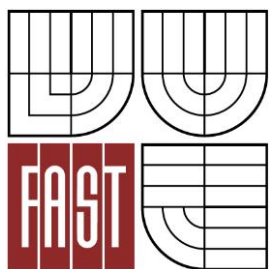




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A
DÍLCŮ

Faculty Of Civil Engineering
Institute of Technology of Building Materials and Components

STUDIUM VLASTNOSTÍ POLYMERY MODIFIKOVANÝCH MALT VYUŽÍVAJÍCÍ PUCOLÁNOVĚ AKTIVNÍ MATERIÁLY

STUDY OF THE PROPERTIES OF POLYMER-MODIFIED MORTARS USING POZZOLANA ACTIVE
ADMIXTURES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

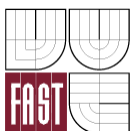
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ELIŠKA PYREŇOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. NIKOL ŽIŽKOVÁ, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Eliška Pyreňová
Název	Studium vlastností polymery modifikovaných malt využívající pucolánově aktivní materiály
Vedoucí diplomové práce	doc. Ing. Nikol Žižková, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2015
Datum odevzdání diplomové práce	15. 1. 2016
V Brně dne 31. 3. 2015	

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.,
MBA
Vedoucí ústavu

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

Podklady a literatura

- MARAGHECHI, H., et. al. Pozzolan reactivity of recycled glass powder at elevated temperatures, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 53, 2014, p. 105–114.
- RASHAD A., M. Recycled waste glass as fine aggregate replacement in cementitious materials based on Portland cement, *Construction and Building Materials*, Vol. 72, 2014, p. 340–357.
- OHAMA, Y., *Handbook of Polymer-modified Concrete and Mortars*, Noyes Publications, New Jersey, USA 1995, ISBN 0-8155-1358-5.

Zásady pro vypracování

Pucolánově aktivní materiály lze využít také při výrobě polymery modifikovaných malt. Tato práce bude zaměřena na studium vlastností polymery modifikovaných cementových malt v důsledku použití pucolánově aktivních příměsí. Použity budou pucolánové příměsi na bázi amorfního oxidu křemičitého. V diplomové práci proveďte:

1. V teoretické části souhrnně zpracujte doposud získané poznatky z oblasti polymery modifikovaných malt (PMM) a problematiky vlivu pucolánových příměsí s amorfním SiO₂ na vlastnosti PMM.
 2. Vyberte vhodné pucolánové příměsi, včetně jedné odpadní látky, u které je předpoklad vhodného materiálového využití a ověřte jejich vlastnosti (chemické a mineralogické složení, pucolánovou aktivitu atd.).
 3. Navrhněte provedení experimentálních výzkumných prací. Proveďte volbu vhodných zkušebních těles a prostředí, ve kterých budou Vámi vyrobená zkušební tělesa uložena a navrhněte metodiku zkoušení dle platných norem (např. dle ČSN EN 12004), případně alternativní zkušební postupy.
 3. Experimentálně ověřte vlastnosti Vámi sledovaných PMM a vyhodnoťte vliv přídatku pucolánově aktivních příměsí na výsledné vlastnosti testovaných PMM.
 4. Na základě výsledků Vašich experimentálních prací předložte hodnocení sledovaných PMM, pro objasnění výsledků využijte vhodné analýzy např. RDA a DTA.
 5. Získané výsledky zpracujte do přehledných tabulek a grafů.
 6. Proveďte zhodnocení dosažených výsledků a rozbor problematiky s praktickými dopady do stavební praxe.
- Rozsah práce 60–80 stran.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....
doc. Ing. Nikol Žižková, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na studium vlastností polymerů modifikovaných cementových malt využívající puzolánově aktivní materiály na bázi amorfního oxidu křemičitého. Zkoumá možnosti využití skelného recyklátu jako částečnou náhradu cementu v PMM. Vlastnosti malt jsou posuzovány z mineralogického a technologického hlediska. Pro upřesnění výsledků byly použity analýzy RTG, DTA a REM.

Klíčová slova

Polymer-modifikované malty, kopolymer EVA, puzolánově aktivní materiál, amorfní oxid křemičitý, odpadní látky, skelný recyklát, vlastnosti PMM

Abstract

This diploma thesis is focused on the study of the properties of polymer-modified cementitious mortars which using pozzolanic active materials based on amorphous silica. Explores the possibilities of using the recycled glass as a partial replacement of cement in PMM. Properties of mortars are reviewed in mineralogical and technological point of view. For specification of the results were used the analysis RTG, DTA and REM.

Keywords

Polymer-modified mortars, EVA copolymer, pozzolanic active material, amorphous silicon dioxide, waste products, recycled glass, properties PMM

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Eliška Pyreňová *Studium vlastností polymery modifikovaných malt využívající pucolánově aktivní materiály*. Brno, 2015, 90 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Nikol Žižková, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 12. 1. 2016

.....
podpis autora
Bc. Eliška Pyreňová

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

Prohlášení:

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 12. 1. 2016

.....
podpis autora
Bc. Eliška Pyreňová

Poděkování:

Ráda bych poděkovala vedoucí práce doc. Ing. Nikol Žižkové Ph.D. za odborné rady a vstřícnost při vypracování diplomové práce.

Obsah

Obsah.....	9
1. Úvod.....	11
2. Cíl práce.....	13
3. Teoretická část.....	14
3.1 Malty.....	14
3.1.1 Vlastnosti malt.....	15
3.1.2 Základní dělení stavebních malt.....	15
3.2 Polymery modifikované malty.....	17
3.2.1. Polymerace.....	18
3.2.2. Mechanismus tvorby matrice polymercementového kompozitu.....	19
3.2.3. Historie polymery modifikovaných malt.....	20
3.2.4. Vlastnosti polymery modifikovaných malt.....	20
3.2.5. Kopolymer Etylvinylacetátu.....	21
3.3 Pucolánově aktivní materiály.....	23
3.3.1. Druhy pucolánů.....	23
3.3.2. Pucolánová reakce.....	24
3.3.3. Pucolánová aktivita.....	24
3.3.4. Vliv pucolánů na vlastnosti čerstvé a zatvrdlé směsi.....	25
3.4. Sklo.....	26
3.4.1. Historie skla.....	26
3.4.2. Výroba skla.....	27
Obr. č. 11 Schéma technologických procesů při výrobě skla.....	28
3.4.3. Obecné vlastnosti skel.....	28
3.4.4. Druhy skla.....	29
3.4.5. Struktura skla.....	30
3.4.8. Recyklace a znovuvyžití odpadního skla.....	31
3.4.6. Pucolánová aktivita skla.....	34
3.4.7. Alkalicko-křemičitá reakce.....	34
3.5 Přínos recyklátů a odpadních materiálů pro životní prostředí.....	36
3.5.1. Recyklace odpadů.....	36
3.5.2. Proč používat recyklované materiály.....	36
4. Praktická část.....	39
4.1 Metodika práce.....	39
4.1.1 ETAPA I.....	39
4.1.2 ETAPA II.....	41
4.1.3 ETAPA III.....	42

4.1.4 ETAPA IV	43
4.2 Popis prováděných zkoušek	44
4.2.1 Předúprava surovin – skelného recyklátu.....	44
4.2.2 Laserová difrakční analýza.....	44
4.2.3 Měrná hmotnost	44
4.2.4 Pucolánová aktivita	45
4.2.5 Stanovení konzistence čerstvé malty	45
4.2.6 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu.....	46
4.2.7 Stanovení pevnosti v tlaku	46
4.2.8 Mrazuvzdornost.....	47
4.2.9 Stanovení přídržnosti	47
4.2.10 Stanovení nasákavosti	48
4.2.11 Rastrovací elektronová mikroskopie – REM.....	49
4.2.12 Diferenční termická analýza – DTA.....	49
4.2.13 Rentgenová difrakční analýza – RTG.....	50
4.2.14 Vysokotlaká rtuťová porozimetrie	50
4.3 Výsledky ETAPY I - rozbor vstupních surovin.....	51
4.3.1 Cement.....	51
4.3.2 Kopolymer etylenvinylacetátu.....	51
4.3.3 Skelný recyklát	52
4.3.4 Drcený vápenec	55
4.4 Výsledky zkoušek ETAPY II.....	57
4.5 Výsledky zkoušek ETAPY III.....	62
4.6 Výsledky ETAPY IV	70
4.6.1 Rentgenová difrakční analýza (RTG)	70
4.6.2 Diferenční termická analýza (DTA).....	72
4.6.3 Vysokotlaká rtuťová porozimetrie	76
4.6.4 Elektronová rastrovací mikroskopie (REM)	77
7. Diskuze a shrnutí výsledků.....	81
8. Závěr	84
9. Zdroje	86
10. Seznam použitých zkratk a symbolů	90

1. Úvod

Malta je historicky známý stavební materiál využívaný nejen pro zdění, ale také pro pokládku, spárování či omítání staveb. Malty jsou známé od doby prehistorické až po současnost. Vlastnosti malt jsou ovlivňovány především složením směsi, která je vždy ze tří hlavních komponent, jako je plnivo, pojivo a voda. Malty mají také své nevýhody, jako je doba tvrdnutí, nízká pevnost v tahu, velké smrštění při sušení či malá chemická odolnost. K redukování těchto nevýhod jsou stále častěji používány maltové kompozity, což je materiál, který se skládá ze dvou nebo více spolupůsobících fází. Jedná se o přísady a příměsi, které pomáhají zlepšit výsledné vlastnosti původní malty. Dávni stavitelé několik set let před naším letopočtem věděli, že přidáváním určitých látek do malt zlepší jejich kvalitu a pozmění určité vlastnosti. Většinou se jednalo o látky z přírodních surovin, jako byl sopečný popel nebo drcená keramika. Dnes jsou jako přísady či příměsi používány nejen přírodní (pucolány), ale také uměle vytvořené látky (např. polymerní přísady). Polymery přidávané do malt mají vliv na vlastnosti čerstvé i zatvrdlé malty. Přidání některých polymerů do malty má kladný vliv na zpracovatelnost směsi, nepropustnost, lepší adhezi, trvanlivost, chemickou odolnost, mrazuvzdornost, pevnost v tahu za ohybu a další vlastnosti. Malty s přidavkem pucolánově aktivních přísad mohou zlepšit mechanickou odolnost, jsou odolnější vůči působení chemických látek a korozivním médiím. Mohou mít pozitivní vliv na výslednou pevnost a trvanlivost malt, na odolnost proti sorpční vlhkosti a mrazuvzdornost malt.

V dnešní době čelí stavebnictví velmi náročnému úkolu, a to dosáhnout maximálních úspor jak při výrobě samotných materiálů, tak při zhotovení celé stavby. Cílem je vytvořit příjemné prostředí, které nebude mít negativní vliv na lidské zdraví a současně ekologickou stavbu, která bude šetrná k životnímu prostředí. Z těchto důvodů se začaly ve stavebnictví hojně využívat odpadní materiály, jako jsou elektrárenské popílky, struska, energosádrovec nebo demoliční a stavební odpady. Použití odpadních materiálů má značné výhody, především snížení nákladů na zpracování odpadů, dále šetří energii jak při těžbě vstupních materiálů, tak zejména při samotné výrobě (např. výroba cementu). Recyklace pevného odpadu významně odlehčí skládkám komunálních odpadů a sníží potřebu zakládání nových skládek, pomáhá ke snižování emisí skleníkových plynů, umožňuje šetřit obnovitelné i neobnovitelné zdroje a v některých případech může omezovat zátěž životního

prostředí. Odpadní suroviny mohou být použity jako náhrada primární suroviny, nebo jsou vneseny do technologie za účelem zlepšení některých parametrů výsledných stavebních hmot díky jejich mimořádným vlastnostem.

2. Cíl práce

Cílem diplomové práce je studium vlastností polymery modifikovaných cementových malt v důsledku použití pucolánově aktivních materiálů na bázi amorfního SiO_2 . Cíle práce lze strukturalizovat do následujících bodů:

1. Vypracování teoretické rešerše z oblasti polymery modifikovaných malt a problematiky vlivu pucolánově aktivních příměsí na vlastnosti polymery modifikovaných malt. Na základě této rešerše navrhnout vhodné pucolánově aktivní příměsi, nejlépe odpadní látky a ověřit jejich vlastnosti (pucolánovou aktivitu, měrnou hmotnost, a další).
2. Navrhnout vhodnou metodiku laboratorních zkoušek a postupů, včetně volby vhodných zkušebních těles a prostředí, ve kterém budou tyto tělesa uložena.
3. Ověřit vlastnosti polymery modifikovaných malt a vyhodnotit vliv přídatku pucolánově aktivních příměsí na tyto malty.
4. Výstupem diplomové práce je souhrnné zhodnocení dosažených výsledků a jejich význam pro stavební praxi.

3. Teoretická část

3.1 Malty

Malta je kašovitá směs, která je připravována smísením drobného kameniva, anorganického pojiva, přísad nebo příměsí s určitým množstvím vody. Slouží ve stavebnictví nejen jako spojovací materiál, ale také jako omítková hmota. Malty jsou známé od doby prehistorické až po současnost. V počátcích stavebnictví lidé zjistili, že stavby zhotovené z kamene, které jsou kladeny těsně vedle sebe, se snadno bortí a nevydrží větší náporů větru. Tento problém byl vyřešen objevením plastické hmoty, která na vzduchu tvrdne a tuhne, dnes ji známe pod pojmem „malta“. Tyto historické malty se používaly ke spojování kamenných bloků, k fixaci povrchových úprav zdiva nebo podlah. Dále byly využívány k přípravě podkladů pro nástěnné malby, ale také k vytváření štukových ozdob či sgrafit [1].

Dávní stavitelé několik set let před naším letopočtem věděli, že přidáváním určitých látek do malt zlepší jejich kvalitu a pozmění určité vlastnosti. Většinou se jednalo o látky z přírodních surovin, jako byl sopečný popel nebo drcená keramika. Díky tomuto poznatku již tehdy mohli stavět stavby odolné proti působení vody a vlhkosti, jako byly například vodovody, lázně, přístavní mola nebo mosty. Používání pucolánů zmínil již v 1. století př. n. l. římský architekt, inženýr a teoretik Marcus Vitruvius Pollio ve svém díle *De Architectura libri X*. Historické malty lze rozdělit dle jejich hlavní složky na sádrové, hliněné nebo vápenné (viz obr. č. 1) [2, 3].



Obr. č. 1 Fotografie historické cemento-vápenné malty

V dnešní době čelí stavebnictví velmi náročnému úkolu, a to dosáhnout maximálních úspor jak při výrobě samotných materiálů, tak při zhotovení celé stavby. Cílem je vytvořit příjemné prostředí, které nebude mít negativní vliv na lidské zdraví a současně ekologickou stavbu, která bude šetrná k životnímu prostředí a tudíž nenáročná na spotřebu energií. Vývoj nových způsobů zdění snižuje spotřebu malty a zvyšuje se tak i rychlost zdění. Ovšem úspora času nemusí být vždy ten nejdůležitější parametr při rozhodování, z jakých materiálů se budova postaví. [4].

Dnes je možno dodávat maltu ve třech podobách. Prvním způsobem je suchá maltová směs, která již obsahuje všechny potřebné komponenty včetně přísad a příměsí, stačí ji pouze rozmíchat s vodou. Dále tzv. staveništní malta, která je vyráběná přímo na stavbě smícháním jednotlivých složek malty. A poslední variantou je mokrá maltová směs, která se dopravuje na staveniště již jako kompletní směs všech komponentů včetně vody.

3.1.1 Vlastnosti malt

Vlastnosti malt jsou především ovlivňovány složením směsi. Kvalitativní požadavky na dobu zpracovatelnosti, obsah chloridů a obsah vzduchu pro čerstvé malty jsou stanoveny normou ČSN EN 998-2. Pro zatvrdlé malty tato norma určuje kvalitativní požadavky na pevnost v tlaku, soudržnost, absorpce vody, propustnost vodních par, objemovou hmotnost, tepelnou vodivost a trvanlivost.

Podle pevnosti v tlaku se malty dělí na jednotlivé třídy M 1; M 2,5; M 5; M 10; M 15 a M 20, což jsou pevnosti v tlaku v MPa (resp. v N/mm²), které jsou překročeny. Pevnost v tlaku vyjádřená třídou malty je základním znakem kvality zdicí malty [4].

3.1.2 Základní dělení stavebních malt

Stavební malty můžeme rozdělit do skupin podle několika kritérií, jako je účel použití, typ použitého pojiva, druh plniva, objemová hmotnost malty, pevnost v tlaku a další.

1. Podle účelu použití:

- malty pro zdění,
- malty pro omítání,
- malty pro výrobu keramických dílců,

- malty tepelně izolační,
- malty stykové a spárovací,
- malty pro kladení dlažeb a obkladů,
- malty pro speciální účely,
- sanační malty a omítky.

2. Podle typu použitého pojiva:

- Vápenné
 - obyčejné,
 - jemné.
- Vápenocementové
 - obyčejné,
 - jemné,
 - pro šlechtěné omítky.
- Vápenosádrové
- Sádrové
- Cementové
 - obyčejné (hrubé),
 - pro cementový postřík.
- Polymercementové malty
- Hliněné malty

3. Podle objemové hmotnosti malty ve vysušeném stavu:

- malty tepelně izolační do 1100 kg.m^{-3} ,
- malty vylehčené do 1600 kg.m^{-3} ,
- malty obyčejné do 2300 kg.m^{-3} ,
- malty těžké nad 2300 kg.m^{-3} .

4. Podle druhu plniva:

- s říčním pískem,
- s kopaným pískem,
- se smíšeným plnivem,
- s druhotnými odpadními látkami (popílek, sláma, cihelná drť, sklo).

5. Podle pevnosti v tlaku:

Malty můžeme dále dělit podle jejich pevností v tlaku viz tab. č. 1

Tab. č. 1 Rozdělení malt dle jejich pevností v tlaku

Třída	M1	M2,5	M5	M10	M15	M20	Md
Pevnost v tlaku [N/mm ²]	1	2,5	5	10	15	20	>25

6. Podle tepelné vodivosti se tepelně izolační malty třídí na malty:

- tepelně izolační $\lambda > 0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,
- vysoce tepelně izolační $\lambda \leq 0,25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,
- mimořádně tepelně izolační $\lambda \leq 0,14 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

7. Podle požadavků na další vlastnosti můžeme malty dále dělit:

Dále můžeme malty dělit na mrazuvzdorné, vodotěsné či propustné vůči vodním parám a malty se zvláštními vlastnostmi nebo malty pro zvláštní použití (břizolitové omítky, umělý kámen, barytové malty, žáruvzdorné malty aj.) [5].

3.2 Polymery modifikované malty

Malty s použitím portlandského cementu byly populární již před více než 200 lety. Nicméně cementové malty a betony mají také své nevýhody jako je doba tvrdnutí, nízká pevnost v tahu, velké smrštění při sušení a malá chemická odolnost. K redukování těchto nevýhod jsou stále častěji používány maltové kompozity, což je materiál, který se skládá ze dvou nebo více fází, které spolu působí ve vzájemné synergii. Jedná se o modifikaci cementových malt přísadami a příměsmi, které pomáhají zlepšit výsledné vlastnosti původní malty. Velmi často se do malt přidávají polymery různého typu. Existují tři způsoby, jak může být polymer použit do malt, jsou to buď polymery modifikované malty (PMM), polymerní malty (PM) nebo polymery impregnované malty (PIM) [7].

Polymery v maltě mohou zlepšit její vlastnosti několika způsoby. Polymery přispívají ke snížení rychlosti odpařování vody, což umožňuje jejich krystalická struktura a to přispívá k neustálému narůstání pevností během časných stádií

vytvrzování. Přidáním polymeru do malt se tak zvyšuje jejich pevnost v tahu za ohybu a lomová houževnatost, neboť trhlinky, které vznikají v cementové matrici během vytvrzování, jsou přemostěny vytvořeným polymerním filmem nebo membránami, a zároveň se tak vytvoří vazby s hydratačními produkty a plnivem. Polymery v maltách výrazně zlepšují jejich aplikační vlastnosti, což usnadňuje manipulaci s maltou při nanášení. Určité polymery mohou také prodloužit dobu hydratace, která má velký vliv na dobu zpracovatelnosti čerstvé směsi. Dále mohou mít polymery v maltách příznivý vliv na přídržnost k různým povrchům, jako je beton, cihly, dřevo, polystyren, sklo a kovy. Přídržnost je důležitá vlastnost, a to zejména pro tenkovrstvé provedení jako jsou nástřiky, štuky nebo oddělovací vrstvy [7,18].

Polymery modifikované malty (PMM), známé také pod označením polymercementové malty (PCM) jsou malty, vyráběné pomocí částečné náhrady cementového pojiva polymerními přísadami. Tyto PMM mají monolitickou matrici, kde se vzájemně prolíná hydratovaná cementová fáze s polymerní fází.

Výroba polymercementových malt probíhá smícháním polymeru v dispergované, práškové nebo tekuté podobě s cementovou maltou. Základní reakce v polymerní maltě spočívá v koalescenci polymerních částic nebo polymeraci monomerů.

V současnosti je pozorovatelný velký zájem o využití polymery modifikovaných malt jako správkového materiálu především pro poškozené železobetonové konstrukce (viz obr. č. 2), sanaci betonů, pokládku dlažby a další [9].



Obr. č. 2 Sanační malta na vlhké zdivo [24]

3.2.1. Polymerace

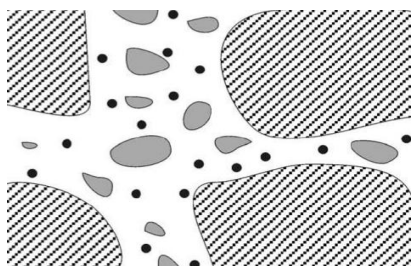
Polymerace je řetězová chemická reakce, při které vznikají z monomeru (nízkomolekulární látky) dlouhé makromolekuly polymeru (makromolekulární látka). Polymerace se vyznačuje především tím, že při této reakci nedochází ke vzniku žádných vedlejších produktů.

Polymerace se skládá ze tří základních dějů: iniciace, propagace a terminace. Polymerační proces začíná dodáním aktivační energie, která převádí reagující látky do aktivní formy, ve které jsou schopny chemické reakce. Monomery lze aktivovat iniciátorem, což může být teplo, záření nebo aktivující látka [6].

3.2.2. Mechanismus tvorby matrice polymercementového kompozitu

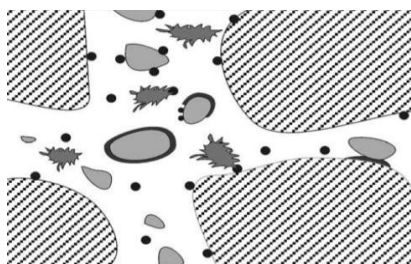
Utváření polymerního filmu může probíhat od chvíle, kdy mají kapičky polymeru dostatečnou energii na to, aby překonaly odpudivé síly vznikající z povrchově aktivních látek. Tento proces může probíhat společně s probíhající hydratací cementu, zejména pak v případě prostředí s nižší relativní vlhkostí. Toto umožňuje částečné nebo úplné zapouzdření cementových zrn vedoucí ke zpomalení hydratačního procesu. Jednotlivé fáze průběhu tvorby polymerního filmu jsou na obrázcích č. 3–6.

1. fáze - ihned po zamíchání



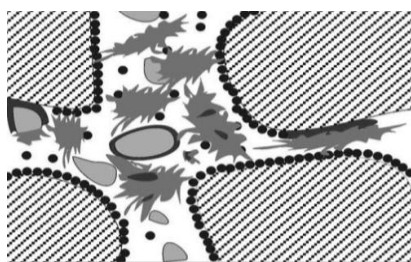
Obr. č. 3 Rozptýlení cementové i polymerní složky ve vodě [8].

2. fáze



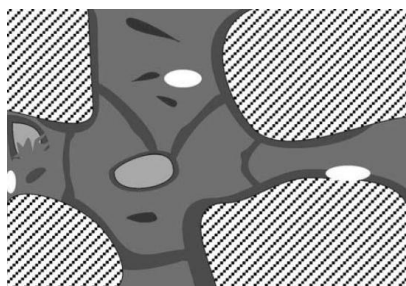
Obr. č. 4 Počáteční fáze hydratace cementových zrn [8].

3. fáze



Obr. č. 5 Pokračující hydratace cementu a tvorba polymerního filmu [8].

4. fáze



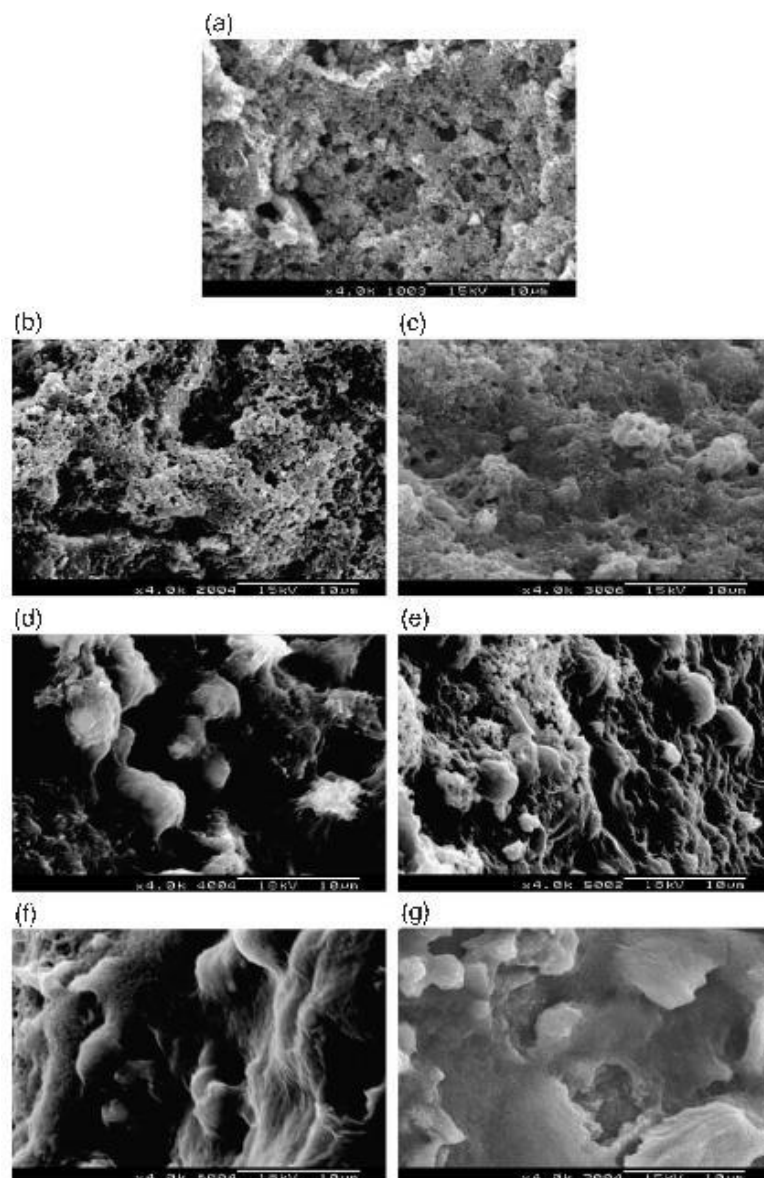
Obr. č. 6 Poslední fáze zahrnuje další postup hydratace a závěrečnou tvorbu polymerního filmu [8].

3.2.3. Historie polymery modifikovaných malt

Aktivní výzkum a vývoj polymery modifikovaných malt a betonů probíhá více než 70 let. Na základě výsledků těchto výzkumů jsou polymerní přísady používány již běžně v mnoha vyspělých zemích, především jako přísada do sanačních materiálů. První patent na polymercementové malty byl vydán v roce 1924 V. Lefeburem. Jako první sestavil metodu pro skladbu směsi s využitím přírodních latexů. Tento patent byl zlomovým bodem pro další výzkum těchto kompozitů. V roce 1933 byl v Německu publikován patent A. G. Rodwellem na využití synteticky vyrobené pryskyřice jako přísady do polymercementových malt. A ve čtyřicátých letech byl poprvé využit polyvinylacetát jako polymerní přísada pro polymercementové malty, které pak byly používány pro povrchové úpravy, dlažby, podlahy, antikorozi a lepicí hmoty. V 70. letech minulého století byl prováděn významný výzkum PMM a PMC a od 80. let se staly tyto malty dominantními konstrukčními materiály, které jsou celosvětově používány dodnes [9].

3.2.4. Vlastnosti polymery modifikovaných malt

Polymery přidávané do malt mají vliv na vlastnosti čerstvé i zatvrdlé malty. Přidání některých polymerů do malty má kladný vliv na zpracovatelnost směsi, nepropustnost a lepší adhezi. Modifikace polymery může zásadním způsobem zlepšit přidržitelnost k podkladu, trvanlivost, chemickou odolnost, mrazuvzdornost, vodotěsnost a mnoho dalších vlastností materiálů na cementové bázi. Studie prokazují, že použitím polymeru se zlepšuje také pevnost v tahu za ohybu, to však závisí na vodním součiniteli malty a také na zvoleném typu polymeru. Na obr. č. 7 můžeme vidět vliv přidaného polymeru do malt po 28 dnech uložení v laboratorních podmínkách.



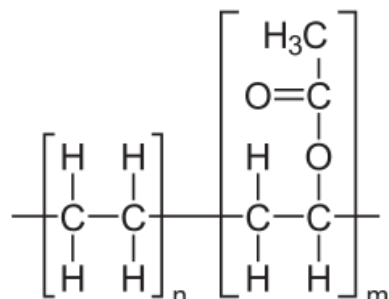
Obr. č. 7 Povrch polymercementové malty po 28 dnech s různým množstvím polymeru (a) 0 %, (b) 1 %, (c) 5 %, (d) 8 %, (e) 10 %, (f) 15 % a (g) 20 % [19]

3.2.5. Kopolymer Etylvinylacetátu

Kopolymer je makromolekulární látka, jejíž molekuly jsou tvořeny nejméně ze dvou různých monomerů. Kopolymery mají často lepší vlastnosti než jednoduché polymery. Mají značný technický význam, například EVA – kopolymer etylenu s vinylacetátem, ABS – akrylonitril-butadien-styrenový kaučuk nebo BSR – butadien-styrenový kaučuk a další [10].

Etylvinylacetát je polymer vyrobený z nepolárního etylenu ($H_2C=CH_2$) a polárního vinylacetátu ($H_2C=CH-O-COCH_3$), jehož chemický vzorec je znázorněn na obr. č. 8.

Kopolymer EVA se vyrábí vysokotlakou radikálovou blokovou polymerací při tlaku 140 MPa a teplotě 180 – 250 °C. Etylvinylacetát je prodáván pod obchodním označením Alathon, Elvax, Escorene, Alkathene, Levaprene a další [10].



Obr. č. 8 Chemický vzorec Kopolymeru EVA [20]

Kopolymer etylenu a vinylacetátu je významný představitel kopolymerů využívaný pro modifikaci malt. Běžně je využíván jako aditivum v suchých maltových směsích. Nejčastěji je přidáván ve formě redispergovatelného prášku (viz obr. č. 9).

Vlastnosti kopolymeru EVA závisí především na obsahu vinylacetátu, čím je jeho obsah vyšší, tím má kopolymer lepší houževnatost, pružnost a odolnost proti tvorbě trhlin. Ale naopak při vyšším obsahu vinylacetátu se snižuje tvrdost a tvarová stálost za tepla. Maximální pevnosti EVA je dosaženo při obsahu 20 – 30 % vinylacetátu. Kopolymery vinylacetátu jsou průsvitné až průhledné, mají vysokou pevnost a jsou rozpustné v ketonech a aromatických uhlovodících [9, 10].



Obr. č. 9 Kopolymer EVA ve formě redispergovatelného prášku [20]

Kopolymer EVA se využívá v obalovém průmyslu, dále pro výrobu karimatek, dětských samolepek, v biomedicínském průmyslu na výrobu zařízení pro dodávky léčiv. Dále je kopolymer EVA využíván jako výplň pro různé sportovní pomůcky jako lyžařské boty, cyklistická sedátka, rukavice, helmy a další. Významné použití mají pro

výrobu lepidel pro nábytkářství a polygrafický průmysl. Kopolymer EVA je také využíván ve stavebnictví pro výrobu fólií a podlahovin, dále jako přísada pro nátěrové hmoty, nebo jako přísada do sanačních malt [9, 10].

3.3 Pucolánově aktivní materiály

Pucolánově aktivní materiály jsou látky s obsahem amorfního oxidu křemičitého (SiO_2) a oxidu hlinitého (Al_2O_3), které samy o sobě mají velmi malé nebo žádné pojivé vlastnosti. Avšak při běžných teplotách, za přítomnosti vlhkosti a hydroxidu vápenatého (Ca(OH)_2) dochází k chemické reakci, při které vznikají hydratované sloučeniny vápenaté, které se vyznačují pojivými vlastnostmi a jsou stálé i pod vodou. Pucolány obsahují velice malé nebo žádné množství oxidu vápenatého (CaO), a tím se liší od klasických hydraulických příměsí (např. struska), které tyto vápenaté oxidy obsahují. Z chemického hlediska jde tedy o přírodní nebo technogenní látky, vnášející do směsi hydraulické složky.

První zmínky o použití pucolánů jsou již z období Starého Říma. Římané používali sopečný popel z oblasti Pozzuoli pod Vesuvem, který smíchali s hašeným vápnem a vodou k výrobě hydraulické malty, odtud vznikl dnešní název pucolán [11].

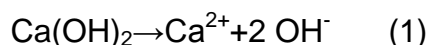
3.3.1. Druhy pucolánů

Podle původu vzniku dělíme pucolány na přírodní a technogenní. Přírodní pucolány jsou látky vulkanického původu nebo sedimenty s daným chemicko-mineralogickým složením. Mezi přírodní pucolány patří tufy, tufity, pemza, spongility, křemelina a další. Přírodní materiály s pucolánovými vlastnostmi většinou nevyžadují složité zpracování kromě případné úpravy velikosti částic (mletí).

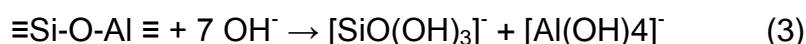
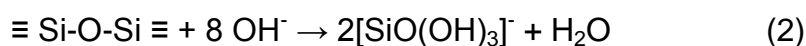
Technogenní pucolány jsou odpadní látky nebo cíleně upravované jílové suroviny pálením a následným mletím při nízkých teplotách. Nejčastěji používaný je kaolín, který se upraví pálením na metakaolín. V minulosti byl používán například kostní nebo dřevěný popel. V dnešní době je však hojně využívána granulovaná struska, elektrárenské popílký, křemičité úlety, nanosilika nebo například odpadní sklo [11].

3.3.2. Pucolánová reakce

Přírodní pucolány, které jsou rozptýleny v nasycené nebo nenasycené vápenné vodě reagují s hydroxidem vápenatým ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) za vzniku hydratovaných křemičitanů vápenatých (C-S-H) a hexagonálních hlinitanů C_4AH_{13} . Pokud je ve vápeno-pucolánové maltě přítomný i sádrovec, dochází ke tvorbě ettringitu. Je známo, že hydroxid vápenatý je silný hydroxid, který je ve vodě disociován na ionty, viz chemická rovnice (1).



Vysoká koncentrace OH^- iontů převádí do roztoku vápenaté, sodné a draselné ionty, dochází ke štěpení vazeb v SiO_2 , křemičitanech a hlinitokřemičitanech, viz rovnice (2) a (3).



Vzniklé ionty tvoří s ionty Ca^{2+} nejprve hydratované křemičitany (C-S-H gely) a hlinitany vápenaté na jejich povrchu ve formě lístků.

Pucolány mají řadu vlivů nejen na hydrataci cementu, ale i na celkové vlastnosti kompozitních materiálů. Důsledkem pucolánové reakce s hydroxidem vápenatým dochází například ke snížení výsledného množství portlanditu, což má vliv na vlastnosti materiálu. Rozhodující vlastností pro použití pucolánů do malt je jejich pucolánová aktivita [11, 12].

3.3.3. Pucolánová aktivita

Pucolánová aktivita je schopnost reakce pucolánů s $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve vodném prostředí a za běžných teplot okolního prostředí (20°C). Pucolánová aktivita definuje dvě hodnoty, jednak maximální množství $\text{Ca}(\text{OH})_2$, se kterým je pucolán schopen reagovat, a dále definuje rychlost probíhající reakce. Obě tyto hodnoty závisí na charakteru použitého pucolánu, především na kvalitě a množství aktivních látek obsažených v pucolánu. Avšak reakce je ovlivněna také dalšími parametry, jako je poměr $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a pucolánu ve směsi, obsah vody, chemické složení, teplota,

specifický povrch nebo délka doby ošetřování. Pucolánová aktivita je ovlivněna mnoha proměnnými, tudíž různé typy pucolánů mají odlišnou pucolánovou aktivitu.

Stanovení pucolánové aktivity se může provádět různými způsoby, buďto na vlastní surovině, nebo v součinnosti pojiva a suroviny. Metody stanovování pucolánové aktivity lze rozdělit na přímé a nepřímé. Přímé metody sledují přítomnost a následný pokles množství $\text{Ca}(\text{OH})_2$ v průběhu pucolánové reakce. Mezi přímé metody patří například termogravimetrická analýza, odměrná analýza nebo rentgenová difrakční analýza. Pucolánovou aktivitu můžeme stanovit také pomocí nepřímých metod, a to sledováním mineralogie, fyzikálních a chemických vlastností testovaných vzorků [11].

3.3.4. Vliv pucolánů na vlastnosti čerstvé a zatvrdlé směsi

Zásadní vliv na vlastnosti čerstvých a zatvrdlých cementových kompozitů má granulometrie a chemické složení pucolánu, především pak procentuální zastoupení amorfního SiO_2 . Obsah amorfního SiO_2 v pucolánu by měl být nejméně 25 % hmotnostních. Proto je vhodné používání skelného recyklátu jako pucolánově aktivního materiálu, neboť sklo obsahuje až 85 % SiO_2 . Granulometrie neboli jemnost mletí výrazně ovlivňuje samotnou reakci. Čím je velikost částic pucolánu menší, tím lépe probíhá reakce s hydroxidem vápenatým $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Dále mohou tuto reakci ovlivňovat vytvrzovací podmínky (tj. teplota a relativní vlhkost okolního prostředí) [12].

V počáteční fázi pucolánové reakce dosahují zkušební tělesa nižších pevností v tlaku než referenční zkušební tělesa zhotovená pouze z portlandského cementu. Pucolánová reakce je totiž pomalejší ve srovnání s dobou hydratace portlandského cementu. Existují různé faktory, které ovlivňují rychlost pucolánové reakce (např. složení), ale pucolánová reakce s hydroxidem vápenatým pokračuje a dochází ke zhušťování mikrostruktury. Pevnosti v tlaku tak mohou být po roce až o 50 % vyšší než u referenčních vzorků. Malty s přidavkem pucolánově aktivních materiálů mohou zlepšit mechanickou odolnost, jsou odolnější vůči působení chemických látek a korozivním médiím. Podle studie H. Maraghechi a M. Maraghechi, kteří prováděli práci zaměřenou na pucolánovou reakci sodno-vápenato-křemičitého skla, bylo zjištěno, že zvýšením vytvrzovací teploty na 60°C dojde k urychlení pucolánové reakce skelného recyklátu a může mít také vliv na krystalinitu výsledného C-S-H gelu [12]. Podle studie Roz-Ud-Din Nassara bylo zjištěno, že použití jemně mletého

odpadního skla jako částečné náhrady cementu má pozitivní vliv na výslednou pevnost a trvanlivost malty, dále zlepšuje odolnost proti sorpční vlhkosti a také zlepšuje mrazuvzdornost malt [13].

3.4. Sklo

Sklo je anorganický amorfní materiál, používaný v mnoha průmyslových odvětvích, jako je sklářský průmysl, automobilový průmysl, stavebnictví nebo je také používán jako prvek architektury nebo umění [14].

3.4.1. Historie skla

Sklo bylo objeveno kolem roku 3 000 př. n. l. v Mezopotámii. Zpočátku se používalo pouze pro výrobu ozdob nebo korálek (viz obr. č. 10). Nešlo však o čiré sklo, jaké ho známe dnes, ale jednalo se o drobnější různě zbarvený, často nedokonale protavený sklovitý materiál, tzv. fajáns.



Obr. č. 10 Skleněný korálek (Jaroměř, 5-6. století př. n. l.) [14]

Skutečné předměty ze skla vznikaly až v době okolo roku 1 600 př. n. l. a začaly se pomalu rozšiřovat až do Evropy. Díky chemickým rozborům historického skla víme, že obsahovalo především oxid křemičitý, vápník a sodík, tudíž můžeme říci, že se jednalo o křemičité a sodnovápenaté sklo.

Svou historii má sklo také na našem území. V Čechách je přítomné od 2. tisíciletí př. n. l. a bylo přineseno v rámci výměnného obchodu především

Egyptřany. Od poloviny 14. století již české sklárny vyráběly téměř čiré sklo, ze kterého se zhotovovaly číše, poháry nebo také kostelní okna – vitráže. K další výrazné inovaci došlo za doby vlády Karla IV., začalo se používat okenní sklo. Čeští skláři prosluli v té době technologií zvanou „procédé de Bohéme“, tzv. český způsob. Jednalo se o foukání skla do válců, následné rozstřihnutí, rozvinutí zchlazené skloviny do roviny a vyhlazení. Touto technikou se vyráběla především barevná chrámová okna.

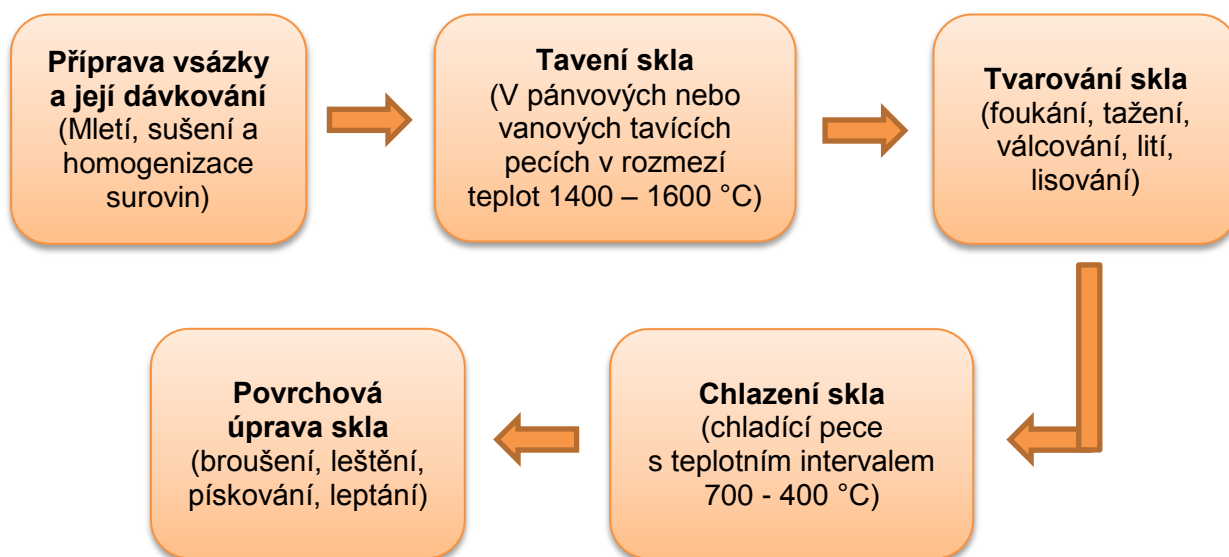
Skláři v Čechách patřili k nejlepším v Evropě a k technologickému vývoji skla přispěli několika vynálezy. Například český sklář František Kavalír vynalezl ve třicátých letech 19. Století první chemicky odolné sklo na světě. A dalším příkladem je vybudování první výrobní linky na plavené ploché sklo (Float process) v Evropě. V současné době výroba plochého skla způsobem Float proces zcela ovládla svět a bez plochého skla vyrobeného touto technologií si rozvoj celé řady průmyslových odvětví nelze představit [14].

3.4.2. Výroba skla

Základem pro výrobu skla je směs surovin, která se nazývá sklářský kmen. Základní surovinou jsou sklářské písky s obsahem 60-80 % SiO_2 . Požadavky na kvalitu sklářských písků (zrnitostní, minerální a chemické složení) se mění podle druhu vyráběného skla. Nejvýznamnějším ložiskem pro tyto písky v ČR je Střeleč a Provořín. Dalšími základními složkami běžných skel jsou CaO a alkálie (Na_2O a K_2O). CaO je do surovinové směsi (tzv. sklářského kmene) přidáván nejčastěji ve formě jemně mletého vápence (CaCO_3). Tavením kmene přechází uhličitan vápenatý na oxid vápenatý, jehož obsah upravuje rozpustnost a chemickou odolnost skla. Oba alkalické oxidy se do kmene přidávají také ve formě uhličitanů (soda - Na_2CO_3 , potaš - K_2CO_3). Obsah alkálií ve sklářském kmene ovlivňuje zejména teplotu tavení vsázky. Kromě hlavních sklotvorných surovin se při výrobě přidávají také pomocné látky se specifickými účinky, jako jsou barviva nebo čeřiva. Určitý podíl vsázky tvoří také drcené odpadní sklo (skleněné střepy), čímž dochází k úspoře primárních surovin a zároveň ke zrychlení tavícího procesu a zlepšení počáteční homogenity skloviny. Složením sklářského kmene a množstvím jednotlivých složek je možno ovlivňovat vlastnosti skla, jako je jeho hustota, pevnost, pružnost nebo tvrdost [14, 15].

3.4.2.1. Technologie výroby skla

Při výrobě skla se uplatňuje pět dílčích technologických procesů (viz obr. č. 11), mezi které patří příprava vsázky (sklářského kmene a přísad) a její dávkování, tavení skla ve sklářských tavicích pecích, tvarování, chlazení skla ve speciálních chladících zařízeních a jako poslední technologie je povrchová úprava skla (broušení, leštění, pískování a další).



Obr. č. 11 Schéma technologických procesů při výrobě skla

3.4.3. Obecné vlastnosti skel

Pro výrobu skla je důležité znát vlastnosti skla v roztaveném stavu jako je viskozita, hustota, krystalizační schopnost, tepelná a elektrická vodivost. Shrnutí významných fyzikálních a mechanických vlastností skla je uvedeno v tab. č. 2.

Hustota skla je ovlivněna především chemickým složením, teplotou a rychlostí chlazení taveniny. Hustota klasického křemenného skla je přibližně $2,20 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Tvrdost skla závisí hlavně na chemickém složení a tavicí teplotě. Podle Mohsovy stupnice se sklo pohybuje v intervalu 6 - 7. Díky rychlému zatuhnutí vnitřní struktury je vnější povrch skel tvrdší než jejich vnitřní část. Jakmile je však jejich povrch poškozen, ztrácejí skla pevnost. Pevnostní charakteristiky skla jsou ovlivněny obsahem SiO_2 a Na_2O , teplotou, rozměry vzorku nebo vnitřními defekty. Pevnost skla je možné zvýšit pomocí povrchové úpravy nebo metodou tepelného tvrzení (tato metoda se provádí prudkým ochlazením povrchu skla, které vyvolá tlakové předpětí na povrchu).

Tepelná odolnost nejvíce závisí na chemickém složení skla a dále na koeficientu teplotní roztažnosti, který by měl být menší než $50 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$.

Chemická odolnost je schopnost skla odolávat proti působení kyselin, louhů a plynům z ovzduší. Pokud je sklo málo odolné, mohou složky obsažené v ovzduší způsobit vznik povlaku na skle, který je důsledkem koroze, a sklo tak ztrácí svůj lesk. Chemicky odolná jsou především skla křemičitá, avšak rozpouštějí se v kyselině fluorovodíkové za vzniku plynného SiF_4 [16].

Tab. č. 2 Tabulka fyzikálních a mechanických vlastností skla [14].

Vlastnosti	Jednotka	Rozpětí hodnot
hustota	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2200 - 6000
pevnost v tlaku	MPa	700 - 1200
pevnost v tahu	MPa	30 - 90
pevnost v ohybu	MPa	40 - 190
modul pružnosti	GPa	50 - 90
součinitel délkové teplotní roztažnosti	K^{-1}	$6 \cdot 10^{-6}$ - $9 \cdot 10^{-6}$
součinitel tepelné vodivosti	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0,6 - 0,9
měrná tepelná kapacita	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	840 - 1000
tvrdost podle Mohse	-	6 - 7
index lomu	-	1,5 - 2,25

3.4.4. Druhy skla

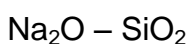
Sklo a skelné materiály je možno rozdělit podle celé řady hledisek, a to zejména podle původu, chemismu, způsobu výroby a použití (viz obr. č. 12, 13, 14).

- Podle původu se jedná o skla přírodní (skla, která vznikla přírodními procesy, nejčastěji vulkanickou činností) a skla umělá (vznikají buď tavením sklářského kmene, nebo jako vedlejší produkt spalování uhlí – popílky, tavné strusky).

- Dělení skel dle chemismu:



křemenné sklo



tzv. rozpustné (vodní sklo)



křemičité sodnovápenaté sklo

$K_2O - CaO - SiO_2$ a $K_2O - PbO - SiO_2$ křišťálová skla

$Na_2O - B_2O_3 - SiO_2$

tepelně odolná skla

$CaO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2$

nízkoalkalická skla

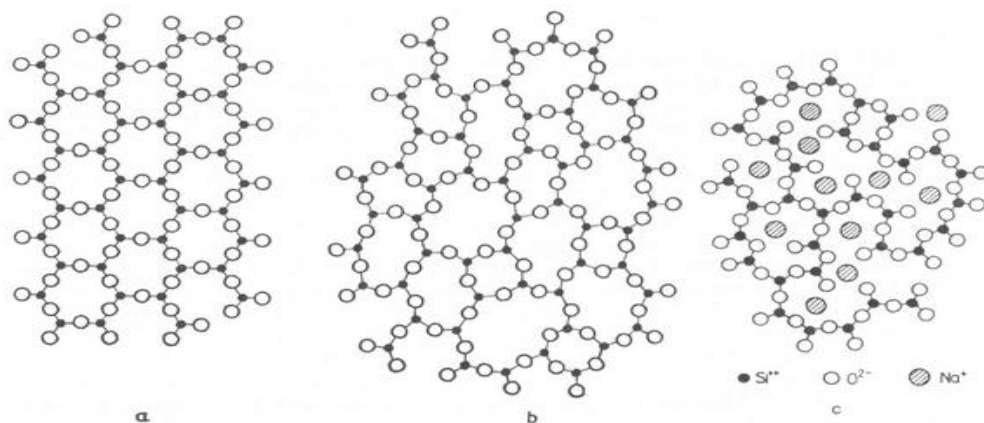
- A podle způsobu průmyslové výroby a použití dělíme sklo na ploché tažené, válcované, tvarované, foukané, pěnové sklo a skleněná vlákna [14, 15].



Obr. č. 12, 13, 14 Druhy skleněných výrobků [17].

3.4.5. Struktura skla

Sklo je přechlazená kapalina, která vlivem vysoké viskozity nemůže krystalizovat. První poznatky o struktuře skla formuloval Zachariasen, jehož teorie tzv. nahodilé sítě spočívá ve strukturní neuspořádané spojitě mřížce. Struktura amorfních látek postrádá pravidelné, systematické a periodické uspořádání základních stavebních jednotek na delší vzdálenosti (viz obr. č. 15). Při dostatečně rychlém ochlazení skla ve výrobním procesu se nestačí vytvořit krystalická struktura [14].



Obr. č. 15 Plošné znázornění rozdílů mezi strukturami [14]

- Struktura křemene (krystalické SiO_2).
- Struktura křemenného skla (skelné SiO_2).
- Struktura běžného skla.

3.4.8. Recyklace a znovuvyžití odpadního skla

Ochrana životního prostředí a zachování přírodních zdrojů je problémem u výroby některých stavebních materiálů a s nimi spojeným i znečišťováním ovzduší (emise CO₂). Využití pevného odpadu (např. v betonu či maltách) má značné výhody, především snížení nákladů na zpracování odpadů, dále šetří energii jak při těžbě vstupních materiálů, tak zejména při samotné výrobě skla (cca 30 % úspor na jedné tuně skloviny) [15]. Významně odlehčí skládkám komunálních odpadů a sníží potřebu zakládání nových skládek, pomáhá ke snižování emisí skleníkových plynů, zachování přírodních surovin a zlepšení některých vlastností betonů či malt. Pro zpracování odpadního skla jsou speciální linky (viz obr. č. 16). Recyklace je z ekologického hlediska nejlepší volbou, avšak v některých případech nelze použít odpadní suroviny pro výrobu nových materiálů z důvodu dodržení kvality surovin, jak je tomu například u výroby skla. V důsledku těchto výrobních kritérií se zvyšuje množství odpadního skla, a to především barevného skla. Proto je nutné hledat alternativní možnosti využití těchto odpadů [21, 22, 15].

Skleněný odpad lze rozdělit do dvou skupin:

- Prvním zdrojem je skleněný odpad vzniklý při výrobě skla a skleněných výrobků. Z důvodu technologie výroby (kde je kladen velký důraz na čistotu suroviny a složení skloviny) se recyklují pouze odpady vzniklé při výrobě skleněných vláken, užitkového skla a skleněných polotovarů pro výrobu bižuterie.
- Dalšími zdroji odpadního skla jsou skleněné obaly (zelené, hnědé a čiré sklo), autoskla, stavební a demoliční činnosti (plochá skla, zářivky, a další) a komunální odpad [15].

Množství recyklace skla oproti jiným druhům odpadu je v mnoha zemích poměrně nízká. Například v USA bylo v roce 2010 vyprodukováno 11,53 mil. tun odpadního skla a recyklováno bylo pouze 27,1% a zbylé množství bylo uloženo na skládky [21]. V Hongkongu je denně vyprodukováno asi 300 tun odpadního skla a pouze 3 % z tohoto množství jsou dále využity jako sekundární materiál [12, 23 26].



Manipulace se střepy pomocí nakladače



Předdrtič s magnetickou separací kovových částí



Odstranění hrubých nečistot pomocí ruční separace



Výrobní linka



Konečné vyčištění pomocí optoelektronického zařízení



Třídění na požadované frakce



Expedice skelného recyklátu

Obr. č. 16 Schéma znázorňující zpracování skla [33]

Odpadní sklo je možno využít pro své chemické složení a fyzikální vlastnosti jako náhradu kameniva nebo jako částečnou náhradu cementu do betonu či malt. Před použitím skelného odpadu je důležité jeho důkladné očištění, odstranění etiket, apod. Po promytí a vysušení je vhodné sklo pomletím zmenšit na požadovanou velikost částic v čelistovém nebo jiném drtiči, aby byla zvýšena jeho aktivita. Odpadní sklo pozitivně přispívá ke zlepšení mechanických vlastností malt, a také k mikrostrukturně - technických vlastností malt. Skelný recyklát má zanedbatelnou hodnotu absorpce vody, vynikající tvrdost a odolnost proti otěru. Při použití do betonu či malt lze díky C-S-H produktům dosáhnout příznivých změn ve struktuře hydratované cementové pasty a mezifázových přechodových zón mezi kamenivem a betonem. Negativním jevem při použití skla může být možnost vzniku alkalicko-křemičité reakce (ASR).

Dle výzkumu Kiang Hwee Tan a Hongjian Du výsledky zkoušek ukázaly, že použití částic odpadního skla ve formě jemného plniva sníží tekutost a zvýší hustotu malty a zároveň sníží obsah vzduchu v maltě. Dále bylo prokázáno zvýšení trvanlivosti, a to zejména z hlediska odolnosti proti pronikání chloridových iontů. Ale na druhou stranu odpadní sklo jako plnivo zhoršilo mechanické vlastnosti kvůli mikroprasklinám v maltě a také zde bylo poměrně velké smrštění při sušení [21, 22].

Další negativní stránkou použití odpadního skla do malt či jiných stavebních materiálů je ekonomická náročnost mletí, ale to se do jisté míry dá vykompenzovat snížením dávky cementu a jeho náhrady mletým sklem [21, 22].

Použití skelného recyklátu (viz obr. č. 17) jako konkrétní složky je relativně nová technologie, která ještě vyžaduje intenzivní výzkumnou práci a nutnost definovat přesné charakteristiky pro recyklované sklo v betonu [12, 23, 25, 26, 27].



Obr. č. 17 Skelný recyklát plochého skla [33]

3.4.6. Pucolánová aktivita skla

Většina skel se vyznačuje vysokým obsahem amorfního SiO_2 , což je typické pro latentně hydraulické látky. Tyto látky po smíchání s vodou samy netvrdnou. Jsou-li však velice jemně pomlety, mohou reagovat v přítomnosti vody a rozpuštěného hydroxidu vápenatého za vzniku sloučenin vápenatých silikátů a vápenatých aluminátů, jejichž obsah má za následek postupné narůstání pevností. Tyto sloučeniny jsou velice podobné těm, které vznikají při tvrdnutí hydraulických látek. Sklo řadíme mezi pucolány, neboť obsahuje poměrně velké množství aktivního oxidu křemičitého (až 85 %). Před použitím skla jako pucolánu, musí být nejdříve upraveno, a to mletím na velikost částic menší než $75 \mu\text{m}$ (dle provedených výzkumů). Mikro-mleté odpadní sklo lze poté využít jako částečnou náhradu cementu, pokud tvoří obsah amorfního oxidu křemičitého nejméně 25 % z hmotnosti skla. V maltě pak dochází k pucolánové reakci s hydroxidem vápenatým (obsažen v cementu) a dochází ke vzniku sekundárního hydrátu křemičitanu vápenatého (C-S-H gel). Hydroxid vápenatý je přítomen v cementu, proto nemůže být skelný prášek použit jako celková náhrada cementu. Pucolánová reakce je příčinou příznivých změn v mikrostruktuře, kde dochází ke snížení objemu pórů, mikrostruktura je tak hustší a méně propustná pro vodu. Použitím odpadního skla se může zlepšit kvalita cementové malty, což přispívá ke zvýšení trvanlivosti, pevnosti a odolnosti malty. Největší vliv na výslednou strukturu malty mohou mít chemické složení, velikost skleněných částic a nečistoty obsažené ve skleněném prachu [23, 28].

3.4.7. Alkalicko-křemičitá reakce

Pokud je sklo upraveno v podobě mikromletých částic, může být použito jako částečná náhrada cementu nebo jako plnivo do malt či betonu. Negativním vlivem skelného recyklátu přidávaného do malt je velmi vysoký obsah Na_2O , který by mohl zapříčinit vznik alkalicko-křemičité reakce kameniva, která má za následek tvorbu nežádoucích produktů, jež mohou svými objemovými změnami vyvolat až destrukci matrice. Chemické složení skla závisí především na použitých surovinách, které se mírně liší pro každý typ skla. Nejběžnější jsou sodnovápenatá skla, která se skládají z více než 70 % amorfního SiO_2 , více než 12 % Na_2O a asi z 5 % CaO [23, 28].

Amorfní oxid křemičitý obsažený ve skle je velmi náchylný na alkalické prostředí a vlivem probíhající chemické reakce dochází ke vzniku monomeru $\text{Si}(\text{OH})_4$, což by mohlo dále reagovat s alkáliemi jako je Na^+ , K^+ a Ca_2^+ za vzniku

ASR gelu. Tento gel může absorbovat vodu a poté bobtnat v mikrostruktuře malty, což má za následek vznik vnitřního pnutí. Pokud je překročena pevnost malt, může dojít vlivem vnitřního pnutí k poškození, popraskání nebo k destrukci malty. Odpadní sklo může být použito do malt za předpokladu, že bude zmírněna expanze způsobená alkalicko-křemičitou reakcí (ASR). Na ASR má vliv barva skla, použité množství a především velikost částic. Ze studie v Singapuru bylo zjištěno, že vlastnosti malt, do kterých je přidán skelný recyklát, závisí na barvě skel. Po přidavku čírého skla byla expanze alkalicko-křemičité reakce vyšší, než po přidavku skla zeleného či hnědého. Expanze je dle této studie zmenšena s obsahem menších částic skelného recyklátu [22].

Alkalicko-křemičitou reakci lze zjednodušeně popsat rovnicí:



3.4.7.1. Omezení vzniku alkalicko-křemičité reakce

Pokud cementové malty obsahují plnivo s obsahem aktivního SiO_2 není možné této reakci zcela zabránit. Avšak můžeme se snažit několika způsoby o omezení vzniku ASR. V suchých vnitřních prostorech, kde chybí vlhkost, se tato reakce téměř nevyskytuje. Tudíž jedním ze způsobů je snížit vlhkost okolního prostředí. Dalším způsobem omezení vzniku ASR je snížit obsah alkálií v cementu. Množství C-S-H gelu a následná expanze závisí na jeho chemickém složení, zejména na poměru CaO a $(\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{O})$ [28].

Podle výzkumu A. Dhira a kol. jsou zelená skla nejméně reaktivní v alkalicko-křemičité reakci, vzhledem k vysokému obsahu Cr_2O_3 , který se přidává pro nazelenalou barvu skla. Hnědá skla vykazují podobně malé expanze alkalicko-křemičité reakce jako zelená skla, neboť jejich chemické složení se liší jen nepatrně. Tudíž dalším způsobem jak snížit možnost vzniku alkalicko-křemičité reakce je zvolit vhodný typ skelného recyklátu [22].

U velmi jemných částic dochází k ASR podobně jako u částic hrubších, ale tlak při bobtnání zůstává vlivem menších částic tak malý, že nevzniká žádné poškození vlivem objemových změn ve formě trhlin. Tudíž čím menší budou částice skelného recyklátu, tím menší je pravděpodobnost poškození malty vlivem alkalicko-křemičité reakce [28].

3.5 Přínos recyklátů a odpadních materiálů pro životní prostředí

3.5.1. Recyklace odpadů

Pojem „recyklace“ pochází z anglického slova „recycling“, což znamená recirkulaci nebo vrácení zpět do procesu, znovuvyužití, znovuzavedení do cyklu. Recyklace je výraz pro takové nakládání s odpadem, které vede k jeho dalšímu využití. Jedná se o opětovné využití odpadů a jejich vlastností jako „druhotné suroviny“ ve výrobním procesu. S recyklací je tedy spojeno více faktorů, nejen využití odpadu jako druhotné suroviny, ale také snaha minimalizovat spotřebu primárních zdrojů, snížit spotřebu energie, škodlivých účinků a objem skládkových materiálů [29].

Recyklace umožňuje šetřit obnovitelné i neobnovitelné zdroje a v některých případech může omezovat zátěž životního prostředí. Recyklace se dělí na přímou, kdy se znovu využívá věcí bez další úpravy, a na nepřímou, kdy je nutno odpadní materiál před použitím znovu zpracovat. Aby mohl být odpad recyklován, musí být roztříděn podle druhu materiálu [29].

3.5.2. Proč používat recyklované materiály

Stavební průmysl je jedním z hlavních spotřebitelů přírodních zdrojů a zároveň také jedním z velkých zdrojů odpadů. Jedním ze způsobů jak zachovat přírodní suroviny a minimalizovat množství odpadů je recyklování a znovu využití odpadů jako stavebních materiálů (například využití skelného recyklátu, betonového či asfaltového recyklátu a jiných odpadních látek). Tento přístup pomáhá šetřit energii, snížit emise znečišťujících látek a eliminovat náklady na skládkování [30].

Ve vývoji stavebnictví a ve výzkumu stavebních materiálů dnes hraje důležitou roli také environmentální problematika, řešící minimalizaci vlivu stavebních činností na ekosystémy, což je například omezení znečištění vody, ovzduší a půdy, snižování hluku, zmenšení dopravních vzdáleností mezi stavenišťem a místem výroby stavebních materiálů, zvyšování trvanlivosti stavebních materiálů a tím i životnosti staveb a další [31].

Důležitou oblastí je snaha o co nejefektivnější a nejšetrnější využívání surovinových zdrojů vzhledem k míře jejich neobnovitelnosti. Proto by měly být stávající stavební materiály recyklovány (viz obr. č. 18) a také by měla být snaha o znovu využití stavebních i jiných průmyslových odpadních materiálů, které lze ve

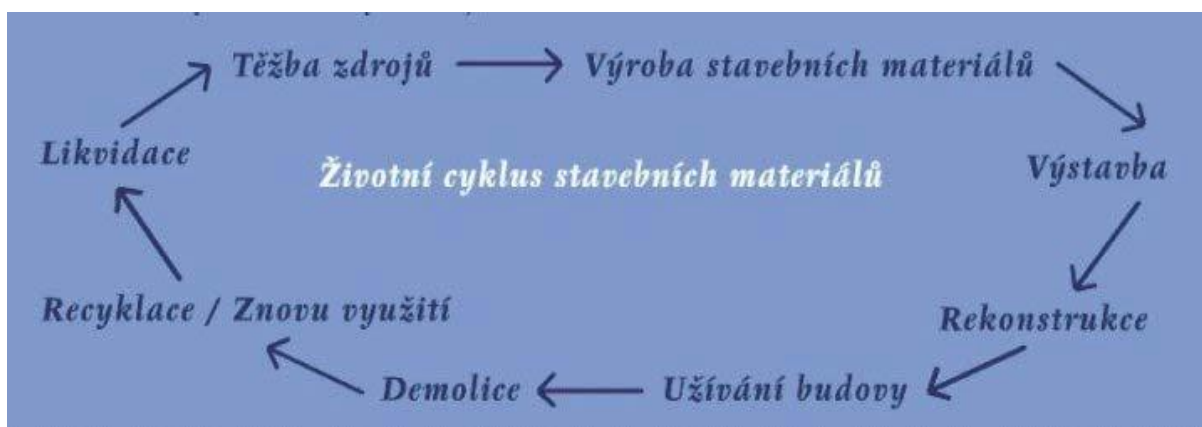
stavebnictví znovu využít například jako pojiva, přísady či plniva. Technologie využívající druhotné suroviny mohou vést ke zlepšení užitných vlastností konečného výrobku a v některých případech se podílet i na snižování objemu emisí [31].

Produkce odpadních materiálů se dostává do popředí zájmů z těchto hlavních důvodů:

- Environmentální – znečišťování životního prostředí, možnost úniku toxických látek, nedostatek místa pro zakládání nových skládek, apod.
- Zdravotní – kvalita života lidí v blízkosti skládek či spaloven a s tím spojená možnost poškození lidského zdraví.
- Ekonomický – ztráta znovu využitelných zdrojů, náklady spojené se skládkováním, spalováním, apod.

Odpadní suroviny mohou být ve formě druhotných surovin přínosné ze všech výše uvedených hledisek. Mohou být použity jako náhrada primární suroviny, nebo jsou vneseny do technologie za účelem zlepšení některých parametrů výsledných stavebních hmot díky jejich mimořádným vlastnostem.

Mezi průmyslové odpadní materiály používané jako náhrada stavebních materiálů řadíme například odpady z elektrárenských a teplárenských provozů vznikající při spalování uhlí (popílký). Dále zde řadíme strusku, jedná se o vedlejší produkt hutní výroby. Energosádrovec, což je jeden z odpadních sádrovců, který vzniká při odsiřování spalin. A velkou skupinou průmyslových odpadů jsou stavební a demoliční odpady (zde řadíme veškerý odpad vzniklý například při demolici či rekonstrukci stavby).



Obr. č. 18 Schéma životního cyklu stavebních materiálů [32]

Před samotnou recyklací musí být odpad nejdříve roztríděn podle druhu materiálu, což má za následek zvyšování nákladů. Nejvýhodnější je, když je odpad tříděn přímo v domácnostech či firmách. V České republice se třídí hlavně kovy, papír, sklo a plasty. Míra recyklace odpadů se v ČR každým rokem pomalu zvyšuje, avšak ve srovnání s ostatními zeměmi EU je nižší. Celkové odhadované množství stavebního odpadu v ČR činí asi 10 mil. tun ročně. A z toho je recyklováno necelých 10 %, což nedosahuje ani poloviny objemů běžných v zemích Evropské unie [29, 31].

Jsou však i opačné názory, že třídění a recyklace nejsou žádným řešením, ale jedná se pouze o druhotné opatření, jak snižovat celkové množství odpadu tím, že se celý nebo jeho část opět využije. Hlavním cílem by mělo být vzniku odpadu předcházet [29].

4. Praktická část

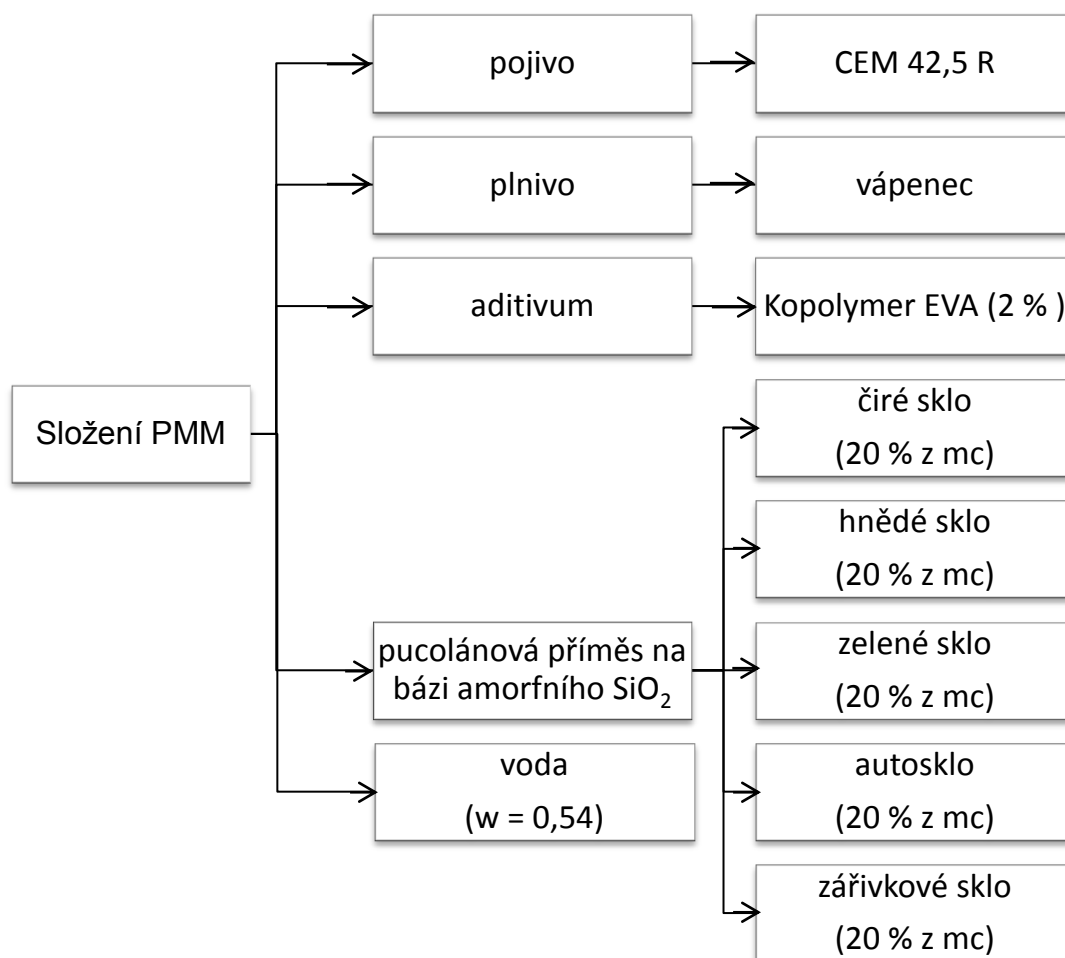
4.1 Metodika práce

Metodika práce je rozdělena do čtyř etap, ve kterých jsou hodnoceny vlastnosti vstupních surovin a výsledných malt, dále je navržena receptura směsí. Postup každé etapy je znázorněn na níže uvedených schématech (obr. č. 19 až 23).

4.1.1 ETAPA I

První etapa je zaměřena na volbu vhodných vstupních surovin, návrh receptury směsi, a také na ověření vlastností vstupních surovin.

Jako pucolánové příměsi na bázi amorfního SiO_2 byly zvoleny různé druhy skelného recyklátu (čiré sklo, hnědé sklo, zelené sklo, autosklo a zářivkové sklo). Prvotním krokem bylo důkladné očištění jednotlivých druhů skel a následovala vhodná úprava skla na požadovanou velikost částic (0,063 mm). Při navrhování receptury byla zvolena částečná náhrada cementu skelným recyklátem (viz obr. č. 19).

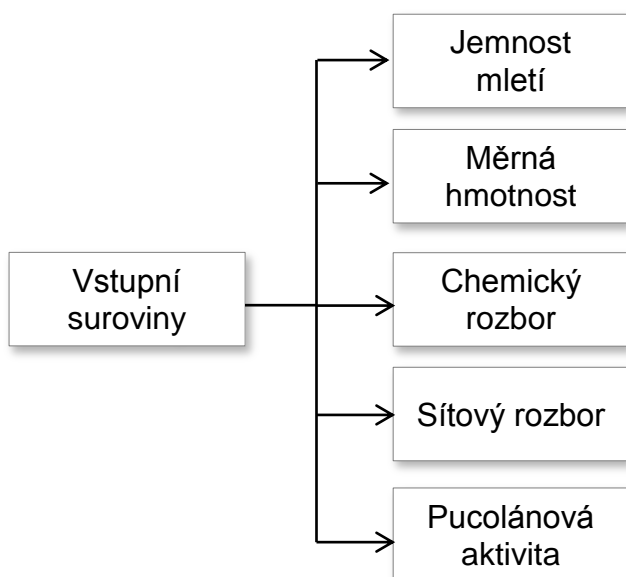


Obr. č. 19 Složení PMM s přidavkem pucolánové příměsi na bázi amorfního SiO_2 jako částečná náhrada cementu

Níže uvedená tab. č. 3 navrhuje složení a posuzované zkoušky na vstupních surovinách jsou znázorněny na obr. č. 20.

Tab. č. 3 Receptura testovaných polymery modifikovaných malt

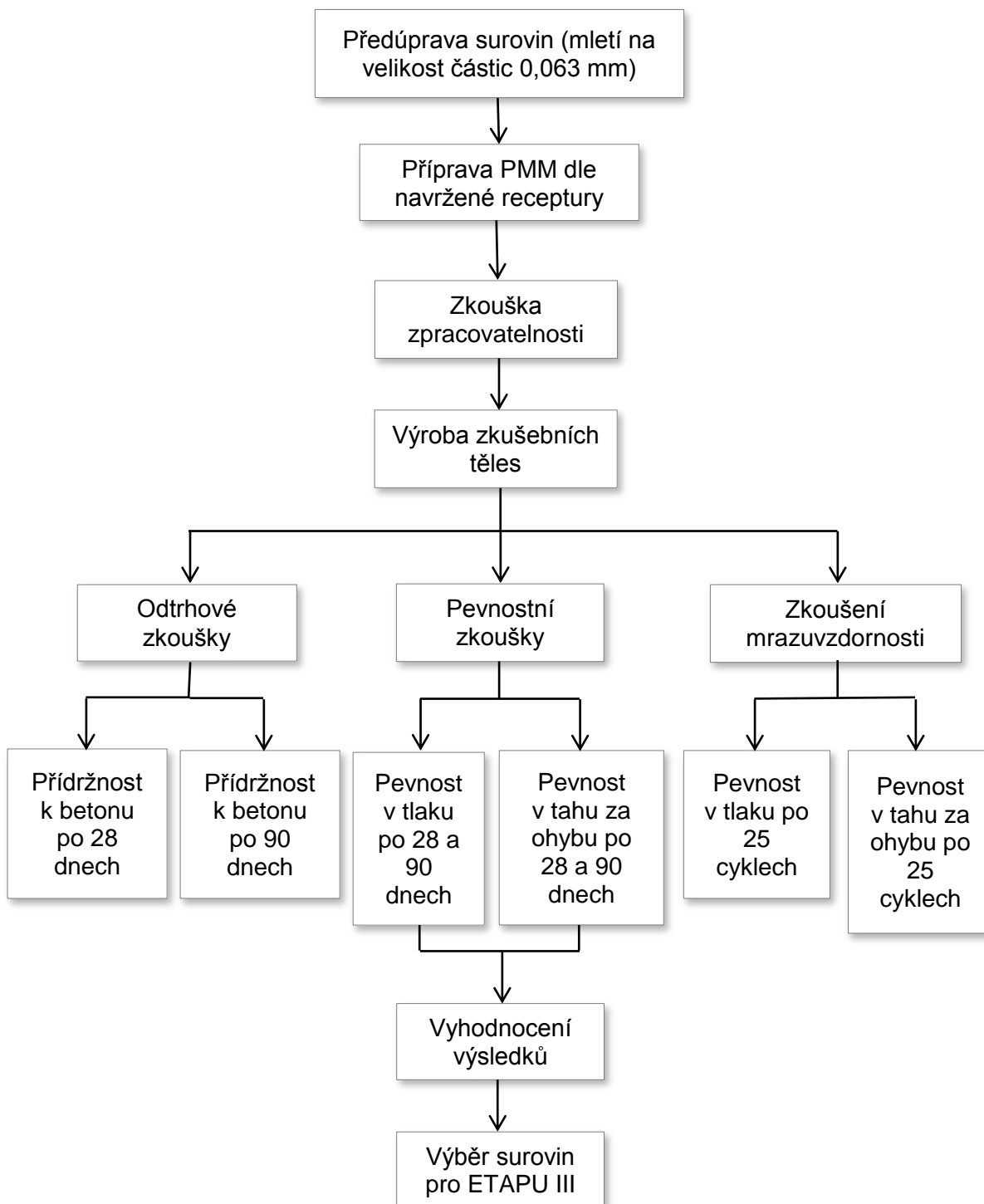
Složení směsi		
Suroviny	Množství [%]	Množství [g/1000 g]
CEM 42,5 R	20 %	200 g
Vápenec Vápenná 0 – 0,2 mm	15 %	150 g
Vápenec Vápenná 0,2 – 0,5 mm	15 %	150 g
Vápenec Vápenná 0,5 – 1,0 mm	15 %	150 g
Vápenec Vápenná 1,0 – 1,4 mm	30 %	300 g
Kopolymer EVA	2 %	20 g
Záměšová voda	w = 0,54	250 ml
Skelný recyklát	20 % z mc	50 g



Obr. č. 20 Prováděné zkoušky na vstupních surovinách

4.1.2 ETAPA II

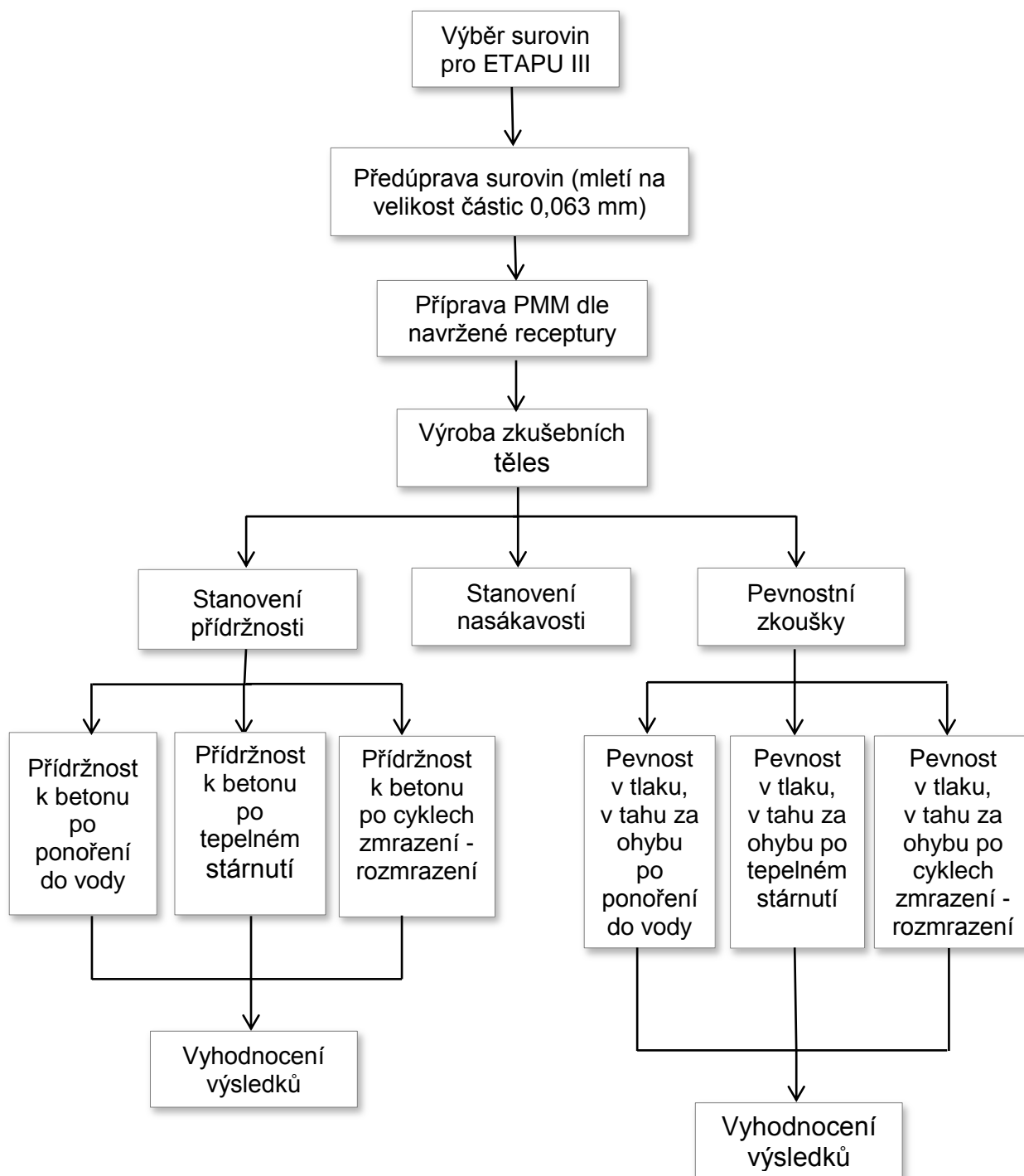
Etapa II je zaměřena na výrobu polymery modifikovaných malt dle navržené receptury za použití různých druhů skelného recyklátu jako částečné náhrady cementu. Na připravených směsích bylo provedeno stanovení konzistence, a poté byly vytvořeny zkušební trávce o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Na těchto vzorcích byly provedeny zkoušky uvedené na obr. č. 21.



Obr. č. 21 Metodika provádění ETAPA II

4.1.3 ETAPA III

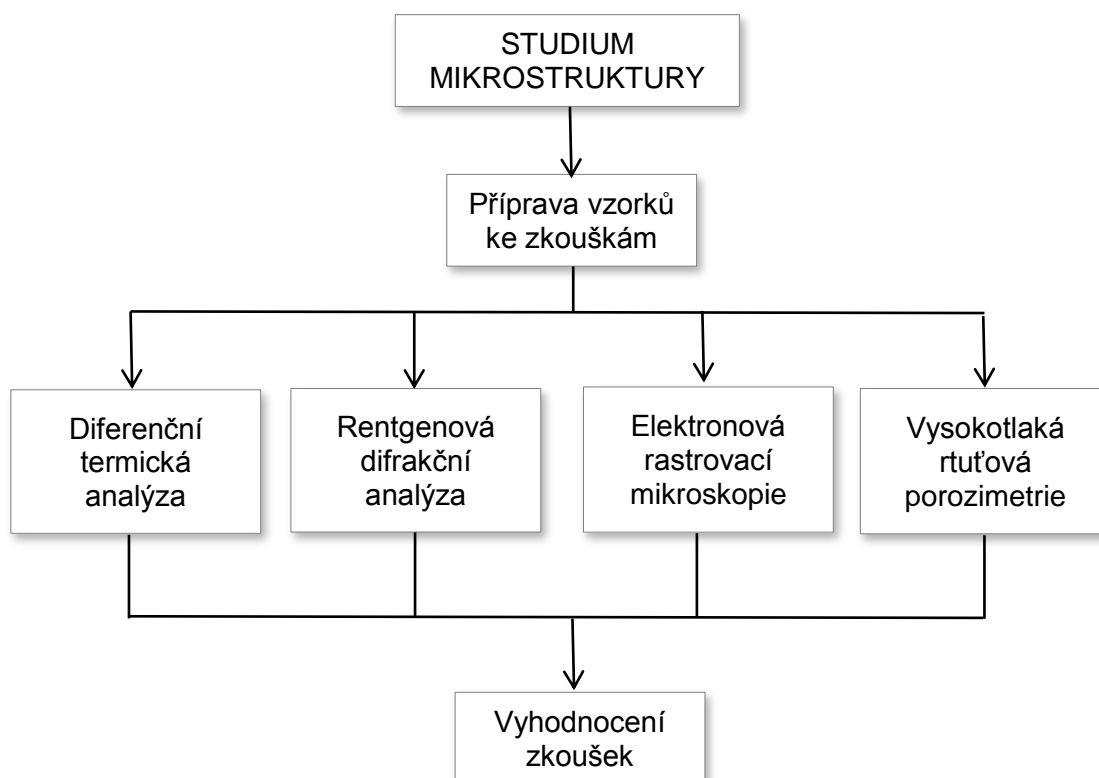
V této etapě byly na základě výsledků předchozí etapy vybrány pouze tři směsi s nejlepšími výsledky zkoušek a také referenční směs pro další porovnání. V této etapě bylo provedeno podrobnější ověření vlastností vybraných malt dle alternativních zkušebních postupů (viz obr. č. 22).



Obr. č. 22 Metodika provádění ETAPA III

4.1.4 ETAPA IV

V poslední etapě byly provedeny zkoušky sledující mikrostrukturu hmot. Studium mikrostruktury bylo provedeno na vzorcích odebraných ze zlomků zkušebních těles polymery modifikovaných malt. V této etapě byly použity metody diferenční termické analýzy, rentgenové difrakční analýzy, vysokotlaká rtuťová porozimetrie a elektronová rastrovací mikroskopie (viz obr. č. 23).



Obr. č. 23 Metodika provádění studia mikrostruktury – ETAPA IV

4.2 Popis prováděných zkoušek

4.2.1 Předúprava surovin – skelného recyklátu

Jednotlivé typy skla, byly před použitím dobře očištěny a poté pomocí kladiva zmenšeny na malé střepy (viz obr. č. 24). Dále bylo sklo mleto po dobu 3 minut na vibračním diskovém mlýně (viz obr. č. 25). Z důvodu omezení vzniku alkalicko-křemičité reakce s amorfním SiO_2 byla pro skelný recyklát zvolena velikost částic pod 0,063 mm (viz obr. č. 26), a to na základě vědeckého výzkumu M. Mirzahosseini a K. A. Ridinga, jejichž výsledky ukázaly, že vznik ASR reakce je omezen při velikosti částic 0,075 - 0,063 mm.



Obr. č. 24 Skleněné střepy

Obr. č. 25 Mletí střepů

Obr. č. 26 Prosévání skla

4.2.2 Laserová difrakční analýza

Tato metoda slouží pro stanovení velikosti částic jemných sypkých materiálů používaných jako příměsi nebo plniva do malt. Princip metody laserové difrakce je založen na měření intenzity laserového záření vyvolaného bodovým zdrojem a procházejícího měřeným vzorkem, který je rozptýlen v disperzním prostředí. Úhel odrazu laserového paprsku je tím větší, čím menší je velikost částic. Záznam výše intenzity odraženého laserového paprsku vyjadřuje přímo úměrnou závislost na velikosti částic. Vysoká intenzita odraženého laserového paprsku znamená velké částice, a naopak nízká intenzita znamená malé částice.

4.2.3 Měrná hmotnost

Měrná hmotnost byla stanovena pyknometricky dle ČSN 72 2113. Měrná hmotnost je definována jako hmotnost 1 cm^{-3} suchého materiálu bez pórů a dutin vyjádřena v $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Pro stanovení měrné hmotnosti jsou využívány nádoby

s kalibrovaným objemem, tzv. pyknometry. Dle předepsaného zkušební postupu byla vážením zjištěna hmotnost suchého pyknometru, poté byla zjištěna jeho hmotnost po naplnění destilovanou vodou a nakonec byl pyknometr naplněn vodou a vzorkem a poté byla vážením zjištěna jeho hmotnost. Z těchto získaných hodnot vypočítáme měrnou hmotnost v $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a to pomocí níže uvedeného vzorce:

$$\rho = \frac{(m_2 - m_1) \cdot \rho_s}{m_4 - m_3 - m_1 + m_2}$$

Kde:

m_1 ...hmotnost suchého pyknometru v g

m_2 ...hmotnost pyknometru se vzorkem v g

m_3 ...hmotnost pyknometru s vodou v g

m_4 ...hmotnost pyknometru s vodou a vzorkem v g

ρ_s ...hustota vody $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$

4.2.4 Pucolánová aktivita

Pucolánová aktivita byla stanovena Chapelleho testem. Výsledek zkoušky je vyjádřen jako množství $\text{Ca}(\text{OH})_2$ v mg vázaného na 1 g pucolánu. Metoda spočívá v reakci určitého množství $\text{Ca}(\text{OH})_2$ s 1 g pucolánu, který je za stálého míchání ve vodě o teplotě 90°C po dobu 16 hodin. Na konci zkoušky se pomocí titrace HCl stanoví celkový obsah $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve filtrátu.

4.2.5 Stanovení konzistence čerstvé malty

Stanovení konzistence bylo provedeno dle harmonizované normy ČSN EN 1015-3. Ihned po zamíchání malty je stanovována konzistence, a to dle předepsaných postupů. V prvním kroku je nutno navlhčit desku i kovový komolý kužel, ten se plní ve dvou vrstvách a každá se zhutní 10 rázy dusadla. Přebytečná malta se setře a poté opatrně zvedneme komolý kužel. Maltu podrobíme otřesům střešacího stolku a to 15 rázy s frekvencí jeden zdvih za sekundu. Průměr vzniklého koláče změříme ve dvou na sebe kolmých směrech. Výsledkem je průměr ze dvou provedených měření rozlité malty v mm.

4.2.6 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu

Zkouška pevností v tahu za ohybu byla provedena dle normy ČSN EN 12808-3 na trámcích o normových rozměrech 40 x 40 x 160 mm, které jsou uloženy po dobu 27 dní ve standardním prostředí o teplotě (23 ± 2) °C a relativní vlhkosti vzduchu (50 ± 5) %. Po ukončení kondicionování se zkušební těleso vloží do hydraulického lisu tak, aby jednou stranou spočíval na podpěrných válcích a jeho podélná osa byla kolmá k podpoře. Hodnota pevnosti v ohybu byla vypočtena jako průměr ze tří stanovených hodnot dle vzorce:

$$R_f = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad [\text{MPa}]$$

Kde:

F...zatížení vyvolané lisem potřebné pro zlomení zkušebního tělesa [N]

b...šířka průřezu zkušebního tělesa [mm]

h... výška lámaného průřezu [mm]

l... rozpětí podpor [mm]

4.2.7 Stanovení pevnosti v tlaku

Zkouška byla provedena na polovinách hranolu rozlomeného při ohybové zkoušce. Zlomky vzorku se vloží mezi dvě destičky (plocha „S“), které mají rozměry podle průřezu zkušebního tělesa a plynule se zatíží tlakem kolmo na směr zhutnění až do porušení. Pevnost v tlaku R_c se spočítá dle vzorce:

$$R_c = \frac{F}{S} \quad [\text{MPa}]$$

Kde:

F... zatížení vyvolané lisem potřebné pro porušení zkušebního tělesa [N]

S... tlačná plocha [mm²]

4.2.8 Mrazuvzdornost

Zkoušení mrazuvzdornosti proběhlo dle ČSN EN 12 808-3. Zkouška byla provedena na zkušebních tělesech o velikosti 40 x 40 x 160 mm, které byly ponechány po dobu 28 dní ve standardních laboratorních podmínkách. Před zmrazovacími a rozmrazovacími cykly se vzorky ponoří do vody o teplotě $(21 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Tělesa se vyjmou z vodního uložení a vloží se do cyklovacího zařízení, v němž jsou vystavovány 25 cyklům při střídavé teplotě $-20 ^\circ\text{C}$ a $+20 ^\circ\text{C}$ (za spolupůsobení vody), a to v přesně stanovených intervalech. Po skončení 25 cyklů se tělesa vyjmou ze zařízení a zkouší se jejich pevnost v tahu za ohybu a poté se vypočítá součinitel mrazuvzdornosti jako poměr průměrné hodnoty pevnosti v tahu za ohybu zmrazovaných a nezmrazovaných trámů. V případě že je tento součinitel nižší než 0,75, je materiál charakterizován jako nemrazuvzdorný.

4.2.9 Stanovení přídržnosti

Pro stanovení přídržnosti byl zvolen alternativní zkušební postup, který byl inspirován normou ČSN EN 1348. Namíchaná maltová směs dle receptury se nanese ve velmi tenké vrstvě na očištěný a navlhčený povrch stavebního prvku – betonové desky, poté se nanese na povrch desky tlustší vrstva malty a roztáhne se plochou stěrkou po celém obvodu desky. Přídržnost se provádí pomocí kovového terče, který je k podkladu nalepen pomocí lepidla, po obvodu terče se materiál stanoveným způsobem prořízne tak, aby byl odtrh proveden na definované ploše. Poté se připevní odtrhoměr k terči a je proveden odtrh. Do výsledků je nutno zaznamenat nejen při jaké síle došlo k odtržení, ale také místo odtrhu (odtrženo v maltě, odtrženo v lepidle, odtrženo v ploše styku malty a betonové desky atd.) Pokud je místem odtrhu plocha terče (odtrženo v lepidle nebo v místě styku lepidla a terče, případně lepidla a zkoušeného povrchu) je nutno zvolit kvalitnější lepidlo.

4.2.9.1 Počáteční přídržnost

Připravená zkušební tělesa se uloží na 27 dní ve standardních podmínkách, po uplynutí tohoto času jsou ke zkušebním deskám přilepeny kovové terče pomocí epoxidového lepidla. Po jeho vytvrzení lepidla se stanoví přídržnost malty k podkladu pomocí tahové zkoušky.

4.2.9.2 Přídržnost po ponoření do vody

Zkušební tělesa se kondicionují za standardních podmínek po dobu 7 dní, poté se ponoří do vody při standardní teplotě. Po 20 dnech jsou zkušební tělesa vytažena z vodního uložení a přilepí se k nim kovové terče, po 7 hodinách se tělesa opět položí do vody při standardní teplotě. Následující den jsou tělesa vytažena z vody a je hodnocena přídržnost malty k betonovému podkladu.

4.2.9.3 Přídržnost po tepelném stárnutí

Zkušební tělesa se kondicionují za standardních podmínek po dobu 14 dní, potom jsou uložena na 14 dní do sušárny s cirkulací vzduchu, která musí být vyhřátá na teplotu $(70 \pm 3) ^\circ\text{C}$. Jakmile uplyne požadovaná doba, tělesa jsou ze sušárny vyjmuta a pomocí epoxidového lepidla jsou k deskám přilepeny kovové terče. Po vytvrzení lepidla je provedena zkouška přídržnosti malty k betonovému podkladu.

4.2.9.4 Přídržnost po cyklech zmrazení – rozmrazení

Zkušební tělesa se kondicionují za standardních podmínek po dobu 7 dní, poté se na 21 dní uloží do vodního prostředí. Po 21 dnech se provede 25 cyklu zmrazení – rozmrazení. Po posledním cyklu se tělesa otřou tkaninou a přilepí se kovové terče pomocí lepidla. Po vytvrzení se provede přídržnost malty k betonovému podkladu tahovou zkouškou.

4.2.10 Stanovení nasákavosti

Tato zkouška byla provedena dle normy ČSN EN 12808-5. Dle zkušebního postupu byly zhotoveny zkušební vzorky o rozměrech 40 x 40 x 160 mm, které se kondicionují 27 dní při standardních podmínkách o teplotě $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti vzduchu $(50 \pm 5) \%$. Po 21 dnech od přípravy byly boční povrchy těles utěsněny pomocí silikonového tmelu, aby byly pro vodu nepropustné. 28 dní po přípravě se každý vzorek zváží a vloží do nádrže s vodou tak, aby jeho vrchní povrch byl dole, ponořený ve vodě do hloubky 5 až 10 mm. Po 30 minutách byly vzorky

vyjmuty z vody rychle osušeny vlhkou utěrkou a zváženy, tento proces se pak opakoval i po 210 minutách. Výsledná nasákavost se vypočítá ze vztahu:

$$W_{mt} = m_t - m_d$$

Kde:

m_dhmotnost suchého vzorku v g

m_thmotnost vzorku po ponoření v g

4.2.11 Rastrovací elektronová mikroskopie – REM

Elektronová mikroskopie umožňuje sledovat mikrostrukturu analyzovaného materiálu při velkém zvětšení a rozlišení, jež se vymyká možnostem optického mikroskopu. Rastrovací elektronový mikroskop je v principu konstruován tak, že úzký elektronový svazek se řádkuje po povrchu vzorku, kde vyvolává ionizací valenčních sfér atomů emisi sekundárních elektronů. Tyto jsou snímány detektorem, který dále modeluje elektronový paprsek na obrazovce tak, že probíhá synchronně se snímacím paprskem. Na základě různého excitačního proudu vzniká obraz, jehož kontrast je určen výtěžkem odražených elektronů. Obraz v elektronovém rastrovacím mikroskopu se vyznačuje vysokou hloubkou ostrosti s vysokou rozlišovací schopností.

4.2.12 Diferenční termická analýza – DTA

Diferenční termická analýza je dynamická, tepelně analytická analýza, která je založená na měření rozdílů teplot v závislosti na teplotě mezi zkoušeným a standardním vzorkem, současně vyhřívány konstantní rychlostí v peci měřícího přístroje. Tepelné zbarvení reakce se ve výsledné křivce projeví maximy a minimy v exotermní a endotermní oblasti. Diferenční termická analýza je spojena s termogravimetrií (TG), která sleduje kvantitativně změnu hmotnosti vzorku jako funkci lineárně se měnící teploty. Na záznamu je také zachycena derivační křivka (DTG), která vyjadřuje závislost rychlosti změny hmotnosti vzorku na teplotě.

4.2.13 Rentgenová difrakční analýza – RTG

Tato metoda slouží ke stanovení mineralogického složení látek krystalického charakteru. Difrakční metody strukturální analýzy jsou založeny na interferenci rentgenového záření a vycházejí z toho, že se v pevné látce nacházejí vzájemně rovnoběžné roviny, které jsou od sebe vzdáleny o tzv. mezimřížkovou vzdálenost d . Na těchto rovinách dochází k interferenci rentgenového záření. Každá krystalická látka obsahuje mnoho různých rovin o mezimřížkových vzdálenostech, na kterých vzrostou hodnoty intenzit záření na I .

4.2.14 Vysokotlaká rtuťová porozimetrie

Tato metoda slouží pro stanovení pórovitosti (stanovení obsahu tzv. „nulté fáze“ ve vzorku). Metoda vysokotlaké rtuťové porozimetrie byla prováděna pro stanovení velikosti a objemu mikropórů ve zkušebních vzorcích. Metoda je založena na principu vnikání rtuti do mikropórů vzorku vlivem definovaného tlaku. Měření objemu mikropórů se provádí v měřicí baňce přístroje, do níž je vložen vzorek. Baňka je zazátkována, vakuováním je z ní odstraněn vzduch a poté je zaplněna rtutí až do definované výšky. Vakuováním se z mikropórů vypudí veškerý vzduch, který by zkresloval výsledky měření. Na hladinu rtuti působí rovnoměrně se zvyšující tlak a rtuť postupně vniká do pórů vzorku.

4.3 Výsledky ETAPY I - rozbor vstupních surovin

4.3.1 Cement

V praktické části byl pro zhotovení zkušebních těles použit portlandský cement CEM I 42,5 R z cementárny Mokrá, závod patří pod Českomoravský cement, a.s. Cement je jemně mletá anorganická látka, která po smíchání s vodou vytváří kaši, která tuhne a tvrdne v důsledku hydratačních procesů. Je to hydraulické pojivo, které má schopnost pojit jiné sypké látky v pevnou hmotu. Po zatvrdnutí cement zachovává svoji pevnost a stálost i ve vodě. Sledované vlastnosti použitého portlandského cementu jsou uvedeny v tab. č. 4 a v tab. č. 5.

Tab. č. 4 Vlastnosti použitého cementu

Výrobce	Českomoravský cement, a.s.
Obchodní název	Portlandský cement CEM I 42,5 R
Měrná hmotnost	3110 [kg·m ⁻³]
Měrný povrch	377 [m ² ·kg ⁻¹]
Jemnost mletí	3520 [cm ² /g]
Pevnost v tlaku po 28 dnech	57 MPa až 62 MPa

Tab. č. 5 Průměrné chemické složení použitého cementu

Chemické složení cementu [%]									
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	S ^{II-}	Cl ⁻	Na ₂ O	K ₂ O
65,00	19,00	4,00	3,00	1,00	3,00	0,04	0,05	0,15	0,75

4.3.2 Kopolymer etylenvinylacetátu

Kopolymer etylenvinylacetátu (EVA) je redispergovatelný prášek bílé až světle béžové barvy a bez zápachu. Jedná se o kopolymer vinylacetátu a etylenu s minerálními přísadami a ochranným koloidem. Pro diplomovou práci byl použit výrobek, který se nazývá Vinnapas 5044 N od firmy Wacker Chemie AG. Při použití kopolymeru do malt je obvykle zlepšena přídržnost k podkladu, pevnost v tahu za ohybu, deformovatelnost, odolnost proti oděru a zpracovatelnost. Sledované vlastnosti použitého kopolymeru EVA jsou uvedeny v tab. č. 6.

Tab. č. 6 Vlastnosti použitého kopolymeru EVA

Výrobce	Wacker Chemie AG
Obchodní název	Vinnapas 5044 N (GER)
Sypná hmotnost	400 – 550 kg·m ⁻³
Objemová hmotnost	400 až 550 kg·m ⁻³

4.3.3 Skelný recyklát

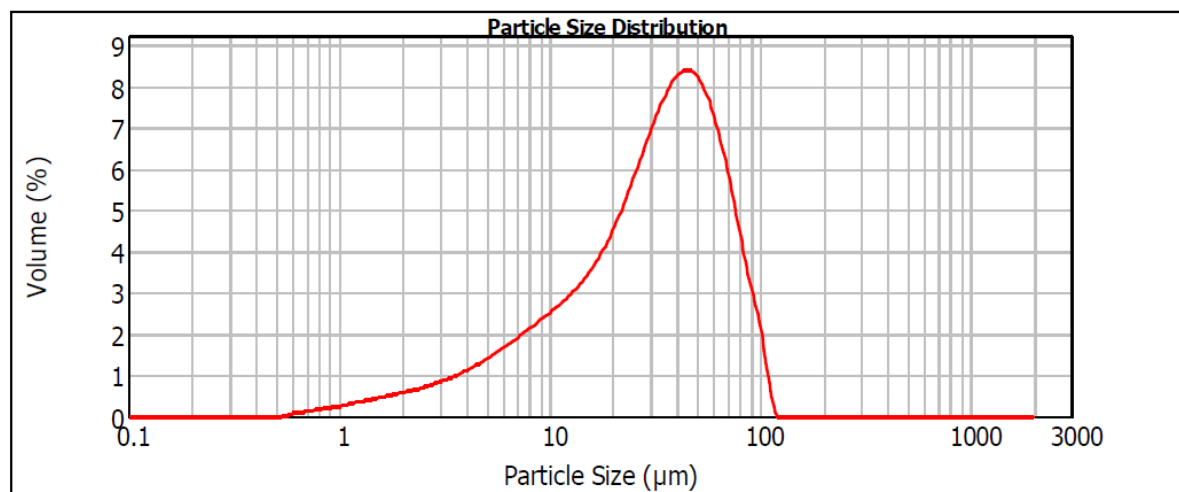
Jako skelný recyklát bylo zvoleno 5 typů skel (čiré sklo, zářivkové sklo, hnědé sklo, autosklo a zelené sklo. Po úpravě recyklátu na vhodnou velikost částic (částice o velikosti zrna pod 0,063 mm) byly provedeny zkoušky pro specifikaci určitých vlastností.

4.3.3.1 Čiré sklo

Skelný recyklát byl získán pomletím skleněných střepů z čirého obalového skla v laboratorním mlecím zařízení na jemný bílý prášek, který byl následně proset přes síto o velikosti ok 0,063 mm. Sledované vlastnosti mletého čirého skla jsou uvedeny v tab. č. 7 a na obr. č. 27.

Tab. č. 7 Vlastnosti použitého čirého skla

Pucolánová aktivita	574 mg Ca(OH) ₂ / 1g pucolánu
Měrná hmotnost	0,6634 g·cm ⁻³
Jemnost mletí	0,188 m ² ·g



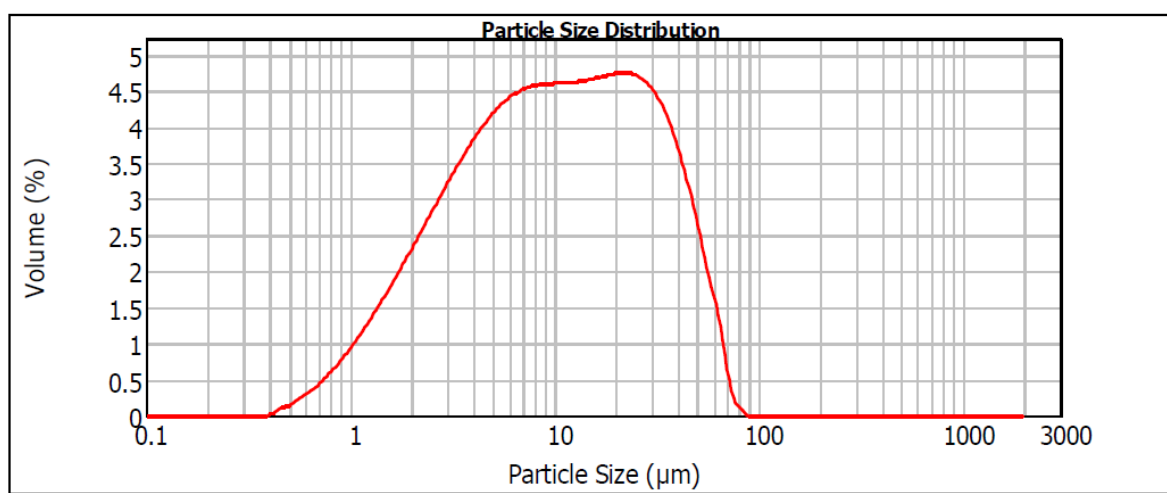
Obr. č. 27 Křivka zrnitosti čirého skla

4.3.3.2 Zářivkové sklo

Skelný recyklát byl získán pomletím střepek z již nepoužitelné zářivky v laboratorním mlecím zařízení na jemný bílý prášek, který byl následně přeset přes síto o velikosti ok 0,063 mm. Sledované vlastnosti mletého zářivkového skla jsou uvedeny v tab. č. 8 a na obr. č. 28.

Tab. č. 8 Vlastnosti použitého zářivkového skla

Pucolánová aktivita	568 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2$ / 1g pucolánu
Měrná hmotnost	0,6316 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
Jemnost mletí	0,483 $\text{m}^2\cdot\text{g}$



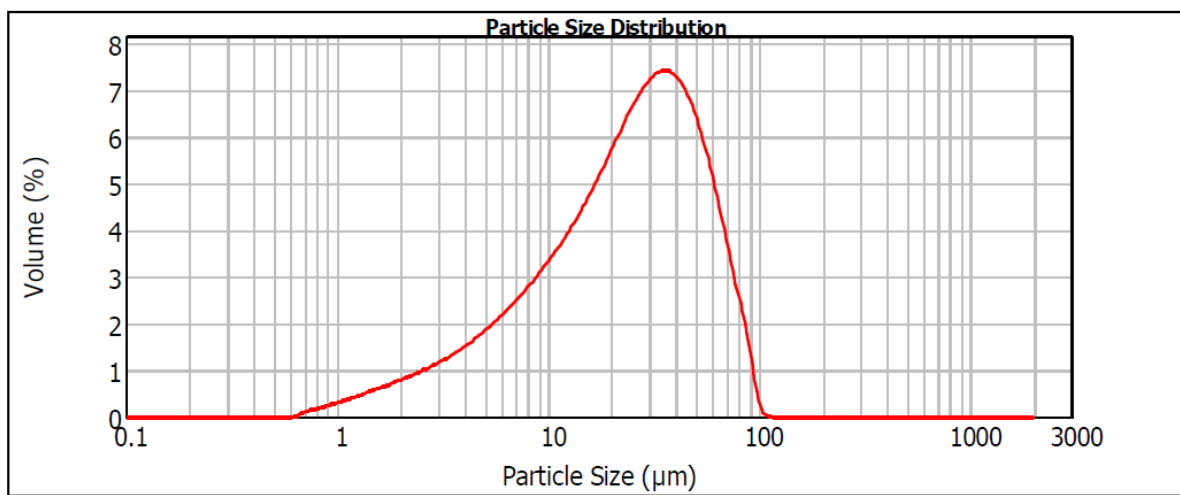
Obr. č. 28 Křivka zrnitosti zářivkového skla

4.3.3.3 Hnědé sklo

Skelný recyklát byl získán pomletím skleněných střepek z hnědého obalového skla v laboratorním mlecím zařízení na jemný béžový až světle hnědý prášek, který byl následně přeset přes síto o velikosti ok 0,063 mm. Sledované vlastnosti mletého hnědého skla jsou uvedeny v tab. č. 9 a na obr. č. 29.

Tab. č. 9 Vlastnosti použitého hnědého skla

Pucolánová aktivita	685 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2$ / 1g pucolánu
Měrná hmotnost	0,6257 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
Jemnost mletí	0,226 $\text{m}^2\cdot\text{g}$



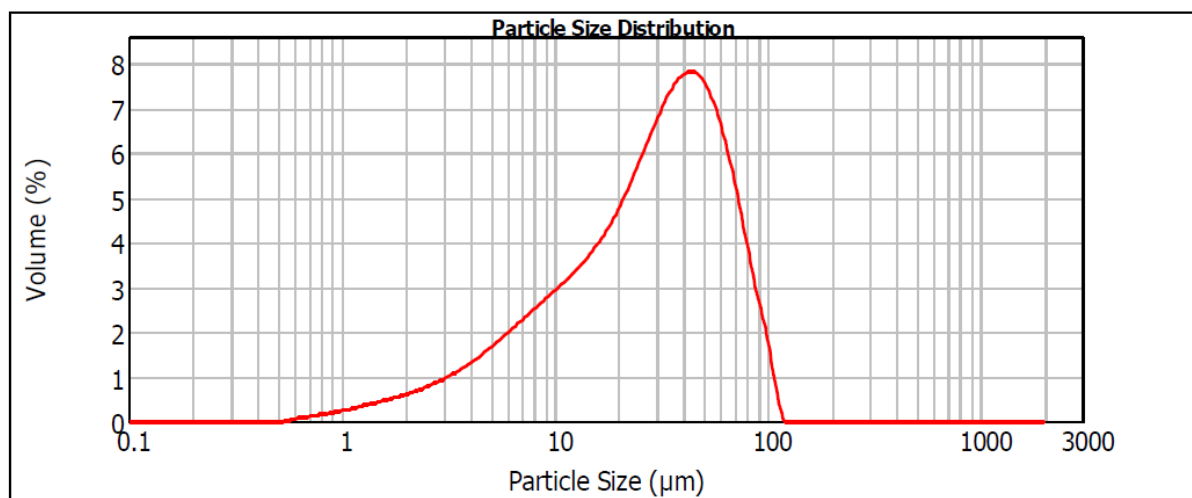
Obr. č. 29 Křivka zrnitosti hnědého skla

4.3.3.4 Autosklo

Skelný recyklát byl získán pomletím skleněných stěpů z bočního autoskla v laboratorním mlecím zařízení na jemný bílý prášek, který byl následně přeset přes síto o velikosti ok 0,063 mm. Sledované vlastnosti mletého hnědého skla jsou uvedeny v tab. č. 10 a na obr. č. 30.

Tab. č. 10 Vlastnosti použitého autoskla

Pucolánová aktivita	657 mg Ca(OH) ₂ / 1g pucolánu
Měrná hmotnost	0,6490 g·cm ⁻³
Jemnost mletí	0,198 m ² ·g



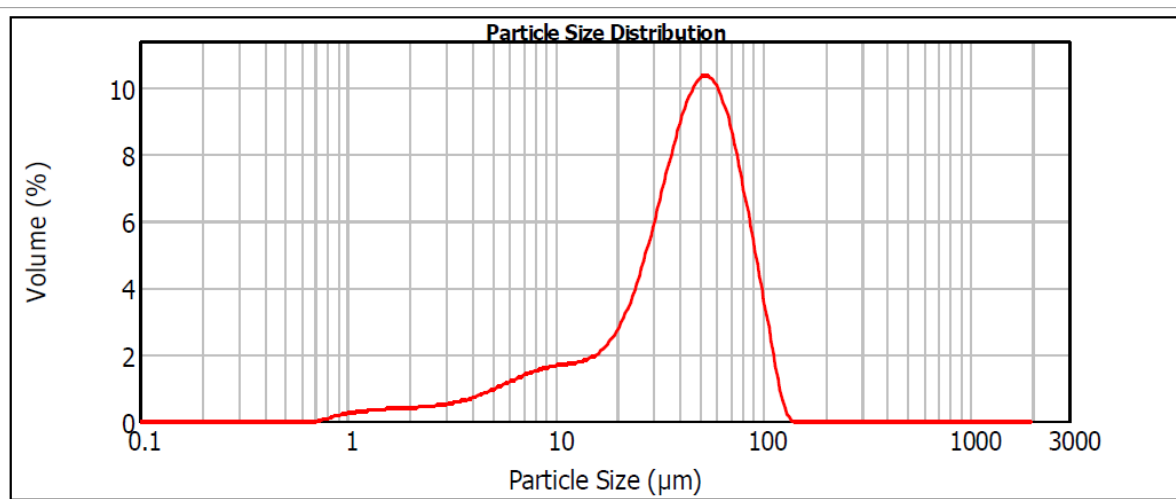
Obr. č. 30 Křivka zrnitosti autoskla

4.3.3.5 Zelené sklo

Skelný recyklát byl získán pomletím skleněných střepů ze zeleného obalového skla v laboratorním mlecím zařízení na jemný světle zelený prášek, který byl následně přeseť přes síto o velikosti ok 0,063 mm. Sledované vlastnosti mletého hnědého skla jsou uvedeny v tab. č. 11 a na obr. č. 31.

Tab. č. 11 Vlastnosti použitého zeleného skla

Pucolánová aktivita	561 mg Ca(OH) ₂ / 1g pucolánu
Měrná hmotnost	0,6462 g·cm ⁻³
Jemnost mletí	0,140 m ² ·g



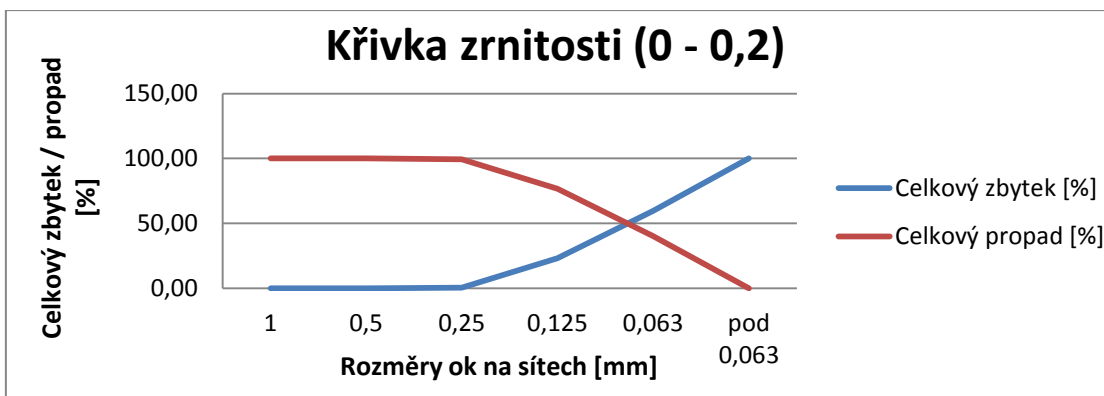
Obr. č. 31 Křivka zrnitosti zeleného skla

4.3.4 Drcený vápenec

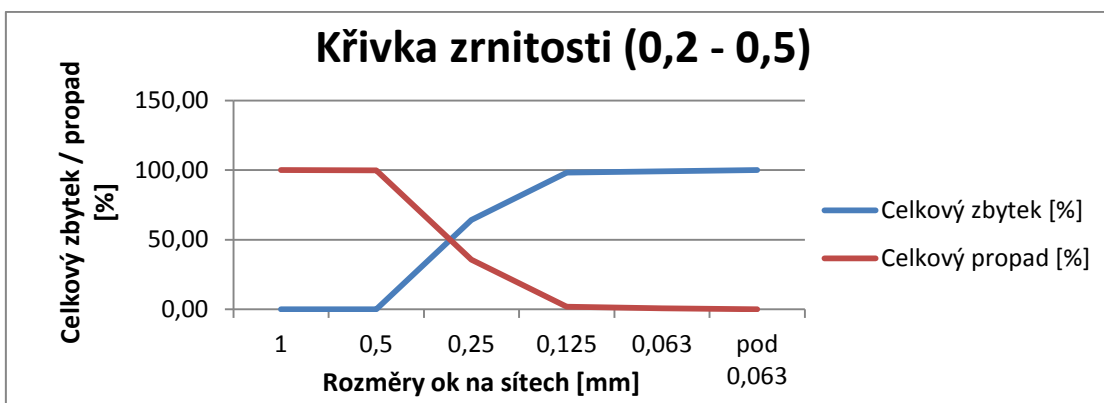
Jako plnivo do polymery modifikovaných malt byl použit drcený vápenec z firmy Omya, používaný obchodní název je Carolith, který vzniká drcením vysokoprocenního vápence s vysokým obsahem kalcitu. Sledované vlastnosti jsou uvedeny v tab. č. 12 a na obr. č. 32 - 35.

Tab. č. 12 Chemické složení drceného vápence Carolith

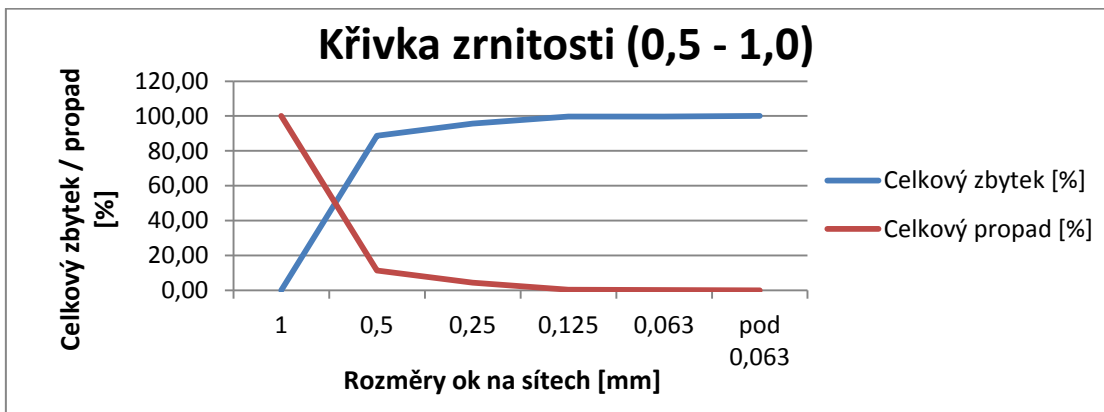
Chemické složení drceného vápence [%]									
CaO	MnO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	S ^{II-}	SiO ₂	TiO ₂	MgO	K ₂ O	CaCO ₃
55,25	0,01	0,09	0,12	0,80	0,06	0,01	0,65	0,02	98,5



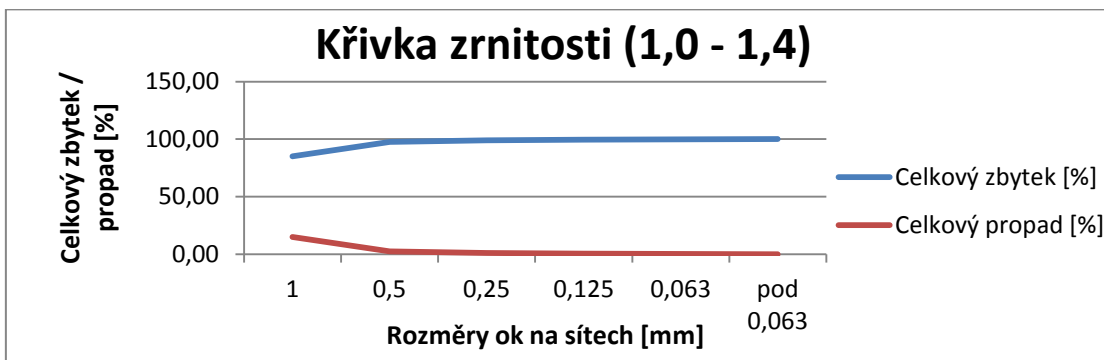
Obr. č. 32 Celkový zbytek a propad na sítích (frakce 0 – 0,2 mm)



Obr. č. 33 Celkový zbytek a propad na sítích (frakce 0,2 – 0,5 mm)



Obr. č. 34 Celkový zbytek a propad na sítích (frakce 0,5 – 1,0 mm)



Obr. č. 35 Celkový zbytek a propad na sítích (frakce 1,0 – 1,4 mm)

4.4 Výsledky zkoušek ETAPY II

V rámci ETAPY II byly provedeny na zhotovených zkušebních tělesech zkoušky, mezi které patří stanovení objemové hmotnosti, pevnosti v tahu za ohybu po 28 a 90 dnech uložení v laboratorním prostředí, pevnosti v tlaku po 28 a 90 dnech uložení v laboratorním prostředí, mrazuvzdornost po 25 zmrazovacích cyklech a stanovení přídržnosti po 28 a 90 dnech uložení v laboratorním prostředí. Výsledky zkoušek pevností jsou uvedeny v tab. č. 13 – tab. č. 15 a na obr. č. 36 – obr. č. 39. Výsledky stanovení přídržnosti jsou uvedeny v tab. č. 16 a tab. č. 17.

Tab. č. 13 Výsledky stanovených vlastností hmot ETAPY II po 28 dnech uložení v laboratorním prostředí

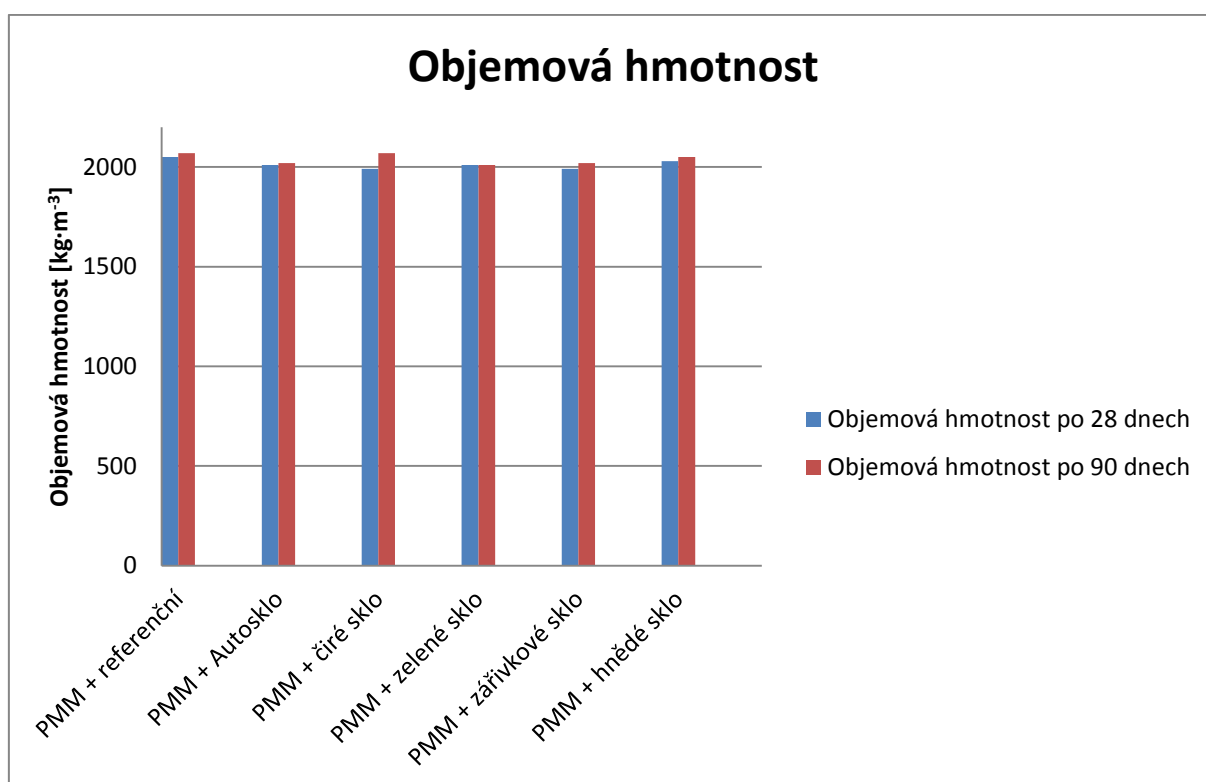
Označení směsi	Objemová hmotnost [kg·m ⁻³]	Pevnost v tahu za ohybu R _f [MPa]	Pevnost v tlaku R _c [MPa]
PMM - referenční	2050	10,1	35,0
PMM + autosklo	2010	9,0	33,0
PMM + čiré sklo	1990	9,2	31,5
PMM + zelené sklo	2010	8,2	31,0
PMM + zářivkové sklo	1990	9,3	30,5
PMM + hnědé sklo	2030	9,3	29,5

Tab. č. 14 Výsledky stanovených vlastností hmot ETAPY II po 90 dnech uložení v laboratorním prostředí

Označení směsi	Objemová hmotnost [kg·m ⁻³]	Pevnost v tahu za ohybu R _f [MPa]	Pevnost v tlaku R _c [MPa]
PMM - referenční	2070	10,8	35,5
PMM + autosklo	2020	10,1	32,5
PMM + čiré sklo	2070	10,3	34,0
PMM + zelené sklo	2010	9,2	32,0
PMM + zářivkové sklo	2020	10,1	31,0
PMM + hnědé sklo	2050	10,5	31,5

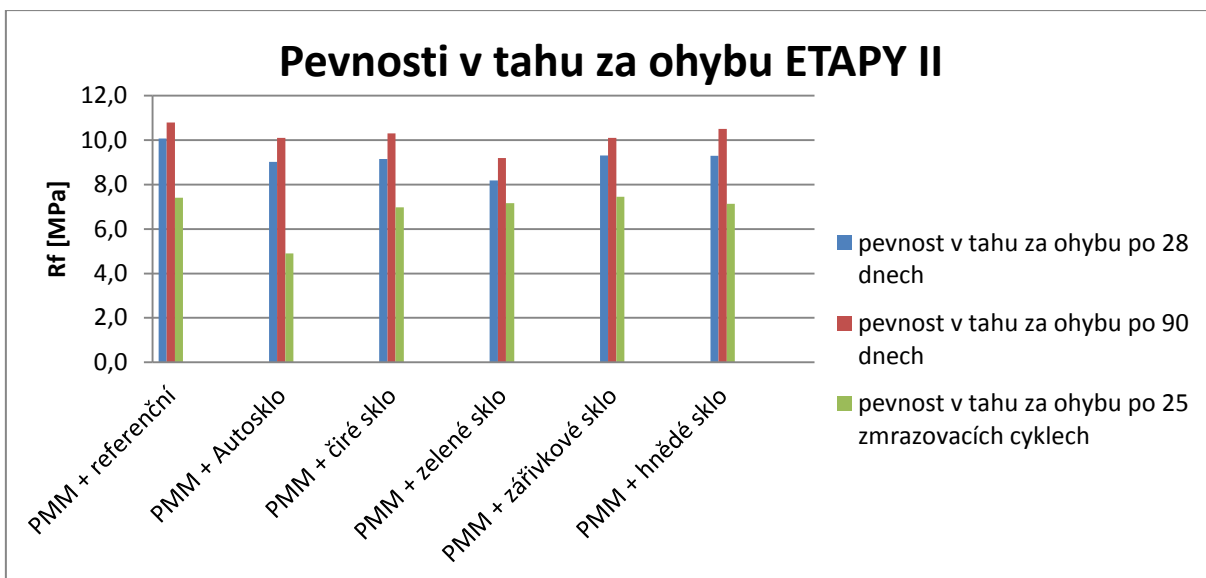
Tab. č. 15 Výsledky stanovených vlastností hmot ETAPY II po 25 zmrazovacích cyklech

Označení směsi	Mrazuvzdornost	Pevnost v tahu za ohybu po 25 zmrazovacích cyklech Rf [MPa]	Pevnost v tlaku po 25 zmrazovacích cyklech Rc [MPa]
PMM - referenční	0,74	7,41	34,27
PMM + autosklo	0,54	4,90	26,67
PMM + čiré sklo	0,76	6,98	30,73
PMM + zelené sklo	0,88	7,17	25,10
PMM + zářivkové sklo	0,80	7,45	27,19
PMM + hnědé sklo	0,77	7,14	27,08



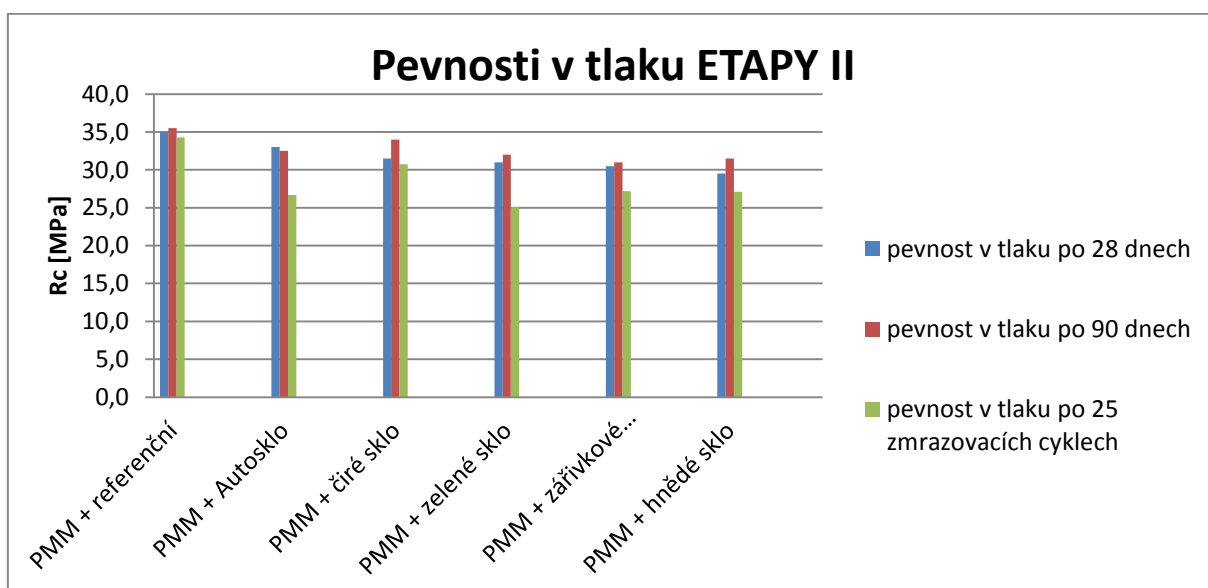
Obr. č. 36 Výsledný graf objemových hmotností stanovených po 28 a 90 dnech v laboratorním uložení

Téměř u všech polymery modifikovaných hmot byl zaznamenán malý nárůst objemových hmotností, a to v důsledku delší doby uložení v laboratorním prostředí (90 dní). Objemové hmotnosti všech hmot se pohybují okolo 2000 kg·m⁻³.



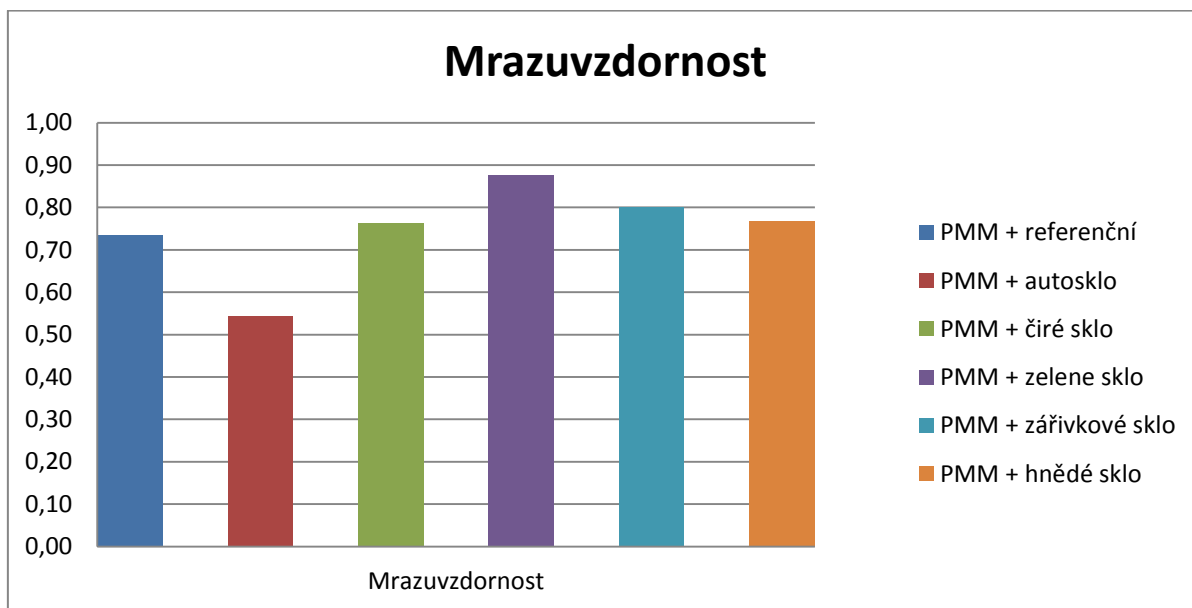
Obr. č. 37 Výsledné pevnosti v tahu za ohybu hmot z ETAPY II stanovovaných po 28 a 90 dnech uložení v laboratorním prostředí a po 25 zmrazovacích cyklech

Nejvyšší pevnosti v tahu za ohybu dosáhly vzorky po 90 denním uložení v laboratorním prostředí, a to v důsledku delší doby zrání a pravděpodobně pucolánové aktivity skla, která se projevuje po delším časovém úseku. Nejvyšších pevností v tahu za ohybu bylo dosaženo u referenční hmoty, a dále u hmot s přídavkem hnědého a čirého skelného recyklátu. Zmrazovací cykly snížily pevnost v tahu za ohybu, nejnižší pevnost po zmrazovacích cyklech měla PMM s autosklem.



Obr. č. 38 Výsledné pevnosti v tlaku hmot z ETAPY II stanovovaných po 28 a 90 dnech uložení v laboratorním prostředí a po 25 zmrazovacích cyklech

Vyhodnocení pevnosti v tlaku při zkoušení polymery modifikovaných malt opět ukázalo nárůst pevností po 90 denním uložení v laboratorním prostředí. Nejvyšších pevností dosáhla referenční hmota bez přidání skelného recyklátu. Největší pevnosti s příměsí skla dosáhla hmota obsahující čiré sklo a autosklo. Pevnost v tlaku byla po 25 zmrazovacích cyklech nižší než pevnosti v tlaku po 28 dnech uložení v laboratorních podmínkách.



Obr. č. 39 Výsledné hodnoty mrazuvzdornosti hmot z ETAPY II

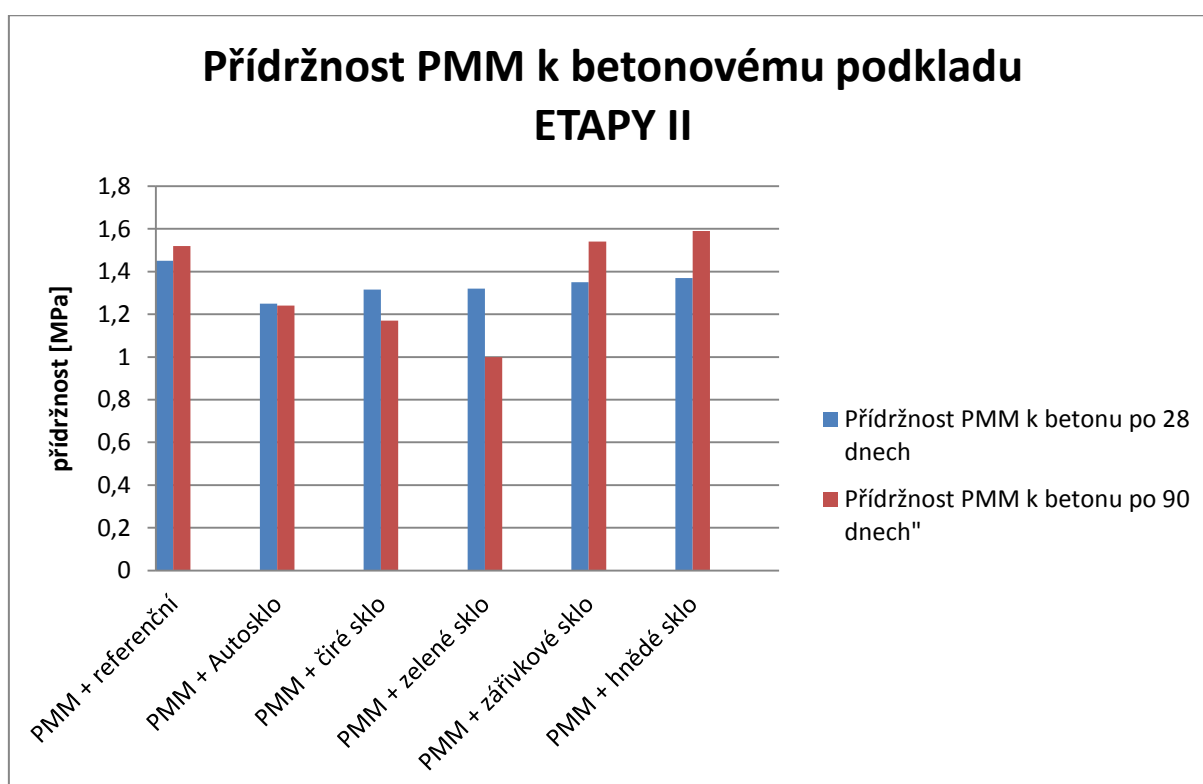
Z výsledných hodnot mrazuvzdornosti je viditelné, že kromě referenční hmoty a hmoty s příměsí autoskla jsou všechny ostatní hmoty klasifikovány jako mrazuvzdorné, neboť hodnota součinitele mrazuvzdornosti je vyšší než 0,75.

Tab. č. 16 Přídržnost polymery modifikovaných malt k betonovému podkladu po 28 dnech uložení v laboratorních podmínkách

Označení směsi	Plocha terče [mm ²]	Přídržnosti po 28 dnech [MPa]
PMM - referenční	1963,50	1,45
PMM + autosklo	1963,50	1,25
PMM + čiré sklo	1963,50	1,32
PMM + zelené sklo	1963,50	1,32
PMM + zářivkové sklo	1963,50	1,35
PMM + hnědé sklo	1963,50	1,37

Tab. č. 17 Přídržnost polymery modifikovaných malt k betonovému podkladu po 90 dnech uložení v laboratorních podmínkách

Označení směsi	Plocha terče [mm ²]	Přídržnosti po 90 dnech [MPa]
PMM - referenční	1963,50	1,52
PMM + autosklo	1963,50	1,24
PMM + čiré sklo	1963,50	1,17
PMM + zelené sklo	1963,50	1,00
PMM + zářivkové sklo	1963,50	1,54
PMM + hnědé sklo	1963,50	1,59



Obr. č. 40 Přídržnosti polymery modifikovaných malt k betonovému podkladu po 28 a 90 dnech uložení v laboratorních podmínkách

Přídržnost PMM k betonovému podkladu po 28 dnech byla u všech hmot podobná, největší přídržnost pak měla referenční hmota bez příměsí skelného recyklátu. Přídržnosti po 90 dnech se již lišily. U hmot s příměsí autoskla, čirého skla a zeleného skla byla přídržnost po 90 dnech nižší než po 28 dnech. A naopak u hmot s příměsí zářivkového a hnědého skla byl zaznamenán nárůst přídržností po 90 dnech. Je to způsobeno delší dobou zrání, a působení pucolánové reakce ve hmotě.

4.5 Výsledky zkoušek ETAPY III

Na základě vyhodnocení výsledků předešlé etapy byly pro ETAPU III zvoleny pouze 3 typy skelného recyklátu (čiré sklo, zářivkové sklo a hnědé sklo) s nejlepšími výsledky pevností a přídržností k betonovému podkladu. ETAPA III je zaměřena na ověření dalších vlastností a chování vybraných malt stejné receptury, které jsou uloženy v jiném než laboratorním prostředí.

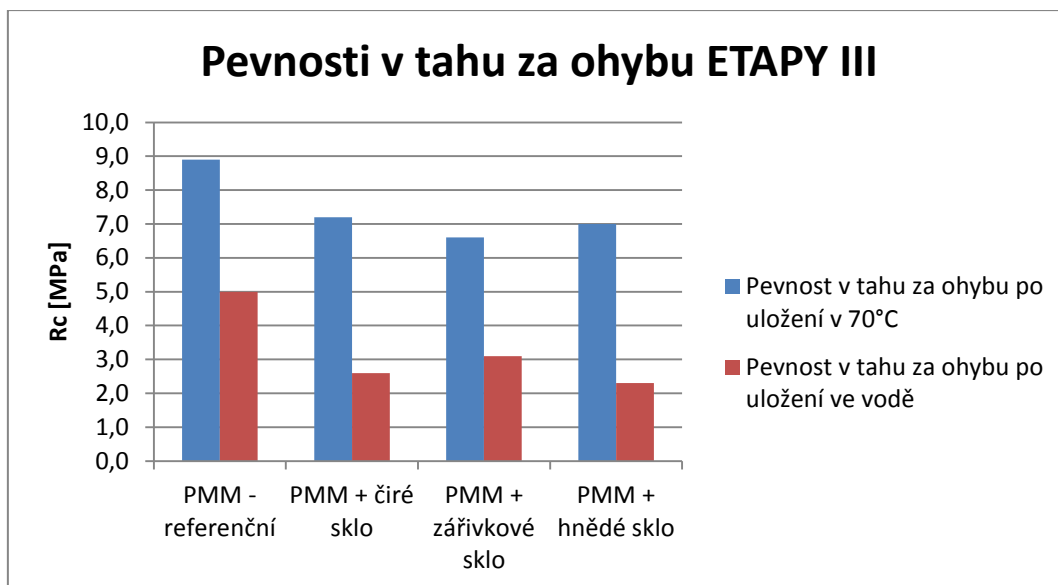
V rámci této etapy bylo provedeno stanovení nasákavosti (viz tab. č. 20 a obr. č. 43), dále přídržnost, pevnost v tahu a v tlaku po ponoření do vody (viz tab. č. 18 - 21 a obr. č. 41 - 44), přídržnost po cyklech zmrazení - rozmrazení (viz tab. č. 22 a obr. č. 45) a stanovení přídržnosti, pevnost v tahu a v tlaku po tepelném stárnutí (viz. tab. č. 23 a obr. č. 46). Výsledné hodnoty všech přídržností ETAPY III jsou graficky znázorněny na obr. č. 47.

Tab.č. 18 Výsledky stanovených vlastností hmot ETAPY III po uložení v 70°C

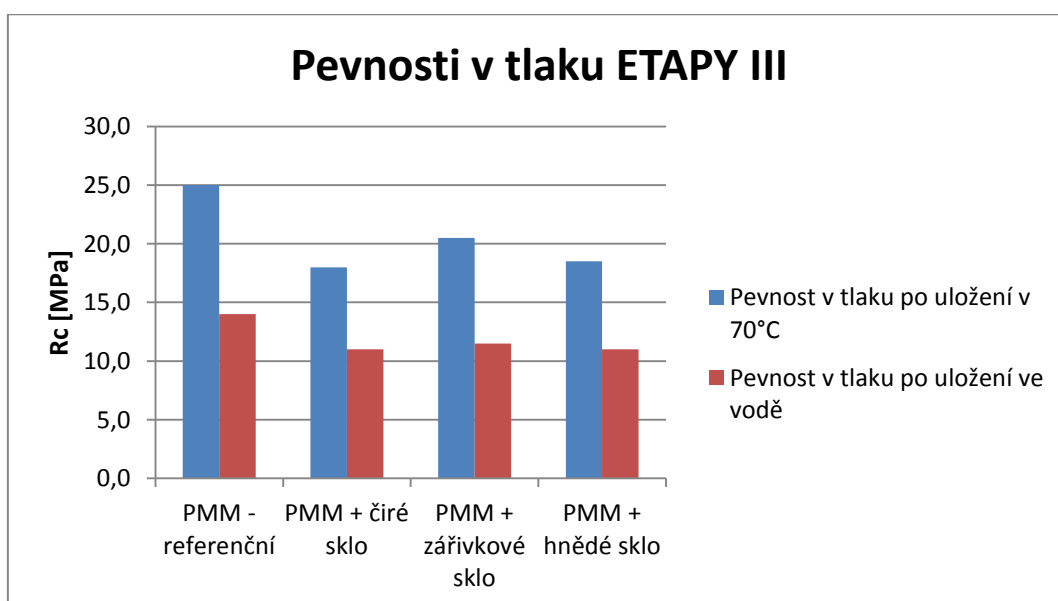
Označení směsi	Objemová hmotnost [kg·m ³]	Pevnost v tahu za ohybu R _f [MPa]	Pevnost v tlaku R _c [MPa]
PMM - referenční	1980	8,9	25,0
PMM + čiré sklo	1940	7,2	18,0
PMM + zářivkové sklo	1980	6,6	20,5
PMM + hnědé sklo	1910	7,0	18,5

Tab.č. 19 Výsledky stanovených vlastností hmot ETAPY III po uložení v 70°C

Označení směsi	Objemová hmotnost [kg·m ³]	Pevnost v tahu za ohybu R _f [MPa]	Pevnost v tlaku R _c [MPa]
PMM - referenční	2150	5,0	14,0
PMM + čiré sklo	2190	2,6	11,0
PMM + zářivkové sklo	2410	3,1	11,5
PMM + hnědé sklo	2260	2,3	11,0



Obr. č. 41 Výsledné pevnosti v tahu za ohybu hmot z ETAPY III stanovovaných po uložení v teple (70°C) a ve vodě.

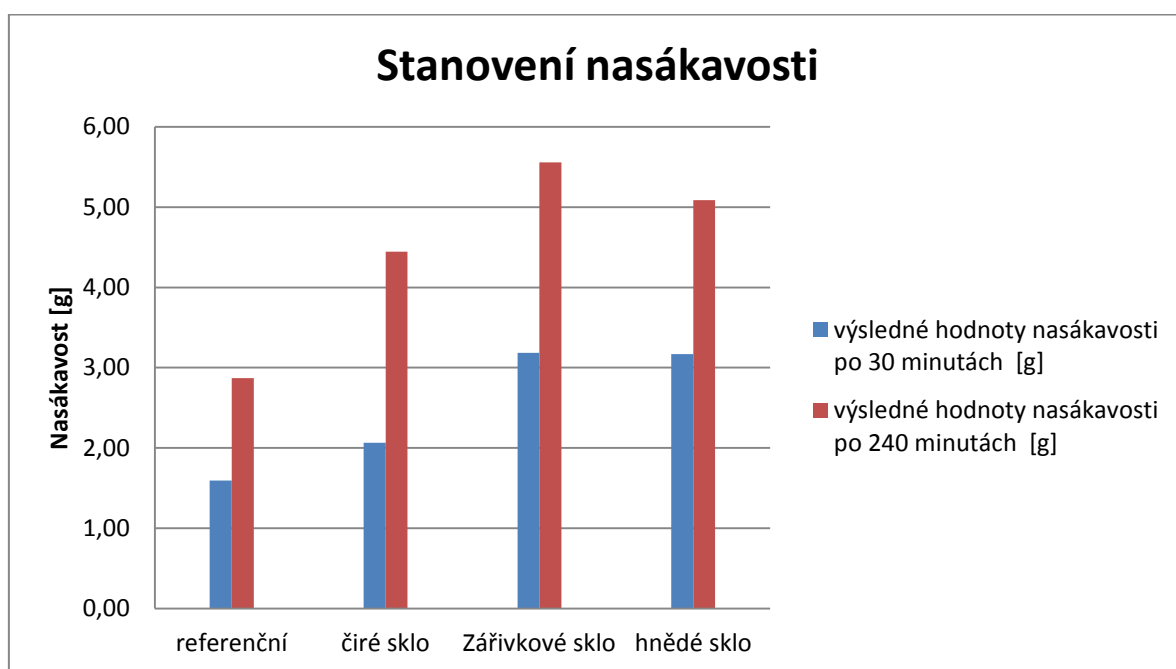


Obr. č. 42 Výsledné pevnosti v tlaku hmot z ETAPY III stanovovaných po uložení v teple (70°C) a ve vodě.

Z uvedených grafických znázornění pevnostních charakteristik (viz obr. 41 a 42) lze konstatovat, že uložení hmot ve vodním prostředí výrazně snižuje pevnosti v tahu za ohybu a také pevnosti v tlaku ve srovnání s hmotami, které byly uloženy v prostředí o teplotě 70 °C. Nejvyšších pevností zkoušených v rámci ETAPY III dosáhla referenční hmota bez přídavku skelného recyklátu. Pevnosti všech hmot s přídavkem skelného recyklátu jsou velmi podobné.

Tab. č. 20 Stanovení nasákavosti po 30 a 240 minutách

Výsledné hodnoty nasákavosti po 30 minutách [g]				
PMM - referenční	1,94	1,23	1,61	1,59
PMM + čiré sklo	2,11	1,95	2,14	2,07
PMM + Zářivkové sklo	3,70	2,66	3,19	3,18
PMM + hnědé sklo	3,23	3,12	3,16	3,17
Výsledné hodnoty nasákavosti po 240 minutách [g]				
PMM - referenční	3,14	2,55	2,92	2,87
PMM + čiré sklo	4,21	5,60	3,52	4,44
PMM + Zářivkové sklo	6,46	4,99	5,22	5,56
PMM + hnědé sklo	5,36	4,87	5,03	5,09

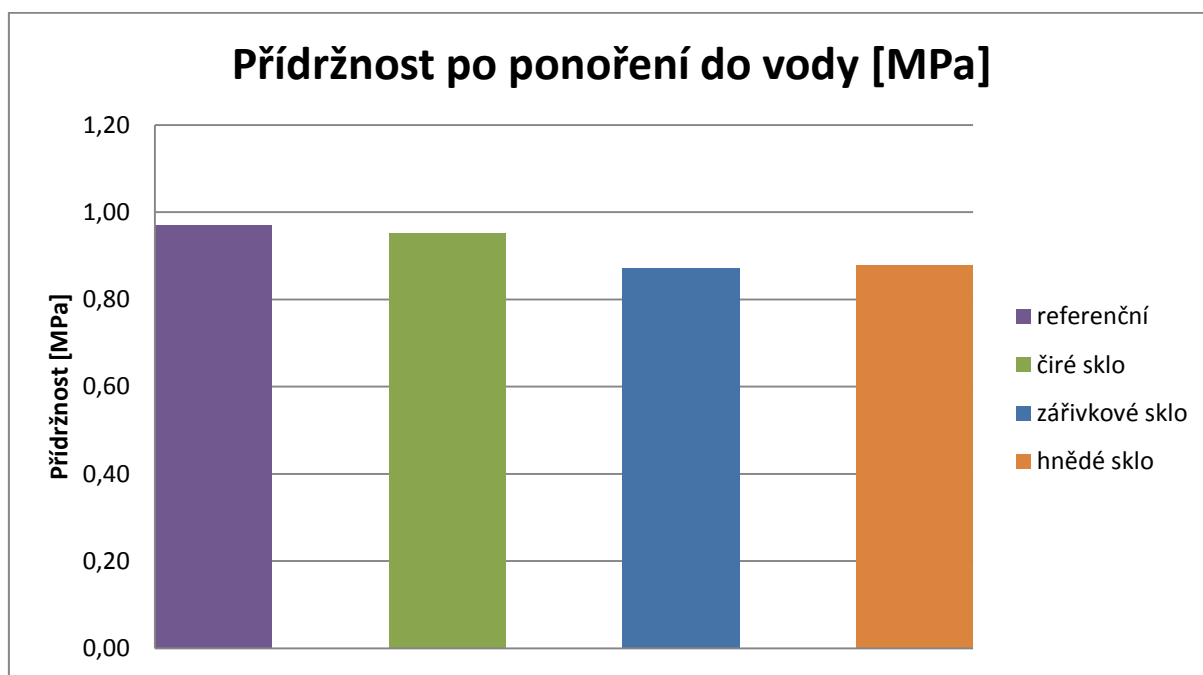


Obr. č. 43 Grafické znázornění nasákavosti zkušebních těles po 30 a 240 minutách

Z výše uvedeného grafu je patrné, že nasákavost se zvyšovala spolu se zvyšujícím časem. Největší nasákavost má PMM s příměsí zářivkového skla. Pro upřesnění této zkoušky je vhodné stanovit velikost a objem pórů ve zkušebních vzorcích metodou vysokotlaké rtuťové porozimetrie (viz výsledky kapitoly 4.6.3).

Tab. č. 21 Výsledky přídržnosti PMM k betonovému podkladu po ponoření do vody

Označení směsi	Plocha terče [mm ²]	Přídržnost [MPa]
PMM - referenční	1963,50	0,95
PMM + čiré sklo	1963,50	0,97
PMM + zářivkové sklo	1963,50	0,87
PMM + hnědé sklo	1963,50	0,88

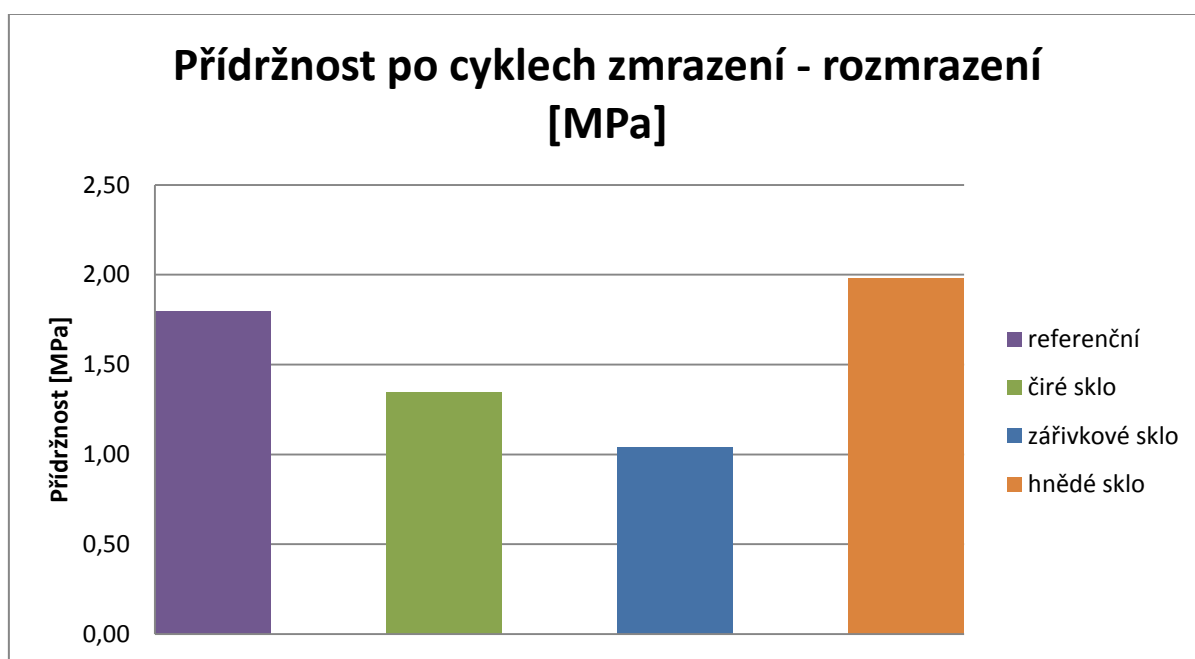


Obr. č. 44 Přídržnost k betonovému podkladu po ponoření do vody

Výsledky přídržností malt k betonovému podkladu po ponoření do vody jsou u všech hmot srovnatelné, proto lze usoudit, že přidání skelného recyklátu do směsi nemá na přídržnost po ponoření do vody výrazný vliv. Avšak ve srovnání s počáteční přídržností k podkladu po 28 dnech jsou výsledky nižší, v průměru o 0,35 MPa.

Tab. č. 22 Výsledky přídržnosti PMM k betonovému podkladu po cyklech zmrazení - rozmrazení

Označení směsi	Plocha terče [mm ²]	Přídržnost [MPa]
PMM - referenční	1963,50	1,80
PMM + čiré sklo	1963,50	1,34
PMM + zářivkové sklo	1963,50	1,04
PMM + hnědé sklo	1963,50	1,98

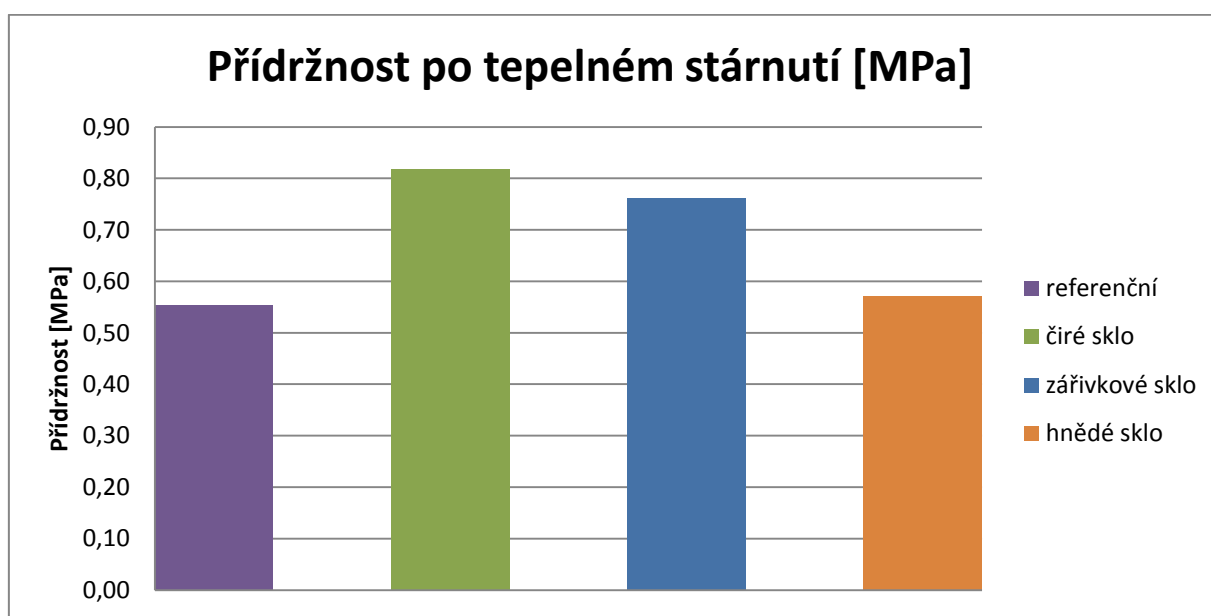


Obr. č. 45 Přídržnost k betonovému podkladu po cyklech zmrazení – rozmrazení

Přídržnost PMM k betonovému podkladu po cyklech zmrazení – rozmrazení byla pro jednotlivé hmoty odlišná. Nejvyšší přídržnost vykazovala hmota s příměsí hnědého skla, a naopak nejhorší výsledky měla hmota s příměsí zářivkového skla. V celkovém důsledku jsou přídržnosti po cyklech zmrazení – rozmrazení srovnatelné s počátečními přídržnostmi stanovované na zkušebních tělesech po 28 denním uložení v laboratorním prostředí.

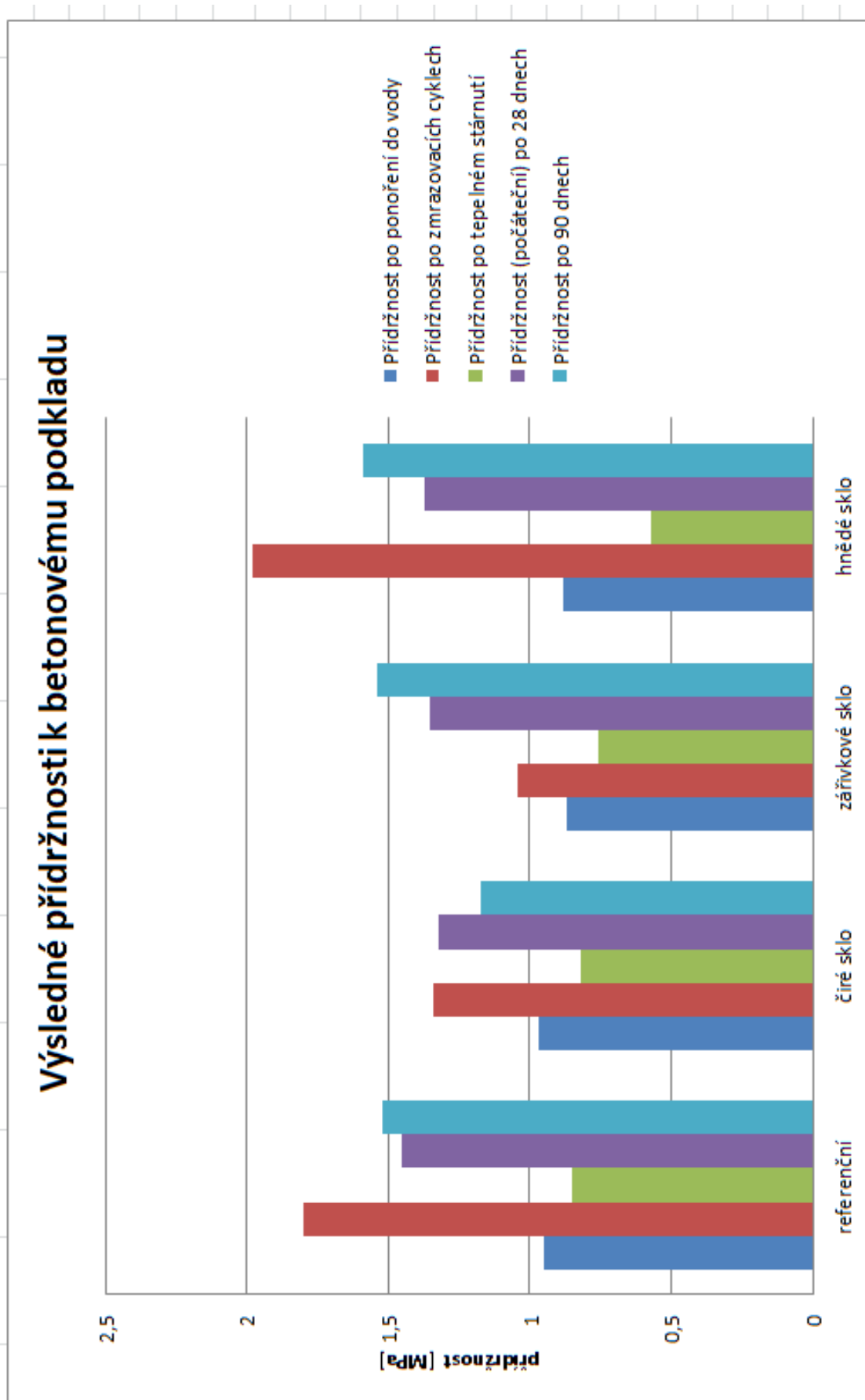
Tab. č. 23 Výsledky přídržnosti PMM k betonovému podkladu po tepelném stárnutí

Označení směsi	Plocha terče [mm ²]	Přídržnost [MPa]
PMM - referenční	1963,50	0,85
PMM + čiré sklo	1963,50	0,82
PMM + zářivkové sklo	1963,50	0,76
PMM + hnědé sklo	1963,50	0,57



Obr. č. 46 Přídržnost k podkladu po tepelném stárnutí

Přídržnost PMM po tepelném stárnutí byla výrazně nižší než u jiných typů stanovení přídržnosti. Nejvyšších hodnot přídržnosti dosahovaly hmoty s příměsí čirého a zářivkového skla. Naopak nejnižších hodnot dosáhla referenční hmota. Z grafického znázornění tedy vyplývá, že přidáním skelného recyklátu do polymery modifikovaných malt lze zvýšit přídržnost k betonovému podkladu po tepelném stárnutí.



Obr. č. 47 Porovnání všech hodnot přídržností v rámci ETAPY II a ETAPY III

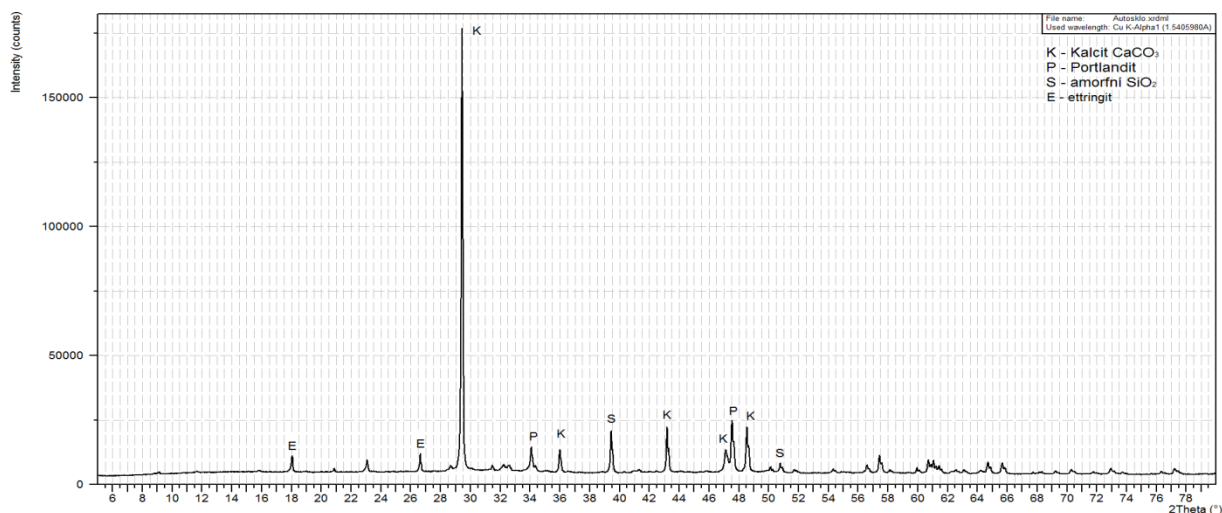
Na výše uvedeném grafu je možné vidět celkové zhodnocení všech stanovovaných přídržností ETAPY II a ETAPY III. Počáteční přídržnost zkušebních vzorků uložených v laboratorních podmínkách po dobu 28 dní byla u všech hmot srovnatelná. S delší dobou uložení (90 dní) vzrostla ve třech hmotách přídržnost k betonovému podkladu a to v důsledku delší doby zrání cementu. U hmoty s příměsí čírého skla byl zaznamenán pokles přídržnosti, což bylo pravděpodobně způsobeno lidským faktorem – nevhodným nanesením lepidla. Během vodního uložení došlo k poklesu přídržností u všech PMM ve srovnání s přídržnostmi naměřených po 28 dnech uložení v laboratorním prostředí. Další alternativní zkouškou bylo uložení po dobu 14 dnů v prostředí o teplotě 70 °C, což mělo negativní vliv na všechny PMM jejichž hodnoty přídržností klesly pod 1 MPa. Přídržnost hmot k betonovému podkladu po 25 zmrazovacích cyklech výrazně vzrostla u dvou hmot, u referenční hmoty a u hmoty s přídavkem hnědého skla. Mírný pokles byl zaznamenán pouze u hmoty s přídavkem zářivkového skla, avšak pouze o 0,35 MPa.

4.6 Výsledky ETAPY IV

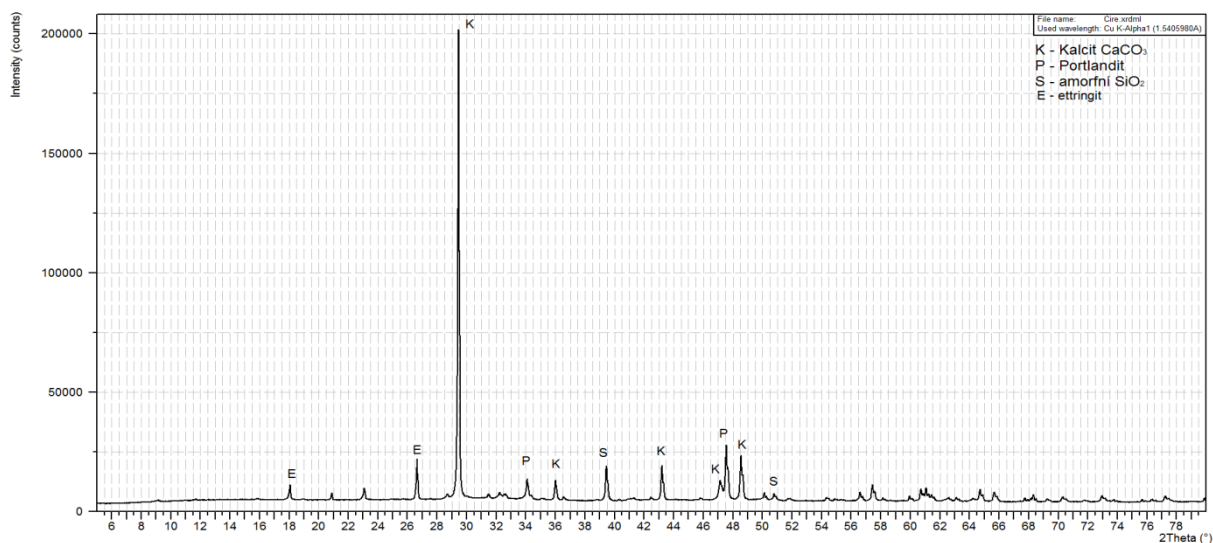
V této etapě bylo provedeno studium mikrostruktury. Zjišťováno bylo mineralogické složení pomocí metody rentgenové difrakční analýzy (RTG), množství porů pomocí vysokotlaké rtuťové porozimetrie, dále byly sledovány hmotnostní úbytky v závislosti na teplotě pomocí diferenční termické analýzy. Jako poslední zkouška mikrostruktury byla provedena rastrovací elektronová mikroskopie (REM).

4.6.1 Rentgenová difrakční analýza (RTG)

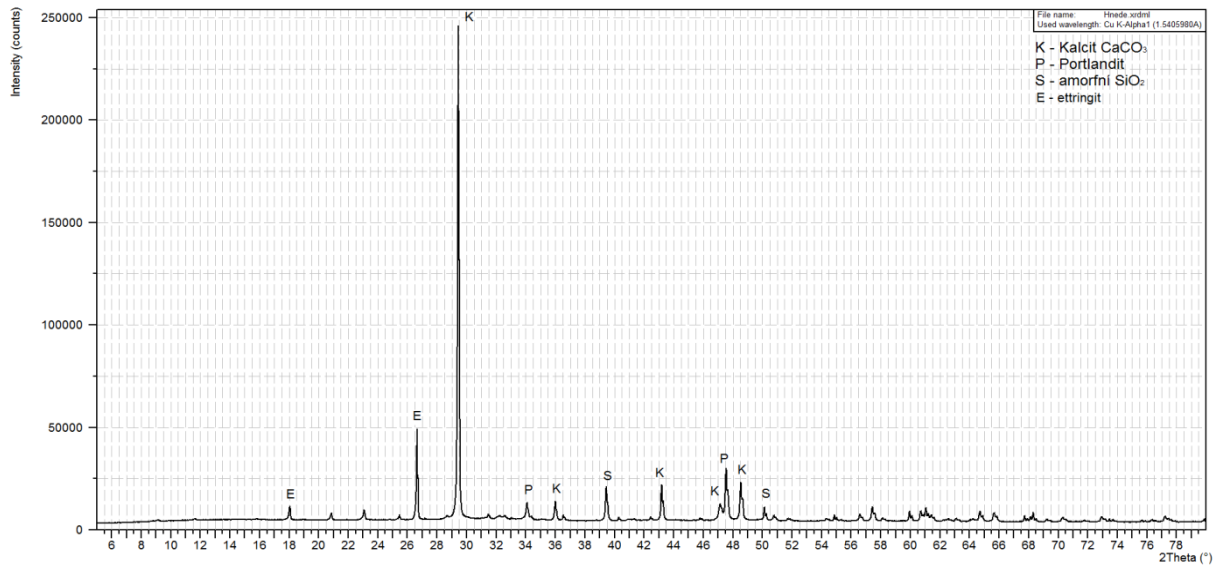
Následující grafy (obr. č. 48 až obr. č. 53) zobrazují výsledky rentgenové difrakční analýzy (RTG). Tato zkouška byla provedena za účelem zjištění mineralogického složení směsí, které byly uloženy po dobu 28 dní v laboratorním prostředí.



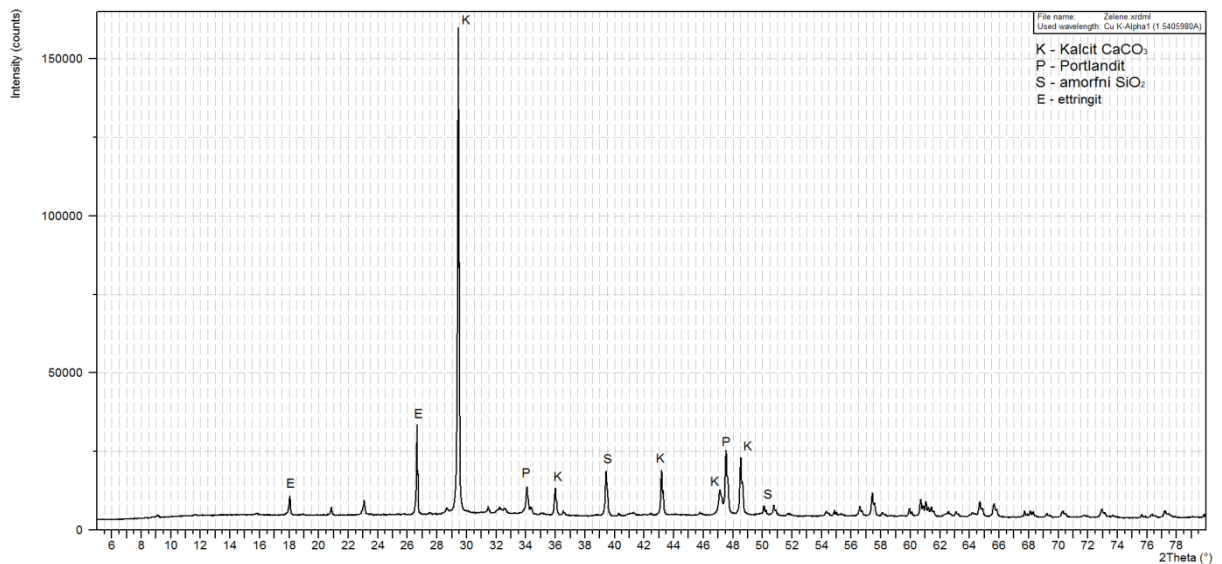
Obr. č. 48 Difraktogram polymercementové malty s autosklem



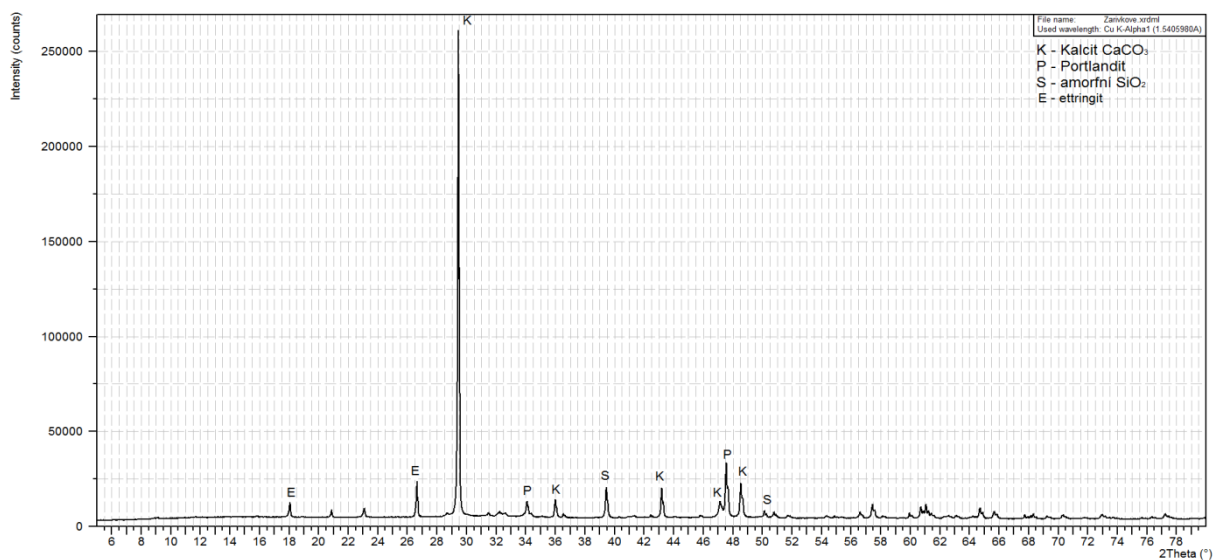
Graf č. 49 Difraktogram polymercementové malty s přidavkem čirého skla



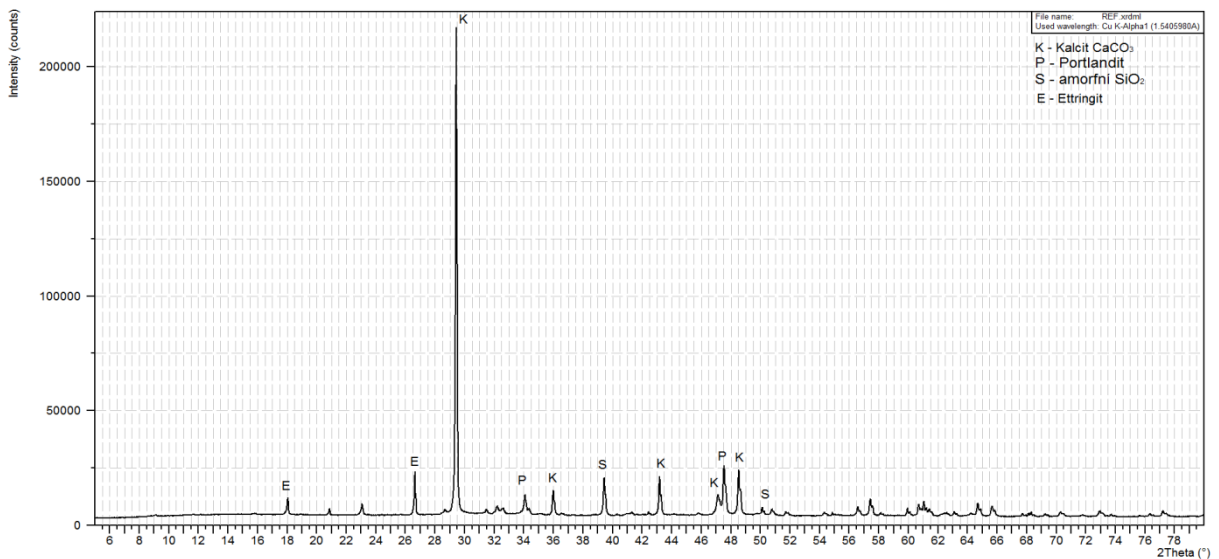
Obr. č. 50 Difraktogram polymercementové malty s přidavkem hnědého skla



Obr. č. 51 Difraktogram polymercementové malty s přidavkem zeleného skla



Obr. č. 52 Difraktogram polymercementové malty s přidavkem zářivkového skla

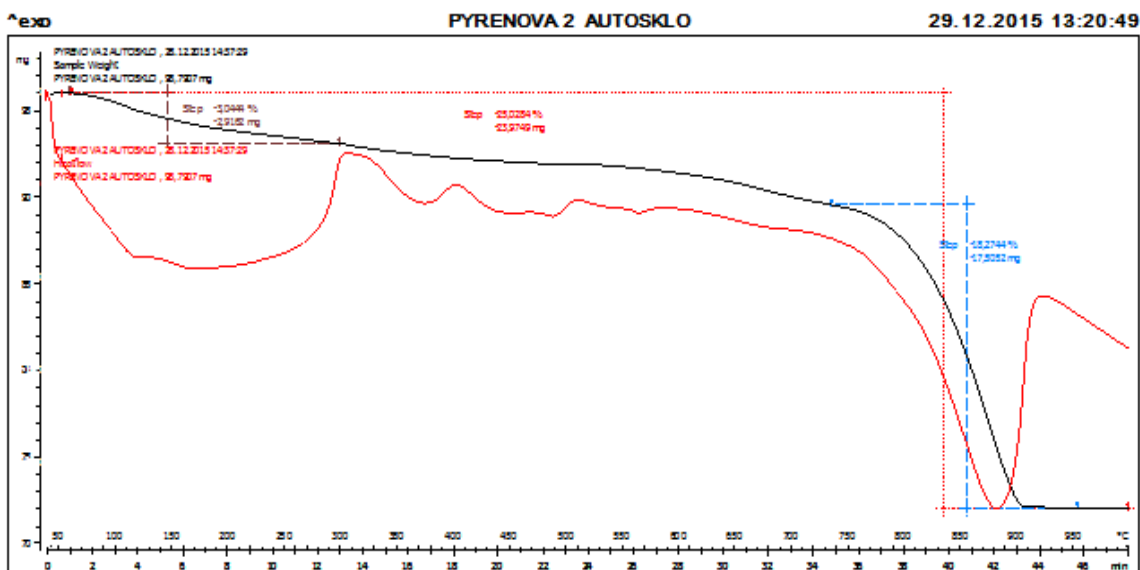


Obr. č. 53 Difraktogram polymercementové referenční malty bez skelného recyklátu

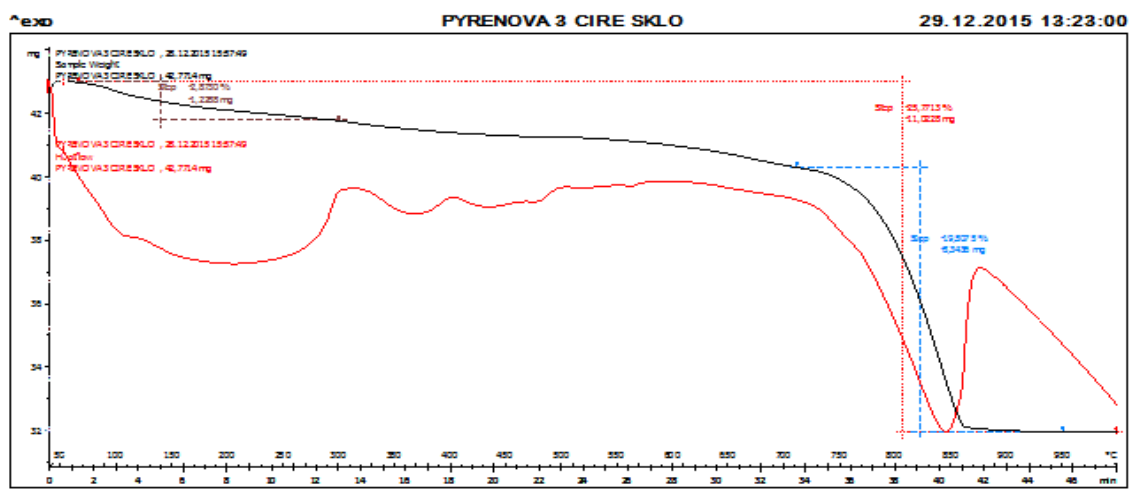
Na základě vyhodnocených difraktogramů lze konstatovat, že jednotlivé záznamy se mineralogicky příliš neliší. Prakticky totožné bylo mineralogické složení všech hmot, kde byla zjištěna přítomnost kalcitu, portlanditu a ettringitu.

4.6.2 Diferenční termická analýza (DTA)

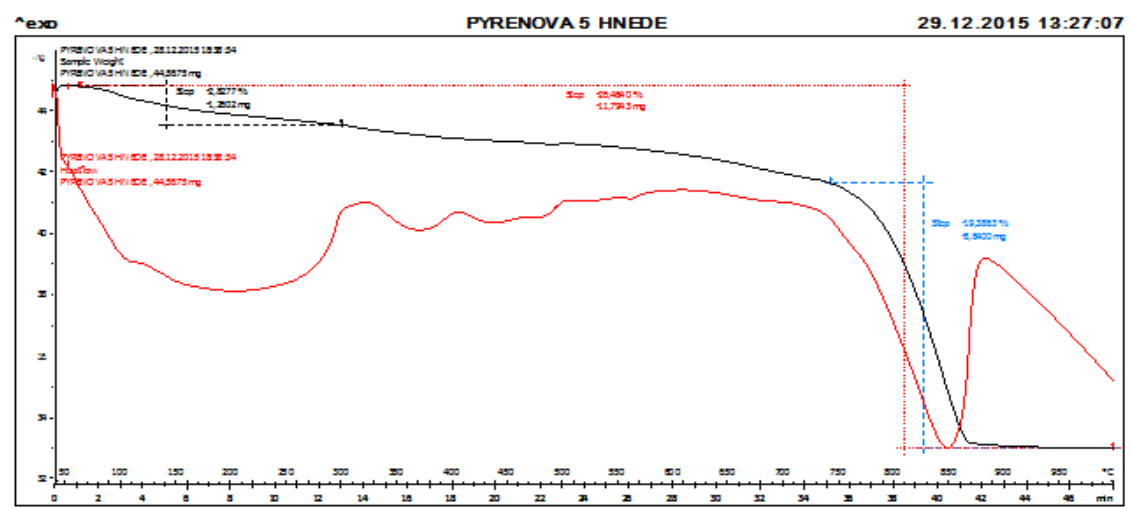
Vyhodnocené DTA záznamy hmot jsou zobrazeny na obr. č. 54 - obr. č. 59 a v tab. č. 24 jsou zobrazeny výsledné hodnoty získané z termogramů.



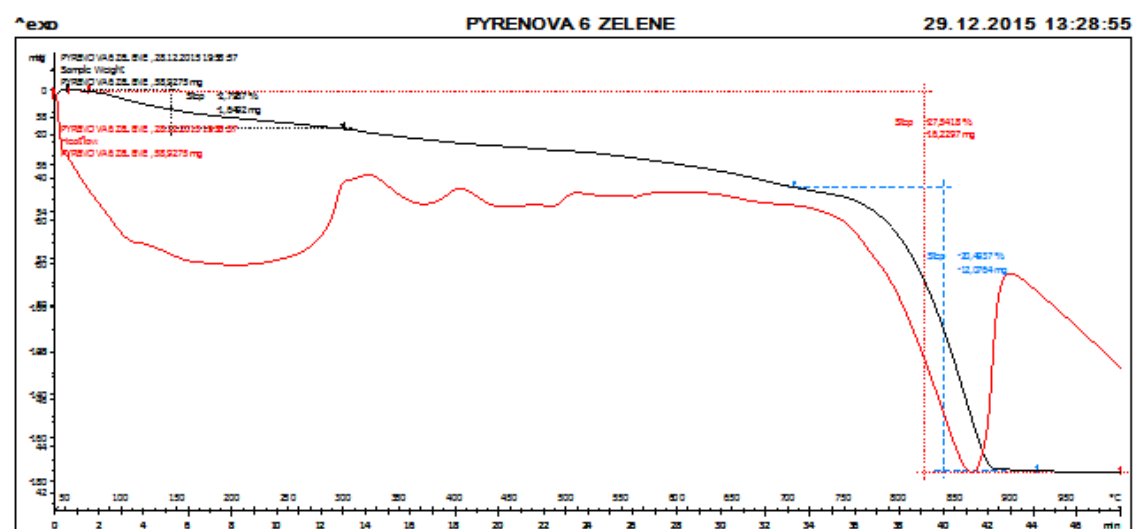
Obr. č. 54 DTA záznam polymercementové malty s přidavkem autoskla



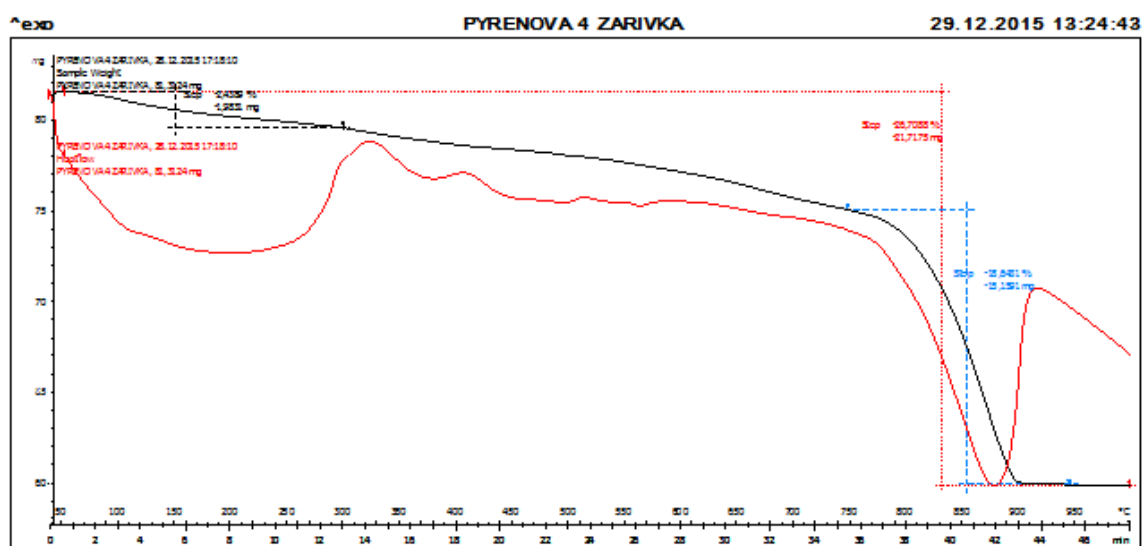
Obr. č. 55 DTA záznam polymercementové malty s přidavkem čírého skla



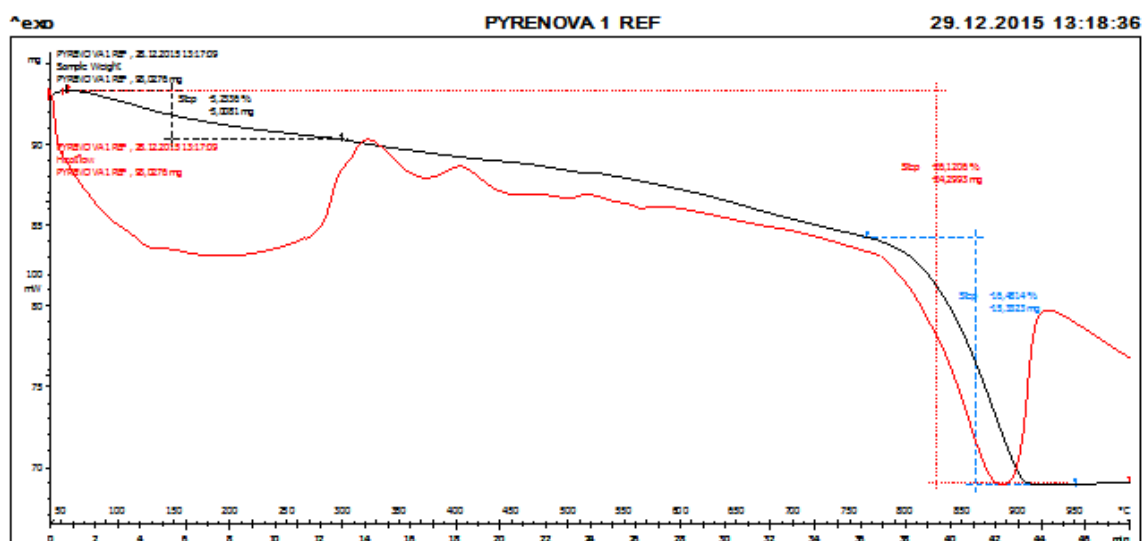
Obr. č. 56 DTA záznam polymercementové malty s přidavkem hnědého skla



Obr. č. 57 DTA záznam polymercementové malty s přidavkem zeleného skla



Obr. č. 58 DTA záznam polymercementové malty s přídavkem zářivkového skla



Obr. č. 59 DTA záznam referenční polymercementové malty bez přídavku skla

Tab. č. 24 Shrnutí DTA analýzy

Označení vzorku	Hmotnostní úbytek odpovídající rozkladu C-S-H [%]	Hmotnostní úbytek odpovídající rozkladu CaCO ₃ [%]	Ztráta žíháním [%]	Hmotnostní obsah CaCO ₃ [%]
PMM - referenční	3,2336	16,4814	26,1206	37,4577
PMM + autosklo	3,0444	18,2744	25,0284	41,5327
PMM + čiré sklo	2,8730	19,5075	25,7713	44,3352
PMM + zelené sklo	2,7987	20,4937	27,5418	46,5766
PMM + zářivkové sklo	2,4389	18,6431	26,7088	42,3707
PMM + hnědé sklo	2,8277	19,3863	26,4640	44,0598

V záznamech DTA byly sledovány reakce a hmotnostní úbytky ve hmotách s přidavkem různých typů skelného recyklátu a také u referenční hmoty bez přidavku skla. Teplotní rozklad jednotlivých minerálů byl vždy doprovázen endotermní reakcí spojenou s hmotnostním úbytkem.

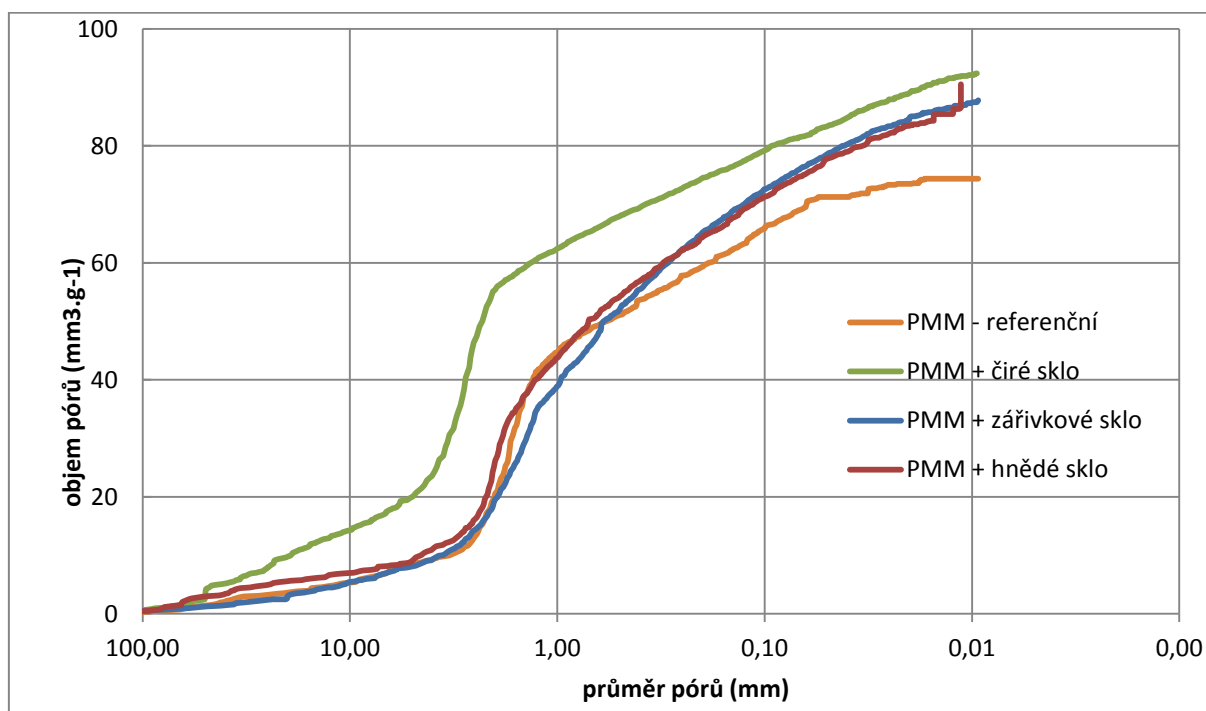
V první fázi růstu teploty do 300 °C lze sledovat endoeffekt, který odpovídá rozkladu C-S-H fáze. Při teplotě 310–400 °C dochází k rozkladu kopolymeru EVA a to v několika krocích. Nejdříve dochází k odštěpení kyseliny octové a vzniku polyethylenu v původním řetězci kopolymeru. Poté pokračuje teplotní rozklad vzniklého polyethylenového řetězce. Další velmi mírný endoeffekt při teplotě 480–520 °C je způsoben dehydratací portlanditu Ca(OH)₂. V poslední části termogramů je u všech hmot okolo teploty 770° C patrný rozklad kalcitu CaCO₃. Referenční hmota měla nejnižší obsah CaCO₃ a naopak největší obsah C-S-H fází v porovnání s ostatními hmotami s přidavkem skelného recyklátu.

4.6.3 Vysokotlaká rtuťová porozimetrie

Hodnoty získané zkouškou vysokotlaké rtuťové porozimetrie jsou uvedeny v tab. č. 25 a na obr. č. 60.

Tab. č. 25 Výsledky stanovení pórovitosti

Označení směsi	Celkový objem pórů [mm ³ ·g ⁻¹]	Celková plocha pórů [m ² ·g ⁻¹]	Objemová hmotnost [g·cm ⁻³]	Měrná hmotnost [g·cm ⁻³]	Celková pórovitost [%]
PMM - referenční	74,362	1,214	1,93654	2,26232	14,4005
PMM + čiré sklo	92,3658	2,237	1,90591	2,31311	17,604
PMM + zářivkové sklo	87,7747	2,591	2,85371	3,80739	25,0483
PMM + hnědé sklo	90,5448	3,876	2,0128	2,46138	18,2248

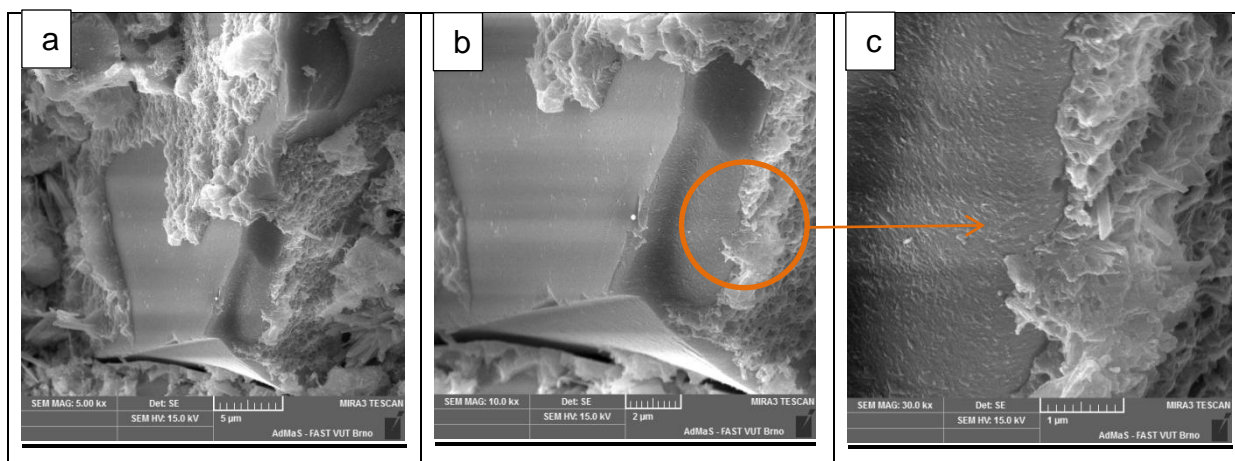


Obr. č. 60 Kumulativní objem pórů vybraných hmot

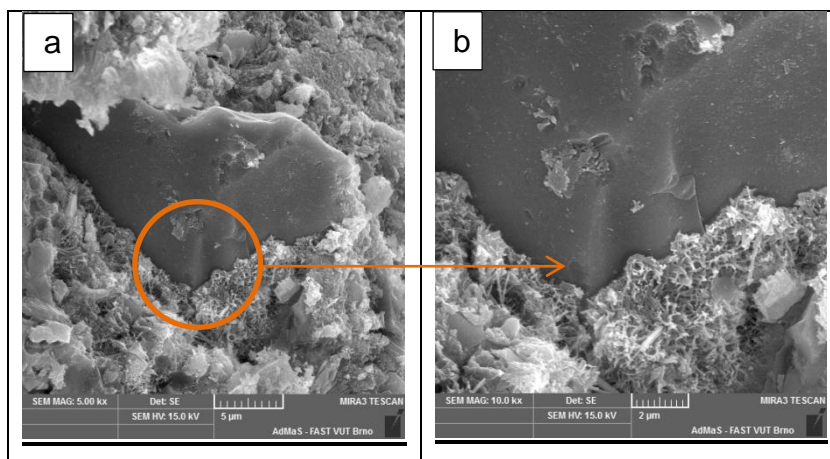
Z uvedeného grafu lze konstatovat, že nejvyšší objem pórů má hmota s přidáním čírého skla, a naopak nejnižší pórovitost vykazuje referenční hmota bez přidání skelného recyklátu. Se zmenšujícím se průměrem pórů roste u všech hmot kumulativní objem pórů.

4.6.4 Elektronová rastrovací mikroskopie (REM)

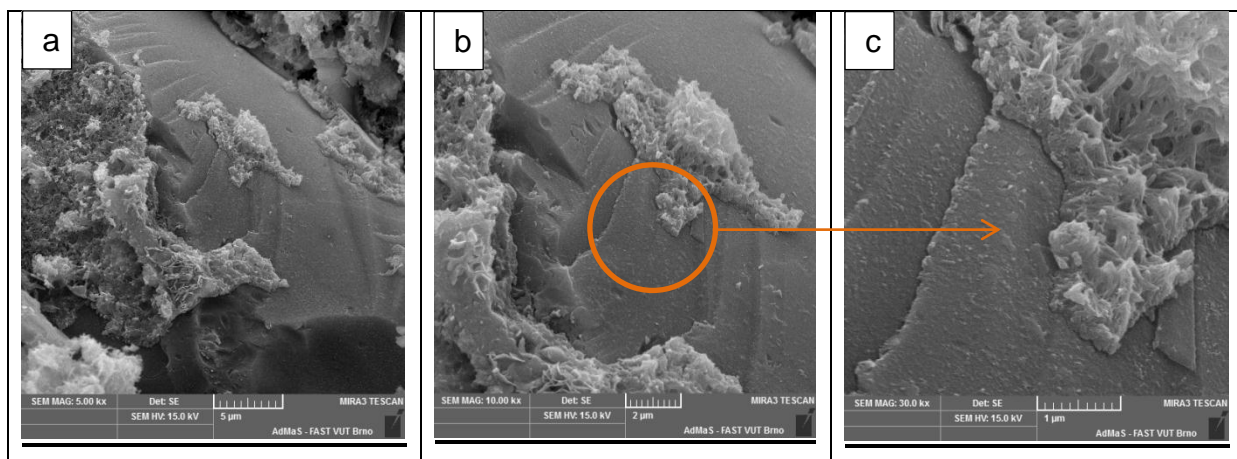
Na obr. č. 61 až obr. č. 67 jsou uvedeny snímky z rastrovacího elektronového mikroskopu jednotlivých hmot, které byly uloženy po dobu 28 dní v laboratorních podmínkách.



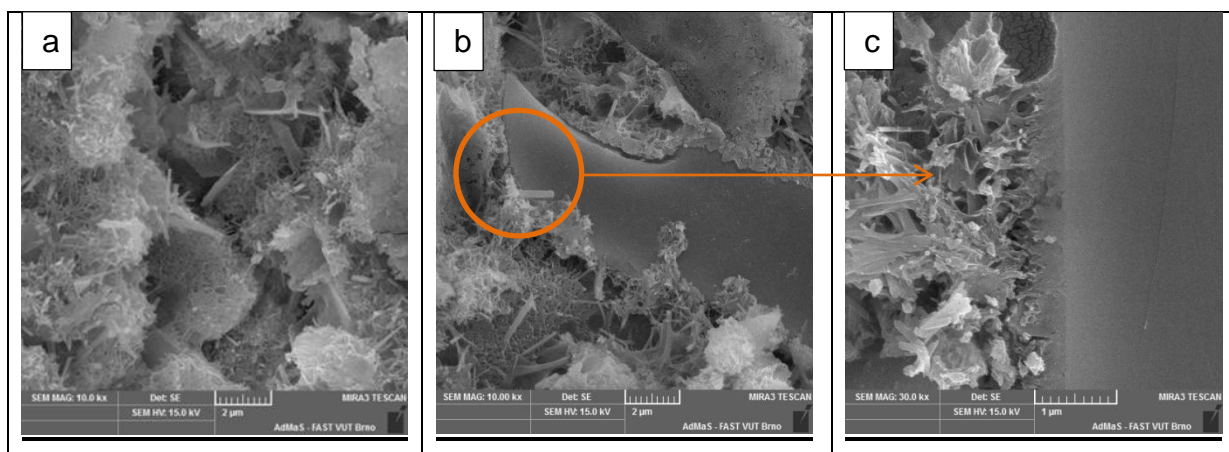
Obr. č. 61 Snímek hmoty s příměsí autoskla (a) viditelné ostrohranné zrno autoskla na jehož povrchu je viditelná C-S-H fáze při zvětšení 5000x, (b) detail zrna autoskla s viditelnou C-S-H fází při zvětšení 10 000x, (c) detail C-S-H fáze na zrna autoskla při zvětšení 30 000x.



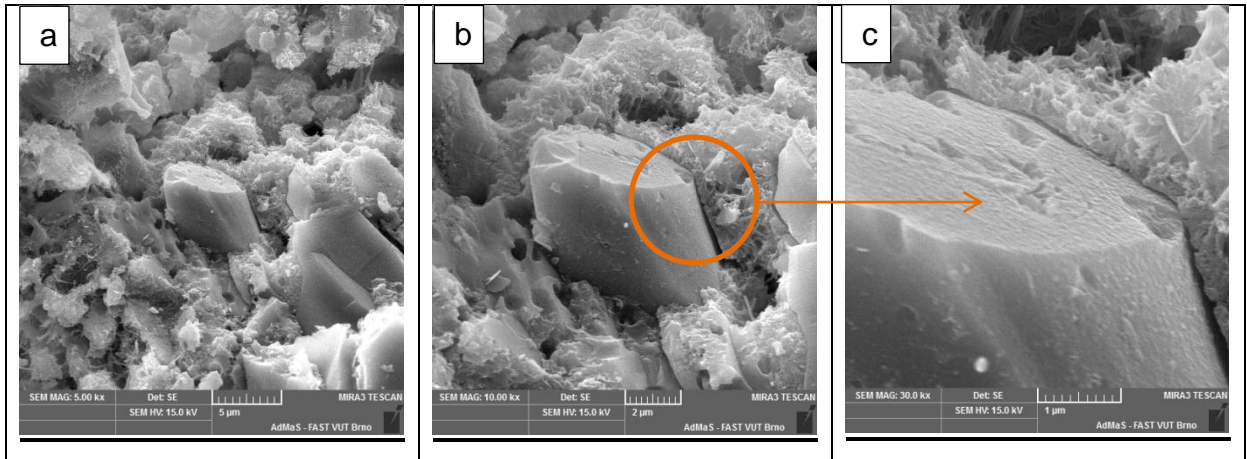
Obr. č. 62 Snímek hmoty s příměsí hnědého skla (a) ostrohranné zrno hnědého skla porostlé produkty C-S-H při zvětšení 5000x, (b) detail povrchu skleněného zrna s C-S-H produkty při zvětšení 10 000x.



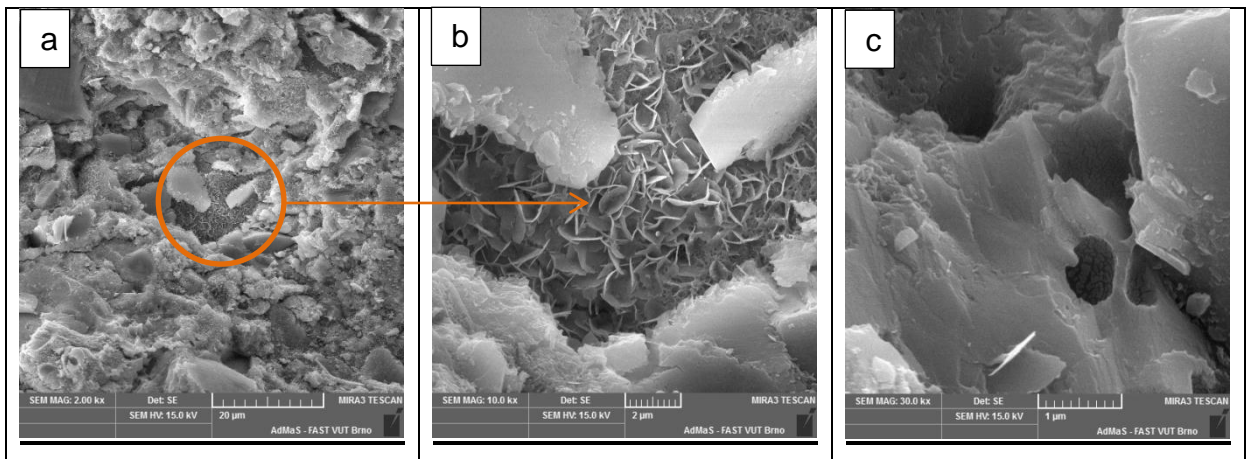
Obr. č. 63 Snímek hmoty s příměsí zeleného skla (a) viditelné strohranné zrna zeleného skla, které je porostlé produkty C-S-H při zvětšení 5000x, (b) detailnější pohled na snímek (a) při zvětšení 10 000x, (c) detail C-S-H produktů, přilepených na zrně zeleného skla při zvětšení 30 000x.



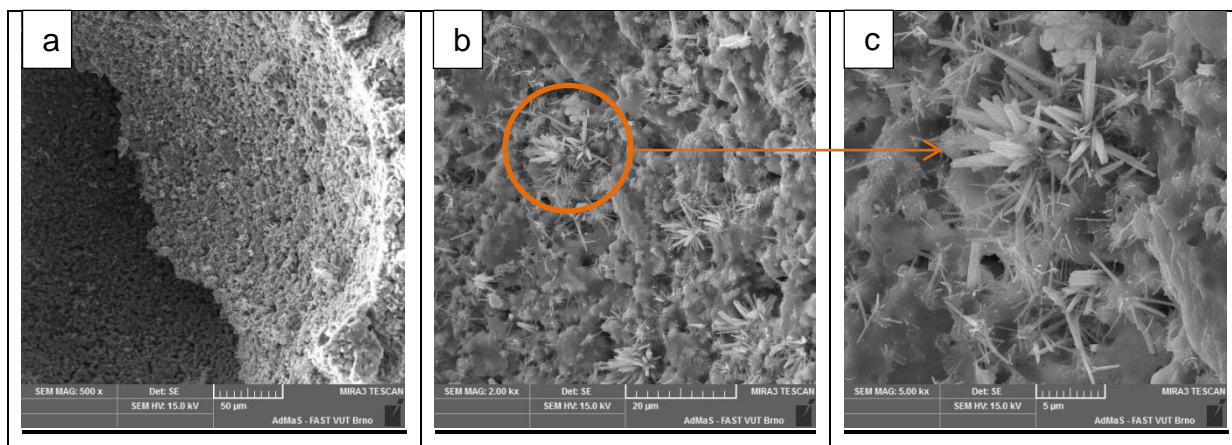
Obr. č. 64 Snímek hmoty s příměsí zářivkového skla (a) viditelné ploché lístečky portlanditu při zvětšení 5000x, (b) část zrna zářivkového skla, která je porostlá C-S-H produkty viditelná při zvětšení 10 000x, (c) detail C-S-H fáze prorůstající do zrna zářivkového skla viditelné při zvětšení 30 000x.



Obr. č. 65 Snímek hmoty s příměsí čírého skla (a) krystaly čírého skla při zvětšení 5000x, (b) detailnější snímek krystalu čírého skla na jehož povrchu jsou viditelné C-S-H produkty při zvětšení 10 000x, (c) detail zrna čírého skla s viditelnou C-S-H fází při zvětšení 30 000x.



Obr. č. 66 Snímek hmoty s příměsí čírého skla – (a) celkový pohled hmotu s viditelným CaCO_3 jako produkt karbonatace při zvětšení 2000x, (b) CaCO_3 jako produkt karbonatace při zvětšení 10 000x, (c) viditelný polymerní film při zvětšení 30 000x.



Obr. č. 67 Snímek referenční hmoty bez přídavku skelného recyklátu (a) celkový pohled na matici při zvětšení 500x, (b) detailnější pohled na strukturu matrice s viditelnými jehličkami ettringitu při zvětšení 2000x, (c) detail krystalků ettringitu při zvětšení 5000x.

Na snímcích, které jsou pořízené elektronovým rastrovacím mikroskopem, je možné vidět především zrna skelného recyklátu a vzniklé C-S-H produkty, jako je tomu na snímcích obr. č. 61, 62, 63 a 65. U hmoty, do níž bylo přidáno zářivkové sklo (viz obr. č. 64) je možné vidět také vzniklý portlandit vlivem procesu hydratace. U referenční hmoty (viz obr. č. 67) je možné sledovat výraznější výskyt ettringitu.

7. Diskuze a shrnutí výsledků

Experimentální část této práce byla zaměřena na studium vlastností polymery modifikovaných malt využívající pucolánově aktivní materiály, jako jsou různé druhy skelných recyklátů. Celkem bylo zvoleno pět druhů odpadního skla, a to čiré sklo, zelené sklo, hnědé sklo, autosklo a zářivkové sklo. Pro ověření vhodnosti materiálového využití těchto odpadních látek byly provedeny zkoušky vlastností, především jejich pucolánová aktivita, měrná hmotnost a jemnost mletí. Největší pucolánovou aktivitu vykazovalo hnědé sklo ($685 \text{ mg Ca(OH)}_2 / 1 \text{ g pucolánu}$). Skelný recyklát byl použit jako 20% náhrada portlandského cementu. Pro zlepšení pevnosti v tahu za ohybu a přídržnosti k podkladu byly cementové malty modifikovány polymerní přísadou, která vytváří v cementové matici polymerní film, jež zlepšuje tyto vlastnosti. Jako polymerní přísada byl zvolen kopolymer EVA, který byl dávkován v množství 2 % pro všechny hmoty, včetně referenční.

Hlavním cílem bylo ověření vlivu přídavku skelného recyklátu na fyzikálně-mechanické vlastnosti a trvanlivost polymercementových hmot.

Z naměřených výsledků je patrné, že nejvyšších pevností tahu za ohybu i v tlaku bylo dosaženo u referenční směsi bez přídavku skelného recyklátu a to bez vlivu doby uložení či okolního prostředí. Tyto výsledky však nebyly příliš odlišné od polymercementových malt s přídavkem skelného recyklátu. Při uložení v laboratorních podmínkách po dobu 28 a 90 dní dosáhly hmoty s čirým, hnědým a zářivkovým sklem velmi podobných pevností v tahu za ohybu jako hmota referenční. Společně s delší dobou uložení byly viditelné nárůsty pevností v tahu za ohybu u všech hmot v průměru o 1,5 MPa, což je způsobeno delší dobou zrání a pucolánovou aktivitou skla. Pevnosti v tahu za ohybu po 25 zmrazovacích cyklech byly srovnatelné téměř u všech hmot, až na PMM s přídavkem autoskla, u kterého bylo vidět výrazné snížení pevnosti vlivem zmrazovacích cyklů přibližně o 4 MPa. Uložení zkušebních vzorků při teplotě 70 °C mělo mírný vliv na snížení pevností tahu za ohybu. Největší vliv prostředí byl patrný při uložení ve vodě, kdy pevnost v tahu za ohybu klesla u všech směrů v průměru o polovinu hodnoty oproti uložení v laboratorním prostředí. Pevnosti v tlaku po 28 dnech uložení v laboratorním prostředí všech polymercementových malt dosahovaly hodnot 30-35 MPa, což je podmínkou použitelnosti polymercementových malt jako správkových materiálů. Tudiž lze konstatovat, že tyto hmoty s částečnou náhradou cementu skelným recyklátem lze použít i ve stavební praxi. Největší nárůst pevností po 90 dnech byl

zaznamenán u hmot s přídavkem čirého a hnědého skla. Po 25 zmrazovacích cyklech bylo zřetelné, že nejhůře tyto cykly snášejí hmoty s přídavkem autoskla a zeleného skla, neboť zde byl zaznamenán největší pokles pevností. Uložením zkušebních vzorků v prostředí s teplotou 70 °C byla snížena pevnost všech hmot v průměru o 10 MPa. Lze tedy říci, že nejlepší vliv má na tyto hmoty delší doba uložení v laboratorních podmínkách, což je zapříčiněno chemickými reakcemi uvnitř cementového tmele a také vlivem pucolánové reakce příměsí obsahující amorfni oxid křemičitý.

Z výsledných hodnot mrazuvzdornosti je patrné, že kromě referenční hmoty a hmoty s příměsí autoskla byly všechny ostatní hmoty klasifikovány jako mrazuvzdorné, neboť hodnota součinitele mrazuvzdornosti byla vyšší než 0,75.

Přidáním skelného recyklátu do PMM celkově vzrostla pórovitost a nasákavost hmot. Nejvyšší hodnoty byly naměřeny u hmoty s přídavkem zářivkového skla (nasákavost 5,5 g po 240 minutách).

Další provedenou zkouškou bylo zkoušení přídržnosti polymery modifikovaných malt k betonovému podkladu. K tomuto stanovení byly zvoleny alternativní zkušební postupy, při kterých byly hmoty uloženy v různých prostředích. První série vzorků byla uložena v laboratorním prostředí po dobu 28 a 90 dní. Nejvyšší přídržnosti (téměř 1,6 MPa) měly PMM s příměsí zářivkového a hnědého skla, a také referenční hmota. Naopak nejnižších přídržností dosáhly PMM s příměsí zeleného skla a autoskla, a proto byly pro další zkoušení v rámci etapy III vyřazeny. Přídržnost po 28 denním uložení v laboratorních podmínkách byla u všech hmot srovnatelná. S delší dobou uložení (90 dní) vzrostla také přídržnost malt k podkladu, a to pravděpodobně vlivem působení pucolánové reakce vlivem amorfniho SiO_2 , které je obsaženo ve skelném recyklátu. Během vodního uložení došlo k poklesu přídržností u všech PMM ve srovnání s přídržnostmi naměřených po 28 dnech uložení v laboratorním prostředí. Přídržnost hmot k betonovému podkladu po 25 zmrazovacích cyklech výrazně vzrostla u dvou hmot, a to u referenční hmoty a u hmoty s přídavkem hnědého skla. Mírný pokles byl zaznamenán pouze u hmoty s přídavkem zářivkového skla (pokles o 0,35 MPa). Další alternativní zkouškou bylo uložení po dobu 14 dnů v prostředí o teplotě 70 °C, což mělo negativní vliv na všechny PMM a to v důsledku poklesu hodnot přídržností pod 1 MPa.

Pro objasnění výsledků předchozích zkoušek byly využity analýzy, jako jsou rentgenová difrakční analýza, diferenční termická analýza, vysokotlaká rtuťová porozimetrie a rastrovací elektronová mikroskopie.

Rentgenová difrakční analýza a diferenční termická analýza prokázaly přítomnost portlanditu Ca(OH)_2 , který vzniká v průběhu hydratace slínkových minerálů a jeho rozklad v PMM probíhá při teplotách 480–520 °C. Na rentgenogramech byl také viditelný ettringit, který vzniká reakcí trikalciem aluminátu (C3A) a kalcitu CaCO_3 . Přítomnost kalcitu byla viditelná také na snímcích DTA, což se projevuje hmotnostním úbytkem okolo teploty 770 °C, kde dochází k rozkladu kalcitu CaCO_3 . V PMM byl viditelný vysoký obsah kalcitu, a to z důvodu použití vápencového plniva. Ve všech polymery modifikovaných maltách byl na snímcích DTA zaznamenán endoeffekt (při teplotě 60–300 °C), který odpovídá rozkladu C-S-H fáze. A dále byl viditelný rozklad kopolymeru EVA, který probíhá při teplotách 310–400 °C.

Výsledky porozimetrie ukázaly, že hmota s přídavkem čirého skla má nejvyšší objem pórů a naopak nejnižší pórovitost vykazuje referenční hmota bez přidání skelného recyklátu, což dokazuje také nejmenší nasákavost této hmoty. Se zmenšujícím se průměrem pórů roste u všech hmot kumulativní objem pórů.

Studium mikrostruktury bylo provedeno také prostřednictvím rastrovacího elektronového mikroskopu. Snímky při zvětšení až 30 000x z rastrovacího elektronového mikroskopu potvrdily především výskyt kalciumhydrosilikátů C-S-H, což jsou hydratační produkty vznikající při procesu tuhnutí a tvrdnutí cementu. U hmoty, do níž bylo přidáno zářivkové sklo, se podařilo zachytit také vzniklý portlandit Ca(OH)_2 , jenž vzniká během procesu hydratace. U referenční hmoty bylo možné sledovat výskyt ettringitu, který byl identifikován také na rentgenogramu.

Z výsledků vyplývá, že přídavek skelného recyklátu nemá negativní účinek na polymery modifikované malty. Ve srovnání s výsledky fyzikálně-mechanických a fyzikálně-chemických vlastností referenční hmoty lze konstatovat, že se hodnoty příliš neliší a takto navržená malta by mohla být používána jako správkový materiál ve stavební praxi, a to především z důvodu snížení ceny náhradou cementu a materiálovém využívání odpadů v souvislosti s úsporou přírodních surovinových zdrojů a ochranou životního prostředí. Otázkou je, zda celková cena úpravy a mletí skelného recyklátu v konečném důsledku nepřevýší cenu cementu.

8. Závěr

Tato diplomová práce se zabývala vlivem pucolánově aktivních materiálů, především odpadního skla, na vlastnosti polymery modifikovaných malt. Malta je kompozitní stavební látka, kde kamenivo plní funkci plniva a pojivo je druhou fází kompozitu sestávající z hydratované maltoviny (většinou cementu) a pórů. Slabým článkem v maltovém kompozitu je jednak rozhraní fází (povrch kameniva ve styku s cementovým kamenem) a jednak pórovitá struktura cementového kamene, která byla vytvořena fyzikálně chemickým procesem v průběhu hydratace cementu, přebytečnou vodou dodanou při míchání čerstvé malty nebo nedostatečným zhutněním, při němž nebyl vytěsněn všechen vzduch. Pro zlepšení některých vlastností cementových malt byla do hmoty přidána polymerní přísada (kopolymer EVA).

Hlavní myšlenkou práce bylo ověření možnosti dosažení požadovaných vlastností malt s minimální energetickou náročností (úsporou cementu) a minimálním zatížením životního prostředí. Na celém světě se ročně vyrobí přes několik miliard tun cementu, což vyvolává spotřebu obrovského množství energie a zároveň je cementářství jedním z největších zdrojů oxidu uhličitého CO_2 . Současná produkce směsného komunálního odpadu pouze v České republice přesahuje ročně přes několik mil. tun, což je dalším výrazným faktorem zatěžující životní prostředí. Využíváním vznikajícího odpadu vlastně chráníme surovinové zdroje a zároveň společnost tímto šetří své náklady za skladování odpadů, a také se ušetří při výrobě materiálů, které mohou být zpracovanými odpady nahrazeny. Pro tuto diplomovou práci bylo jako odpadní materiál zvoleno sklo, které z 20 % nahrazovalo portlandský cement. Většina skel se vyznačuje poměrně vysokým obsahem amorfního oxidu křemičitého (SiO_2), což je charakteristické především pro pucolánově aktivní materiály. V souvislosti s používáním skelného recyklátu do malt či betonů jsou diskutována dvě témata. Prvním je velikost částic v souvislosti se vznikem alkalicko křemičité reakce s amorfním SiO_2 . Podstata této reakce spočívá v dlouhodobém působení alkálií (např. K_2O , Na_2O) na amorfní SiO_2 , což vede k objemovým změnám, které mají negativní vliv na výsledné pevnosti hmot. A druhým jsou pucolánové reakce, které naopak zlepšují fyzikální a mechanické vlastnosti betonu či malt. O schopnosti reakce pucolánové příměsi v zásaditém prostředí malty rozhoduje nejen chemické složení, ale také jemnost mletí materiálu.

Z výsledků experimentální části lze vyvodit důsledky ovlivňující vlastnosti malty. Jedná se především o předúpravu vstupních surovin (jemnost mletí), způsob a dobu uložení zkušebních vzorků. Nejlepších výsledků dosáhly polymery modifikované malty s přidavkem čirého a zářivkového skla uložené v laboratorním prostředí.

Získané výsledky experimentální části diplomové práce prokázaly možnost využití skelných recyklátů jako částečné náhrady cementu v polymery modifikovaných maltách. Ve stavební praxi by bylo možné tyto malty využívat např. jako správkové hmoty, pokud by byla upravena přídržnost malt k betonovému podkladu. Zvýšení hodnot přídržnosti by bylo možné docílit upravením dávkování polymerní přísady.

9. Zdroje

[1] *Stavební materiály historických objektů* [online]. [cit. 13. 7. 2015]. Dostupný z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-80-7080-347-9/pages-img/obsah.html

[2] MAXOVA, I., PACAKOVA, M. *Péče o architektonické dědictví. Vybrane kapitoly k tematu peče o stavebni pamatky a umělecke pamatky. Praha: Idea servis konsorcium, 2008, 179 stran. ISBN 978-85970-62-3.*

[3] *Oprava historických kamenných konstrukcí. Sbornik semináře Společnosti pro technologie ochrany pamatek, Praha: STOP, 2008, 81 stran.*

[4] *Vlastnosti zdících cementových malt* [online]. [cit. 20. 8. 2015]. Dostupný z: http://www.svsoms.cz/files/Cementove_malty.pdf

[5] *Rozdělení malt* [online]. [cit. 25. 8. 2015]. Dostupný z: <http://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=malty>

[6] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: Výroba, vlastnosti, zpracování, použití. 2. vyd. Praha: VŠCHT Praha, 2006. ISBN ISBN 80-7080-617-6.*

[7] BEELDENS, A., MONTENY, J., VINCKE, E., BELIE, N., GEMERT, D., TAERWE, L., VERSTRAETE, W. *Resistance to Biogenic Sulphic Acid Corrosion of Polymer-modified mortars, Cement and Concrete Composites, Vol. 23, 2001, p. 47–56.*

[8] BEELDENS, A. *Polymers in Concrete: The Synergistic Effect between Japan and Belgium, Proceedings of ICPIIC 2007, XII. International Congress on Polymers in Concrete, Chunchon, korea, Kangwon National University, 2007, ISBN 89-960-0450-2, p.919–928.*

[9] OHAMA, Y., *Handbook of Polymer-modified Concrete and Mortars, 1ed edition: Noyes Publications, New Jersey, USA 1995, ISBN 0-8155-1358-5.*

[10] MLEZIVA, J., ŠŇUPÁREK, J. *Polymery – výroba, struktura, vlastnosti a použití, 2ed edition: Sobotáles, Brno 2000, ISBN 80-85920-72-7, 544 p.*

[11] *Lea's chemistry of cement and concrete. 4th ed. Editor Peter C Hewlett. Oxford: Elsevier, 2004, 1057 s. ISBN 07-506-6256-5.*

[12] MARAGHECHI, H., et. Al. *Pozzolanic reactivity of recycled glass powder at elevated temperatures, Cement & Concrete Composites, Vol. 53, 2014, p. 105-114.*

[13] ROZ-UD-DIN, N., PARVIZ, S. *Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement, Construction and Building Materials, Volume 29, April 2012, Pages 368-377.*

[14] *Co je to sklo [online]. [cit. 12. 9. 2015]. Dostupný z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/sklo.html>*

[15] *O skle [online]. [cit. 19. 9. 2015]. Dostupný z: <http://www.askpcr.cz/o-skle/>*

[16] MATOUŠEK, Josef. *Anorganické nekovové materiály. 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1992, 160 s. ISBN 80-7080-160-3.*

[17] *Sklo – keramika – tvrdé materiály [online]. [cit. 15. 9. 2015]. Dostupný z: <http://www.slideshare.net/kchtul/sklo-keramika-tvrde-materialy>*

[18] *Polymer-modified Mortars [online]. [cit. 16. 8. 2015]. Dostupný z: <http://www.concreteconstruction.net/polymer-concrete/polymer-modified-mortars.aspx>*

[19] RU WANG, PEI-MING WANG, XIN-GUI LI, " *Physical and Mechanical Properties of Styrene-Butadiene Rubber Emulsion Modified Cement Mortars*", *Cement and Concrete Research* 35, 2005, 900-906.

[20] *Ethylene vinyl acetate [online]. [cit. 5. 8. 2015]. Dostupný z: https://en.wikipedia.org/wiki/Ethylene-vinyl_acetate*

[21] KIANG HWEE TAN, HONGJIAN DU, *Use of waste glass as sand in mortar: Part I – Fresh, mechanical and durability properties* Original Research Article *Cement and Concrete Composites*, Volume 35, Issue 1, January 2013, Pages 109-117.

[22] HONGJIAN DU, KIANG HWEE TAN, *Use of waste glass as sand in mortar: Part II – Alkali–silica reaction and mitigation methods* Original Research Article *Cement and Concrete Composites*, Volume 35, Issue 1, January 2013, Pages 118-126.

[23] TUNG-CHAI LING, CHI-SUN POON, *Feasible use of large volumes of GGBS in 100% recycled glass architectural mortar* *Cement and Concrete Composites*, Volume 53, October 2014, Pages 350-356.

[24] *Sanační malta na vlhké zdivo* [online]. [cit. 25. 9. 2015]. Dostupný z: <http://ntplus.cz/hydroizolace-sika/injektaz-sika-pro-vlhke-zdivo/malta-pro-vlhke-zdivo-sika-mur-dry>

[25] BASHAR TAHA, GHASSAN NOUNU, *Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement* *Construction and Building Materials*, Volume 22, Issue 5, May 2008, Pages 713-720.

[26] RASHAD A., M. *Recycled waste glass as fine aggregate replacement in cementitious materials based on Portland cement*, *Construction and Building Materials*, Vol. 72, 2014, p. 340–357.

[27] ROZ-UD-DIN NASSAR, PARVIZ SOROUSHIAN, *Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement* *Construction and Building Materials*, Volume 29, April 2012, Pages 368-377.

[28] Ing. MATULOVÁ, P., Ing. MELICHAR, T., Ing. PŘIKRYL, J.: *Substituce pojiva v cementových kompozitech jemně mletou recyklovanou sklovinou s ohledem na životní prostředí*, *BETON TKS 3/2009*, 76 s.

[29] *Recyklace [online]. [cit. 27. 9. 2015]. Dostupný z:*
<https://cs.wikipedia.org/wiki/Recyklace>

[30] JOÃO L. C., ALINE S. S. et Al., *Effects of windshield waste glass on the properties of structural repair mortars Original Research Article Cement and Concrete Composites, Volume 53, October 2014, Pages 88-96.*

[31] *Využití průmyslových odpadních materiálů při výrobě stavebních hmot [online]. [cit. 27. 9. 2015]. Dostupný z: http://www.casopisstavebnictvi.cz/vyuziti-prumyslovych-odpadnich-materialu-pri-vyrobe-stavebnich-hmot_A753_I18*

[32] DOBEŠ M., et al. *Recyklované stavební materiály [online]. [cit. 25. 8. 2015]. Dostupný z: <http://www.dolceta.eu/ceska-republika/Mod5/Recyklovane-stavebnimaterialy>*

[33] *Recyklace skla a její význam [online]. [cit. 27. 9. 2015]. Dostupný z: http://splrecycling.com/recyklace_skla_a_jeji_vyznam.html*

10. Seznam použitých zkratek a symbolů

- PMM – polymery modifikované malty
PCM – polymercementové malty
RTG – rentgenová difrakční analýza
DTA – diferenční termická analýza
REM – rastrovací elektronová mikroskopie
ASR – alkalicko-křemičitá reakce
EVA – kopolymer etylenu s vinylacetátem
ABS – akrylonitril-butadien-styrenový kaučuk
BSR – butadien-styrenový kaučuk
 $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$ – ethylen
 $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\text{O}-\text{COCH}_3$ - polární vinylacetát
 SiO_2 – oxid křemičitý
 Al_2O_3 - oxid hlinitý
 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – hydroxid vápenatý
CaO – oxid vápenatý
C-S-H gel – hydratované křemičitany
 CaCO_3 - vápenec
 Na_2CO_3 – soda
 K_2CO_3 – potaš
 CO_2 – oxid uhličitý
 $\text{Si}(\text{OH})_4$ – hydroxid siřičitý
 Cr_2O_3 – oxid chromitý
HCl – kyselina chlorovodíková
 Fe_2O_3 – oxid železitý
MgO – oxid manganatý
 SO_3 – oxid sírový
 Na_2O – oxid sodný
 K_2O – oxid draselný
 SiF_4 – fluorid křemičitý