8	0,3	1,2
A2	1260	0,5	0,3	0,5
A3	1220	0,3	0,3	0,4
A4	1260	0,5	0,3	0,6
A5	1170	0,4	0,3	1,1
A6	1060	0,2	0,2	0,3
A7	1070	0,3	0,4	0,4
A8	910	0,3	0,3	0,3
A9	1020	0,4	0,3	0,6
A10	-	-	-	-
A11	940	0,2	0,3	0,5
B _{ref}	1050	1,6	0,7	1,2
B1	1210	1,3	0,7	1,3
B2	1140	1,4	0,8	1,9
B3	1230	1,9	0,9	1,5
B4	1300	2,1	1,1	1,7
B5	1280	2,3	1	1,8
B6	1350	2,4	1,1	2,9
B7	1380	2,5	1,2	2,6
B8	1430	3,1	1,4	3
B9	900	2,6	1	2,3
B10	1730	4,5	1,7	4,3
C _{ref}	1170	0,5	0,4	0,6
C1	1080	0,4	0,4	0,3

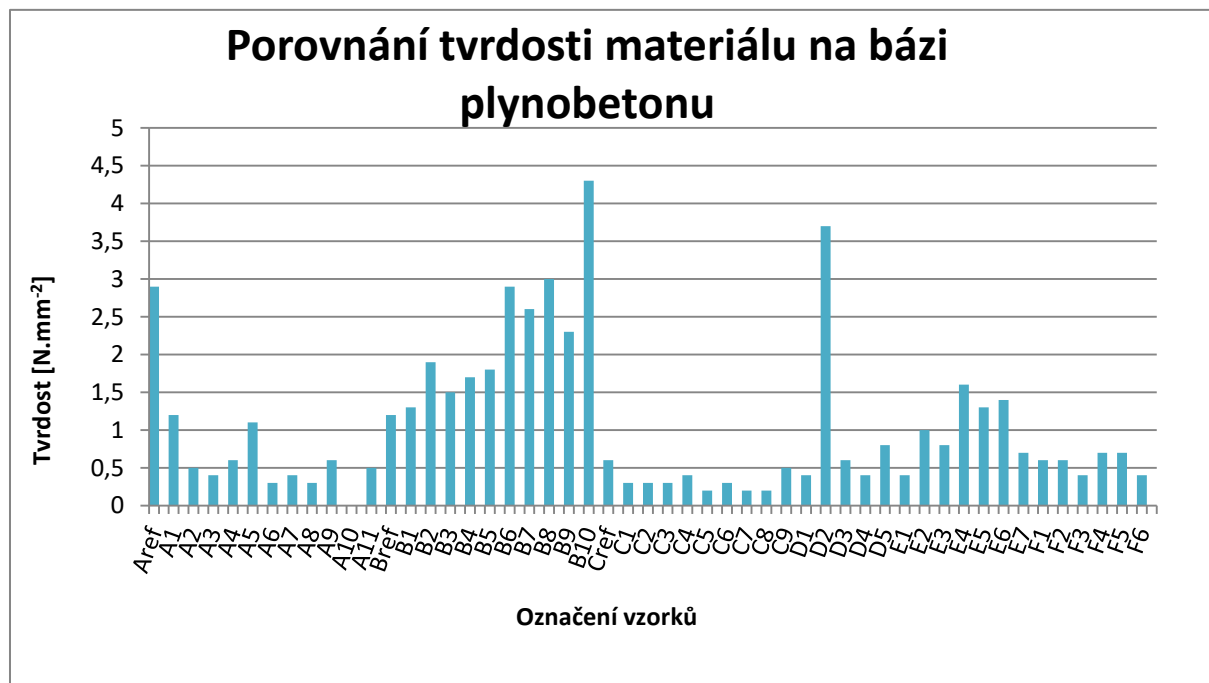
Tabulka 25 Výsledky fyzikálně-mechanických zkoušek chlorového plynobetonu (2/2)

Receptura	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Pevnost v tlaku [N.mm ⁻²]	Pevnost v tahu za ohybu [N.mm ⁻²]	Tvrdost [N.mm ⁻²]
C2	1120	0,2	0,2	0,3
C3	1130	0,3	0,3	0,3
C4	1040	0,3	0,3	0,4
C5	970	0,3	0,3	0,2
C6	920	0,3	0,3	0,3
C7	930	0,3	0,3	0,2
C8	810	0,2	0,3	0,2
C9	800	0,2	0,2	0,5
D1	670	0,2	0,2	0,4
D2	700	1,5	0,7	3,7
D3	720	0,4	0,4	0,6
D4	570	0,2	0,3	0,4
D5	860	0,7	0,4	0,8
E1	660	0,2	0,2	0,4
E2	750	0,9	0,6	1
E3	620	0,9	0,4	0,8
E4	680	2	0,8	1,6
E5	940	1,8	0,8	1,3
E6	670	1,8	0,8	1,4
E7	860	1	0,5	0,7
F1	800	0,4	0,3	0,6
F2	820	0,3	0,4	0,6
F3	820	0,3	0,3	0,4
F4	710	0,5	0,4	0,7
F5	680	0,7	0,5	0,7
F6	920	0,4	0,4	0,4

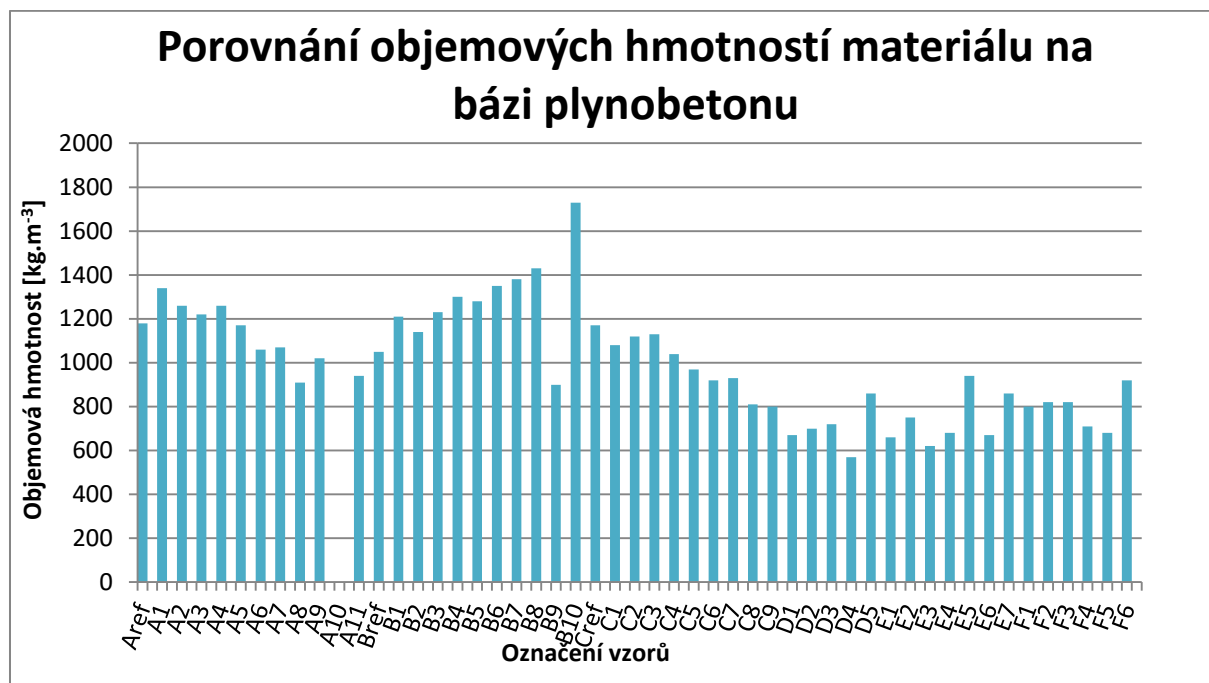
13.1.2.4 Fyzikálně-mechanické vlastnosti

Z grafického vyhodnocení je patrné, že tvrdost vzorků je převážně ovlivněna danou recepturou, především množstvím obsaženého cementu. Je jasné viditelné, že vzorky obsahující větší množství cementu dosahují, oproti ostatním, znatelně vyšších tvrdostí. S ohledem na přidavek peroxidu vodíku se tvrdost vzorků zvětšuje do dosažení optimálního přídávku, následně pevnost klesá. Toto chování je podobné jako u plynobetonů s dávkou hliníkového prášku. Receptury s vyšším obsahem chlorového vápna dosahují velmi malých tvrdostí s porovnáním s ostatními recepturami. Tento jev je způsoben nižším obsahem cementu, a také nedokonale proběhlou reakcí, která způsobila shlukování vápenatých produktů, a tudíž oslabení struktury zkoušených vzorků. Receptury obsahující částečnou náhradu kameniva

Liaver dosahují velmi malých pevností oproti recepturám, které jsou bez náhrady. To je způsobeno tím, že kromě méně pevní cementové matrice je méně pevné i plnivo, tedy celkové vlastnosti kompozitu jsou ovlivněny nepřítomností nějaké významně tvrdé, pevné složky.



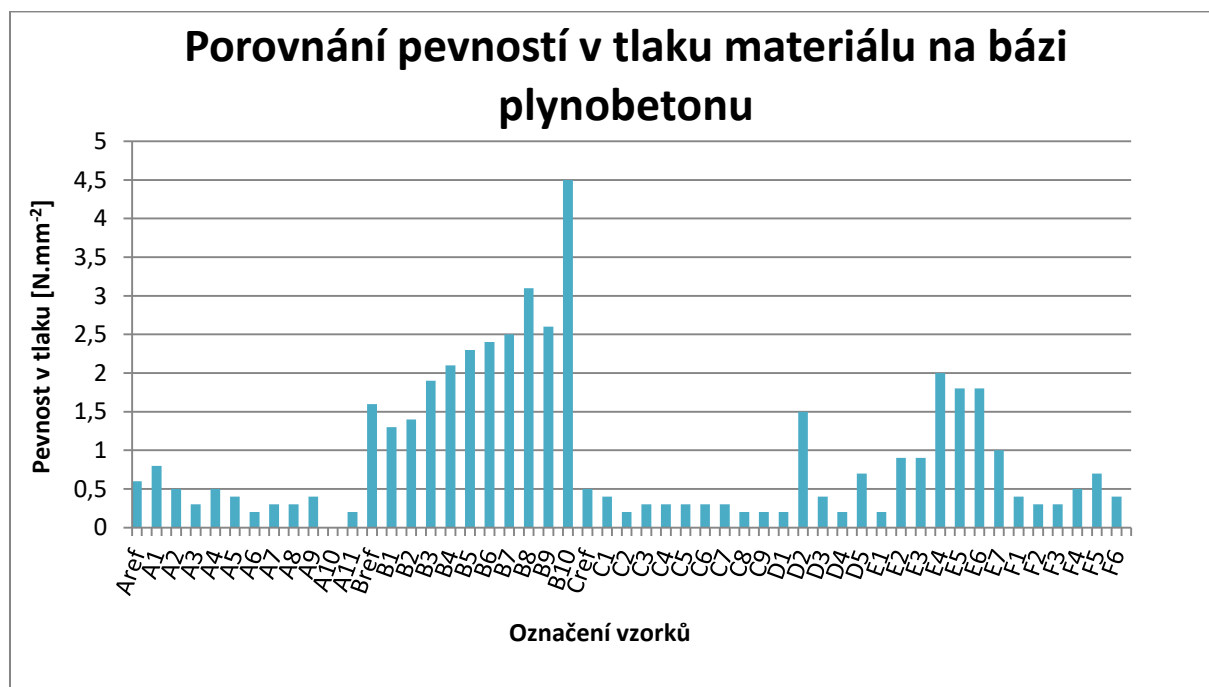
Graf 28 Tvrdost chlorového plynobetonu



Graf 29 Objemová hmotnost chlorového plynobetonu

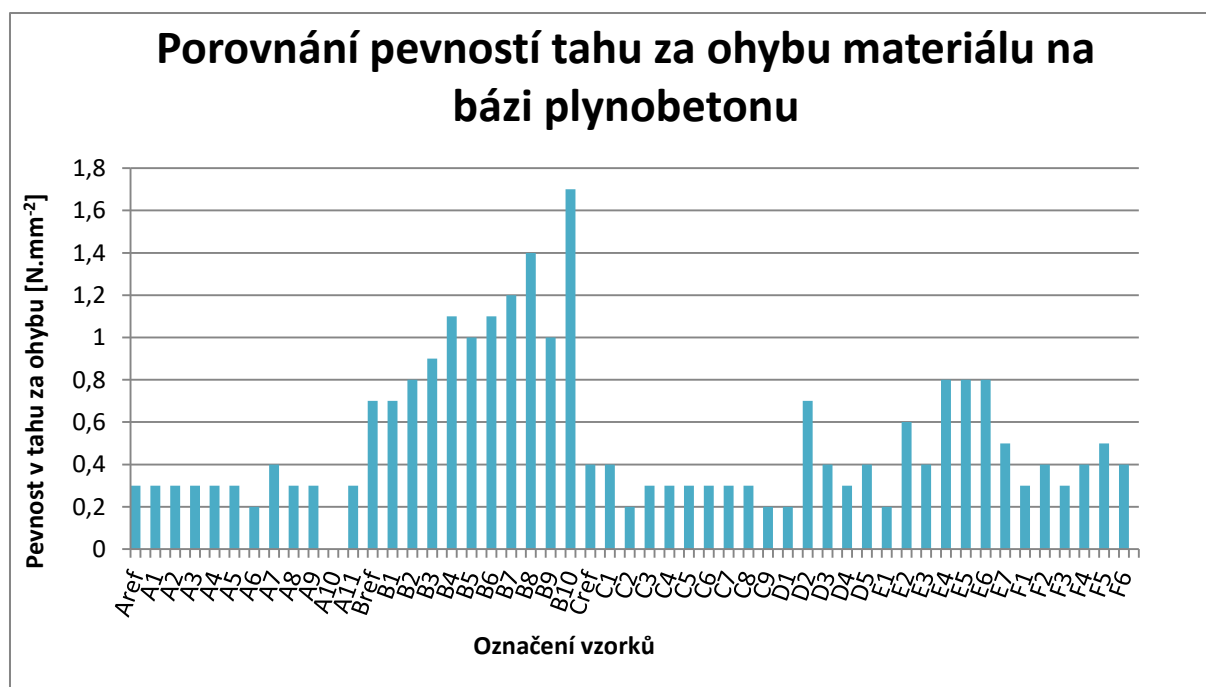
Z grafu 34 je patrné, že zvyšující se dávka peroxidu vodíku přispívá ke zmenšení objemové hmotnosti testované směsi, jak bylo předpokládáno. U receptur skupiny B, se zvýšeným obsahem cementu, dochází k pravému opaku. Tento jev je

možné vysvětlit menší dávkou chlorového vápna a tím způsobeným slabším průběhem nakypřující reakce oproti ostatním recepturám.



Graf 30 Pevnost v tlaku chlorového plynobetonu

Pevnosti v tlaku nedosahují příliš vysokých hodnot. Tyto hodnoty jsou úměrné množství cementu a chlorového vápna ve směsi. v případě receptury A10 došlo dokonce k destrukci vzorků při odformování a nebylo možné na těchto vzorcích provádět žádná měření. Se zvyšujícím se množstvím chlorového vápna klesá celková pevnost v tlaku. To samé platí pro zvyšující se přídavek peroxidu vodíku, který snižuje výsledné pevnosti v tlaku. U receptur skupiny B, se zvýšenou dávkou cementu, se hodnoty pevnosti zvyšují s přídavkem peroxidu vodíku. Tento jev je možné vysvětlit reakcí peroxidu vodíku se složkami chlorového vápna nebo cementu za vzniku nových anorganických produktů. Zároveň pevnost ovlivněna nižší koncentrací chlorového vápna v receptuře, a tudíž i slabším průběhem nakypřující reakce. U receptur skupiny C, se zvýšenou dávkou chlorového vápna, dochází vlivem nedokonalého proběhnutí reakce chlorového vápna s peroxidem vodíku k tvorbě shluků vápenatých produktů, které celkově oslabují strukturu materiálu. Receptury s částečnou náhradou běžného kameniva za kamenivo Liaver dosahují hodnot v přímé závislosti na množství a frakci nahrazeného kameniva. Receptury se stejnou dávkou chlorového vápna a cementu dosahují velmi nízkých hodnot pevnosti v tlaku. Je nutné podotknout, že výsledné pevnosti negativně ovlivňoval zvýšený vodní součinitel, který zpomalil průběh tuhnutí směsi.



Graf 31 Pevnost v tahu za ohybu chlorového plynobetonu

Pevnost v tahu za ohybu je, až na výjimky, receptury skupiny B se zvýšenou dávkou cementu, na roveň s ostatními recepturami, a to bez větších odchylek. Výjimkou jsou pouze receptury s částečnou náhradou běžného kameniva za kamenivo Liaver, které zvyšovalo pevnosti v tahu za ohybu. U vzorků se zvýšenou dávkou chlorového vápna byla struktura negativně ovlivněna vytvořenými shluky vápenatých produktů vytvořených nedokonalým průběhem reakce chlorového vápna a peroxidu vodíku. Tento jev ovlivnil všechny průběhy fyzikálně-mechanických zkoušek prováděných na této receptuře. Shluky vápenatých produktů jsou viditelné na obr. 12. Výsledky pevnosti v tahu za ohybu jsou v souladu s hodnotami pevnosti v tlaku.



Obrázek 12 Shluky vápenatých produktů

Vzorky plynobetonu na bázi reakce chlorového vápna a peroxidu vodíku byly vyrobeny experimentální postupem. Výslednou kvalitu materiálu ve většině případů ovlivnil zvýšený vývin tepla. Jedná se o exotermní reakci. Proto bylo nutné zvýšit množství vody pro zlepšení zpracovatelnosti směsi, hodnota vodního součinitele se tedy zvyšovala. V některých případech nebylo, do jedné minuty, možné s danou směsí pracovat, pokud nebyl zvýšen vodní součinitel. Jinak docházelo k zatuhnutí čerstvé směsi.

13.2 Ověření dlouhodobé stability suchých směsí a určení jejich vhodnosti ke skladování

V této kapitole byly prověřeny vlastnosti suchých směsí po odležení v pytli simulujícím běžné podmínky, kterým jsou materiály po výrobě a přepravě do míst určení vystaveny. Materiály na bázi pěnobetonů a plynobetonů byly uloženy v igelitových pytlích, které zabraňují přístupu vlhkosti k danému materiálu. Pro dlouhodobé ověření byl stanoven časový horizont odležení tří měsíce. Po skončení tohoto časového úseku byly z odleželých vzorků v laboratorním prostředí namíchány zkušební vzorky, na kterých byly ověřeny fyzikálně-mechanické vlastnosti.

Pro tyto testy bylo vybráno celkem 6 receptur, které měly být reprezentativním vzorkem užitých kombinací surovin.

13.2.1 Výsledné hodnoty laboratorních zkoušek

Tabulka 26 Výsledky fyzikálně-mechanických zkoušek po dlouhodobém odležení

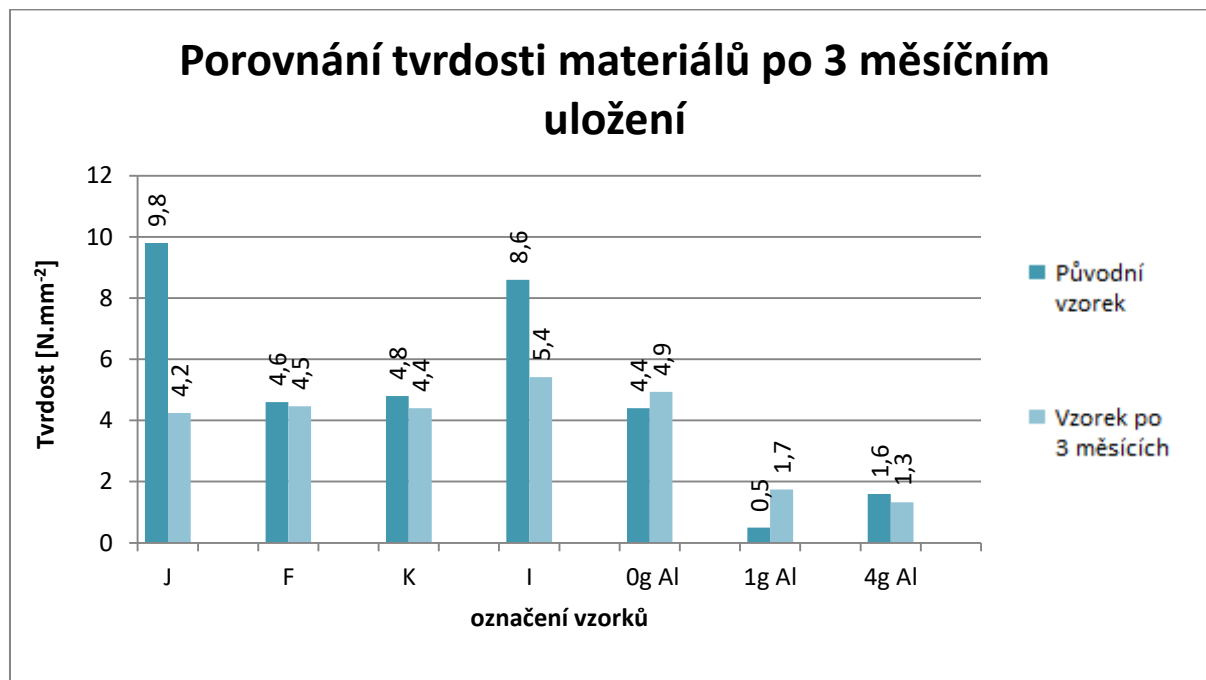
Receptura	Tvrdost po 3 měsících [N.mm ⁻²]	Objemová hmotnost po 3 měsících [kg.m ⁻³]	Pevnost v tlaku po 3 měsících [N.mm ⁻²]	Pevnost v tahu za ohybu po 3 měsících [N.mm ⁻²]
J	4,2	1635	14,8	4,2
F	4,5	1505	9,4	3,4
K	4,4	1830	12,2	3,7
I	5,4	1315	7,6	2,9
0g Al	4,9	1575	10,3	3
1g Al	1,7	1515	1,9	0,9
4g Al	1,3	1415	0,8	0,6

U materiálů na bázi pěnobetonů, které jsou vylehčeny přidáním suchých pěnotvorných činidel, jsou všechny složky vůči sobě, bez přidání vody, inertní. Proto dlouhodobým uložením nedochází k degradaci materiálů, naopak manipulací a následnou přepravou dochází k domísení směsi.

U materiálů na bázi plynobetonů, fungujících na principu hliníkového prášku, bylo nutné nejdříve hliníkový prášek odmastit, před přidáním do uložené směsi vhodným odmašťovadlem. Protože hliníkového prášku je v poměru k celkovému objemu směsi velmi málo, i minimální degradace jeho vlastností může nepříznivě ovlivnit výsledné hodnoty pevnostních charakteristik. Proto je nutné jeho rovnoměrné rozptýlení v dané záměsi a zabránění jeho možné segregaci.

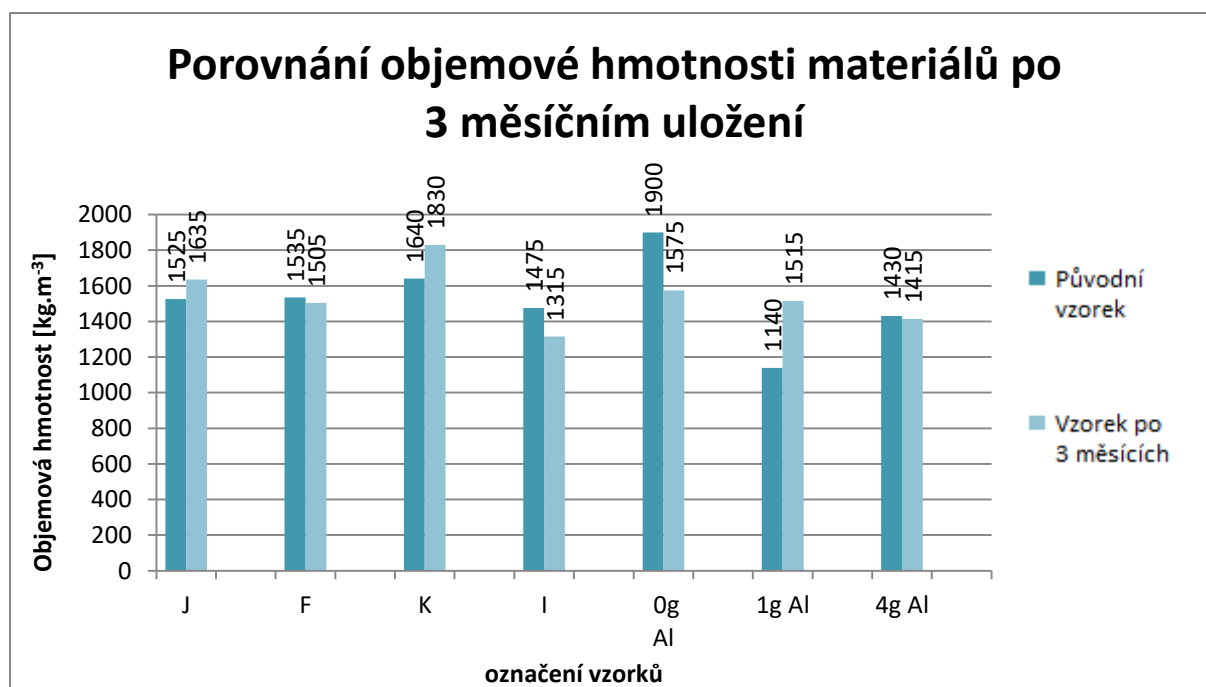
U materiálů na bázi plynobetonů, fungujících na principu reakce chlorového vápna s peroxidem vodíku, bylo stanoveno na základě velmi nízkých manipulačních pevností po odformování namíchaných čerstvých směsí, že nejsou vhodné pro dlouhodobé skladování.

13.2.2 Porovnání fyzikálně-mechanických vlastností po 3 měsíčním odležení



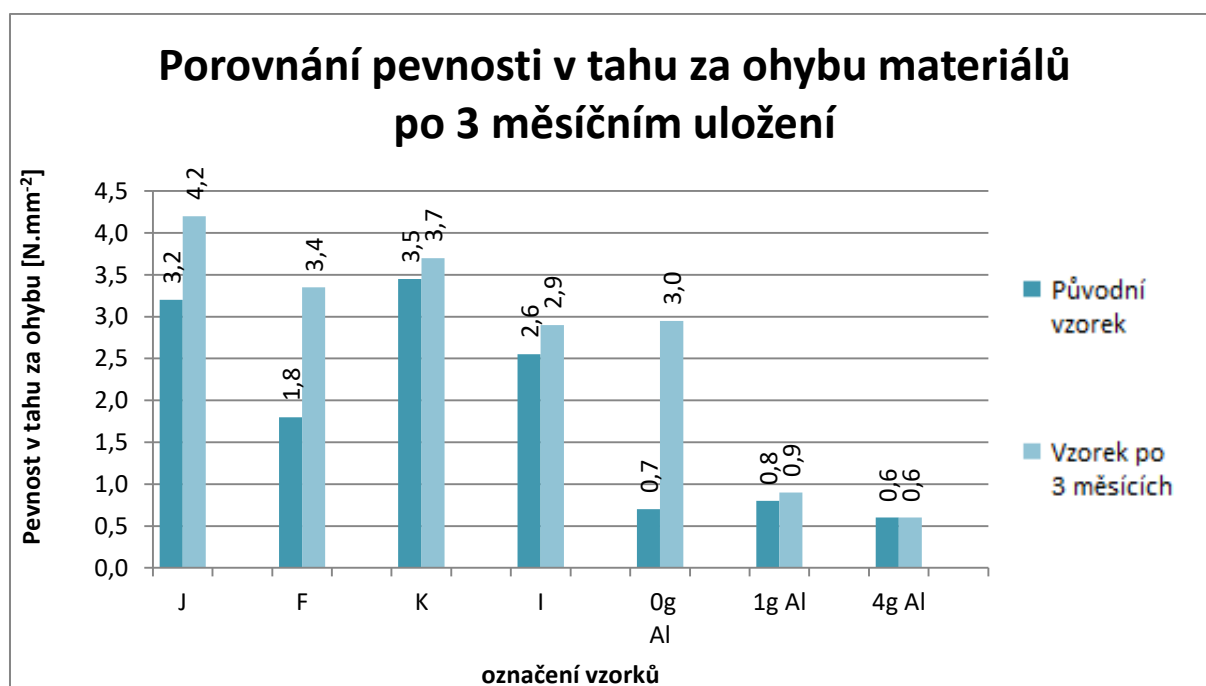
Graf 32 Porovnání tvrdosti po 28 dnech a po dlouhodobém odležení

Z grafického vyhodnocení je patrné, že u receptur pěnobetonů I, J po tříměsíčním odležení došlo k poklesu tvrdosti oproti jejich standardu. Dvojice receptur pěnobetonů J, F a K, I, až na změnu druhu pěnотvorné přísady, jsou ve složení totožné, ale k poklesu dochází pouze u vzorků receptury J a I. U receptur s využitím hliníkového prášku, je tvrdost materiálu v rozmezí předem předpokládané odchylky, kde pouze u vzorku s dávkou hliníkového prášku 1 g dochází k razantnímu zvýšení tvrdosti. Z velmi nízkých hodnot vzorku dávky 1 g hliníkového prášku se lze domnívat, že nedošlo k ideálnímu proběhnutí reakce, a tedy došlo možnému degradaci směsi při dlouhodobém uložení.



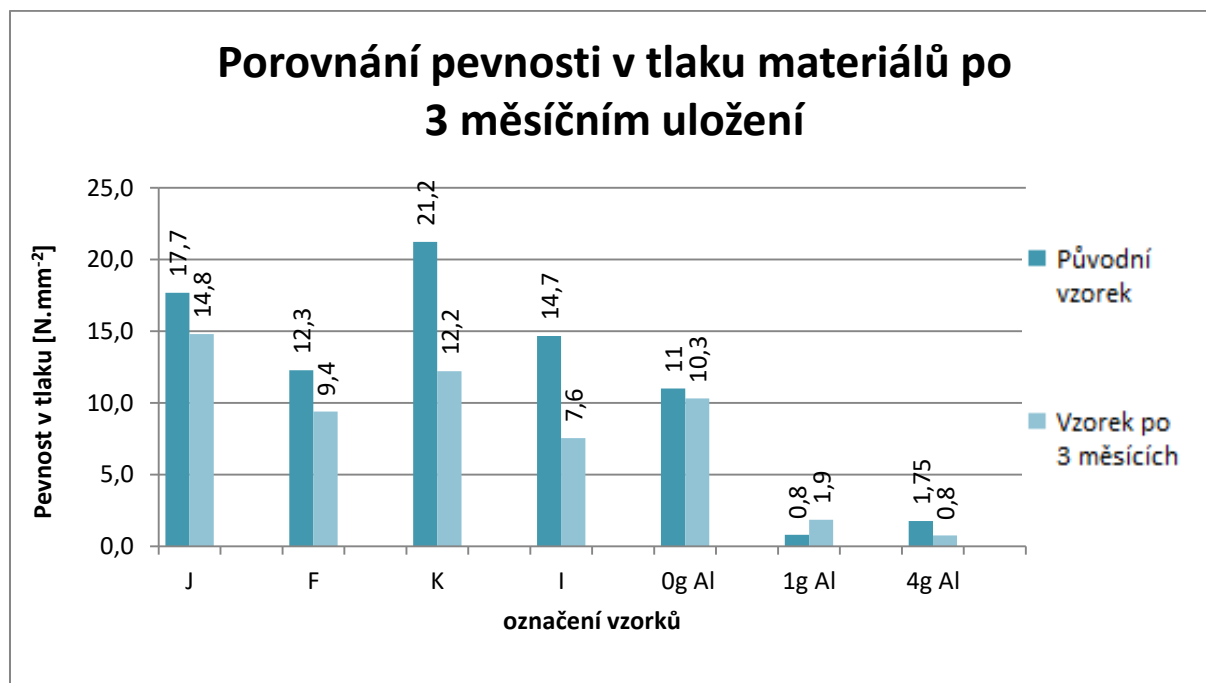
Graf 33 Porovnání objemové hmotnosti po 28 dnech a po dlouhodobém odležení

Z výsledných hodnot objemových hmotností je patrné, že u receptur pěnobetonů J a K dochází k mírnému zvýšení objemových hmotností oproti porovnávanému vzorku. U zbylých receptur pěnobetonů F a I naopak dochází k mírnému poklesu jejich objemových hmotností. Zvýšená dávka hliníkového prášku dlouhodobě nijak neovlivňuje objemovou hmotnost, naopak u dávky 1 g hliníkového prášku dochází po uložení k nechtěnému nárůstu objemových hmotností.



Graf 34 Porovnání pevnosti za ohybu po 28 dnech a po dlouhodobém odležení

U všech dlouhodobě odležených vzorků je dobře patrný vzestup pevnosti v tahu za ohybu průměrně o jednu třetinu jejich hodnoty. Receptura pěnobetonu J dosahuje hodnot nad 4 N.mm^{-2} , F a K hodnot nad 3 N.mm^{-2} . Hodnoty receptury i jsou těsně pod hranicí 3 N.mm^{-2}



Graf 35 Porovnání pevnosti v tlaku po 28 dnech a po dlouhodobém odležení

Z grafického vyhodnocení je patrné, že dochází k poklesu výsledných pevností v tlaku u směsí po dlouhodobém odležení u všech vzorků. Tento jev je možné vysvětlit částečnou napěňovací, naplynovací reakcí nebo degradací směsí a materiálů jich obsažených za přítomnosti vzdušné vlhkosti při jejich tvorbě a následném uložení. Zkoušené receptury pěnobetonů J, F, K, I poklesly o jednu třetinu oproti jejich referenčnímu standardu. i přes tento pokles lze stanovit výsledné hodnoty obstojnými v rámci základních kritérií průmyslových podlah.

13.2.3 Shrnutí vlivu 3 měsíčního odležení na fyzikálně-mechanické vlastnosti

Celkově lze říci, že dlouhodobé skladování ve vzduchotěsném pytli mělo na vlastnosti směsí jen malý vliv. Rozdíly v hodnotách jsou většinou jen marginální a mají velmi malý vliv na celkové vlastnosti jednotlivých směsí. Největší míru degradace je možné detekovat u směsí s hliníkovým práškem, kde zřejmě dochází k degradaci hliníkového prášku a nehašeného vápna, jejichž vzájemná reakce následně neprobíhá optimálně. Směsi s aditivu a lehkými plnivy lze prohlásit za

vhodné k dlouhodobému uložení, protože i přes mírnou degradaci byly splněny požadavky na fyzikálně-mechanické vlastnosti výsledných vzorků.

14. Etapa III.: Studium mikrostruktury vybraných vzorků

14.1 Vzorky pro studium mikrostruktury

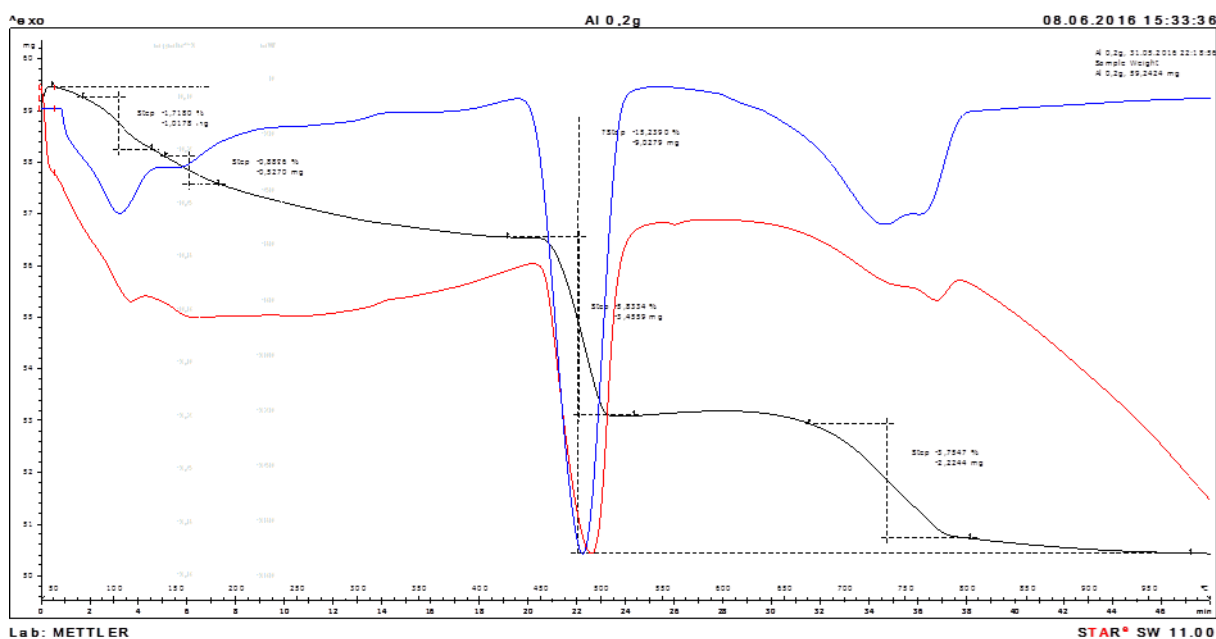
Pro studium mikrostruktury byly vybrány reprezentativní vzorky, vybrané z etapy II. Od každého druhu vzorků – receptur byl analyzován alespoň jeden vzorek, aby mohly být popsány procesy probíhající ve vzorcích a vliv jednotlivých složek na mikrostrukturu vzorků. Vzorky byly v dlouhodobém laboratorním uložení po dobu 1 – 2 let a následně na nich byly provedeny analýzy. Jednalo se o DTA a RTG analýzu a optickou a elektronovou rastrovací mikroskopii. Pro porovnání celkové soudržnosti a vzhledu vzorků byly pořízeny fotografie.

14.2 Receptury s obsahem 0,2 a 1,2 g hliníkového prášku

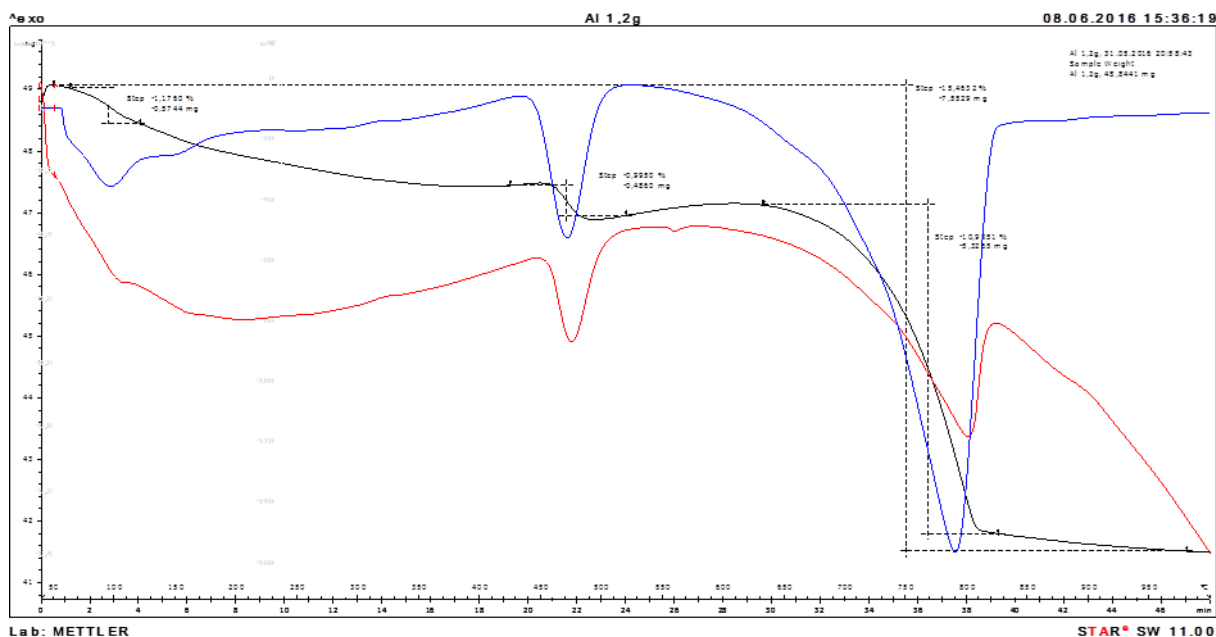
Jako reprezentativní vzorky s obsahem hliníkového prášku byly vybrány receptury a obsahem 0,2 g a 1,2 g hliníkového prášku. Tyto receptury vykazovaly nejlepší kombinaci fyzikálně-mechanických vlastností. Byly také vybrány pro možnost porovnat vliv nízké (0,2 g) a vyšší (1,2 g) dávky hliníkového prášku.

Tabulka 27 Receptury vzorků s hliníkovým práškem použitých pro studium mikrostruktury

Receptura	CEM I 42,5 R [g]	Kamenivo frakce 0-4 mm [g]	Nehašené vápno [g]	Odmaštěný hliníkový prášek [g]	Voda [g]
AI prášek 0,2 g	200	600	200	0,2 g	250
AI prášek 1,2 g	200	600	200	1,2 g	250

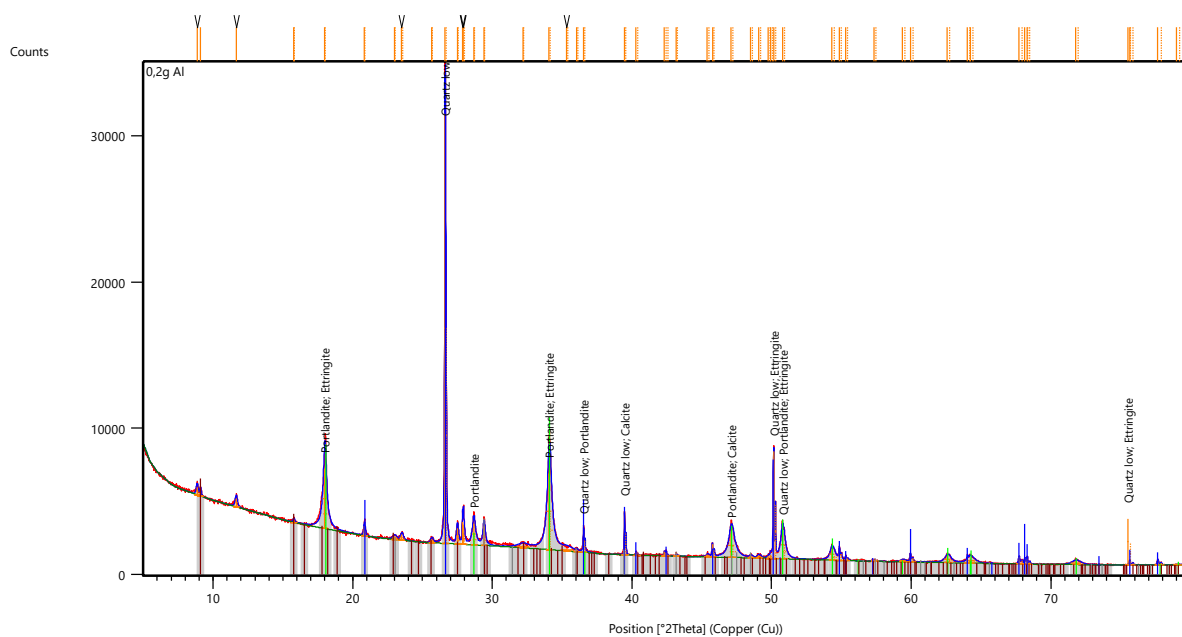


Graf 36 DTA směsi s 0,2 g hliníkového prášku



Graf 37 DTA směsi s 1,2 g hliníkového prášku

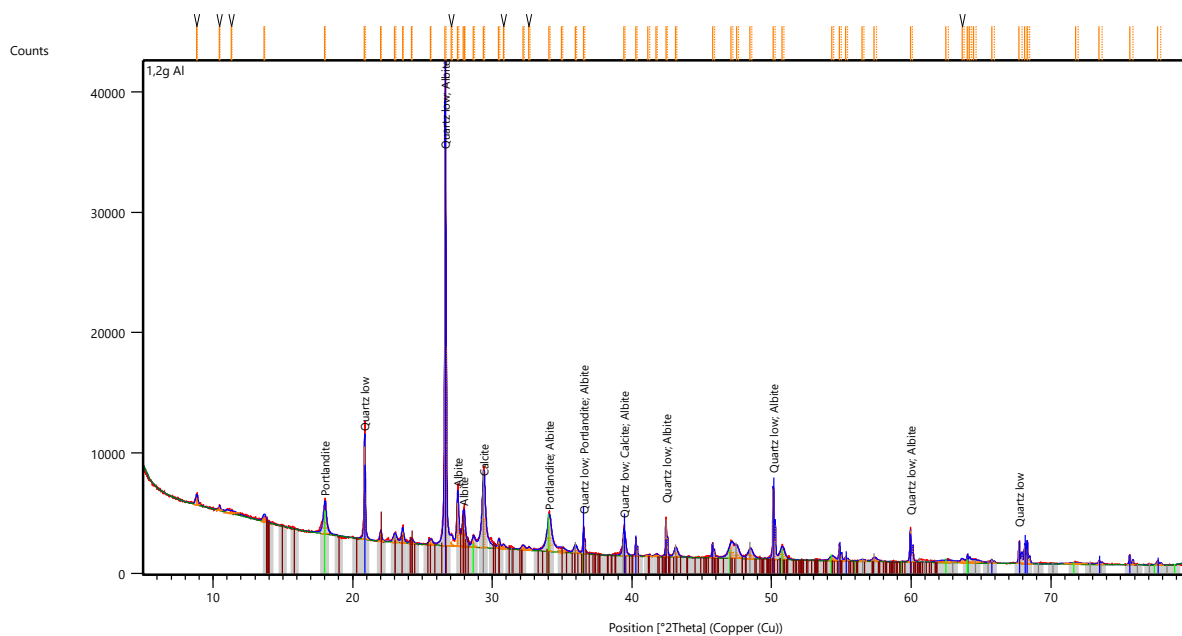
Z analýzy DTA je patrné, že s vyšším obsahem hliníkového prášku (0,2 g vs 1,2 g) nedochází, podle očekávání, k výrazné změně, co se struktury vzorků týče. Obsah volné i vázané vody v obou vzorcích je prakticky totožný a i její uvolňování má podobný průběh. Ke změnám dochází při vyšší teplotě DTA, kdy snížení obsahu hliníkového prášku má za následek výrazné zvýšení obsahu portlanditu na úkor kalcitu. Ve vzorku obsahujícím 0,2 g hliníkového prášku byly obsaženy dle analýzy DTA 4 % portlanditu a 25 % kalcitu. Vzorek obsahující 1,2 % hliníkového prášku obsahoval 63 % portlanditu a 9 % kalcitu. Výpočet je uveden v příloze C.



Graf 38 RTG směsi s 0,2 g hliníkového prášku

Tabulka 28 Vyhodnocení RTG analýzy směsi s 0,2 g hliníkového prášku

Barva	Chemický vzorec	Minerál
modrá	SiO_2	Křemen
zelená	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Portlandit
šedá	CaCO_3	Kalcit
hnědá	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$	Ettringit



Graf 39 RTG směsi s 1,2 g hliníkového prášku

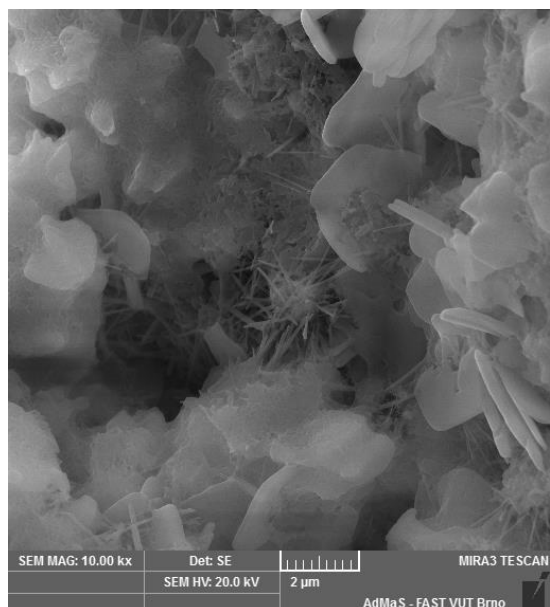
Tabulka 29 Vyhodnocení RTG analýzy směsi s 0,2 g hliníkového prášku

Barva	Chemický vzorec	Minerál
modrá	SiO_2	Křemen
zelená	Ca(OH)_2	Portlandit
šedá	CaCO_3	Kalcit
hnědá	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	Albit

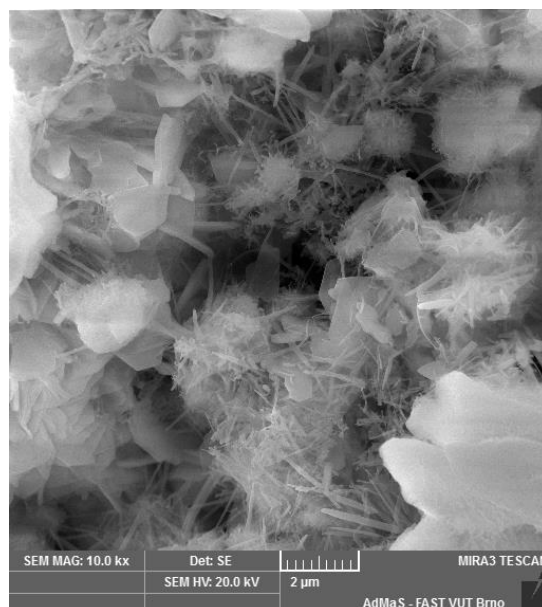
Závěry vyvozené z analýzy DTA rentgenogramy potvrzují. Oba vzorky vykazují obsah portlanditu a kalcitu. Rentgenogramy jsou prakticky totožné a vzorky se mineralogicky příliš neliší.

Ve vzorku s nižším obsahem hliníkového prášku byl prokázán ettringit, který je vidět i na snímcích z elektronového mikroskopu (obr. 13, 14, 15), kde se ukazuje jeho jehličkovitá hexagonální struktura. Ettringit je jeden z minerálů, které se při RTG analýze prokazují obtížně i přesto, že na snímcích z elektronového mikroskopu bývá zřetelně viditelný. Drobné jehličkovité krystalky jsou na snímcích velmi výrazné a i jednotlivé krystaly je možné snadno identifikovat (obr. 14). Na rentgenogramu je však jeho identifikace obtížná, především kvůli jeho malému podílu ve vzorku.

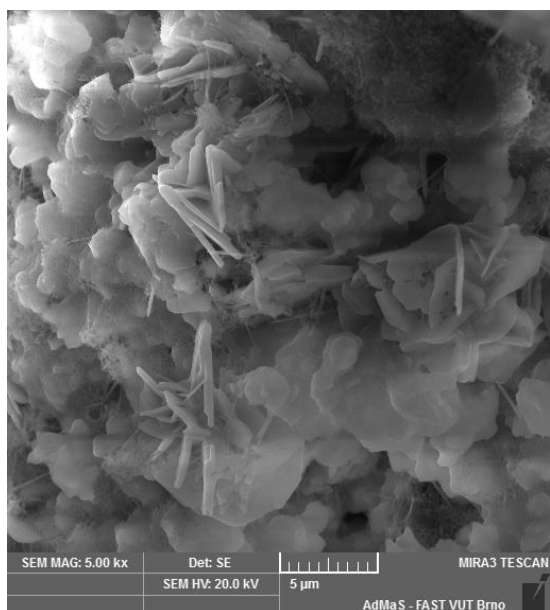
Na snímcích z elektronového mikroskopu je také patrná jemná pórová struktura vytvořená reakcí hliníkového prášku (obr. 16). Na snímcích z elektronového mikroskopu jsou patrné minerály, které byly prokázány i pomocí RTG analýzy. V případě vzorků s hliníkovým práškem se jedná především o zrna portlanditu a kalcitu, která vystupují z matrice C-S-H (obr. 13, 14, 15). Na obrázku 13 je vidět velké množství zrn portlanditu ve vzorku s obsahem 0,2 g hliníkového prášku. To jen potvrzuje závěry provedené z analýzy DTA. Na obrázku 14, kde je vzorek s obsahem 1,2 h hliníkového prášku je zrn portlanditu výrazně méně.



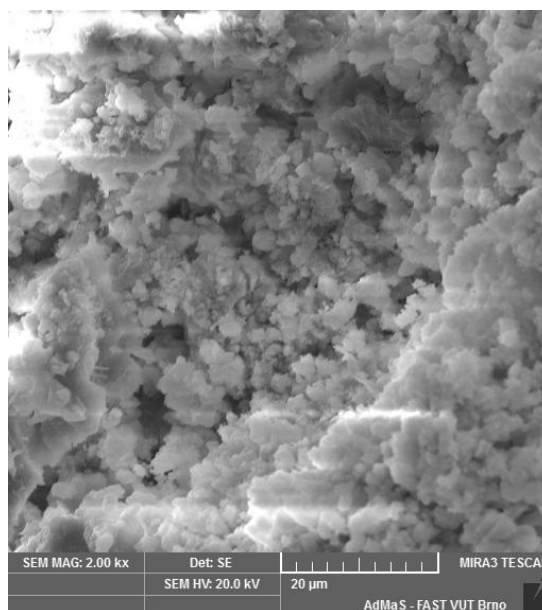
Obrázek 13 REM směsi s 0,2 g hliníkového prášku (10 000 ×)



Obrázek 14 REM směsi s 1,2 g hliníkového prášku (10 000 ×)



Obrázek 15 REM směsi s 0,2 g hliníkového prášku (5 000 ×)

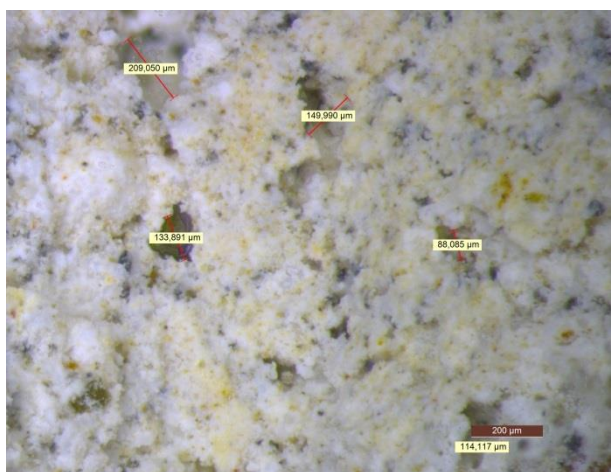


Obrázek 16 REM směsi s 1,2 g hliníkového prášku (2 000 ×)

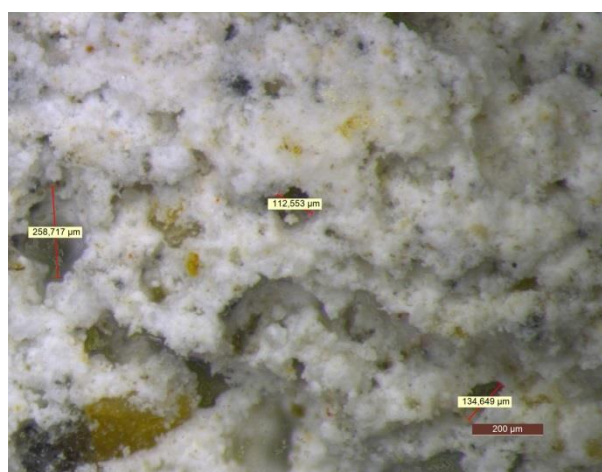
Na snímcích z optického mikroskopu jsou vidět póry, které se pohybují v rozmezí velikosti 100 – 200 µm (obr. 17, 18). Je vidět perfektní obalení zrn tmelem, ke kterému došlo při expanzi při reakci hliníkového prášku s vápenným hydrátem. Ve vzorcích s větším množstvím přidaného hliníkového prášku se dle předpokladu vytvořila rozsáhlejší pórová struktura. To je dáno tím, že vyšší obsah hliníkového prášku způsobí vývin většího množství plynného vodíku, který je následně zachycen v matici vzorku. Je tedy patrné, že pórů je více, a to jak menších pórů velikosti okolo 150 µm, tak došlo i k vytvoření většího množství větších pórů ve velikosti okolo

300 μm . Dalším mechanismem pozorovaným v pórové struktuře je shlukování pórů podobné velikosti, jak je vidět na obrázku 17 a 19. Zde je vidět, že větší přídavek hliníkového prášku způsobil zřejmě bouřlivější reakci, při které vodík unikl do matrice, a docházelo k zachycení bublinek podle složení matrice v daném místě. Kde byl spíše tmel a jemné složky kameniva, došlo k zachycení menších pórů (obrázek 17), naopak tam, kde byly i větší zrna kameniva byly zachyceny také větší póry (obrázek 19). Ve vzorcích s obsahem 0,2 g hliníkového prášku nebyla tato pravidelnost v pórové struktuře pozorována.

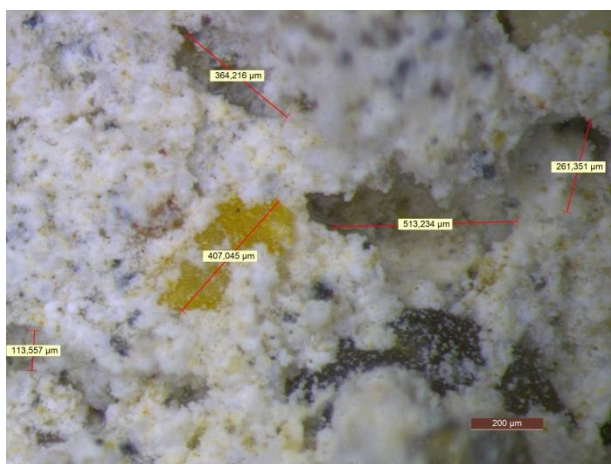
Z fotografie je zřejmé, že vzorky byly kompaktní a soudržné a byly prosty velkých pórů a kaveren.



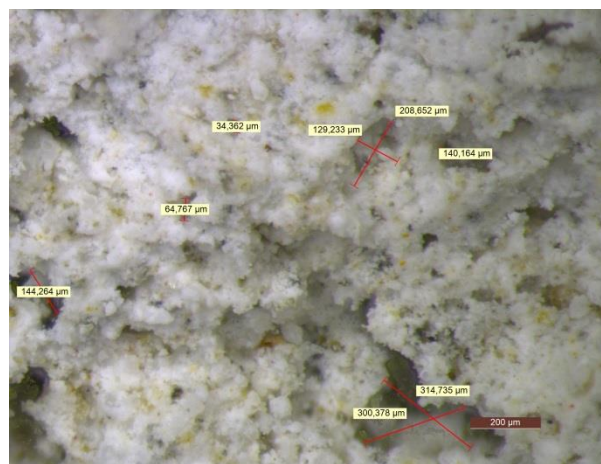
Obrázek 17 OM směsi s 1,2 g hliníkového prášku (50 ×)



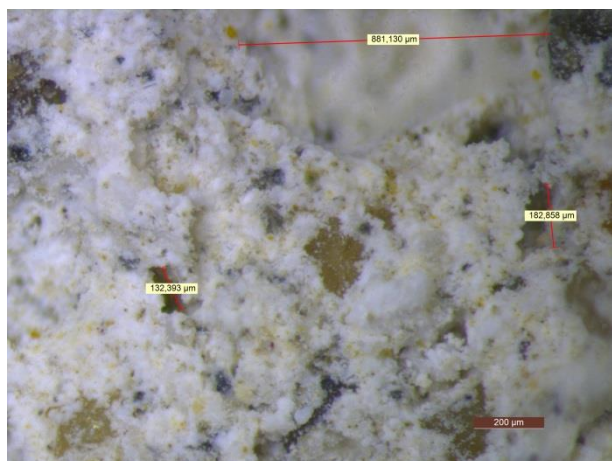
Obrázek 18 OM směsi s 0,2 g hliníkového prášku (50 ×)



Obrázek 19 OM směsi s 1,2 g hliníkového prášku (50 ×)



Obrázek 20 OM směsi s 0,2 g hliníkového prášku (50 ×)



Obrázek 21 OM směsi s 1,2 g hliníkového prášku (50 ×)



Obrázek 22 Foto směsi s 0,2 g hliníkového prášku

14.2.1 Shrnutí analýz receptur s hliníkovým práškem

Ve vzorcích obsahujících hliníkový prášek nebyl pozorován výrazný rozdíl, co se týká jejich mineralogického složení. DTA analýza pouze ukázala, že snížení dávky hliníkového prášku má za následek zvýšení obsahu portlanditu na úkor kalcitu. To bylo prokázáno i mikroskopicky. Na snímcích z elektronového mikroskopu byl také vizuálně prokázán ettringit. Póry vytvořené pomocí hliníkového prášku měly velikost 100 – 200 μm . Při použití většího množství hliníkového prášku byla vytvořena pórová struktura viditelně (v optickém mikroskopu) rozsáhlejší a póry měly také rozmanitější velikost. Větší množství hliníkového prášku mělo také za následek shlukování většího množství pórů. Tento jev nebyl při dávce 0,2 g hliníkového prášku pozorován. Vzorky byly kompaktní a soudržné. Rozsáhlejší pórový systém při dávce 1,2 g hliníkového prášku se ale neprojevil snížením objemové hmotnosti. Naopak, při dávce 0,2 g hliníkového prášku činila objemová hmotnost $1\,185\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, pevnost v tlaku $1,45\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, a při dávce 1,2 g hliníkového prášku byla objemová hmotnost $1\,550\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a pevnost v tlaku $3,5\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$.

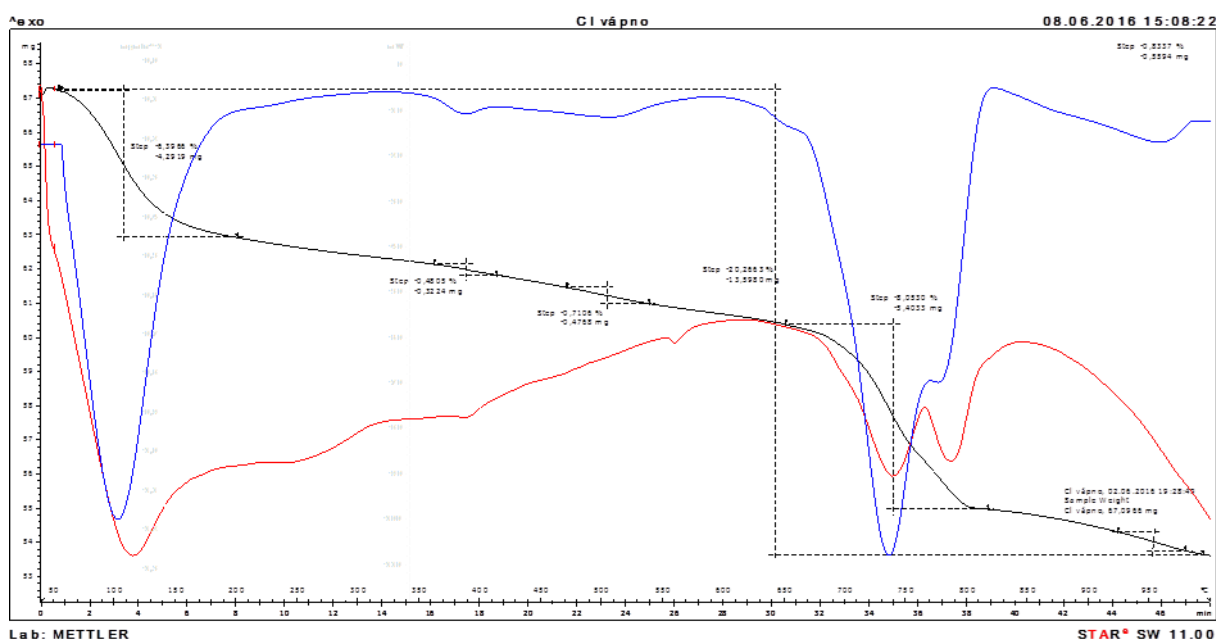
14.3 Receptura s chlorovým vápnem

Pro zkoumání mikrostruktury vzorků vytvořených pomocí reakce chlorového vápna s peroxidem vodíku byl vybrán typický vzorek.

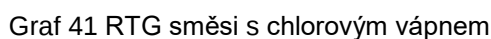
Tabulka 30 Receptura typického vzorku s chlorovým vápnem použitého pro studium mikrostruktury

Receptura	CEM I 42,5 R [g]	Kamenivo frakce 0-4 mm [g]	Chlorové vápno [g]	Voda [g]	Peroxid vodíku [g]
Chlorové vápno	360	720	120	360	70

Dále byly některé analýzy provedeny i na shluku, který se tvořil při reakci. Vyloupnutý shluk je vyobrazen na obrázku 30. V kapitole 13.1.2.4 je popsán vznik těchto shluků, které vznikaly bezprostředně po zamíchání vzorků při proběhu reakce a při ukončení doby tuhnutí po odstranění vzorů z forem již byly přítomny v celém vzorku. Tento jev byl způsoben bouřlivostí reakce, která byla velmi prudká, a tyto produkty se tvořily velmi rychle a nebylo možné směs rozmíchat do hladka. Tyto shluky byly přítomny ve všech vzorcích a daly se ze vzorků snadno vyloupnout, a to především na lomu. Bylo předpokládáno, že se jedná o shluky vápence (kalcitu). Dále docházelo, zřejmě vlivem přídavku peroxidu vodíku, k okamžité karbonataci části vzniklého portlanditu.

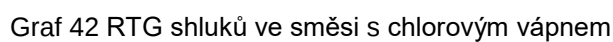


Graf 40 DTA směsi s chlorovým vápnem



Tabulka 31 Vyhodnocení RTG analýzy směsi s chlorovým vápnem

Barva	Chemický vzorec	Minerál
modrá	SiO_2	Křemen
zelená	CaCO_3	Kalcit
šedá	SiO_2	Cristobalit
hnědá	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	Albit



Tabulka 32 Vyhodnocení RTG analýzy shluků ve směsi s chlorovým vápnem

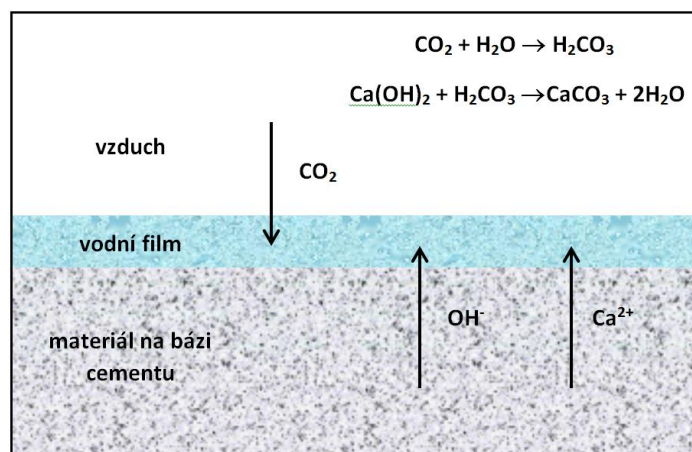
Barva	Chemický vzorec	Minerál
modrá	CaCO ₃	Kalcit

Přestože se použití reakce chlorového vápna s peroxidem neosvědčila při návrhu podlah z důvodu pracnosti, rychlosti reakce, nemožnosti kontrolovat reakci, bezpečnosti práce (dochází k uvolňování zápachu) a nemožnosti opakovat výsledky v dostatečně stabilní míře, jedná se o nejzajímavější vzorky v této disertační práci. Chlorové vápno neboli chlornan vápenatý reaguje bouřlivě s peroxidem vodíku, a při této reakci dochází kromě tvorby pórů a nakypření také k tvorbě vápenných shluků, které není možné ve směsi rozmíchat či jinak zabránit jejich vzniku.

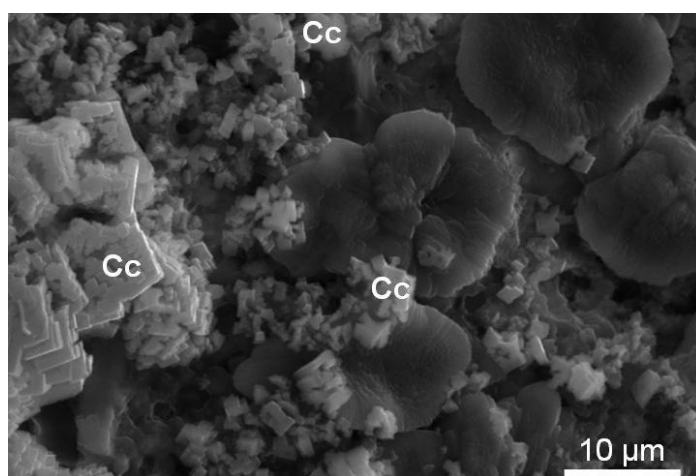
Po odformování a dále v době 28 denního zrání měly vzorky na pohled kompaktní a soudržnou strukturu s typickou šedou barvou s bílými shluky kalcitu. Z důvodu ohodnocení pozdějšího vzhledu a pevnosti byly nějaké vzorky uchovány dále v laboratorním prostředí. Po roce získaly tyto vzorky bílou až žlutou barvu, začaly se částečně drobit a při rozlomení vykazovaly hrubé póry skoro až kostní struktury.

Analýza DTA neprokázala žádné odchylky od předpokládaného průběhu, pouze ukázala na přítomnost volné a vázané vody v CSH gelu a na obsah kalcitu. Ten byl prokázán i rentgenograficky, kde se ukázaly i další minerály, jako je křemen, cristobalit a albit pocházející z plniva. Na snímcích z elektronového mikroskopu je vidět narušená struktura tmele, která není podobná žádným dalším snímkům, kde byl tmel nakypřován buď pomocí hliníkového prášku, nebo přidavkem aditiv. Na snímcích se neukázaly jednotlivé minerály a struktury, jak tomu bylo u ostatních receptur.

Mechanismus tvorby výkvětů na povrchu materiálů na bázi cementu je patrný z obrázku 23. Zde jsou naznačeny reakce, které probíhají vlivem vzdušného oxidu uhličitého za přítomnosti vody. Nejprve dochází k reakci vody s oxidem uhličitým za vzniku kyseliny uhličité. Kyselina uhličitá pak dále reaguje s hydroxidem vápenatým (portlanditem). Výslednými produkty této reakce jsou uhličitán vápenatý (kalcit), který pozorujeme ve formě výkvětů a voda.

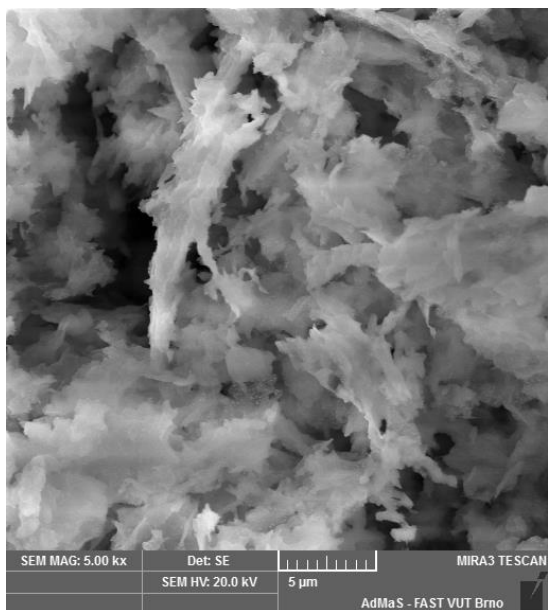


Obrázek 23 Schéma tvorby vápenných výkvětů [95]

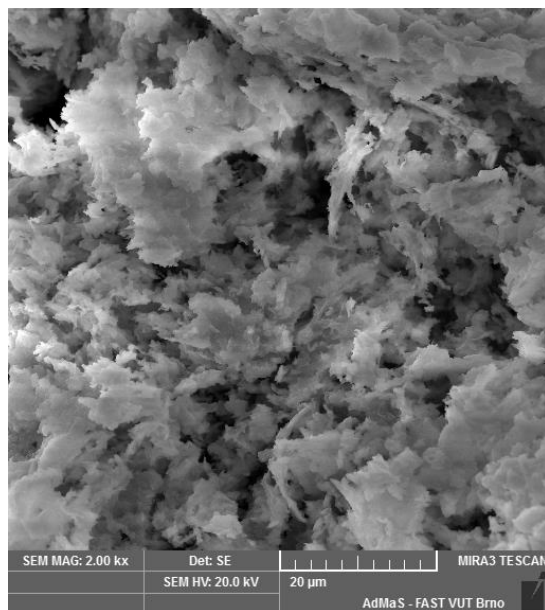
Obrázek 24 Snímek vápenných výkvětů na povrchu vzorku (Cc - CaCO₃) [95]

Dá se říci, že vzorek je prosycen vápennými výkvěty. V tomto popisovaném případě došlo k tak masivní tvorbě těchto produktů (výkvětů) zřejmě kvůli pórovité struktuře materiálu, kde docházelo k působení vlhkosti a vzdušného oxidu uhličitého v celém vzorku a nejen na jeho povrchu, jak tomu bývá v případě kompaktních vzorků s homogenní strukturou. Vzorky byly vystaveny dlouhodobému působení vzdušené vlhkosti a vápenaté zbytky obsažené ve větší míře v průběhu času zreagovaly s vlhkostí a následkem toho došlo k prosycení vzorku. Na obrázku 24 je vidět typická povrchová struktura vzorku, jehož povrch je pokryt výkvěty. v porovnání se vzorky pórobetonu s chlorovým vápnem je vidět, že skoro celá struktura vzorku

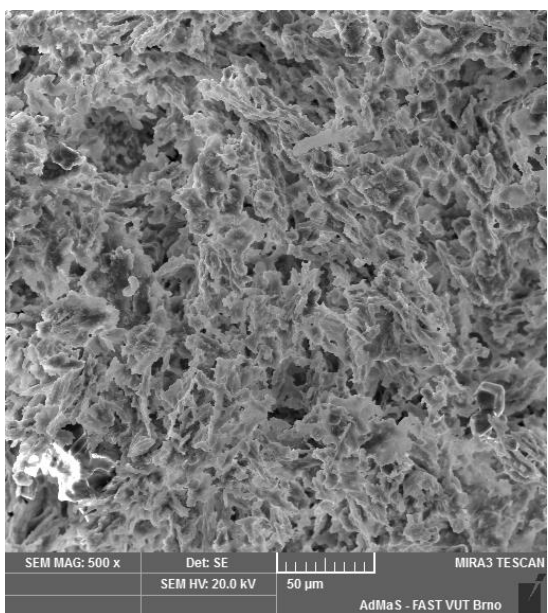
jak na povrchu, tak i na lomu je pokryta zvláštními vápennými útvary.



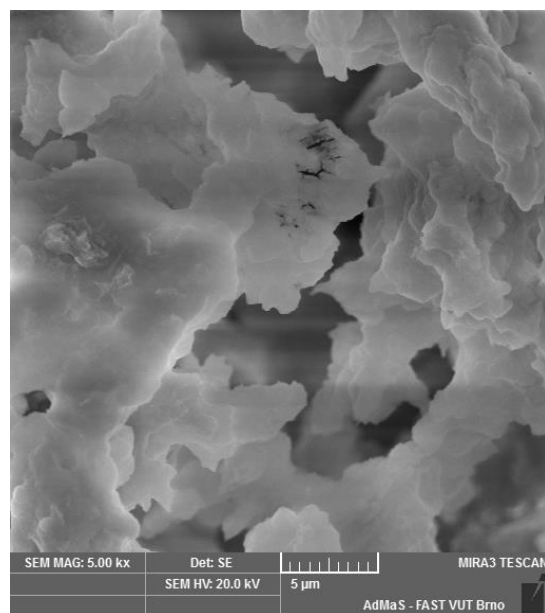
Obrázek 25 REM směsi s chlorovým vápnem (5 000 ×)



Obrázek 26 REM směsi s chlorovým vápnem (2 000 ×)



Obrázek 27 REM shluků ve směsi s chlorovým vápnem (500 ×)

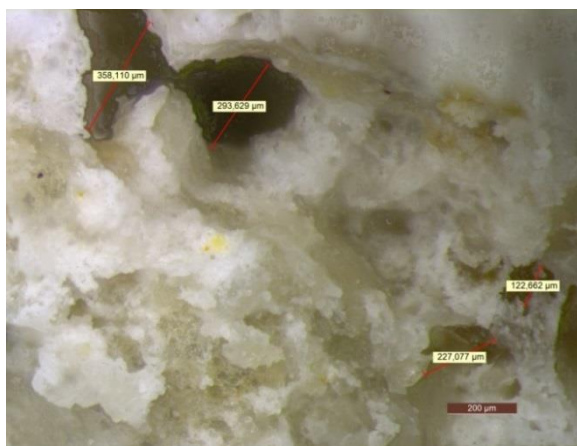


Obrázek 28 REM shluků ve směsi s chlorovým vápnem (5 000 ×)

Rentgenograficky bylo potvrzeno, že se jedná o shluky kalcitu. Shluky nebyly v tmelu nijak pevně ukotveny a na rozdíl od plniva je bylo možné snadno vyloupnout.

Je zajímavé, že snímky kalcitových shluků a celého vzorku vypadají velmi podobně a ukazuje se tedy především kalcit.

Kromě velkých pórů o velikosti 2-4 mm, které vytvářely již zmíněnou „kostní“ strukturu, byly v tmelu vytvořeny také póry menší, o velikosti 150 - 350 μm . Vytvořené póry jsou tedy výrazně větší, než tomu je u pórů tvořených reakcí s hliníkovým práškem. Na obrázku 29 je snímek z optického mikroskopu s patrnými póry. Obrázek 30 ukazuje shluky vyloupenuté z trámečků.



Obrázek 29 OM směsi s chlorovým vápnem (50 ×)



Obrázek 30 Foto shluků ve směsi s chlorovým vápnem

Na obrázcích 31 a 32 je viditelná změněná struktura vzorku, oproti čerstvému vyžrálému vzorku, který je vidět na obrázku 12 v kapitole věnované výrobě vzorků pomocí reakce chlorového vápna s peroxidem vodíku.



Obrázek 31 "kostní struktura" směsi s chlorovým vápnem



Obrázek 32 Foto směsi s chlorovým vápnem

14.3.1 Shrnutí analýz receptury s chlorovým vápnem

Analýzy byly provedeny na typickém vzorku. Vzorky v čase silně degradovaly a nebyly předpokládány výrazné změny v mikrostruktuře vzorků v závislosti na dávce chlorového vápna a peroxidu vodíku. Dále byl analyzován také shluk vápenných produktů, který se vyskytoval ve většině vzorků a dal se snadno vyloupnout. Analýzami bylo prokázáno, že se jedná o shluky kalcitu.

RTG a DTA analýzy shodně ukázaly na přítomnost většího množství kalcitu. Dále byl prokázán albit a cristobalit, pocházející zřejmě z plniva. Zajímavé je, že i přesto, že vzorky obsahují velké množství kalcitu, další formy uhličitanu vápenatého, a to především vaterit a aragonit, na rozdíl od ostatních vzorků zkoumaných v této práci, přítomny nebyly.

Vzorky byly v dlouhodobém uložení celkově ve špatném stavu, ze zpočátku kompaktních vzorků typicky šedé barvy se v průběhu času staly světle žluté rozpadající se vzorky se změněným pórovým systémem vizuálně připomínajícím „kostní strukturu“ s viditelnými póry o velikosti až několika milimetrů. Nicméně byly ve struktuře zachovány i póry menší, vzniklé při počáteční reakci. Tyto póry měly velikost 150 – 350 μm . Lze tedy usuzovat, že zpočátku byly reakcí vytvořeny póry do velikosti 400 μm a v průběhu času, vlivem vzdušného CO_2 , vlhkosti a nezreagovaných reziduí po počáteční reakci, docházelo k tvorbě výkvětů a následné destrukci přepážek mezi póry, až došlo k vytvoření pórů o velikosti 2 – 4 mm. Dále lze také předpokládat, že tento proces nebyl v době provádění analýz dokončen a v průběhu dalšího uložení v řádu několika let by došlo k dalšímu zvětšování pórů, následné destrukcí všech přepážek mezi póry a tedy i k totální destrukci celého vzorku.

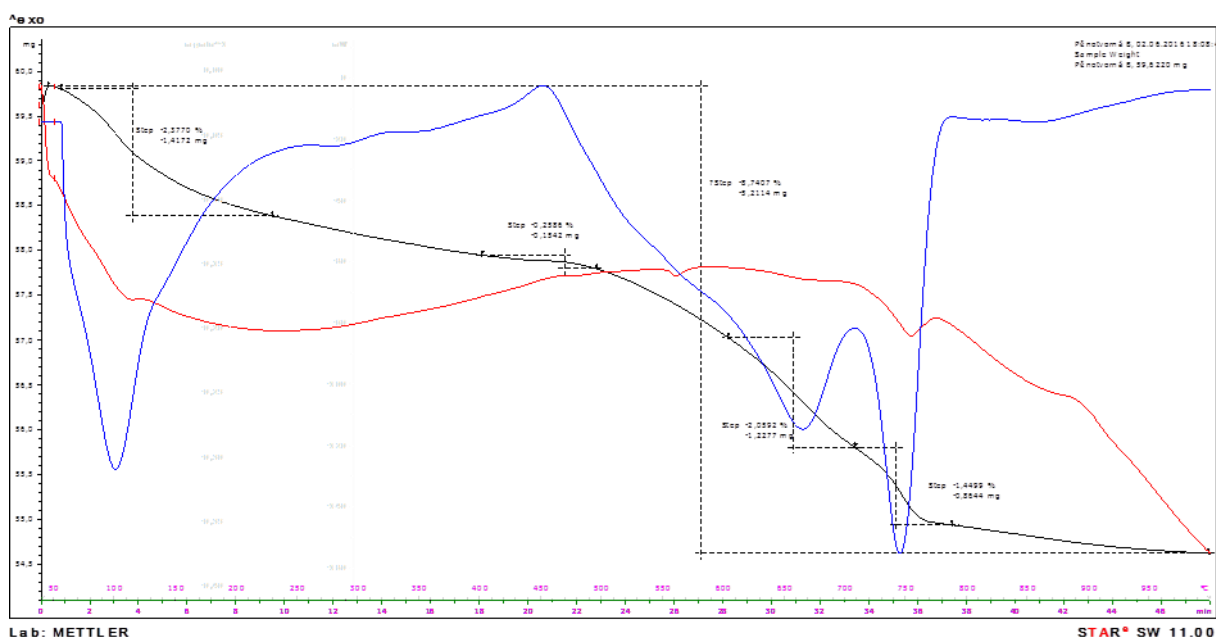
14.4 Receptury obsahující pěnotvorné látky B, L, G7

Pro studium mikrostruktury receptur obsahujících pěnotvorné látky byly vybrány receptury s typickým složením pro tuto kategorii, aby bylo možné co nejlépe demonstrovat vlastnosti těchto receptur.

Tabulka 33 Receptury vzorků obsahujících pěnotvorné látky použitých pro studium mikrostruktury

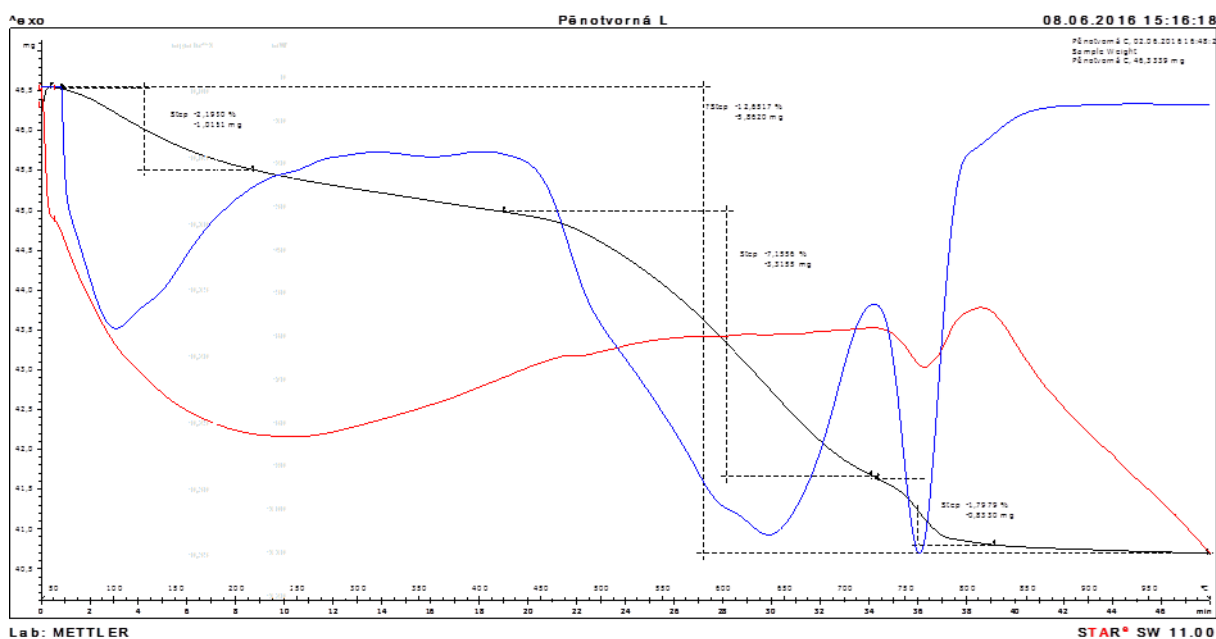
Receptura	CEM I 42,5 R [g]	Kamenivo frakce 0-4 mm [g]	Liaver 0-4 mm [g]	Pěnidlo Hostapur [g]	Pěnidlo Tylovis EP 28 [g]
REC B	249	746		0,4	
REC L	333		666		0,5
REC G7	330		670	0,5	0,5

V případě receptur obsahujících pěnotvorné látky, má zřejmě, kromě zrání tmele na tvorby krystalických struktur na mikrostrukturu vliv také použité plnivo. v případě receptury B je vidět i drobný exotermní efekt, při kterém došlo k vyhoření zřejmě aditiva. Na začátku křivky je opět zřejmé opouštění vody volné a vázané, tento efekt probíhá i ve všech dalších DTA grafech a nebude již dále zmiňován. Následně se rozkládá albit a kalcit. Tyto minerály byly také prokázány pomocí RTG, kde byl přítomen ještě křemen a hahturit, který je shodný s alitem.



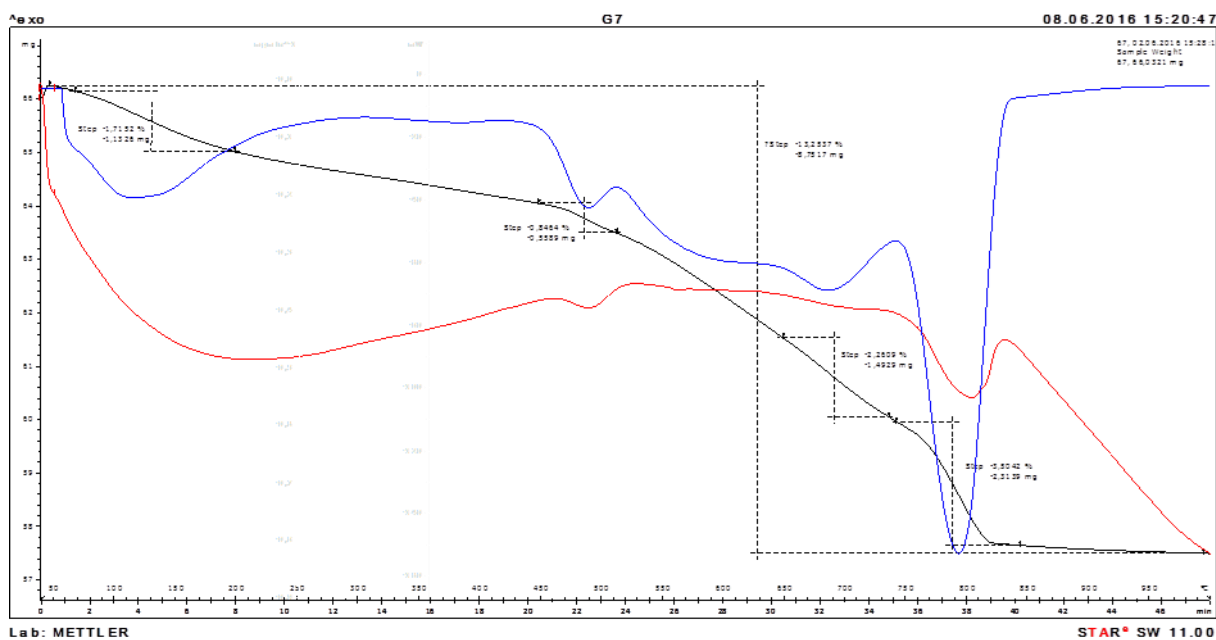
Graf 43 DTA směsi pěnobetonu B

U receptury L vidíme v závěru pík kalcitu a vedle něj nalevo je velký pík, kde je zřejmě skryt rozpad vateritu, cristobalitu, portlanditu a křemene, které byly prokázány RTG analýzou a zároveň jejich rozpad probíhá v intervalu teplot právě 400 - 700°C.

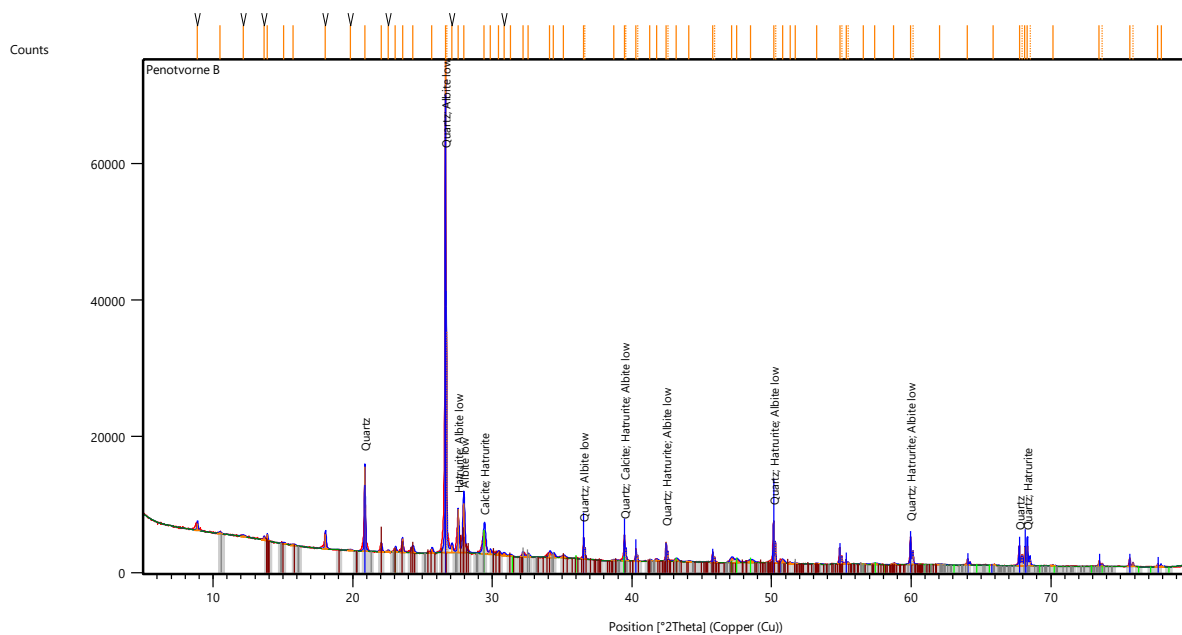


Graf 44 DTA směsi pěnobetonu L

U vzorku G7 pak vidíme oddělený pík portlanditu, křemene a cristobalitu a pak těsně vedle kalcitu také drobný pík vateritu, který má sice stejné chemické složení, jako kalcit, rozpadá se ale při nižší teplotě.



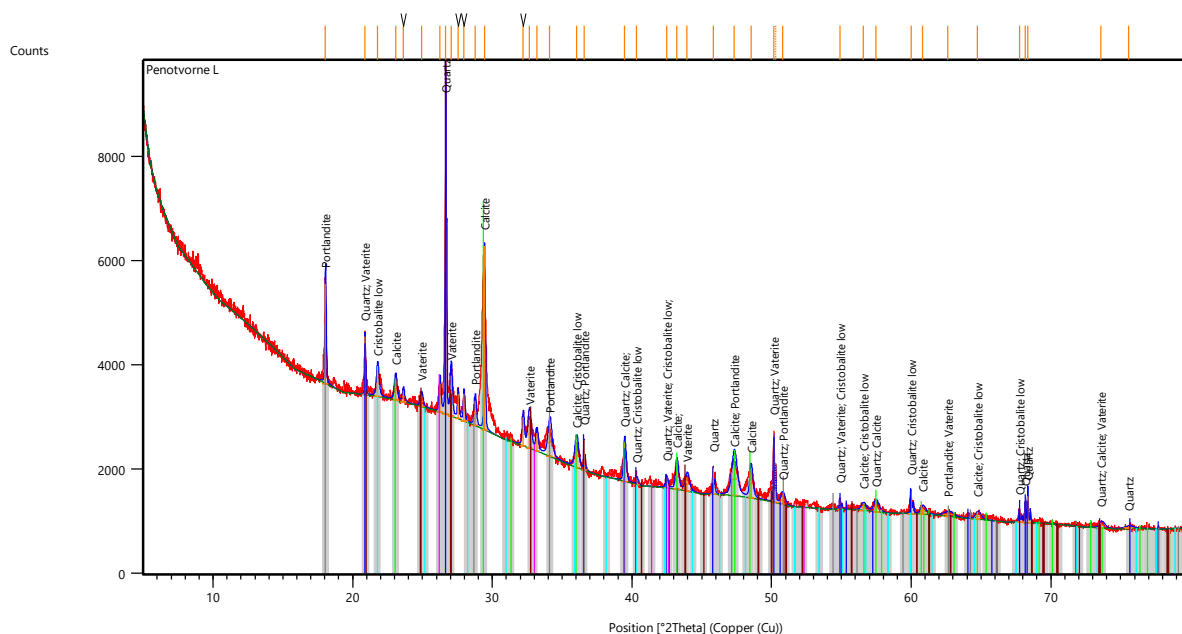
Graf 45 DTA směsi pěnobetonu G7



Graf 46 RTG směsi pěnobetonu B

Tabulka 34 Vyhodnocení RTG analýzy směsi pěnobetonu B

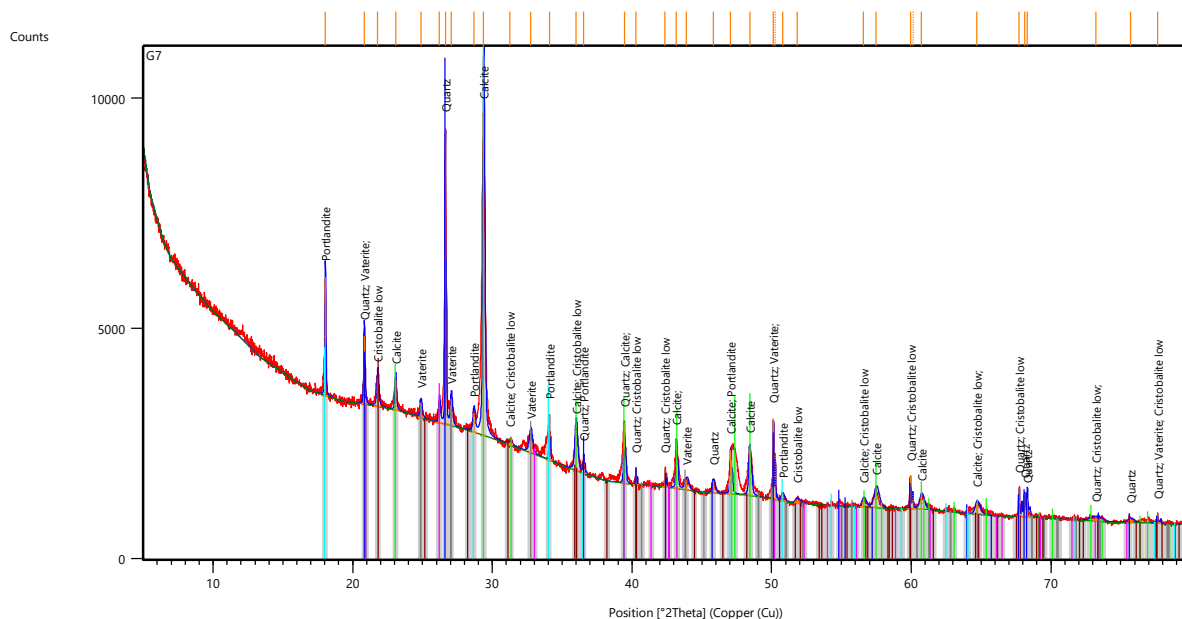
Barva	Chemický vzorec	Minerál
modrá	SiO_2	Křemen
zelená	CaCO_3	Kalcit
šedá	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	Alit (hahtrurit)
hnědá	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	Albit



Graf 47 RTG směsi pěnobetonu L

Tabulka 35 Vyhodnocení RTG analýzy směsi pěnobetonu L

Barva	Chemický vzorec	Minerál
modrá	SiO_2	Křemen
zelená	CaCO_3	Kalcit
šedá	Ca(OH)_2	Portlandit
hnědá	CaCO_3	Vaterit
tyrkysová	SiO_2	Cristobalit
fialová	KNO_3	Draselný ledek



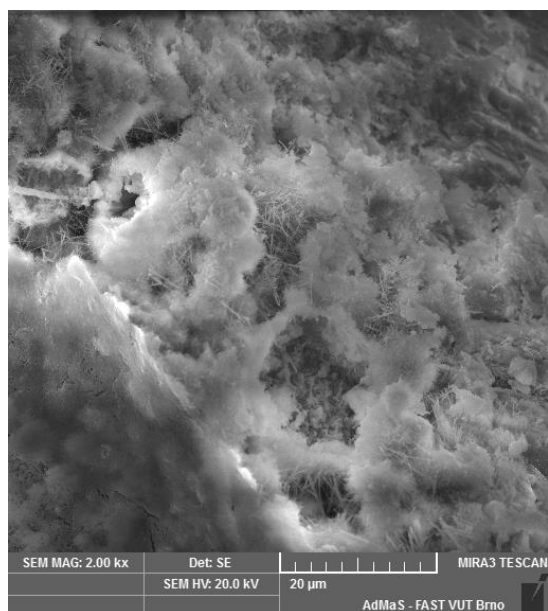
Graf 48 RTG směsi pěnobetonu G7

Tabulka 36 Vyhodnocení RTG analýzy směsi pěnobetonu G7

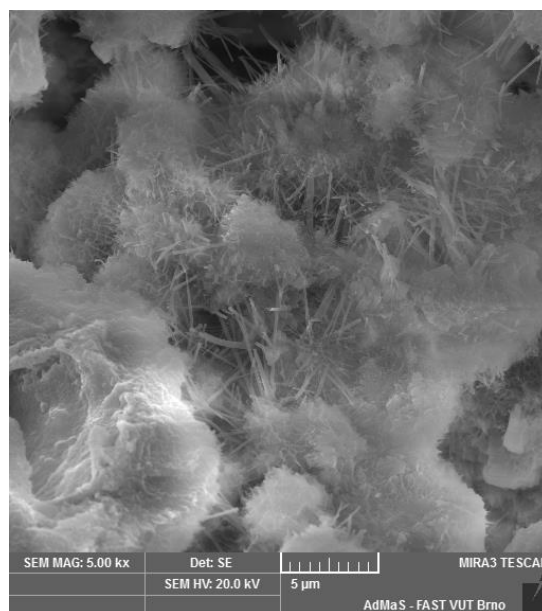
Barva	Chemický vzorec	Minerál
modrá	SiO_2	Křemen
zelená	CaCO_3	Kalcit
šedá	CaCO_3	Vaterit
hnědá	SiO_2	Cristobalit
tyrkysová	Ca(OH)_2	Portlandit
fialová	KNO_3	Draselný ledek

Na snímcích z elektronového mikroskopu pak může být pozorován cementový tmel a krystaly kalcitu a portlanditu (obr. 33, 36). Jehličky ukazují na přítomnost malého množství ettringitu (na obrázcích občasná širší jehlička) a drobné jehličky vateritu vyrůstající ze zrn kalcitu a tmele (obr. 34). Byly potvrzeny výsledky řady autorů, např. Lacha a Henninga (1983). Jedná se o produkty karbonatace, kde vzniklý CaCO_3 vystupuje v různých modifikacích, a to jak nestabilní vaterit a aragonit tak i přímo jako stabilní kalcit. Pro karbonataci vzorku bylo ve všech případech splněno několik podmínek, kdy ke karbonataci dochází, nebo se ještě urychluje. Jedná se především o stáří a uložení vzorku, kdy byly vzorky uloženy v laboratorním

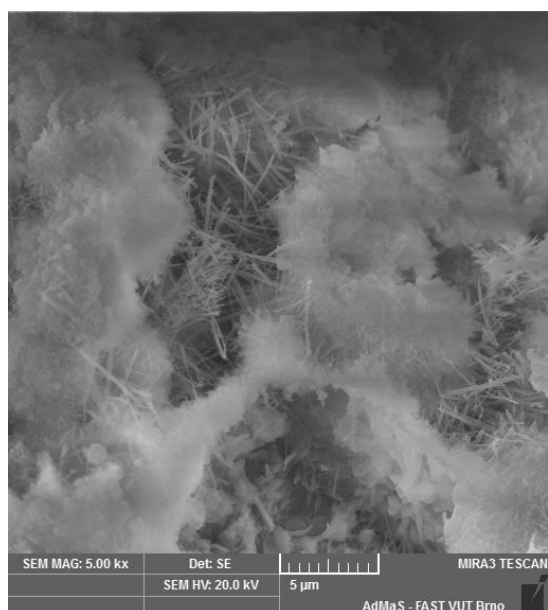
prostředí, kde může docházet ke zvýšení relativní vlhkosti a také ke zvýšení obsahu CO_2 ve vzduchu. Vzorky byly uloženy po dobu delší, než jeden rok a nebyly ze své podstaty hutné, takže se jejich pórový systém dobře prosycoval vzdušným CO_2 .



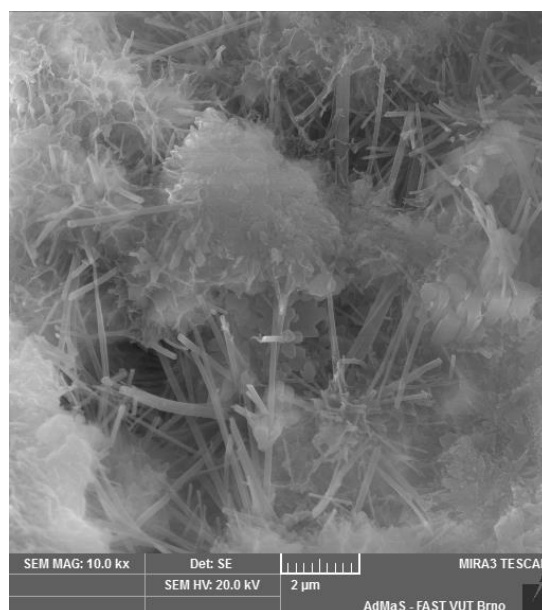
Obrázek 33 REM směsi pěnobetonu B (2 000 ×)



Obrázek 34 REM směsi pěnobetonu L (5 000 ×)



Obrázek 35 REM směsi pěnobetonu G7 (5 000 ×)



Obrázek 36 REM směsi pěnobetonu G7 (10 000 ×)

Na snímcích z optického mikroskopu je vidět velikost pórů, které v tomto případě jsou cca 200 - 400 µm velké (obr. 37), tj. také výrazně větší než póry tvořené hliníkovým práškem. Dále je vidět ukotvení jednotlivých zrn plniva v tmelu a mezerovitá struktura. Na obrázcích 38 a 39 je možné také pozorovat vnitřní strukturu kameniva Liaver. Na obrázku 39 je dále možné pozorovat mezerovitou

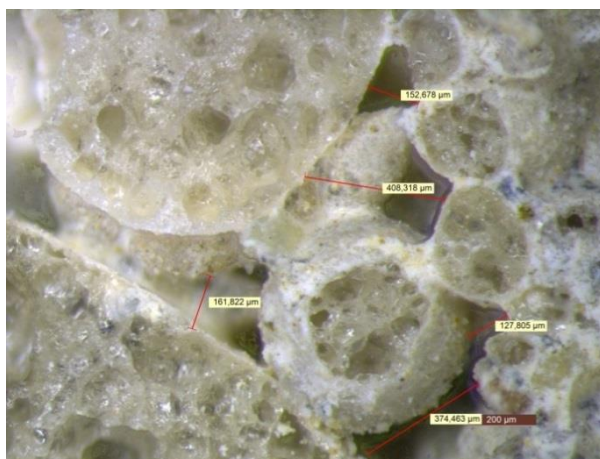
strukturu mezi zrny kameniva Liaver, je zde pěkně vidět styk kameniva a jeho perfektní obalení tmelem.



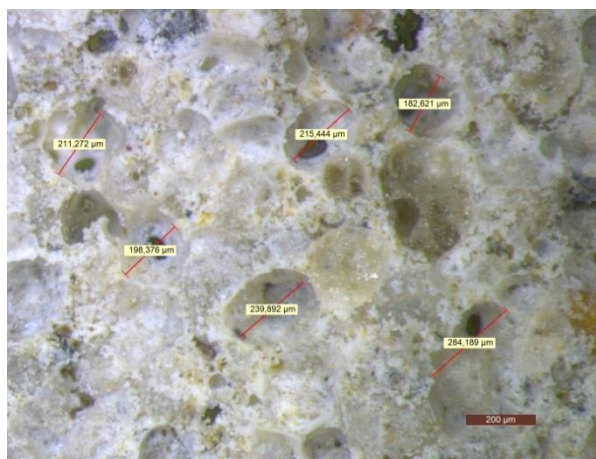
Obrázek 37 OM pěnobetonu B (50 ×)



Obrázek 38 OM detail ukotvení zrna Liaveru (50 ×)



Obrázek 39 OM pěnobetonu G7 (50 ×)



Obrázek 40 OM pěnobetonu G7 (50 ×)

Na obrázku 40 jsou patrné póry vytvořené pomocí sypkého pěnidla. Na fotkách je pak vidět, že vzorky měly kompaktní a soudržnou strukturu bez výrazných kaveren či shluků.



Obrázek 41 Foto pěnobetonu B



Obrázek 42 Foto pěnobetonu G7

14.4.1 Shrnutí analýz receptur obsahujících pěnotvorné látky

Pro následné použití v praxi jsou to právě receptury obsahující pěnotvornou látku a plnivo v podobě kameniva 0 – 4 mm nebo lehkého plniva Liaver 0 – 4 mm, které byly doporučeny.

Analýzy RTG a DTA neukázaly na žádný nečekaný jev, který by doprovázel tyto receptury. To bylo také předpokládáno, protože při výrobě těchto vzorků nedocházelo k žádným bouřlivým či překvapivým reakcím. Ve vzorcích byl prokázán vaterit, cristobalit, portlandit a křemen. Na snímcích z elektronového mikroskopu byl pozorován cementový tmel s jeho typickou strukturou zplstěných krystalů. Dále byly pozorovány drobné jehličky vateritu vyrůstající ze zrn kalcitu a tmele a také malé množství ettringitu.

Póry vytvořené pomocí práškového pěnidla jsou větší, než póry vytvořené pomocí hliníkového prášku. Jejich velikost se pohybuje v rozmezí 200 – 400 μm . Vzorky, kde byl použit jako plnivo Liaver měly typickou mezerovitou strukturu, pozorovatelnou v optickém mikroskopu. Vzorky byly soudržné a měly kompaktní strukturu. Co se týká zmíněné mezerovitosti, mezery mezi zrny korespondovaly svou velikostí s póry vytvořenými pěnidlem. Velikost mezer byla 100 – 400 μm . Je také vidět, že přidání práškového pěnidla přispělo k perfektnímu obalení zrn tmelem.

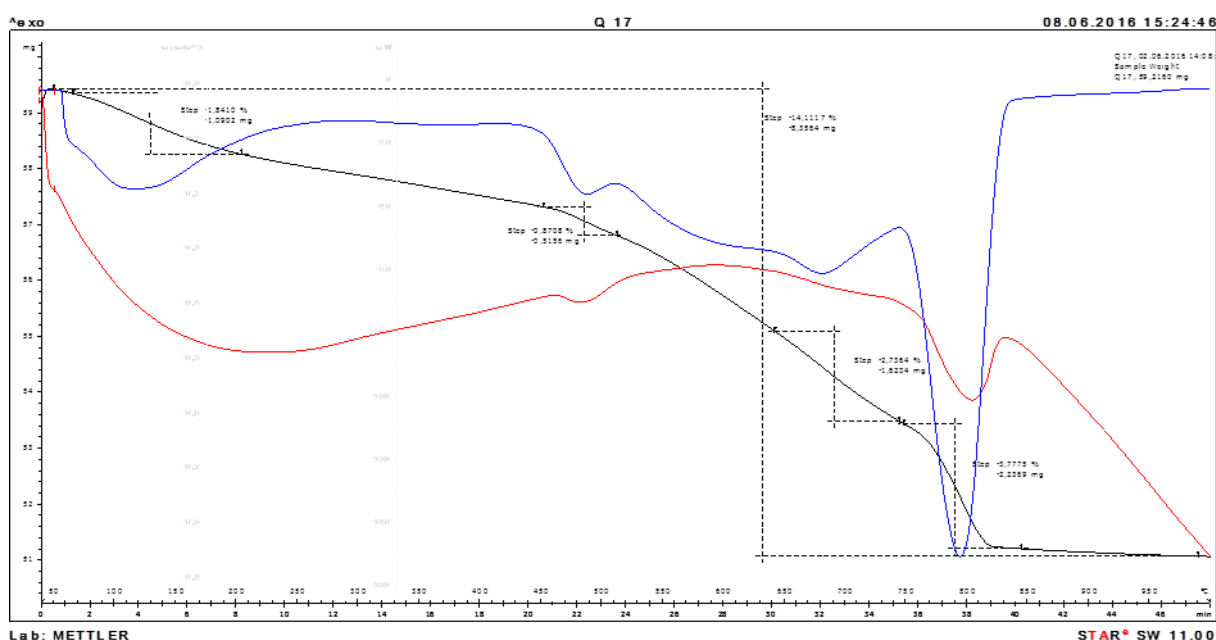
14.5 Receptury obsahující mikrosféry Q17, X24

Pro studium mikrostruktury receptur obsahujících mikrosféry byly vybrány dvě receptury obsahující také pěnотvorné látky.

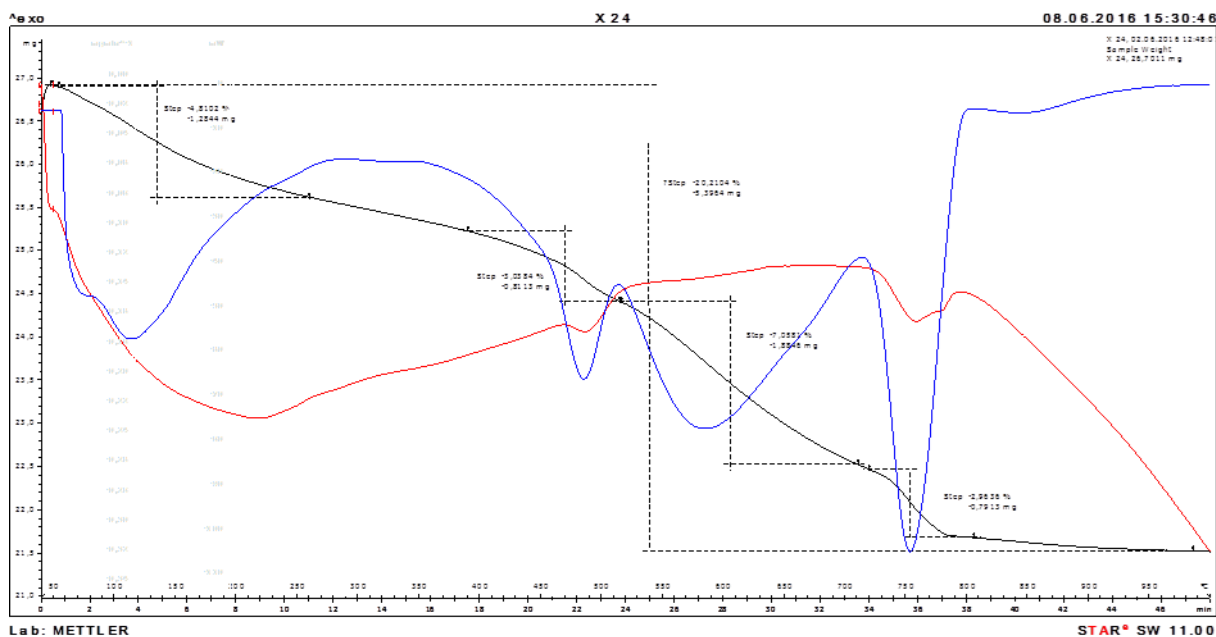
Tabulka 37 Receptury vzorků obsahujících mikrosféry použitých pro studium mikrostruktury

Receptura	CEM I 42,5 R [g]	Popílek [g]	Liaver 0-4 mm [g]	Vermikulit [g]	Q-CEL- 7016 [g]	W-300	Pěnidlo Hostapur + Tylovis EP 28 (1:1) [g]
REC Q17	330	80	420			170	0,1
REC X24	440	120	160	120	160		0,1

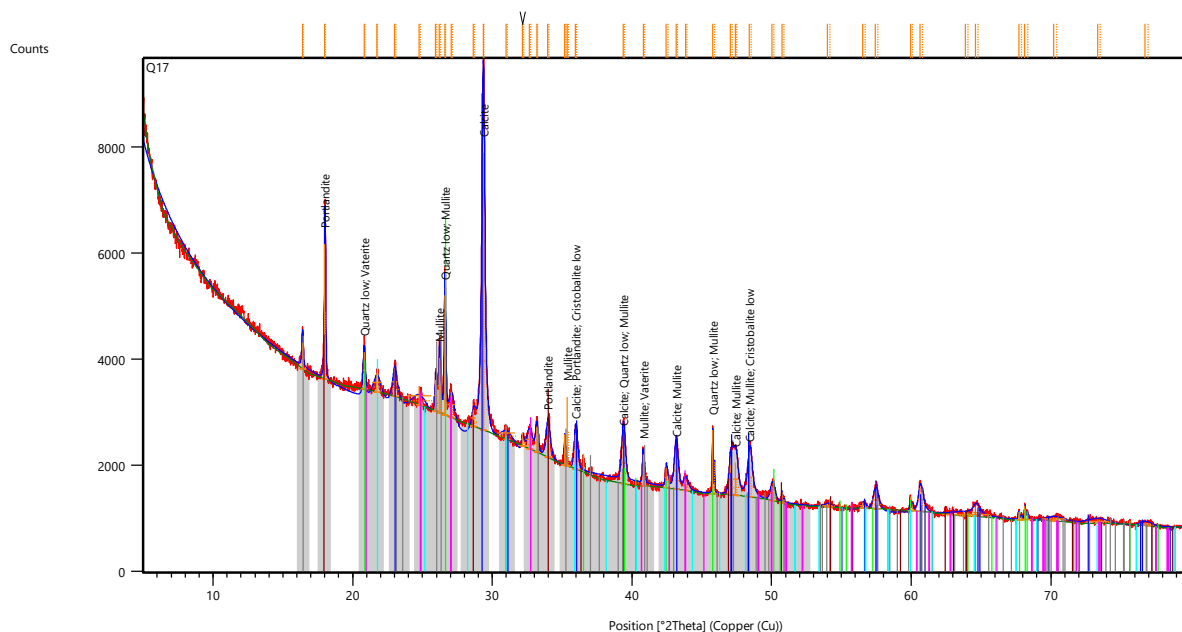
Výsledky DTA analýzy a RTG analýzy vzorků s obsahem mikrosfér se příliš neliší od výsledků z přechozí kapitoly. Receptury těchto vzorků jsou přímo založeny na recepturách vzorků s pěnidly a jediným a hlavním rozdílem je obsah právě mikrosfér. U vzorku Q17 je vidět pík ukazující na přítomnost portlanditu, vateritu a kalcitu. Všechny tyto minerály byly prokázány i pomocí RTG analýzy. Vzorek X24 vykazuje dramatičtější křivku DTA, na vině je především složení plniv, kde byly kromě mikrosfér a Liaveru přidány i další, např. vermikulit. Na křivce je opět přítomen rozpad portlanditu a kalcitu s píkem ukazujícím na křemen a vaterit. v RTG analýze byl přítomen také zeolit, který můžeme vidět i na obrázku z elektronového mikroskopu (obr. 47).



Graf 49 DTA směsi Q17



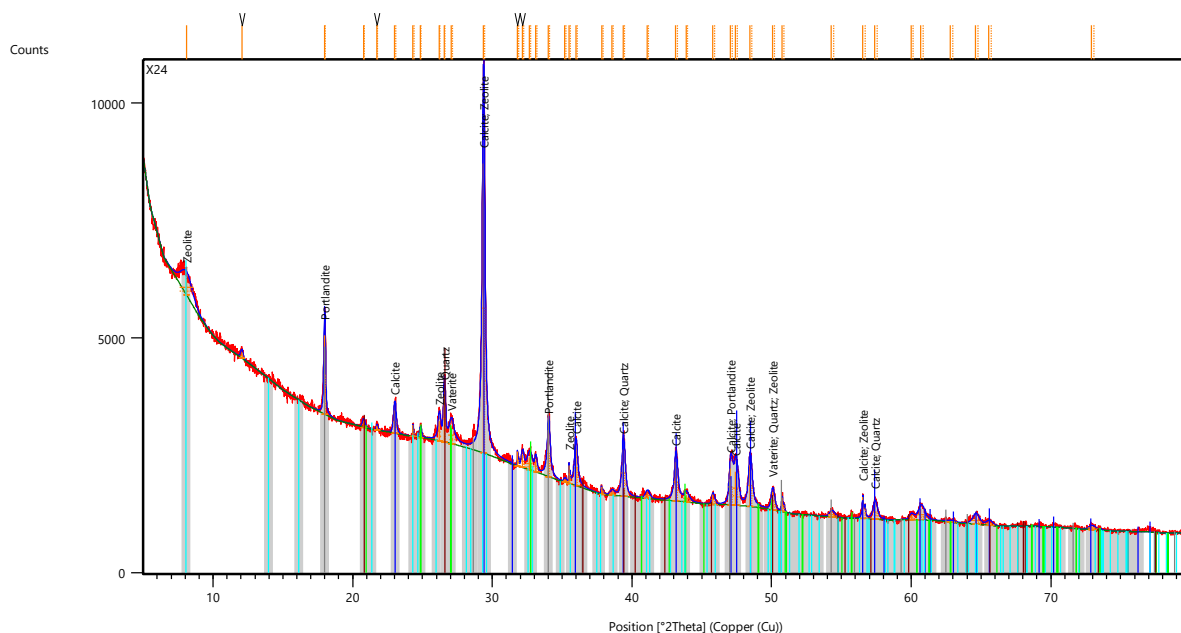
Graf 50 DTA směsi X24



Graf 51 RTG směsi Q17

Tabulka 38 Vyhodnocení RTG analýzy směsi Q17

Barva	Chemický vzorec	Minerál
modrá	CaCO_3	Kalcit
zelená	SiO_2	Křemen
šedá	$\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$	Mullit
hnědá	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Portlandit
tyrkysová	SiO_2	Cristobalit
fialová	CaCO_3	Vaterit

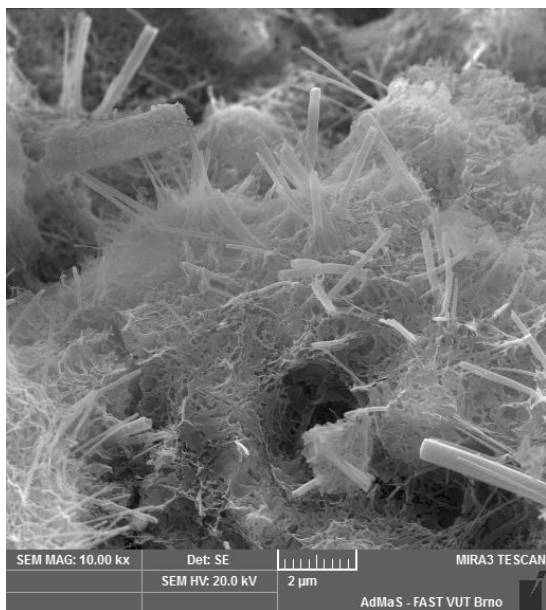


Graf 52 RTG směsi X24

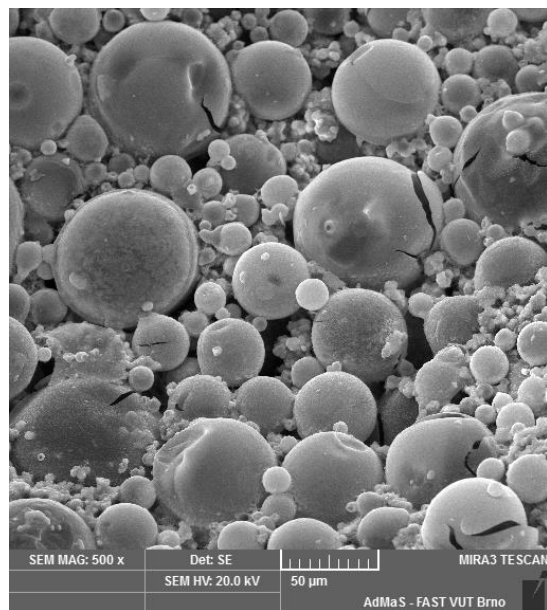
Tabulka 39 Vyhodnocení RTG analýzy směsi pěnobetonu X24

Barva	Chemický vzorec	Minerál
modrá	CaCO_3	Kalcit
zelená	CaCO_3	Vaterit
šedá	Ca(OH)_2	Portlandit
hnědá	SiO_2	Křemen
tyrkysová	$\text{SiO}_2 +$	Zeolit

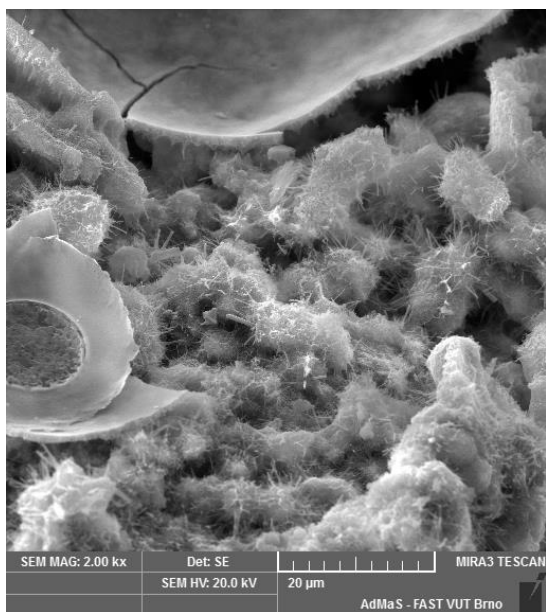
Opět je možné pozorovat drobné jehličky vyrůstající z krystalů kalcitu a ztvrdlého tmele (obr. 43). Jsou také patrné kuličky - mikrosféry, které, jak je vidět mají sklon k praskání. Jejich vnitřní povrch je dokonale hladký. Tam, kde došlo k ukotvení jednotlivých sfér do tmele, je možné vidět obalení celé kuličky filmem s drobnými výrůstky tmele. Ettringit je opět přítomen jen v malém množství. Mikrosféry se bohužel rády shlukují, viz obr. 44, a není možné je lépe rozmíchat. Dochází tak ke tvorbě měkkých shluků, které nejsou vůbec spojeny tmelem a mají tendenci vypadávat. Na obrázku 45 je možné pozorovat prasklé kuličky – mikrosféry, na jejichž povrchu je vidět obalení tmelem v tenké vrstvě. Oproti tomu shluk mikrosfér na obrázku 44 ukazuje na hladký povrch mikrosfér bez obalení tmelem. Shluk byl vyloupnut z místa podobného shluku viditelnému na fotce (obr. 52)



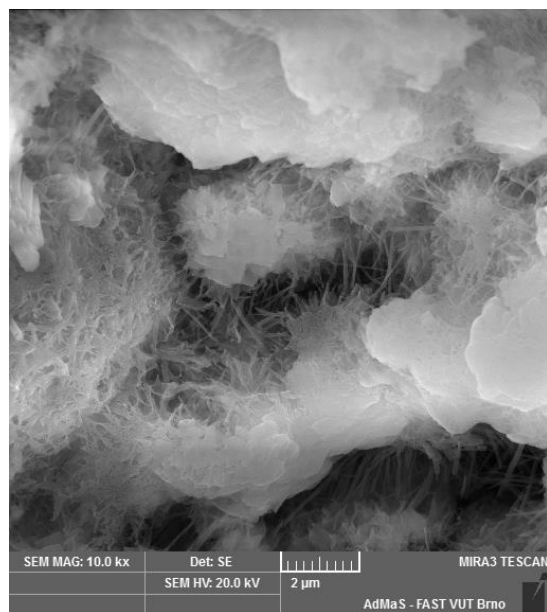
Obrázek 43 REM směsi X24 (10 000 ×)



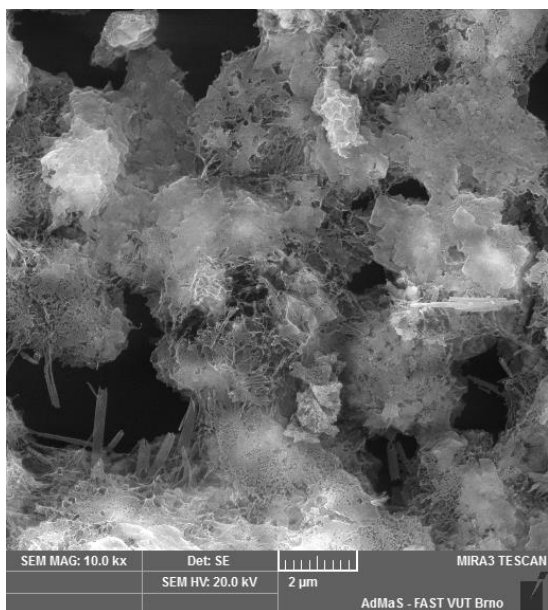
Obrázek 44 Shluk cenosfér ve směsi X24 (500 ×)



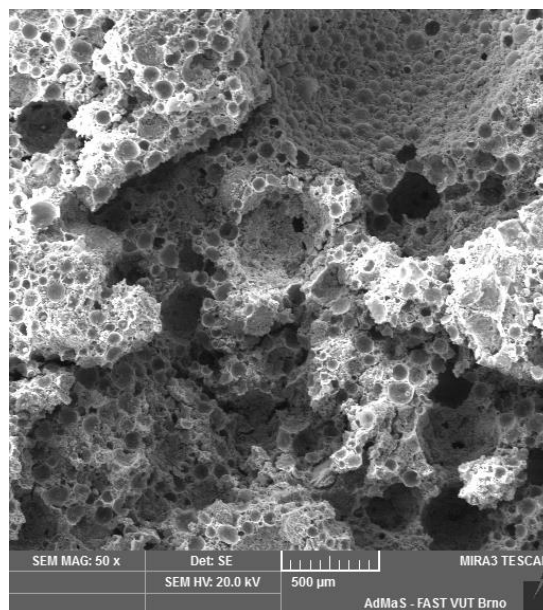
Obrázek 45 REM směsi Q17 (2 000 ×)



Obrázek 46 REM směsi Q17 (10 000 ×)

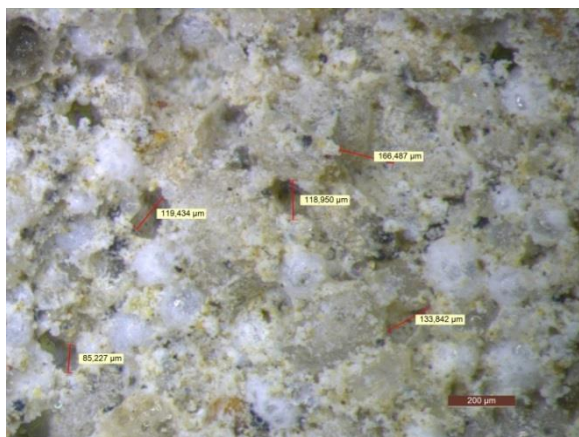


Obrázek 47 REM směsi X24 (10 000 ×)

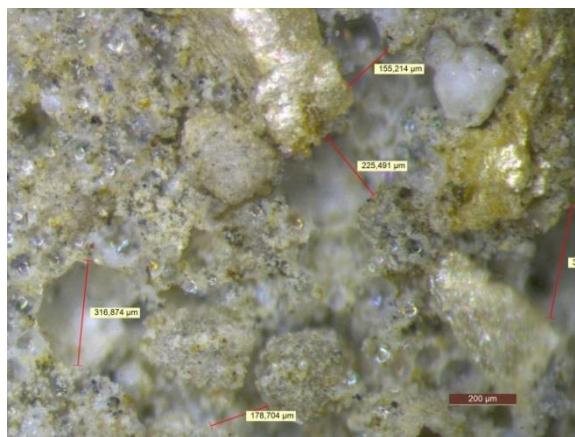


Obrázek 48 REM směsi X24 (50 ×)

Na obrázcích z optického mikroskopu můžeme pozorovat drobné průhledné kuličky, to jsou právě rozmísené mikrosféry do tmele. V případě, kdy byl použit pouze tmel, Liaver a mikrosféry je struktura vzorku výrazně kompaktnější a i póry vytvoření napěňovacími aditivami jsou menší, okolo 100 µm. Na obr. 50 lze pozorovat hrubší strukturu, póry jsou větší cca 150 - 300 µm. Je také vidět hezky ukotvené zrno vermikulitu. Pro porovnání, na obr. 48, jsou vidět póry a mikrosféry při zvětšení 50 × v elektronovém mikroskopu, na obr. 50 jsou mikrosféry viditelné při stejném zvětšení, jako průhledné bublinky. Lze tedy tvrdit, že i při malé dávce je vzorek mikrosférami zcela prosycen. Na fotografiích (obr. 51 a 52) je vidět kompaktní struktura vzorků s drobnými, rovnoměrně rozmístěnými póry. U receptury X24 lom probíhá zrovna shlukem cenosfér. Tyto shluky se vyskytovaly volně na náhodných místech vzorku, a také na jeho povrchu.



Obrázek 49 OM směsi Q17 (50 ×)



Obrázek 50 OM směsi X24 (50 ×)



Obrázek 51 Foto směsi Q17



Obrázek 52 Foto směsi X24

14.5.1 Shrnutí analýz receptur obsahujících mikrosféry

Vzorky obsahující mikrosféry byly pro potřeby mikrostrukturální analýzy odděleny od předchozí kapitoly, vzorků obsahujících pěnотvorné látky, jejich podstata je však stejná.

Drobné rozdíly v analýzách RTG a DTA jsou způsobeny především použitím jiných plniv, a to popílku, vermikulitu a především mikrosfér. Opět byl prokázán kalcit, vaterit, portlandit a křemen. Do vzorku obsahujícího vermikulit byl zavlečen zeolit, který byl prokázán i mikroskopicky. Dále byly v elektronovém mikroskopu, dle předpokladu, pozorovatelné mikrosféry ve formě kuliček, jejichž vnitřní povrch je dokonale hladký a vnější povrch je pokryt vrstvou tmele (opět je možné pozorovat zplstěnou strukturu krystalů). Pokud byly mikrosféry pozorovány ve shluku, bez

přítomnosti tmele, byl jejich vnější povrch také hladký. V optickém mikroskopu byly mikrosféry pozorovány jako drobné číré kuličky připomínající bublinky.

Přídavek popílku a mikrosfér způsobil jemnější strukturu vzorků, kde póry vytvořené napěňovacími aditivami jsou menší, pouze okolo 100 μm . Ve vzorcích, kde byl přidán vermikulit, byla pozorována hrubší struktura a také vytvořené póry jsou větší, o velikosti cca 50 – 300 μm .

15. Finální zhodnocení procesu vylehčení stavebních hmot

15.1 Celková diskuze dosažených výsledků

Tato disertační práce byla věnována výzkumu a vývoji nových lehčených potěrů pro podlahy. Jedním z hlavních cílů bylo prozkoumat a popsat proces vylehčení stavebních hmot. Tento cíl byl splněn a všechny zkoumané metody vedly více či méně úspěšně na vylehčení a na tvorbu pórového systému. v rámci laboratorních zkoušek se podařilo vyrobit úspěšně jak neautoklávovaný pórobeton s hliníkovým práškem, který se vyrábí průmyslově a autoklávuje se, tak i pěnobetony se sypkými pěnidly. Součástí práce byly také zkoušky na vzorcích vzniklých pomocí nakypřovací reakce peroxidu vodíku s chlorovým vápnem. Tato metoda se v praxi nevyužívá a literatura ji pouze zmiňuje, bylo nutné při návrhu receptur, a především dávky chlorového vápna a peroxidu vodíku, postupovat experimentálně.

Nejprve byly vybrány, v teoretické části práce, složky pro návrh receptur, a to především lehčená plniva, plniva z druhotných i přírodních surovin. Dále pak bylo pomocí teoretického modelu určeno optimální množství cementu a k němu ideální dávka popílku. Při samotné tvorbě vzorků v laboratoři bylo posupováno ze základních receptur vytvořených na základě výpočtů optimálního množství cementu, popílku a na stanovení křivky zrnitosti. Potom již bylo postupováno experimentálně a dávky jednotlivých složek byly upravovány podle požadované konzistence a vlivu jednotlivých složek na vlastnosti čerstvé směsi, její zpracovatelnost a rozmíchatelnost.

V první etapě byly vybrány vhodné způsoby vylehčení potěrového materiálu pro podlahy s obsahem druhotných surovin. Nejprve byla, na základě předešlého teoretického studia, vybrána vhodná plniva a pojiva pro vývoj lehčené podlahoviny. Byla vybrána jak přírodní a průmyslově vyráběná lehčená kameniva, tak i druhotné suroviny používané přímo a kameniva vyrobená z druhotných surovin různými průmyslovými procesy.

Následně byly odzkoušeny fyzikálně-mechanické vlastnosti komerčně vyráběných potěrů pro podlahy. Jednalo se o potěry tříd CT-C12-F3, CT-C20-F4, CT-C30-F5 a CT-C35-F5.

Dále byly vybrány ze známých a dostupných způsobů vnesení mikropórů do matrice cementového tmele ty nejvhodnější. Byly navrženy základní receptury, na

kterých byla ověřena vhodnost jednotlivých plniv a jejich kombinací pro použití v dalších návrzích receptur. Stejným způsobem byly ověřeny i možnosti napěnění a nakypření směsi.

Na vzorcích byly provedeny základní zkoušky – stanovení objemové hmotnosti, pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu. Z vyhodnocení praktických zkoušek v této etapě byly vybrány suroviny a postupy pro další návrhy receptur potěrových hmot pro podlahy.

Následně byl zkoumán vliv lehčených plniv na výsledné vlastnosti potěrové hmoty. Cílem bylo zjištění vhodného zastoupení původního plniva plnivem lehčeným. Byl zkoumán vliv 5%, 10%, 15% a 20% náhrady původního plniva plnivem lehčeným. Náhrada plniva probíhala objemově.

Bylo zjištěno, že expandovaný perlit je možné využít jen do 10% náhrady přírodního plniva. Přídavek expandovaného perlitu má celkově negativní vliv na vlastnosti hmoty, jelikož se snižuje koeficient konstruktivnosti, tedy poměr mezi objemovou hmotností a pevností v tlaku. Expandovaný perlit se ve směsi chová podobně jako expandovaný perlit a nelze ho tedy doporučit jako lehčené plnivo první volby pro hmoty, kde hraje roli nejen nízká objemová hmotnost, ale i pevnost v tlaku. Mikrosféry Q-CEL-7014 zlepšují zpracovatelnost hmoty a zároveň snižují množství potřebné záměsové vody, kvůli jejich vysoké ceně je možné je dávkovat jen do 5 % náhrady plniva. Tyto mikrosféry mají také tendenci se shlukovat a dají se špatně rozmíchat ve směsi. Mikrosféry W 300 mají podobný vliv jako mikrosféry Q-CEL-7014, dají se ale lépe rozmíchat ve směsi a tvorba shluků je v jejich případě minimální.

V druhé etapě byly, na základě výsledků předchozí etapy, navrženy receptury pro lehčené potěrové hmoty pro podlahy. Vývoj receptur byl směřován především k tomu, aby mohly být průmyslově vyráběny do pytlů nebo sil kompletně, bez další potřeby přídavku tekutých aditiv či pěny vyráběné na staveništi.

Nejprve byly navrženy tři typy receptur. První skupinou byly receptury na bázi pěnobetonu za přídavku práškových pěnidel. Dalším typem byly receptury na bázi plynobetonu – neautoklávovaného pórobetonu, vyrobeného standardními postupy pro pórobeton – pomocí nakypřovacích reakcí (hliníkový prášek, chlorové vápno + peroxid vodíku). Posledním typem receptur v této části etapy byly receptury obsahující nejrůznější druhy lehčeného a lehkého plniva, a to jednak plniva z přírodních surovin (Perlit, Liapor, Vermikulit) a dále pak plniv vyrobených

z druhotných surovin (Liaver, Poraver, Refaglass, Geocell, mikrosféry a cenosféry). Následně bylo navrženo několik receptur, které kombinovaly jednotlivé typy vylehčení: lehké kamenivo + nakypřovací reakce, lehké kamenivo + přísada pro napětění. Na vzorcích vyrobených z těchto receptur byly stanoveny fyzikálně-mechanické vlastnosti.

Vzorky s náhradou plniva lehčeným plnivem v množství 10 % s práškovým pěnidlem byly vylehčeny asi o 10 %. V tomto případě vylehčení zhruba odpovídalo úbytku objemové hmotnosti. Vzorky, kde bylo přírodní plnivo nahrazeno zcela, a nebyla použita krystalizační přísada, měly sice objemovou hmotnost řádově okolo 500 kg.m^{-3} , ale pevnost v tahu byla neměřitelná a pevnost v tlaku nedosahovala ani jednotek N.mm^{-2} . Receptury s takéž úplnou náhradou přírodního plniva plnivem Liaver s přidanou krystalizační přísadou již vykazovaly pevnost v tlaku okolo 2 N.mm^{-2} , a tedy v souladu s požadavky na vylehčený potěr. Bylo možné vypořádat pozitivní vliv krystalizační přísady v součinnosti s pěnidlem na bázi olefinosulfonátu s dlouhým řetězcem. Naproti tomu pěnidlo na bázi polymerizačního produktu z propylenoxidu a ethylenoxidu společně s krystalizační přísadou způsobilo výrazný úbytek pevnosti v tlaku.

Vzorky připravené pomocí reakce hliníkového prášku s vápenným hydrátem měly vyrovnanou hladinu hodnot objemové hmotnosti $1200 - 1600 \text{ kg.m}^{-3}$. Zde vystupují jako nejlepší vzorky s užitou dávkou 0,8 a 0,9 g hliníkového prášku, při kterých byly hodnoty pevnosti v tlaku nad průměrem a hodnoty pevnosti v tahu za ohybu byly téměř dvojnásobné, oproti vzorkům s jinými dávkami hliníkového prášku.

Vzorky plynobetonu na bázi reakce chlorového vápna a peroxidu vodíku byly vyrobeny experimentální postupem. Výslednou kvalitu materiálu ve většině případů ovlivnil zvýšený vývin tepla. Jako klíčové pro pevnosti v tlaku i v tahu za ohybu se ukázalo, přesně podle předpokladu, množství cementu. Zatímco se zvýšenou dávkou chlorového vápna, dochází vlivem nedokonalého proběhnutí reakce chlorového vápna s peroxidem vodíku k tvorbě shluků vápenatých produktů, které celkově oslabují strukturu materiálu. Je nutné také poznamenat, že vzorky reagovaly v čase se vzdušnou vlhkostí a postupně silně degradovaly.

Protože jedním z cílů disertační práce bylo navrhnout potěr, který bude možné skladovat v pytlech a silech bez nutnosti přidavku dalších látek, kromě vody, přímo na stavbě, byly také provedeny testy dlouhodobé stability směsí. Pro tyto testy bylo vybráno celkem 6 receptur, které měly být reprezentativním vzorkem užitých

kombinací surovin. Z výsledků je patrné, že dochází k poklesu výsledných pevností v tlaku u směsí po dlouhodobém odležení u všech vzorků. Tento jev je možné vysvětlit částečnou napěňovací, naplynovací reakcí nebo degradací směsí a materiálů jich obsažených za přítomnosti vzdušné vlhkosti při jejich tvorbě a následném uložení. Naopak u pevností v tahu za ohybu došlo k jejich zvýšení. Na hodnotách objemové hmotnosti se dlouhodobé uložení nijak výrazně neprojevovalo. U některých vzorků došlo k jejímu zvýšení a u jiných ke snížení. Tyto změny nebyly nijak výrazné.

Třetí etapa byla zaměřena na studium mikrostruktury vybraných receptur. Pro tyto zkoušky byly vybrány receptury z předchozí etapy, které byly vyhodnoceny jako nejlepší, případně nejzajímavější. Vzorky pro zkoumání mikrostruktury byly uloženy v laboratorním prostředí po dobu cca 2 let. Na těchto vzorcích bylo možné pozorovat případné změny vzniklé stárnutím, dozráváním a působením vzdušné vlhkosti. Vzorky byly podrobeny podrobné analýze pro prozkoumání jejich vnitřní struktury – byla na nich provedena diferenční termická analýza, rentgenová difrakční analýza, optická a elektronová rastrovací mikroskopie. Výsledky zkoušek na jednotlivých recepturách byly porovnány s důrazem zejména na změny v mikrostruktuře, změny v pórovitosti, změny ve vazbách mezi minerály, navázání matrice na pórový systém a změny ve struktuře minerálů v závislosti na druhu vylehčení. U zkoumaných vzorků byly na snímcích ze skenovacího elektronového mikroskopu prokázány minerály a fáze, které byly nalezeny pomocí RTG a DTA analýz. Pórový systém byl zkoumán pomocí optické mikroskopie, kde byla zjištěna velikost pórů v matrici a jejich rozmístění. Dále byl také zjištěn trend ve velikosti pórů u jednotlivých metod a také rozdíly při použití různého množství pěnotvorné látky či plniva.

Tabulka 40 Celková pozorovaná velikost pórů

Materiál/vzorek	Velikost pórů	Mezerovitost	Poznámka
Al - prášek	100 - 200 μm	ne	při vyšší dávce Al - prášku ojedinele póry až 400 μm
Chlorové vápno	150 - 350 μm 2 - 4 mm	ne	pórový systém silně degradoval v čase
Pěnotvorná látka	200 - 400 μm	ano 100 - 400 μm	nejrovnoměrněji rozmístěné póry
Mikrosféry + pěnotvorná látka	100 μm	ne	s vermikulitem velikost pórů 150 - 300 μm

Póry ve vzorcích pórobetonu s obsahem hliníkového prášku 0,2 a 1,2 g měly průměr cca 100 – 200 μm . Tyto vzorky měly kompaktní strukturu bez velkých pórů či kaveren. Vzorky plynobetonu nakypřeného pomocí reakce chlorového vápna

s peroxidem vodíku měly hrubou strukturu s póry o velikosti 2 – 4 mm. Ve vzorcích se také vyskytovaly póry o velikosti 150 - 350 μm . Sypká pěnidla tvořila ve struktuře vzorků póry 200 - 400 μm velké, tj. také výrazně větší než póry tvořené hliníkovým práškem. Ve vzorcích s přidanými mikrosférami se tvořily také póry o velikosti 100 μm . V tabulce 40 jsou stručně shrnuty poznatky získané o pórovém systému. Jsou zde uvedeny velikosti vytvořených pórů v závislosti na použité metodě, zvláštnosti v pórové struktuře, a jestli se ve vzorku vyskytla mezerovitost.

Vzorky obsahující hliníkový prášek v dávce 0,2 g vykazovaly oproti vzorkům s obsahem 1,2 g hliníkového prášku výrazně větší množství portlanditu na úkor kalcitu. Tento jev byl potvrzen DTA analýzou a také se ukazuje na snímcích z elektronového mikroskopu, kde je vidět, že vzorky s obsahem 0,2 g hliníkového prášku jsou prosyceny zrny portlanditu, zatímco snímky vzorku s obsahem 1,2 g hliníkového prášku ukazují jen občasné zrno portlanditu.

15.2 Přínos pro vědní obor a praxi

Přínos disertační práce pro vědu a praxi je jak na poli teoretickém, tak i praktickém.

Disertační práce byla řešena ve spolupráci s firmou STOMIX, spol. s r.o. v rámci řešení projektu FR-TI3/742 - Systém lehčených hmot pro dokončování staveb s druhotnými surovinami. Praktické dopady jsou tedy spojeny především a aktivitami této společnosti a její mateřské společnosti Sto, s.r.o., které uvádí výsledky vývoje provedeného v rámci disertační práce do praxe a postupně i na trh. Jako jeden z výstupů prací na této disertační práci byl funkční vzorek BETAFORM LT1 – lehčený samonivelační potěr využívající popílek. Disertační práce měla také pedagogický a vzdělávací dopad, protože ve spolupráci na projektu bylo řešeno i několik diplomových a bakalářských prací. V rámci prací na disertační práci bylo také publikováno na 40 článků a příspěvků na konferencích.

Byla popsána historie výroby pórobetonu. Poznatky z praxe, i především zahraničního výzkumu byly v teoretické části shrnuty a byly vyvozeny důsledky pro samotný vývoj lehčených podlah z neautoklávovaných pórobetonů.

Závěry, které byly v rámci praktického výzkumu vyvozeny, jsou popsány v kapitole 15.1 Celková diskuze dosažených výsledků.

Zde je na místě zdůraznit bližší prozkoumání praktického použití reakce chlorového vápna s peroxidem vodíku pro nakypření silikátových stavebních hmot.

Přestože tuto metodu není možné pro výrobu lehčených potěrů doporučit, protože výsledky jsou velice proměnlivé a vlastnosti výsledného produktu nestabilní, bylo vylehčení úspěšné, póry byly do matrice vneseny a předpoklad vylehčení byl naplněn. Zhotovování směsi bylo složité, reakce probíhala velmi rychle a bouřlivě a nebylo možné ji kontrolovat. Dalším negativním faktorem byla snížená bezpečnost práce, a to zejména díky uvolňování zápachu. Tento zápach byl způsobován uvolňováním plynného chloru a při použití v konstrukci tak, jak byl potěr experimentálně navržen, by docházelo k uvolňování iontů chloru do prostředí. Je nutné zmínit, že tento druh vylehčení není v literatuře, a to zejména v zahraničních zdrojích, podrobně popsán a prakticky se nezkoumal. Přínosem disertační práce tedy je prozkoumání průběhu a mechanismu reakce a následného sledování vzorku při jeho zrání a stárnutí. Učiněné závěry mohou být v budoucnosti použity, jako podklad či informace pro další výzkum.

Dále bylo potvrzeno, že hliníkový prášek v reakci s vápenným hydrátem je možné používat pro nakypření směsi i za studena. Zde ovšem musí být dodržena teplota všech surovin minimálně 25 °C. To by bylo ve stavební praxi těžko dosažitelné. Také při uložení směsi v pytlech jsou výsledky nekoherentní. Směs degraduje už při tříměsíčním uložení. To je způsobeno především tím, že vápenný hydrát, ještě více jak cement, degraduje a reaguje se zbytkovou vzdušnou vlhkostí a rychle se snižuje jeho reaktivita. Přitom reaktivita vápna je pro reakci s hliníkovým práškem klíčová. Problematické může být i rozmísení odmaštěného hliníkového prášku ve směsi, a to jak z pohledu bezpečnosti práce, tak i z pohledu degradace vlastností hliníkového prášku – může začít oxidovat. Hlavním zjištěným nedostatkem této metody je tedy neopakovatelnost výsledků při dodržení stejných podmínek, problematické zajištění vhodných podmínek pro vývoj reakce na stavbě a proměnlivá kvalita a vlastnosti vstupních surovin, především v závislosti na čase.

Jako nejstabilnější se ukázaly vzorky kombinující lehké kamenivo s přísadou, která tvořila v matrici materiálu póry, s práškovým pěnidlem. Zde se ukázala, jako vhodné aditivum, krystalizační přísada, která vylepšovala výrazně vlastnosti vzorků. Bohužel, při použití krystalizační přísady již není zachován požadavek na přidání pouze vody na stavbě, jelikož přidávaná krystalizační přísada byla tekutá, a bylo by nutné ji přidávat do záměsové vody.

Bylo prokázáno, že pro praxi zůstává nejlepším způsobem tvorby lehčených stavebních hmot, v tomto případě podlahových potěrů in situ pro použití za čerstva,

kombinace lehkého kameniva s vylehčujícími či provzdušňujícími přísadami. Nabízí se také vhodné využití dalších, buď práškových, nebo tekutých aditiv s krystalizační funkcí.

Dalším přínosem disertační práce je prozkoumání pórového systému tvořeného jednotlivými metodami vnesení pórů. Byla popsána velikost těchto pórů v závislosti na užitá plniva.

Bylo zjištěno, že pórový systém je ovlivněn metodou použitou pro vnesení pórů do matrice a také dávkováním pěnotvorných či pórotvorných činidel.

Bylo ověřeno, že reakce hliníkového prášku tvoří jemné póry o velikosti 100 – 200 μm . při použití větší dávky hliníkového prášku se tvoří ojedinělé větší póry až 400 μm , při této dávce mají póry tendenci se shlukovat.

Bylo prokázáno, že je vhodnější použití co nejmenšího množství hliníkového prášku při dosažení požadované objemové hmotnosti nejen kvůli úspoře hliníkového prášku, ale také z důvodu lepšího tvaru a rozmístění pórů.

Bylo potvrzeno, že ještě jemnější pórový systém, než při použití hliníkového prášku lze vytvořit pomocí pěnotvorné látky, je možné vytvořit pomocí pěnotvorné látky v případě, že jsou použity společně s mikrosférami a bez použití tvarově nevhodného plniva (vermikulit). Pak jsou vytvořené póry velké 100 μm .

Použití pěnotvorné látky vykazuje nejrovnoměrnější rozmístění pórů v matrici, kde póry, bez vlivu mikroplniv v podobě mikrosfér, mají velikost 200 – 400 μm .

V práci byly ověřeny a doplněny závěry jiných autorů.

16. Závěr

Vylehčení horizontálních konstrukcí staveb je doprovázeno nejen snížením objemové hmotnosti samotné konstrukce, ale zároveň dochází ke zlepšení tepelně-izolačních a akusticko-izolačních vlastností konstrukce. Momentálně jsou na trhu dostupná lehčená plniva vyráběná expanzí z přírodních materiálů a plniva průmyslově vyráběná z druhotných surovin. v této práci budou použita i plniva odpadní.

Právě využití druhotných surovin je nutným trendem pro zachování udržitelného stavebnictví. Jednou z hlavních myšlenek této disertační práce je vyvinout takový lehčený potěr pro podlahy, který bude kombinovat nejen výborné fyzikálně-mechanické vlastnosti, vysokou odolnost a nízkou cenu, ale který také výrazně přispěje k odlehčení zátěže životního prostředí využitím nejrůznějších odpadů, které pak nebude nutné deponovat či spalovat.

Ve třech etapách této disertační práce byl vyvinut lehčený potěr pro podlahy v průmyslové i občanské zástavbě a byly prověřeny jeho fyzikálně-mechanické vlastnosti. Etapy na sebe navazovaly tak, aby výsledky předchozí etapy byly vždy využity v etapě následující.

Disertační práce byla rozdělena na dvě hlavní části – teoretickou a experimentální. V teoretické části byla nejprve popsána historie lehčených betonů a potěrů. Následně byly popsány podlahové systémy a byly popsány základní pojmy.

V experimentální části disertační práce byly navrženy komponenty pro návrh složení nově vyvíjené potěrové hmoty, následně byly otestovány fyzikálně-mechanické vlastnosti potěrů a lehčených potěrů volně přístupných na trhu. Také byla vybrána jednotlivá plniva a byl stanoven jejich vliv na vlastnosti potěrové hmoty. Jednalo se o zkoumání vlivu expandovaného perlitu, expandovaného vermikulitu, mikrosfér Q-CEL-7014 a Omega SPHERES W300 na výsledné fyzikálně-mechanické vlastnosti potěrové hmoty. Následně byly navrženy receptury potěrových hmot s použitím hliníkového prášku, s využitím reakce chlorového vápna s peroxidem vodíku a s pěnotvornými látkami.

Třetí etapa byla věnována podrobnému studiu mikrostruktury vybraných vzorků. Mikrostruktura byla zkoumána pomocí optického a skenovacího rastrového mikroskopu a dále pomocí rentgenové difrakční analýzy a diferenční termické analýzy.

Vzorky pro zkoumání mikrostruktury byly uloženy v laboratorním prostředí po dobu cca 2 let. Na těchto vzorcích bylo možné pozorovat případné změny vzniklé stárnutím, dozráváním a působením vzdušné vlhkosti.

Ve vzorcích s obsahem hliníkového prášku 0,2 a 1,2 g měly póry průměr cca 100 – 200 μm . Při snížení dávky hliníkového prášku došlo ke zvýšení obsahu portlanditu na úkor kalcitu. Vizuálně byl, na snímcích z elektronového mikroskopu, prokázán ettringit. Při použití většího množství hliníkového prášku byla vytvořená pórová struktura viditelně rozsáhlejší a póry měly rozmanitější velikost a měly tendenci se shlukovat. Tento jev nebyl při dávce 0,2 g hliníkového prášku pozorován.

Analýzy vzorku s použitím chlorového vápna ukázaly na přítomnost většího množství kalcitu, dále byl přítomen albit a cristobalit. Přestože vzorky obsahovaly větší množství kalcitu, další formy uhličitanu vápenatého – vaterit a aragonit, přítomny nebyly. Póry vytvořené reakcí chlorového vápna s peroxidem vodíku měly velikost 150 – 350 μm . pórový systém však v čase silně degradoval, došlo k destrukci přepážek mezi póry, až k vytvoření pórů o velikosti 2 – 4 mm. Tento proces nebyl v době provádění analýz dokončen a v průběhu dalšího uložení by došlo ke zvětšování pórů a následné totální destrukci celého vzorku.

Pro použití v praxi se jeví nejlépe receptury obsahující pěnотvornou látku a plnivo (kamenivo 0 – 4 mm nebo lehké plnivo Liaver 0 – 4 mm). Analýzami byl prokázán ve vzorcích vaterit, cristobalit, portlandit a křemen. Dále byl pozorován cementový tmel s typickou strukturou zplstěných krystalů, drobné jehličky vateritu vyrůstající ze zrn kalcitu a tmele a malé množství ettringitu. Velikost pórů vytvořených pomocí práškového pěnidla se pohybovala v rozmezí 200 – 400 μm . Tam, kde byl použit Liaver měly vzorky mezerovitou strukturu, pozorovatelnou v optickém mikroskopu, mezery mezi zrny byla 100 – 400 μm . je také vidět, že přidání práškového pěnidla přispělo k perfektnímu obalení zrn tmelem.

Přídavek popílku a mikrosfér způsobil jemnější strukturu vzorků, s velikostí pórů pouze okolo 100 μm . Ve vzorcích, kde byl přidán vermikulit, byla pozorována hrubší struktura a vytvořené póry mají velikost cca 50 – 300 μm . Analýzami byl prokázán kalcit, vaterit, portlandit a křemen. Vzorek obsahující vermikulit obsahoval zeolit, který byl prokázán i mikroskopicky. Mikrosféry měly vnitřní povrch dokonale hladký a vnější povrch pokryt vrstvou tmele. Ve shluku, bez přítomnosti tmele, byl vnější povrch mikrosfér hladký.

Výsledky této disertační práce budou mít v praxi dopad zejména ve sféře průmyslu a ochrany životního prostředí, kdy využití odpadů a druhotných surovin sníží množství odpadů, které je nutno zpracovat a zároveň bude na trh přiveden zcela nový výrobek pro podlahy s unikátním systémem samonakypření a samonapěnění v pytlované směsi bez nutnosti mechanizace pro výrobu pěny či přidání tekutých aditiv.

Byla vyvinuta hmota, která se již využívá v praxi a je vyráběna a prodávána na trhu jako součást systému lehčených stavebních hmot pro dokončovací práce.

Zdroje

Použitá literatura

- [1] SVOBODA, P., DOLEŽAL, J., *Průmyslové podlahy v objektech pozemních staveb*, Bratislava JAGA GROUP 2007, ISBN 978-80-8073-054-0
- [2] Expanded Shale Clay and Slate Institute (ESCSI) *Lightweight Concrete - History, Applications, Economics*. Salt Lake City, Utah, USA 44p. 1971
- [3] SARYAS QADIR SABIR. *Light weight concrete*. Composites [online]. 1978, roč. 9, č. 4, s. 288. ISSN 00104361. Dostupné z: doi:10.1016/0010-4361(78)90238-0
- [4] Anon, (2016). [online] Available at: <http://keu92.org/uploads/Search%20engineering/Light%20weight%20concrete.pdf> [Accessed 20 Jun. 2016].
- [5] MISHRA, G. (2010). ALL ABOUT LIGHT WEIGHT CONCRETE. [online] The Constructor. Available at: <http://theconstructor.org/concrete/all-about-light-weight-concrete/1670/> [Accessed 20 Jun. 2016].
- [6] Wikipedia. (2016). Autoclaved aerated concrete. [online] Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Autoclaved_aerated_concrete [Accessed 20 Jun. 2016].
- [7] POPONKOVÁ, M.: prezentace „Technologie staveb“ katedry Technologie staveb ČVUT, dostupné z <http://technologie.fsv.cvut.cz>
- [8] SVOBODA, L. a kol. *Stavební hmoty*. Nakladatelství JAGA GROUP, s. r. o.; 2004, 471 stran, ISBN 978-80-8076-057-1
- [9] JAMBOR, J. *Chemické rozborý v stavebníctve* [online]. B.m.: Vydavateľstvo Slovenskej Akadémie Vied, 1953. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=LAXLAAAAMAAJ>
- [10] TŮMA, P.: „Podlahové potěry a časté příčiny jejich poruch“, článek z 28. 12. 2009, dostupný z <http://www.imaterialy.cz>
- [11] RŮŽIČKA, M.: „Podlahová konstrukce v dřevostavbě jako akumulární vrstva“, článek z 08. 04. 2011, dostupný z <http://www.imaterialy.cz>
- [12] HELA, R.: *„Technologie betonu II“*, Brno 2007
- [13] PÍCHA, F.: *„Expandované stavební hmoty“*, Sborník geologických věd, 1961
- [14] VACHUŠKA, V.: *„EPD pro umělé kamenivo Rugen RU“*, 1. Odborný seminář Environmentální prohlášení o produktu se zaměřením na oblast stavebnictví, Praha 20. 01, 2010

- [15] Technický list kamenivo Rugen RU dostupný z www.ekostat.cz
- [16] MATULOVÁ P., MELICHAR T., PŘIKRYL J.: „Substituce pojiva v cementových kompozitech jemně mletou recyklovanou sklovinou s ohledem na životní prostředí“, Časopis Beton TKS 3/2009
- [17] MATOUŠEK, M.: „Lehké stavební látky II“, Praha: SNTL, 1985, 3. opr. vyd.
- [18] DROCHYTKA, R., MATULOVÁ, P., Lehké stavební látky, Studijní opory pro studijní program stavební inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Brno, 2006
- [19] HELA, R.: „Technologie betonu I“, Brno 2005
- [20] FRIDRICHOOVÁ, M.: přednášky předmětu „Maltoviny I“, akademický rok 2009
- [21] ROVNANÍKOVÁ, P.: „Stavební chemie, modul 2, Anorganická chemie a chemie stavebních materiálů“, Brno, Akademické nakladatelství CERM, 2005, Vyd.1., ISBN 80-7204-409-5
- [22] NEVŘIVOVÁ, L.: „Cenosféry, nová možnost lehčení žárovzdorných materiálů“, příspěvek s podporou vědeckovýzkumného záměru VVZ MSM 261100008
- [23] BODNÁROVÁ, L.: „Kompozitní materiály ve stavebnictví“, Brno, Akademické nakladatelství CERM, 2002, 122s., ISBN 80-214-2266-1
- [24] BRIATKA, P., MAKÝŠ P.: „Možno účinne použiť pórovité kamenivo na vnútorné ošetrovanie betónu?“ Beton TKS, číslo 4/2011, BETON TKS, S. R. O., ISSN 1213311b
- [25] BYDŽOVSKÝ, J.: Přednášky předmětu „Vybrané statě z technologie stavebních hmot“, akademický rok 2010
- [26] Heidelberg Cement: „Příručka technologa: Beton: Suroviny – výroba – vlastnosti“, Druhé aktualizované vydání 2005, dostupné na „www.heidelbergcement.cz“
- [27] SVOBODA, L.: „Granulometrie částicových plniv pro vytvrditelné kompozity“, článek v časopise Chemagazín, číslo 4, ročník 2010
- [28] BROŽOVSKÝ, J., DROCHYTKA R., BYDŽOVSKÝ, J., DUFKA, A.: „Výzkumná zpráva za rok 2007 v rámci řešení projektu MPO“ v programu TANDEM FT-TA3/148 Výzkum a vývoj diagnostiky povrchů pozemních komunikací s návrhem řešení metodiky údržby a oprav pro správce pozemních komunikací v ČR: Výzkum betonu pro opravy cementobetonových ploch“, 14. 12. 2007

- [29] DROCHYTKA, R., BYDŽOVSKÝ J., ŽIŽKOVÁ N., JURÁNKOVÁ, E., KŘUPALA, J.: „Zkoušky vzájemné interakce zvolených plniv a druhotných surovin“ Výzkumná zpráva č. 06/11 za rok 2011 v rámci řešení projektu FR-TI3/742 Systém lehčených hmot pro dokončování staveb s druhotnými surovinami.
- [30] <http://termosystem.manolodesign.cz/>
- [31] Odborný článek publikovaný ESCSI, dostupný z <http://www.escsi.org/>
- [32] www.grena.cz
- [33] www.perlit.cz
- [34] www.nagara.cz
- [35] www.liaver.com
- [36] www.refaglass.cz
- [37] www.odlucovace-nadrze.cz
- [38] <http://www.nationalslag.org>
- [39] <http://kgs.uky.edu>
- [40] <http://www.omegaminerals.de/>
- [41] <http://www.soa.utexas.edu>
- [42] BAJZA, A.; ROUSEKOVÁ, I. Technológia betónu. Bratislava : JAGA GROUP, s.r.o., 2006. 190 s. ISBN 80-8076-032-2.
- [43] Cementitious materials for concrete : ACI Education Bulletin E3-01. American Concrete Institute. c2001. 25 p.
- [44] COOLEPARDI, M. Moderní beton. Praha : Informační centrum ČKAIT, s.r.o., 2009. 344 p. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [45] ŠMERDA, Z.; et al. Životnost betonových staveb. Praha : Český svaz stavebních inženýrů, 1999. 184 p. ISBN 80-902697-8-8.
- [46] PAVLÍK, A.; DOLEŽEL, J.; FIEDLER, K. Technologie betonu. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1973. 322 p.
- [47] ADÁMEK, J.; NOVOTNÝ, B.; KOUKAL, J. Stavební materiály. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 1997. 205 s. ISBN 80-214-0631-3.
- [48] PAVLÍKOVÁ, M. Chemické složení surovin - Chemie anorganických stavebních pojiv [prezentace]. [cit. 2009-03-05]. Dostupný z WWW: <http://www.rejbob.wz.cz/Chemie/predn8.pdf>.

- [49] BOHÁČ, M. Vývoj cementových směsí pro sklovláknobetonový kompozit : disertační práce. Brno : Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta, 2011. 111 s.
- [50] AÍCTIN, P.C. Vysokohodnotný beton. Praha : Informační centrum ČKAIT, 2005. 320 s. ISBN 80-86769-39-9.
- [51] NOVÁK, J. a kolektiv autorů. Nauka o materiálech 10: Stavební materiály I. Praha : ČVUT, 1997. 178 s. ISBN 80-01-01619-6.
- [52] Portlandské směsné cement a portlandské cementy s vápencem [online]. c2008-2013. Svaz výrobců cementu ČR. Dostupné z WWW: http://www.svcement.cz/includes/dokumenty/pdf/portlandske_smesne_cementy_a_portlandske_cementy_s_vapencem.pdf.
- [53] HELA, R.; KLABLENA, P.; KRÁTKÝ, J.; ŠTĚPÁNEK, P. Betonové průmyslové podlahy. Betonové stavitelství. Betonové stavitelství. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2006. 152 s. ISBN: 80-86769-73- 9.
- [54] ASLAM, Muhammad, Payam SHAFIGH a Mohd Zamin JUMAAT. Oil-palm by-products as lightweight aggregate in concrete mixture – a review. Journal of Cleaner Production [online]. 2016, roč. 126, s. 56–73 [vid. 2016-04-14]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2016.03.100
- [55] BELHADJ, B., M. BEDERINA, N. MONTRELAY, J. HOUESSOU a M. QUÉNEUDEEC. Effect of substitution of wood shavings by barley straws on the physico-mechanical properties of lightweight sand concrete. Construction and Building Materials [online]. 2014, roč. 66, s. 247–258 [vid. 2015-03-07]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.05.090
- [56] DULSANG, Nattakan, Pornnapa KASEMSIRI, Patcharapol POSI, Salim HIZIROGLU a Prinya CHINDAPRASIRT. Characterization of an environment friendly lightweight concrete containing ethyl vinyl acetate waste. Materials & Design [online]. 2016, roč. 96, s. 350–356 [vid. 2016-05-17]. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2016.02.037
- [57] LIMA, Paulo Roberto Lopes, Mônica Batista LEITE a Edieli Quinteiro Ribeiro SANTIAGO. Recycled lightweight concrete made from footwear industry waste and CDW. Waste management (New York, N.Y.) [online]. 2010, roč. 30, č. 6, s. 1107–13 [vid. 2015-03-07]. ISSN 1879-2456. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2010.02.007

- [58] LV, Jing, Tianhua ZHOU, Qiang DU a Hanheng WU. Effects of rubber particles on mechanical properties of lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, roč. 91, s. 145–149 [vid. 2016-03-17]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.05.038
- [59] MAKUL, Natt a Gritsada SUA-IAM. Characteristics and utilization of sugarcane filter cake waste in the production of lightweight foamed concrete. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2016, roč. 126, s. 118–133 [vid. 2016-05-17]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2016.02.111
- [60] SAIKIA, Nabajyoti a Jorge DE BRITO. Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and Building Materials* [online]. 2014, roč. 52, s. 236–244 [vid. 2015-01-19]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049
- [61] PYTLÍK, P., *Vlastnosti a užití stavebních výrobků*, VUTIUM Brno 1998, ISBN 80-214-1123-6
- [62] NARAYANAN, N. & RAMAMURTHY, K., 2000. Structure and properties of aerated concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, 22(5), pp.321–329. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946500000160> [Accessed April 13, 2016].
- [63] NARAYANAN, N a k RAMAMURTHY. Microstructural investigations on aerated concrete. *Cement and Concrete Research* [online]. 2000, roč. 30, č. 3, s. 457–464 [vid. 2016-05-17]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/S0008-8846(00)00199-X
- [64] JIANG, Jun, Zhongyuan LU, Yunhui NIU, Jun LI a Yuping ZHANG. Study on the preparation and properties of high-porosity foamed concretes based on ordinary Portland cement. *Materials & Design* [online]. 2016, roč. 92, s. 949–959 [vid. 2016-03-17]. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2015.12.068
- [65] KRÄMER, Christina, Matthias SCHAUERTE, Torsten L. KOWALD a Reinhard H.F. TRETTIN. Three-phase-foams for foam concrete application. *Materials Characterization* [online]. 2015, roč. 102, s. 173–179 [vid. 2016-05-17]. ISSN 10445803. Dostupné z: doi:10.1016/j.matchar.2015.03.004

- [66] NAMBIAR, E.K. Kunhanandan a K. RAMAMURTHY. Influence of filler type on the properties of foam concrete. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2006, roč. 28, č. 5, s. 475–480 [vid. 2016-05-17]. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2005.12.001
- [67] GÜL, Rüstem, Ersin OKUYUCU, İbrahim TÜRKMEN a Abdulkadir Cüneyt AYDIN. Thermo-mechanical properties of fiber reinforced raw perlite concrete. *Materials Letters* [online]. 2007, roč. 61, č. 29, s. 5145–5149 [vid. 2015-01-23]. ISSN 0167577X. Dostupné z: doi:10.1016/j.matlet.2007.04.050
- [68] LIU, W.V., D.B. APEL a V.S. BINDIGANAVILE. Thermal properties of lightweight dry-mix shotcrete containing expanded perlite aggregate. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2014, roč. 53, s. 44–51 [vid. 2015-03-07]. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2014.06.003
- [69] TÜRKMEN, İbrahim a Abdulhamit KANTARCI. Effects of expanded perlite aggregate and different curing conditions on the physical and mechanical properties of self-compacting concrete. *Building and Environment* [online]. 2007, roč. 42, č. 6, s. 2378–2383 [vid. 2016-05-17]. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/j.buildenv.2006.06.002
- [70] PYTLÍK, P., *Technologie betonu*, VUTIUM Brno 2000, ISBN 80-214-1647-5
- [71] BYDŽOVSKÝ, J., *Vybrané statě z technologie stavebních hmot, Studijní opory pro studijní program stavební inženýrství, Vysoké učení technické v Brně*, Brno, 2008
- [72] JURÁNKOVÁ, Eva. *Vývoj nových cementových vsypových podlah s využitím vybraných druhotných surovin: diplomová práce*. Brno, 2010. 109 s., Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
- [73] KRENÍKOVÁ, V., *Odpadové hospodářství*, Fakulta životního prostředí, UJEP Ústí nad Labem, 2007
- [74] SABINS, F.: „Ultra-Lightweight Cement - Fourth Quarterly Technical Progress Report“, Issued October 23, 2001, DOE Award Number DE-FC26-00NT40919
- [75] STAR, J.; Wicht, B.: „Dauerhaftigkeit von Beton, Schriften der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar“, F.A. Finger-Institut, Heft 100, Weimar 1995

- [76] DOLAR-MANTUANI, L.: "Handbook of Concrete Aggregates: a Petrographic and Technological Evaluation", Noyes Publications, Park Ridge N. J., 345 pp., 1983
- [77] P. MEHTA, Paulo J. M. Monteiro. Concrete: structure, properties, and materials [online]. B.m.: McGraw-Hill Education, 2006. ISBN 9780071462891. Dostupné z: doi:10.1036/0071462899
- [78] The Pore System and Classification of Pores, http://iti.northwestern.edu/cement/monograph/Monograph7_2.html
- [79] FROST, Rudolf a Jan Hus BERNARD. Encyklopedický přehled minerálů. Praha: Academia, 1992. ISBN 80-200-0360-6.
- [80] SVOBODA, Josef. Encyklopedický slovník geologických věd. Praha: Academia, 1983. Dostupné také z: <http://kramerius.mzk.cz/search/handle/uuid:f9658320-c9d6-11e2-a712-005056827e51>
- [81] BROŽOVSKÝ, J. (2002): Vliv agresivního síranového prostředí na odolnost směsných cementů s ocelářskou struskou. – Informace OP Českého svazu stavebních inženýrů. 1, p. 1-4, ISSN 1213-4112, Ostrava.
- [82] GREGEROVÁ, M. (1996): Petrografie technických hmot. – Masarykova univerzita. Brno.
- [83] CHRYSCHOOU, M. - DERMATOS, D. (2005): Evaluation of ettringite and hydrocalumite formation for heavy metal immobilization: Literature review and experimental study. Stevens institute of technology, Castle point on Hudson, USA.
- [84] Skalny, J. - Marchand, J. - Odler, I. (2002): Sulfate Attack on Concrete. – Spon Press. London.
- [85] BARNES, Paul, Xavier TURRILLAS, Andrew C JUPE, Sally L COLSTON, David O'CONNOR, Robert J CERNIK, Paul LIVESEY, Christopher HALL, David BATES a Reginald DENNIS. Applied crystallography solutions to problems in industrial solid-state chemistry. Case examples with ceramics, cements and zeolites. Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions [online]. 1996, roč. 92, č. 12, s. 2187–2196. ISSN 0956-5000. Dostupné z: doi:10.1039/FT9969202187
- [86] FALINI, Giuseppe, Silvia MANARA, Simona FERMANI, Norberto ROVERI, Marco GOISIS, Giuseppe MANGANELLI a Luigi CASSAR. Polymeric admixtures effects on calcium carbonate crystallization: relevance to cement

- industries and biomineralization. CrystEngComm [online]. 2007, roč. 9, č. 12, s. 1162–1170. Dostupné z: doi:10.1039/B707492A
- [87] GRIFFIN, J L W, P v COVENEY, a WHITING a R DAVEY. {D}esign and synthesis of macrocyclic ligands for specific interaction with crystalline ettringite and demonstration of a viable mechanism for the setting of cement. Journal of the Chemical Society-perkin Transactions 2 [online]. 1999, č. 10, s. 1973–1981. ISSN 03009580. Dostupné z: doi:10.1039/a902760b
- [88] HALL, Christopher, Paul BARNES, Andrew D BILLIMORE, Andrew C JUPE a Xavier TURRILLAS. Thermal decomposition of ettringite $\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$. Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions [online]. 1996, roč. 92, č. 12, s. 2125–2129. ISSN 0956-5000. Dostupné z: doi:10.1039/FT9969202125
- [89] MELLER, Nicola, Christopher HALL, Andrew C JUPE, Sally L COLSTON, Simon D M JACQUES, Paul BARNES a Jonathan PHIPPS. The paste hydration of brownmillerite with and without gypsum: a time resolved synchrotron diffraction study at 30, 70, 100 and 150 [degree]C. Journal of Materials Chemistry [online]. 2004, roč. 14, č. 3, s. 428–435. ISSN 0959-9428. Dostupné z: doi:10.1039/B313215C
- [90] PAGE, D E F. Delayed Ettringite Formation in Concrete. 2015, s. 1–2.
- [91] POKROY, Boaz a Emil ZOLOTAYABKO. Aragonite growth on single-crystal substrates displaying a threefold axis. Chemical Communications [online]. 2005, č. 16, s. 2140–2142. ISSN 1359-7345. Dostupné z: doi:10.1039/B500584A
- [92] RADEMAKER, Hanna a Malte LAUNSPACH. Detection of interaction between biomineralising proteins and calcium carbonate microcrystals. Beilstein Journal of Nanotechnology [online]. 2011, roč. 2, č. 1, s. 222–227. ISSN 21904286. Dostupné z: doi:10.3762/bjnano.2.26
- [93] ZHONG, Lihua, Jun QU, Xuwei LI, Xiaoman HE a Qiwu ZHANG. Simultaneous synthesis of ettringite and absorbate incorporation by aqueous agitation of a mechanochemically prepared precursor. RSC Adv. [online]. 2016, roč. 6, č. 42, s. 35203–35209. ISSN 2046-2069. Dostupné z: doi:10.1039/C6RA01253A
- [94] ZHU, Wenjie, Jiaping LIN, Chunhua CAI a Yingqing LU. Biomimetic mineralization of calcium carbonate mediated by a polypeptide-based

copolymer. Journal of Materials Chemistry B [online]. 2013, roč. 1, s. 841. ISSN 2050-750X. Dostupné z: doi:10.1039/c2tb00182a

- [95] ABERLE, T., A. KELLER a R. ZURBRIGGEN. Efflorescence Mechanisms of Formation and Ways to Prevent. 2o Congresso Nacional de Argamassas de Construção - Sob a Égide da Reabilitação. 2007. Dostupné z: https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjXmftT166XRAhVLUrQKHXLiCm0QFggeMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.apfac.pt%2Fcongresso2007%2Fcomunicacoes%2FPaper%252001_07.pdf&usq=AFQjCNEw40cU-noR31TNgtaruVR7kiQLcw&sig2=eUZ5_J9JBE3qT8BDvshupg&cad=rja

Použité a citované normy

ČSN 74 4505 „Podlahy – společná ustanovení“.

ČSN EN 13318 „Potěrové materiály a podlahové potěry – Definice“

ČSN EN 13813 „Potěrové materiály a podlahové potěry – Potěrové materiály – Vlastnosti a požadavky“

ČSN EN 13892-1 „Zkušební metody potěrových materiálů - Část 1: Odběr vzorků, zhotovení a ošetřování zkušebních těles“

ČSN EN 13892-2 „Zkušební metody potěrových materiálů - Část 2: Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku“

ČSN EN 13892-3 Zkušební metody potěrových materiálů - Část 3: Stanovení odolnosti proti obrušování metodou Böhme

ČSN EN 13892-6 „Zkušební metody potěrových materiálů - Část 6: Stanovení tvrdosti povrchu“

ČSN EN 13892-7 „Zkušební metody potěrových materiálů - Část 7: Stanovení odolnosti potěrů s podlahovou krytinou proti opotřebení valivým zatížením“

ČSN 730532 „Akustika - Ochrana proti hluku v budovách a posuzování akustických vlastností stavebních výrobků – Požadavky“.

ČSN EN 12620+A1 „Kamenivo do betonu“

ČSN EN 13055 „Pórovité kamenivo“

ČSN EN 13055-1 „Pórovité plnivo - Část 1: Pórovité plnivo do betonu, malty a injektážní malty“.

ČSN EN 1015-10

ČSN EN 450 „Popílek do betonu“

ČSN EN 933-1 „Zkoušení geometrických vlastností plniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor“.

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

ČSN EN 1015-10 „Zkušební metody malt pro zdivo - Část 10: Stanovení objemové hmotnosti suché zatvrdlé malty“

Seznam zkratk a symbolů

%	procenta
°C	stupeň Celsia
a.s.	akciová společnost
aj.	a jiné
Al prášek	hliníkový prášek
apod.	a podobně
atd.	a tak dále
CEM	cement dle ČSN EN 197-1
C-S-H	kalciurn-silikátový hydrát
ČR	Česká republika
ČSN	česká technická norma, 1964-1991 rovněž československá státní norma
DIN	německá norma (Deutschen Institut für Normung)
DTA	diferenční termická analýza
EP	expandovaný perlit
EPS	Expandovaný polystyren
et al.	a kolektiv
EU	Evropská unie
JAOM	jemné anorganické odpadní materiály
K	kelvin
k.s.	komanditní společnost
kg	kilogram
KK	koeficient konstruktivnosti
kN	kilonewton
m	metr
max.	maximum
min.	minimum

např.	například
obr.	obrázek
OM	optická mikroskopie
pH	je záporný dekadický logaritmus koncentrace vodíkových kationtů ve zředěném vodném roztoku
REM	rastrovací elektronová mikroskopie
RTG	rentgenová analýza
RU	kamenivo Rugen
s.r.o.	společnost s ručením omezeným
tab.	tabulka
tj.	to jest
VEP	vedlejší energetické produkty
W	watt
XRD	rentgenová analýza
ZŽ	ztráta žíháním
λ	součinitel tepelné vodivosti
μ	mikro

Seznam obrázků

Obrázek 1 Mrakodrap Southwestern Bell Telephone Company v Kansasu [2]	10
Obrázek 2 Rozdělení potěrů dle typu funkce [10].....	16
Obrázek 3: Efekt samoošetřování [31]	18
Obrázek 4 Mezerovitá struktura [18].....	19
Obrázek 5 Hutná struktura [18].....	19
Obrázek 6 Polystyrenbeton [20]	20
Obrázek 7 Mikrosféry firmy Omega (postupně z leva do prava: E-Spheres SL, Omega Bubbles, IsoSpheres, Omega Spheres, Omega Spheres W, Omega-Sil, Q-Cel, Spherice);[40]	27
Obrázek 8 Pórová struktura a mikrostruktura [77]	47
Obrázek 9 Čerstvá směs s Al-práškem	87
Obrázek 10 Směs a Al-práškem po nakynutí	87
Obrázek 11 Čerstvá směs chlorového vápna a peroxidu vodíku	94
Obrázek 12 Shluky vápenatých produktů	99
Obrázek 13 REM směsi s 0,2 g hliníkového prášku (10 000 ×).....	108
Obrázek 14 REM směsi s 1,2 g hliníkového prášku (10 000 ×).....	108
Obrázek 15 REM směsi s 0,2 g hliníkového prášku (5 000 ×).....	108
Obrázek 16 REM směsi s 1,2 g hliníkového prášku (2 000 ×).....	108
Obrázek 17 OM směsi s 1,2 g hliníkového prášku (50 ×).....	109
Obrázek 18 OM směsi s 0,2 g hliníkového prášku (50 ×).....	109
Obrázek 19 OM směsi s 1,2 g hliníkového prášku (50 ×).....	109
Obrázek 20 OM směsi s 0,2 g hliníkového prášku (50 ×).....	109
Obrázek 21 OM směsi s 1,2 g hliníkového prášku (50 ×).....	110
Obrázek 22 Foto směsi s 0,2 g hliníkového prášku	110
Obrázek 23 Schéma tvorby vápenných výkvětů [95].....	114
Obrázek 24 Snímek vápenných výkvětů na povrchu vzorku (Cc - CaCO ₃) [95]	114
Obrázek 25 REM směsi s chlorovým vápnem (5 000 ×).....	115
Obrázek 26 REM směsi s chlorovým vápnem (2 000 ×).....	115
Obrázek 27 REM shluků ve směsi s chlorovým vápnem (500 ×).....	115
Obrázek 28 REM shluků ve směsi s chlorovým vápnem (5 000 ×).....	115
Obrázek 29 OM směsi s chlorovým vápnem (50 ×).....	116
Obrázek 30 Foto shluků ve směsi s chlorovým vápnem.....	116
Obrázek 31 "kostní struktura" směsi s chlorovým vápnem	116

Obrázek 32 Foto směsi s chlorovým vápnem.....	116
Obrázek 33 REM směsi pěnobetonu B (2 000 ×)	122
Obrázek 34 REM směsi pěnobetonu L (5 000 ×).....	122
Obrázek 35 REM směsi pěnobetonu G7 (5 000 ×).....	122
Obrázek 36 REM směsi pěnobetonu G7 (10 000 ×).....	122
Obrázek 37 OM pěnobetonu B (50 ×).....	123
Obrázek 38 OM detail ukotvení zrna Liaveru (50 ×)	123
Obrázek 39 OM pěnobetonu G7 (50 ×)	123
Obrázek 40 OM pěnobetonu G7 (50 ×)	123
Obrázek 41 Foto pěnobetonu B.....	124
Obrázek 42 Foto pěnobetonu G7	124
Obrázek 43 REM směsi X24 (10 000 ×)	128
Obrázek 44 Shluk cenosfér ve směsi X24 (500 ×).....	128
Obrázek 45 REM směsi Q17 (2 000 ×).....	128
Obrázek 46 REM směsi Q17 (10 000 ×).....	128
Obrázek 47 REM směsi X24 (10 000 ×)	129
Obrázek 48 REM směsi X24 (50 ×).....	129
Obrázek 49 OM směsi Q17 (50 ×).....	130
Obrázek 50 OM směsi X24 (50 ×)	130
Obrázek 51 Foto směsi Q17	130
Obrázek 52 Foto směsi X24	130

Seznam tabulek

Tabulka 1 Požadavky na vlhkost potěrů při pokládce dle ČSN EN 74 4505.....	15
Tabulka 2 Příklady odpadů vhodných pro použití při vývoji podlah	23
Tabulka 3 Databáze surovin	34
Tabulka 4 Propady sítím při zrnitosti dle Fullera	39
Tabulka 5 Velikost mikropórů [78]	48
Tabulka 6 Technické údaje komerčních potěrových hmot.....	59
Tabulka 7 Výsledky stanovení fyzikálně-mechanických vlastností komerčních směsí	62
Tabulka 8 Základní vlastnosti vybraných plniv.....	68
Tabulka 9: Základní vlastnosti vybraných mikrosfér	68
Tabulka 10 Vliv expandovaného perlitu na fyzikálně-mechanické vlastnosti potěrové hmoty.....	69
Tabulka 11 Vliv expandovaného vermikulitu a mikrosfér Q-CEL-7014 a Omega SPHERES W300 na fyzikálně-mechanické vlastnosti potěrové hmoty	72
Tabulka 12 Výsledky chemického rozboru prováděného na komerčních směsích [%]	79
Tabulka 13 - Náklady na pořízení surovin	80
Tabulka 14 Hodnocení výběru plniva	81
Tabulka 15 Návrh receptur pěnobetonů [g]	82
Tabulka 16 Návrh receptur pěnobetonů pro analýzu mikrostruktury [g]	82
Tabulka 17 Zpracovatelnost pěnobetonů.....	82
Tabulka 18 Výsledky fyzikálně-mechanických zkoušek pěnobetonů po 28 dnech ...	83
Tabulka 19 Základní složení receptury s hliníkovým práškem.....	86
Tabulka 20 Výsledky fyzikálně-mechanických zkoušek hliníkového prášku po 28 dnech.....	87
Tabulka 21 Navržené receptury s chlorovým vápnem a částečnou náhradou plniva (1/2)	92
Tabulka 22 Navržené receptury s chlorovým vápnem a částečnou náhradou plniva (2/2)	93
Tabulka 23 Objemová hmotnost receptur chlorového plynobetonu	93
Tabulka 24 Výsledky fyzikálně-mechanických zkoušek chlorového plynobetonů (1/2)	94

Tabulka 25 Výsledky fyzikálně-mechanických zkoušek chlorového plynobetonu (2/2)	95
Tabulka 26 Výsledky fyzikálně-mechanických zkoušek po dlouhodobém odležení	100
Tabulka 27 Receptury vzorků s hliníkovým práškem použitých pro studium mikrostruktury	104
Tabulka 28 Vyhodnocení RTG analýzy směsi s 0,2 g hliníkového prášku	106
Tabulka 29 Vyhodnocení RTG analýzy směsi s 0,2 g hliníkového prášku	107
Tabulka 30 Receptura typického vzorku s chlorovým vápnem použitého pro studium mikrostruktury	111
Tabulka 31 Vyhodnocení RTG analýzy směsi s chlorovým vápnem	112
Tabulka 32 Vyhodnocení RTG analýzy shluků ve směsi s chlorovým vápnem	112
Tabulka 33 Receptury vzorků obsahujících pěnotvorné látky použitých pro studium mikrostruktury	118
Tabulka 34 Vyhodnocení RTG analýzy směsi pěnobetonu B	120
Tabulka 35 Vyhodnocení RTG analýzy směsi pěnobetonu L	121
Tabulka 36 Vyhodnocení RTG analýzy směsi pěnobetonu G7	121
Tabulka 37 Receptury vzorků obsahujících mikrosféry použitých pro studium mikrostruktury	125
Tabulka 38 Vyhodnocení RTG analýzy směsi Q17	126
Tabulka 39 Vyhodnocení RTG analýzy směsi pěnobetonu X24	127
Tabulka 40 Celková pozorovaná velikost pórů	135

Seznam grafů

Graf 1 Vliv množství popílku v hutném plnivu na objemovou hmotnost betonu [17].	30
Graf 2 Křivka zrnitosti 0,25 - 4 mm dle Fullera.....	35
Graf 3 Sítový rozbor komerční potěrové hmoty třídy CT-C35-F5	60
Graf 4 Sítový rozbor komerční potěrové hmoty třídy CT-C30-F5	60
Graf 5 Sítový rozbor komerční potěrové hmoty třídy CT-C20-F4	61
Graf 6 Sítový rozbor komerční potěrové hmoty třídy CT-C12-F4	61
Graf 7 Objemová hmotnost komerčních potěrových hmot.....	62
Graf 8 Mikrotvrdost povrchu komerčních potěrových hmot.....	63
Graf 9 Srovnání pevností v tahu za ohybu komerčních potěrových hmot.....	64
Graf 10 Srovnání pevností v tlaku komerčních potěrových hmot.....	65
Graf 11 Srovnání konstruktivnosti komerčních potěrových hmot.....	66
Graf 12 Vodní součinitel potěrové hmoty - průzkum vlivu náhrady plniva expandovaným perlitem.....	70
Graf 13 Objemová hmotnost potěrové hmoty - průzkum vlivu náhrady přírodního plniva expandovaným perlitem	70
Graf 14 Pevnost v tlaku potěrové hmoty - průzkum vlivu náhrady plniva expandovaným perlitem.....	71
Graf 15 Koeficient konstruktivnosti potěrové hmoty - průzkum vlivu náhrady plniva expandovaným perlitem.....	71
Graf 16 Vodní součinitel při výrobě potěrové hmoty - průzkum vlivu náhrady plniva expandovaným perlitem.....	74
Graf 17 Změna objemové hmotnosti při náhradě sklářského písku lehčeným plnivem	75
Graf 18 Změna pevnosti v tlaku potěrové hmoty při náhradě sklářského písku lehčeným plnivem.....	76
Graf 19 Změna pevnosti v tahu za ohybu potěrové hmoty při náhradě sklářského písku lehčeným plnivem	76
Graf 20 Změna konstruktivnosti potěrové hmoty při náhradě sklářského písku lehčeným plnivem.....	77
Graf 21 Zpracovatelnost směsi pěnobetonů	83
Graf 22 Pevnost v tahu za ohybu pěnobetonů.....	84
Graf 23 Pevnost v tlaku pěnobetonů	84
Graf 24 Objemová hmotnost pěnobetonů.....	85

Graf 25 Objemové hmotnosti hliníkového plynobetonů	88
Graf 26 Pevnost v tahu za ohybu hliníkových plynobetonů	89
Graf 27 Pevnost v tlaku hliníkových plynobetonů	90
Graf 28 Tvrdost chlorového plynobetonu.....	96
Graf 29 Objemová hmotnost chlorového plynobetonu.....	96
Graf 30 Pevnost v tlaku chlorového plynobetonu	97
Graf 31 Pevnost v tahu za ohybu chlorového plynobetonu.....	98
Graf 32 Porovnání tvrdosti po 28 dnech a po dlouhodobém odležení	101
Graf 33 Porovnání objemové hmotnosti po 28 dnech a po dlouhodobém odležení	102
Graf 34 Porovnání pevnosti za ohybu po 28 dnech a po dlouhodobém odležení...	102
Graf 35 Porovnání pevnosti v tlaku po 28 dnech a po dlouhodobém odležení.....	103
Graf 36 DTA směsi s 0,2 g hliníkového prášku.....	105
Graf 37 DTA směsi s 1,2 g hliníkového prášku.....	105
Graf 38 RTG směsi s 0,2 g hliníkového prášku	106
Graf 39 RTG směsi s 1,2 g hliníkového prášku	106
Graf 40 DTA směsi s chlorovým vápnem	111
Graf 41 RTG směsi s chlorovým vápnem	112
Graf 42 RTG shluků ve směsi s chlorovým vápnem.....	112
Graf 43 DTA směsi pěnobetonu B	118
Graf 44 DTA směsi pěnobetonu L	119
Graf 45 DTA směsi pěnobetonu G7	119
Graf 46 RTG směsi pěnobetonu B	120
Graf 47 RTG směsi pěnobetonu L.....	120
Graf 48 RTG směsi pěnobetonu G7	121
Graf 49 DTA směsi Q17	125
Graf 50 DTA směsi X24.....	126
Graf 51 RTG směsi Q17	126
Graf 52 RTG směsi X24	127

Přílohy

A. Listy surovin

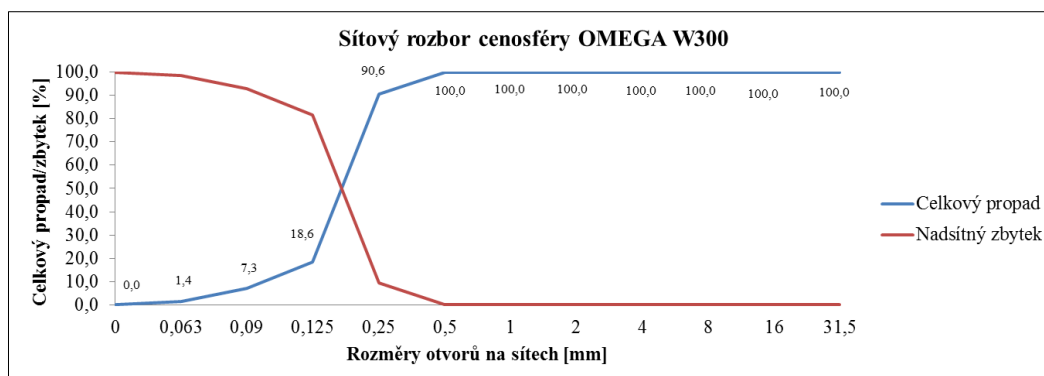
LIST PLNIVA VYRÁBĚNÉHO z DRUHOTNÝCH SUROVIN		č. 52
IDENTIFIKACE LÁTKY		
Název:	Recifa 0/7	
Typ:	Pěnové sklo	
Stručný popis:	Porézní materiál	
Původ:	Odpadové střepy z obalového skla	
Dodavatel:	Recifa a.s. Příbram III/168 Příbram	
Fotodokumentace		
		

IDENTIFIKACE NEBEZPEČNOSTI	
Expandovaný skelný odpad nebyl definován jako nebezpečný produkt.	
POKYNY PRO PRVNÍ POMOC	
Při zasažení očí vypláchnout proudem vody. Při přetrvávajících potížích vyhledat lékařskou pomoc. Vdechnutí vykašlat.	
OPATŘENÍ PRO HAŠENÍ POŽÁRU	
Není hořlavý, neuvolňuje nebezpečné látky.	
ZACHÁZENÍ a SKLADOVÁNÍ	
Používat ochranné pracovní pomůcky.	
OSOBNÍ OCHRANNÉ PROSTŘEDKY	
Ochranné brýle, respirátor proti prachu a umělé odvětrávání místnosti během drcení.	
FYZIKÁLNÍ a CHEMICKÉ VLASTNOSTI	
Skupenství:	Tuhá látka - makroporézní materiál
Barva:	Šedá
Zápach:	Bez zápachu
Hořlavost:	Nehořlavý
Rozpustnost ve vodě:	Ve vodě nerozpustný
Sypná hmotnost - volně sypané	150 kg.m ⁻³
Sypná hmotnost - v setřeseném stavu	180 kg.m ⁻³
Nasákavost	0-10 %

Třída reakce na oheň	A1																																				
Odolnost proti drcení	0,2 N.mm ⁻²																																				
Granulometrický rozbor suroviny																																					
Sítový rozbor - Recifa 0/7 <table><thead><tr><th>Rozměry otvorů na sítích [mm]</th><th>Celkový propad [%]</th><th>Nadsítový zbytek [%]</th></tr></thead><tbody><tr><td>0</td><td>0,0</td><td>100,0</td></tr><tr><td>0,063</td><td>1,2</td><td>98,8</td></tr><tr><td>0,125</td><td>6,5</td><td>93,5</td></tr><tr><td>0,25</td><td>32,9</td><td>67,1</td></tr><tr><td>0,5</td><td>41,5</td><td>58,5</td></tr><tr><td>1</td><td>44,7</td><td>55,3</td></tr><tr><td>2</td><td>50,0</td><td>50,0</td></tr><tr><td>4</td><td>82,5</td><td>17,5</td></tr><tr><td>8</td><td>100,0</td><td>0,0</td></tr><tr><td>16</td><td>100,0</td><td>0,0</td></tr><tr><td>31,5</td><td>100,0</td><td>0,0</td></tr></tbody></table>		Rozměry otvorů na sítích [mm]	Celkový propad [%]	Nadsítový zbytek [%]	0	0,0	100,0	0,063	1,2	98,8	0,125	6,5	93,5	0,25	32,9	67,1	0,5	41,5	58,5	1	44,7	55,3	2	50,0	50,0	4	82,5	17,5	8	100,0	0,0	16	100,0	0,0	31,5	100,0	0,0
Rozměry otvorů na sítích [mm]	Celkový propad [%]	Nadsítový zbytek [%]																																			
0	0,0	100,0																																			
0,063	1,2	98,8																																			
0,125	6,5	93,5																																			
0,25	32,9	67,1																																			
0,5	41,5	58,5																																			
1	44,7	55,3																																			
2	50,0	50,0																																			
4	82,5	17,5																																			
8	100,0	0,0																																			
16	100,0	0,0																																			
31,5	100,0	0,0																																			
STÁLOST a REAKTIVITA																																					
Odolné vůči chemickým vlivům.																																					
TOXIKOLOGICKÉ INFORMACE																																					
Zdravotně nezávadné. Nepřijímá ani nevylučuje žádné škodlivé látky.																																					
EKOLOGICKÉ INFORMACE																																					
Při výrobě užita činidla, která nepředstavují ekologickou zátěž pro životní prostředí.																																					
POKYNY PRO ODSTRAŇOVÁNÍ																																					
Dá se opakovaně recyklovat.																																					

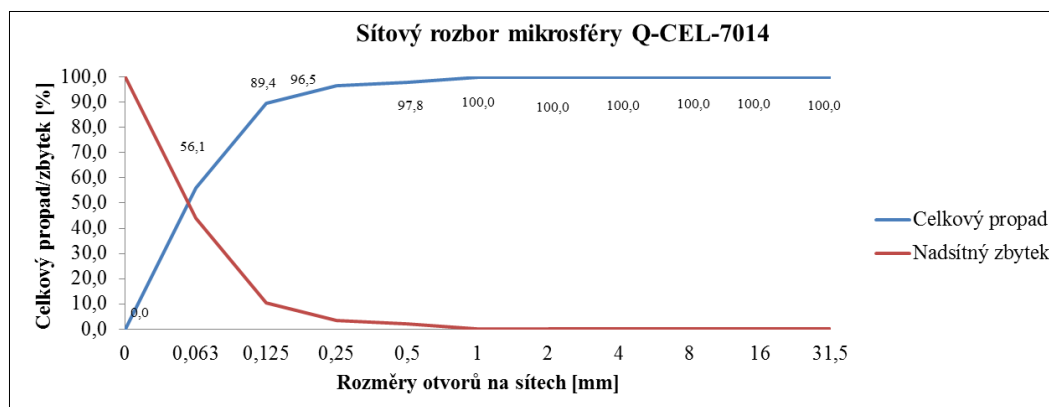
B. Granulometrický rozbor vybraných surovin

Granulometrie mikrosfér Omega-SPHERES W300.



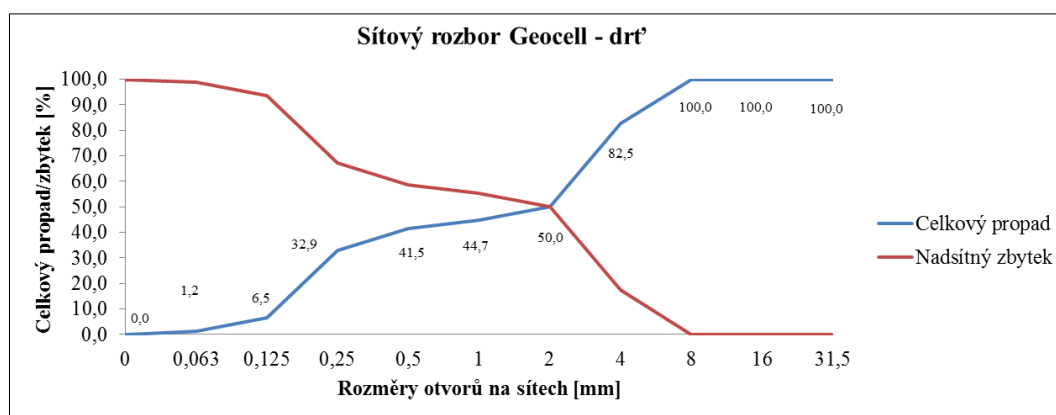
Rozměry otvorů na sítích [mm]	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	Σ
Váhový zbytek na sítě [g]	1,4	5,9	11,3	72,1	9,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,1
Váhový zbytek na sítě [%]	1,4	5,9	11,3	72,0	9,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Nadsitný zbytek [%]	100,0	98,6	92,7	81,4	9,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Celkový propad [%]	0,0	1,4	7,3	18,6	90,6	100	100	100	100	100	100	%

Granulometrie mikrosfér Q-CEL-7014



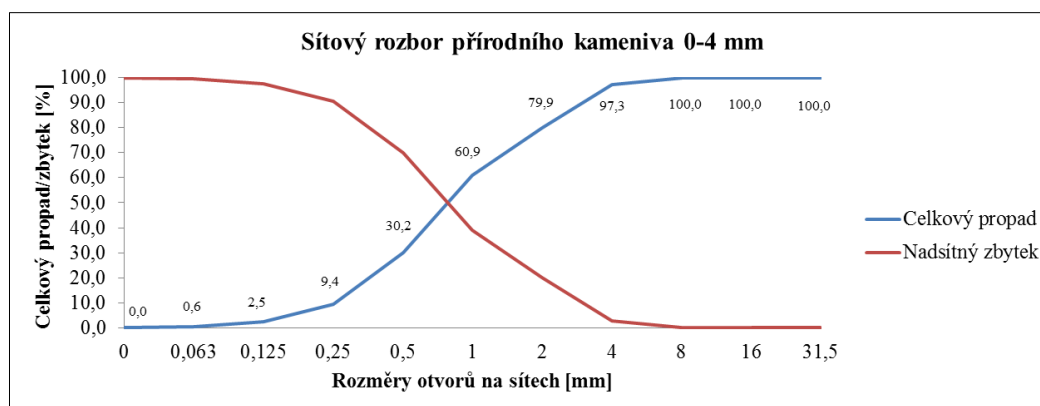
Rozměry otvorů na sítích [mm]	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	Σ
Váhový zbytek na sítě [g]	56,1	33,3	7,1	1,3	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	99,9
Váhový zbytek na sítě [%]	56,2	33,3	7,1	1,3	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Nadsitný zbytek [%]	100,0	43,8	10,5	3,4	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Celkový propad [%]	0,0	56,2	89,5	96,6	97,9	100	100	100	100	100	100	

Granulometrie drceného pěnového skla Geocell



Rozměry otvorů na sítích [mm]	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	Σ
Váhový zbytek na sítě [g]	1,2	5,3	26,4	8,6	3,2	5,3	32,5	17,5	0,0	0,0	0,0	100,0
Váhový zbytek na sítě [%]	1,2	5,3	26,4	8,6	3,2	5,3	32,5	17,5	0,0	0,0	0,0	
Nadsítový zbytek [%]	100,0	98,8	93,5	67,1	58,5	55,3	50,0	17,5	0,0	0,0	0,0	
Celkový propad [%]	0,0	1,2	6,5	32,9	41,5	44,7	50,0	82,5	100	100	100	

Granulometrie přírodního plniva zrnitosti 0 – 4 mm.



Rozměry otvorů na sítích [mm]	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	Σ
Váhový zbytek na sítě [g]	2,5	7,4	27,9	83,6	123,4	76,2	69,8	11,0	0,0	0,0	0,0	401,8
Váhový zbytek na sítě [%]	0,6	1,8	6,9	20,8	30,7	19,0	17,4	2,7	0,0	0,0	0,0	
Nadsítový zbytek [%]	100,0	99,4	97,5	90,6	69,8	39,1	20,1	2,7	0,0	0,0	0,0	
Celkový propad [%]	0,0	0,6	2,5	9,4	30,2	60,9	79,9	97,3	100	100	100	

C. Výpočet DTA

Al prášek 1,2 g

$$m(\text{Ca}(\text{OH})_2) = \Delta m * \frac{M(\text{Ca}(\text{OH})_2)}{M(\text{H}_2\text{O})} = 0,9950 * \frac{74}{18} = 4,09 \% \cong 4 \%$$

$$m(\text{CaCO}_3) = \Delta m * \frac{M(\text{CaCO}_3)}{M(\text{CO}_2)} = 10,9051 * \frac{100}{44} = 24,78 \% \cong 25 \%$$

Al prášek 0,2 g

$$m(\text{Ca}(\text{OH})_2) = \Delta m * \frac{M(\text{Ca}(\text{OH})_2)}{M(\text{H}_2\text{O})} = 15,2390 * \frac{74}{18} = 62,65 \% \cong 63 \%$$

$$m(\text{CaCO}_3) = \Delta m * \frac{M(\text{CaCO}_3)}{M(\text{CO}_2)} = 3,7547 * \frac{100}{44} = 8,53 \% \cong 9 \%$$