



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

STUDIUM VLASTNOSTÍ POLYMERY MODIFIKOVANÝCH MALT VYUŽÍVAJÍCÍ SKELNÝ RECYKLÁT

STUDY OF THE PROPERTIES OF POLYMER-MODIFIED MORTARS USING RECYCLED GLASS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MICHAELA DOŘIČÁKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Doc. Ing. NIKOL ŽIŽKOVÁ, Ph.D.

BRNO 2017



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

Student	Bc. Michaela Dořičáková
Název	Studium vlastností polymery modifikovaných malt využívající skelný recyklát
Vedoucí práce	doc. Ing. Nikol Žižková, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2016
Datum odevzdání	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

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

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

PODKLADY A LITERATURA

JOÃO L. C., ALINE S. S. et al., Effects of windshield waste glass on the properties of structural repair mortars, Cement and Concrete Composites, Volume 53, October 2014, p. 88-96.

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

OHAMA, Y., Handbook of Polymer-modified Concrete and Mortars, Noyes Publications, New Jersey, USA 1995, ISBN 0-8155-1358-5.

Příslušné normy.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Pro výrobu polymery modifikovaných malt lze využít řadu alternativních surovinových zdrojů, včetně odpadních materiálů, které jsou použitelné jako částečná náhrada plniva i pojiva. Diplomová práce bude zaměřena na studium vlastností polymery modifikovaných cementových malt v důsledku použití různých typů skelných recyklátů. Použity tedy budou pucolánově aktivní 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 skelných recyklátů na vlastnosti PMM, a to jak v čerstvém, tak v zatvrdlém stavu.
 2. Vyberte vhodné typy skelných recyklátů a ověřte jejich vlastnosti (chemické a mineralogické složení, pucolánovou aktivitu atd.).
 3. Navrhnete provedení experimentálních výzkumných prací. Proveďte návrh receptur, volbu vhodných zkušebních těles a prostředí, ve kterých budou Vámi vyrobená zkušební tělesa uložena a navrhnete metodiku zkoušení dle platných norem (např. dle norem řady ČSN EN 1015), případně alternativní zkušební postupy.
 3. Experimentálně ověřte vlastnosti Vámi sledovaných PMM a vyhodnoťte vliv přídavku skelného recyklátu na výsledné vlastnosti testovaných PMM.
 4. Na základě výsledků Vašich experimentálních prací předložte hodnocení sledovaných PMM, pro objasnění výsledků využijte vhodné analýzy např. RDA, DTA, REM.
 5. Získané výsledky zpracujte do přehledných tabulek a grafů.
 6. Proveďte zhodnocení dosažených výsledků a rozbor problematiky s doporučením týkajícím se využití studovaných polymery modifikovaných malt.
- Rozsah práce 60–80 stran.

STRUKTURA 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

Diplomová práce se zabývá studiem vlastností polymery modifikovaných malt využívající skelný recyklát a je rozdělena do dvou částí, teoretickou a praktickou. V teoretické části byla vypracována odborná rešerše, která se zabývá polymery modifikovanými maltami s využitím skelného recyklátu. Na základě těchto informací byla vypracována praktická část, která se zaměřila na studium vlastností malt v závislosti na časovém období a prostředí.

Klíčová slova

Polymery modifikované malty, sklo, recyklace, skelný recyklát, kopolymer EVA, vlastnosti malt

Abstract

Master's thesis deals with the study properties of polymer modified mortars using recycled glass and is divided into two parts, theoretical and practical. In the theoretical part has been expert search which deals with polymer modified mortars using recycled glass. On the basis of this information has been formulate practical part, which focused on the study properties of mortars depending on the time period and environment.

Keywords

Polymer modified mortars, glass, recycling, recycling glass, copolymer EVA, properties of mortars

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Michaela Dořičáková *Studium vlastností polymery modifikovaných malt využívající skelný recyklát*. Brno, 2017. 97 s., 101 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Nikol Žižková, Ph.D.

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 13. 1. 2017

.....

podpis autora

Bc. Michaela Dořičáková

Prohlášení:

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

V Brně dne 13. 1. 2017

.....
podpis autora

Bc. Michaela Dořičáková

Poděkování:

Tímto děkuji doc. Ing. Nikol Žížkové Ph.D. za pomoc při vedení diplomové práce, za čas poskytnutý korekcím této práce a vstřícnost a cenné rady, se kterými mi pomohla v průběhu řešení. Mé poděkování patří též paní Blance Bártové za spolupráci při získávání údajů pro praktickou část práce. Tato diplomová práce byla zpracována s využitím infrastruktury Centra AdMaS.

Obsah

1	Úvod	11
2	Cíl práce.....	12
3	Teoretická část.....	13
3.1	Polymery modifikované malty	13
3.1.1	Historie polymerů a polymery modifikované malty	13
3.1.2	Tvorba a struktura PMM.....	15
3.1.3	Vlastnosti PMM.....	17
3.1.4	Kopolymer etylen-vinylacetátu v maltách	18
3.2	Sklo a jeho recyklace	19
3.2.1	Historie skla	19
3.2.2	Chemické složení	19
3.2.3	Dělení skla	20
3.2.4	Technologie výroby	21
3.2.5	Vlastnosti skla.....	22
3.2.6	Sklářský průmysl v České republice.....	23
3.2.7	Recyklace skla	24
3.2.8	Využití skelného recyklátu	29
3.3	Skelný recyklát v cementové matici	30
3.3.1	Pucolánová aktivita.....	30
3.3.2	Alkalicko-křemičitá reakce.....	31
3.3.3	Hydratace malt se skelným recyklátem	32
3.3.4	Mikrostruktura malt se skelným recyklátem	34
3.3.5	Fyzikální a mechanické vlastnosti malt se skelným recyklátem	36
4	Praktická část.....	37
4.1	Metodika práce.....	37

4.1.1	ETAPA I	37
4.1.2	ETAPA II.....	38
4.1.3	ETAPA III.....	39
4.1.4	ETAPA IV	39
4.2	Prováděné zkoušky.....	40
4.2.1	Laserová difrakční analýza	40
4.2.2	Pucolánová aktivita.....	40
4.2.3	Měrná hmotnost	40
4.2.4	Stanovení konzistence čerstvé malty	41
4.2.5	Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlé malty	41
4.2.6	Stanovení pevnosti v tahu za ohybu	41
4.2.7	Stanovení pevnosti v tlaku.....	42
4.2.8	Stanovení přídržnosti	42
4.2.9	Stanovení nasákavosti.....	43
4.2.10	Stanovení mrazuvzdornosti.....	43
4.2.11	Stanovení mechanických vlastností po ponoření do vody.....	44
4.2.12	Stanovení mechanických vlastností po tepelném stárnutí	44
4.2.13	Diferenční termická analýza	44
4.2.14	Rentgenová difrakční analýza.....	45
4.2.15	Rastrovací elektronová mikroskopie	45
4.2.16	Vysokotlaká rtuťová porozimetrie.....	45
4.3	Přístroje a pomůcky.....	45
4.4	Vyhodnocení ETAPY I.....	46
4.4.1	Cement.....	46
4.4.2	Kopolymer ethylenvinylacetátu.....	47
4.4.3	Skelný recyklát	47
4.4.4	Normalizovaný křemenný písek CEN	50

4.4.5	Voda.....	50
4.5	Vyhodnocení ETAPY II.....	50
4.6	Vyhodnocení ETAPY III	61
4.7	Vyhodnocení ETAPY IV	73
4.7.1	Diferenční termická analýza	73
4.7.2	Rentgenová difrakční analýza.....	76
4.7.3	Elektronová rastrovací mikroskopie	77
4.7.4	Vysokotlaká rtuťová porozimetrie.....	78
5	Diskuse a shrnutí	81
6	Závěr.....	84
7	Zdroje	86
8	Seznam zkratk a symbolů	90
9	Seznam obrázků.....	92
10	Seznam tabulek	94
11	Přílohy.....	96

1 Úvod

Polymery modifikovaná malta je kompozitní materiál, který se skládá z písku, vody, cementu či vápna a z polymerních látek, které pomáhají zlepšit vlastnosti malty. Přidáním polymerních látek do malty má za následek lepší zpracovatelnost, nepropustnost, adhezi nebo zlepšení mechanických vlastností. Ovšem nevýhodou u polymery modifikovaných malt je vyšší cena, která je způsobena použitím drahých polymerů. Tyto malty jsou používány ve stavebnictví k lepení, omítání popřípadě k reprofilaci poškozených prvků.

V dnešním světě stavebnictví jsou kladeny vysoké nároky na ekonomickou hospodárnost a hlavně na omezení emisních škodlivých plynů, méně častému využívání přírodních surovin a energetickou nenáročnost. Jednou z nejdražších a základních složek malty je cement, který se vyznačuje skvělými mechanickými pevnostmi. Při jeho výrobě dochází k velké spotřebě energie a vzniku agresivních plynů, které mají za následek znečištění životního prostředí. Je třeba také upozornit, že při jeho výrobě dochází ke spotřebě přírodních neobnovitelných surovin. Proto se v dnešní době stále více uplatňují směsné cementy, kdy je cement částečně nahrazen hydraulicky aktivními látkami, jako je, například popílek nebo struska. Objem těchto využívaných surovin neustále roste, což má za následek růst jejich cen.

Dalším možným řešením je využití recyklovatelného pevného odpadu, jako částečnou náhradu za cement. Použitím těchto materiálů bude mít za následek snížení počtu nových skládek a odlehčení těm stávajícím. Využití těchto odpadů se taktéž projeví kladně k životnímu prostředí a to konkrétně ke snížené spotřebě přírodních surovin, ke snížení skleníkových plynů a v neposlední řadě také k estetice přírody. Mezi potencionální druhotné recyklovatelné suroviny lze zařadit například sklo, které je z ekonomického hlediska levné a výhodné. Sklo se velice přibližuje svým chemickým a mineralogickým složením k pucolánům, které se dnes hojně využívají.

Úkolem této diplomové práce bude studium využitelnosti skelného recyklátu jako hydraulicky aktivní látky v polymery modifikovaných maltách.

2 Cíl práce

Cílem této diplomové práce je studium vlastností polymery modifikovaných malt s využitím skelného recyklátu v závislosti na časovém období a ošetřovaném prostředí. Úkolem teoretické části je vypracování odborné rešerše týkající se polymery modifikovaných malt a využitím skelného recyklátu v těchto maltách.

Na základě poznatků z teoretické části se experimentální část zabývá zkoumáním vlastností, kdy je částečně portlandský cement nahrazen několika druhy skelného recyklátu s použitím kopolymeru EVA. První etapa se zabývá zvolením vhodných skelných recyklátů a ověřují se jejich vlastnosti jako je například pucolánová aktivita či měrná hmotnost. V druhé etapě jsou zhotoveny zkušební vzorky a na nich provedeny navrhované zkoušky. V další etapě jsou zkušební vzorky dány do vybraného prostředí. Po stanoveném čase jsou na vzorcích provedeny dané zkoušky. V poslední části, je sledováno mineralogické složení a mikrostruktura vzorků. Výsledky zkoušek jsou vždy srovnávány s hodnotami referenčních vzorků.

Závěrem diplomové práce je souhrn poznatků a zhodnocení dosažených výsledků, které mohou být významné pro budoucí stavební praxi.

3 Teoretická část

3.1 Polymery modifikované malty

U moderních konstrukcí a jejich oprav se úloha polymerů každým dnem zvyšuje. Značnou pozornost získaly hlavně v průběhu posledních 25 let [1]. Polymery se využívají jako částečná náhrada cementu, nebo dokonce nahrazují pojivo v celém obsahu. Kompozity vyrobené pomocí polymeru spolu s cementem a kamenivem se nazývají polymerem modifikované malty (PMM), zatímco kompozity tvořené polymerem a kamenivem se nazývají polymerové malty (PM) [2]. Použití polymerů výrazně zlepšuje zpracovatelnost, pevnosti, přilnavost, mrazuvzdornost, odolnost vůči chloridům, nepropustnost a trvanlivost malt. Díky těmto vlastnostem je PMM vhodná pro prefabrikovanou výrobu, stavbu mostů, průmyslových podlah, ale především k rekonstrukcím [3]. Polymery pro výrobu malt se používají v různých formách: tekuté pryskyřice, redispergovatelný polymerní prášek (nejčastější), ve vodě rozpustné polymery, monomery a polymerní latexy [4]. Poslední ze jmenovaných polymerů se dále rozdělují na latexové elastomery, termosety, termoplasty, bitumany a latexy kombinované. Volba polymeru závisí na požadovaných vlastnostech, jakou jsou například pevnosti, mrazuvzdornost aj. Polymerní systémy mohou být modifikovány použitím přídatných látek, jako jsou povrchově aktivní látky, stabilizátory a barvicí pigmenty. Pro výrobu PMM se nejčastěji využívají latexy nebo kombinace polymerů polyvinylacetátu, kopolymerů ethylen vinyl acetátu, styren-butadienu, styren-akrylátu a akrylátu [3], [5].

3.1.1 Historie polymerů a polymery modifikované malty

Polymery byly používány v různých aplikacích napříč staletími. První zmínky pochází z 12. století, kdy byl v Anglii založen Cech zpracovatelů rohoviny. Rohovina odborně též kreatin sloužila k výplni oken a luceren. V 15. stol. se hojně používal přírodní kaučuk [6]. V první polovině 19. stol. byl vynalezen celuloid, který nahradil používání slonoviny. 20. stol. se vyznačuje rozvojem syntetických polymerů a rozděluje se do čtyř etap. První etapa je od roku 1900 až do 50. let 20. stol. Tato etapa

byla hlavně obdobím výzkumu chemických látek a reakcí při kterých vznikly tyto polymery: bakelit (1907); acetát celulózy a polyvinylchlorid (1927); polystyren a polyamidy (30. léta); polypropylen, polyethylen, polykarbonát, polyethylentetraftalát a mnoho jiných (50. léta). Druhá etapa (60. – 70. léta) se vyznačuje výzkumem objevených plastů a je zaměřena na jejich praktické využití. Ovšem i v tomto období vznikla nová skupina polymerů, která slouží pro náročnější aplikace. Konkrétně jde o vznik kevlaru a kevlarových vláken. Ve třetí etapě (80. léta) se vyvíjely polymerní směsi a kompozity, konkrétně jde o vznik polykarbonátu – akrylonitrilbutadienstyrenu. Čtvrtá etapa (90. léta) se vyznačuje tzv. plasty na míru, kdy byly vyvinuty a zkoumány metallocenové katalyzátory. Ve 21. stol. byl zahájen výzkum inteligentních polymerů (polymer, který přijme a zpracuje podnět a odpoví vytvořením užitečného efektu) a polymerních nanomateriálů [6], [7].

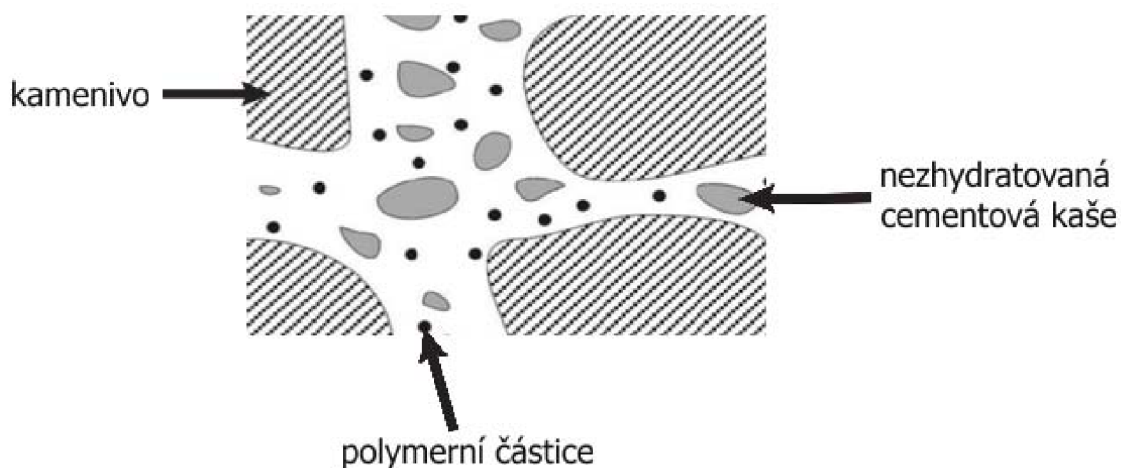
Jedno z prvních použití polymeru do cementové matrice bylo v roce 1923. Konkrétně byl použit kaučukový latex a to v podlahových krytinách. Kolem roku 1930 se začaly do malt přidávat první syntetické pryskyřice, kaučuky a polyvinylacetáty. V roce 1940 byl vynalezen neopren tzv. chloroprenkaučuk, který byl aplikován do PMM. V 60. letech 20. stol. byl vyvinut systém s nenasyceným polyesterem pryskyřice, který nese název Estercrete. Mezi roky 1965 až 1973 patentovali S. Donnelly a P. Duff [4] systém využívající epoxidové pryskyřice. V 80. letech se stávají PMM běžnou součástí konstrukcí ve stavebním průmyslu [4]. V dnešní době se výzkum zabývá rozvojem materiálů, kde se snaží polymerem částečně nahradit cement či kamenivo. V budoucnu je zcela možné, že se dočkáme inteligentních PMM či nových nanomateriálů na bázi polymeru. Dále se do budoucna očekává, zpřísnění omezení styrenu (těkavá organická, karcinogenní, teratogenní látka poškozující hormonální systém) a jiných těkavých látek; vývoj, hybridních pryskyřic, které budou mít výhodné vlastnosti dvou a více pryskyřic; nahrazení vzduchu plynem, který se začlení do polymeru a vznikne polymerbeton či malta bez pórů. Důležitým faktorem v budoucnu budou opravy a rekonstrukce různých typů objektů. Předpokládá se vývoj PMM, která bude tvrdnout a nabývat požadovaných vlastností za krátký čas a reagovat na zvláštní potřeby dané konstrukce [1].

3.1.2 Tvorba a struktura PMM

Prof. Ohama ve své knize *Handbook of polymer-modified concrete and mortars* zjednodušeně popsal třístupňový model, který znázorňuje tvorbu PMM [4]. Tento model částečně pozměnila prof. Anne Beeldens, která ve čtyřech krocích znázornila a popsal spolupůsobení polymeru s cementovou matricí [8]. Tyto 4 kroky jsou popsány a znázorněny níže v podkapitolách.

3.1.2.1 Tvorba a struktura PMM – krok 1

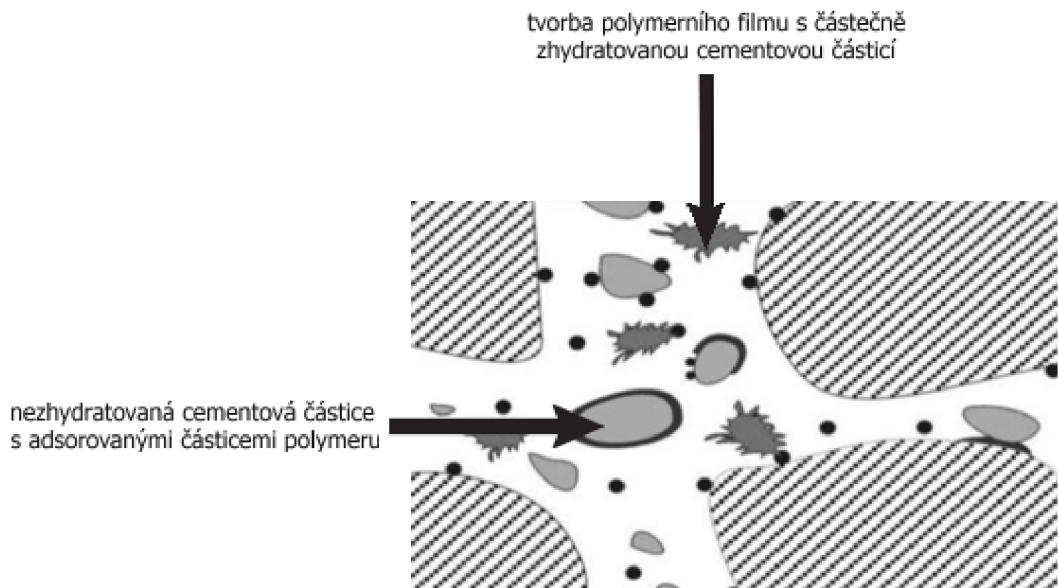
V 1. kroku dojde ke smíchání kameniva, cementu a polymeru, kde se všechny složky pokud možno co nejrovnoměrněji rozptýlí ve vodě a dochází k první části hydratace cementu. Tento krok je znázorněn na obr. 1.



Obr. 1: 1. stupeň – smíchání kameniva, cementu a polymeru s vodou [8]

3.1.2.2 Tvorba a struktura PMM – krok 2

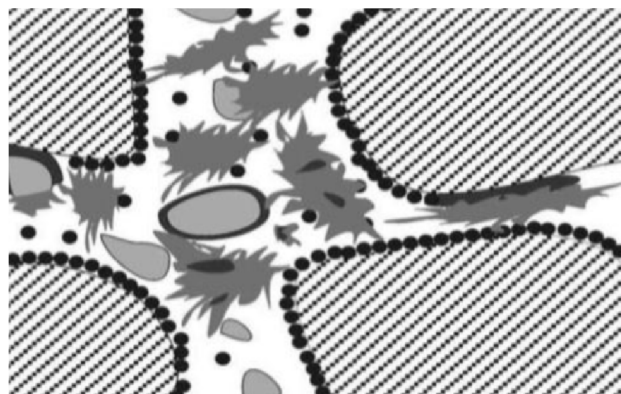
2. krok znázorňuje skupinu polymerních částic, které začínají tvořit polymerní film. Tento film je převážně na povrchu hydratačních produktů, které byly utvořeny při hydrataci a tím způsobuje, zpomalení hydratace cementu. Viz obr. 2.



Obr. 2: 2. stupeň – reakce polymeru s cementovými zrny a vznik polymerního filmu [8]

3.1.2.3 Tvorba a struktura PMM – krok 3

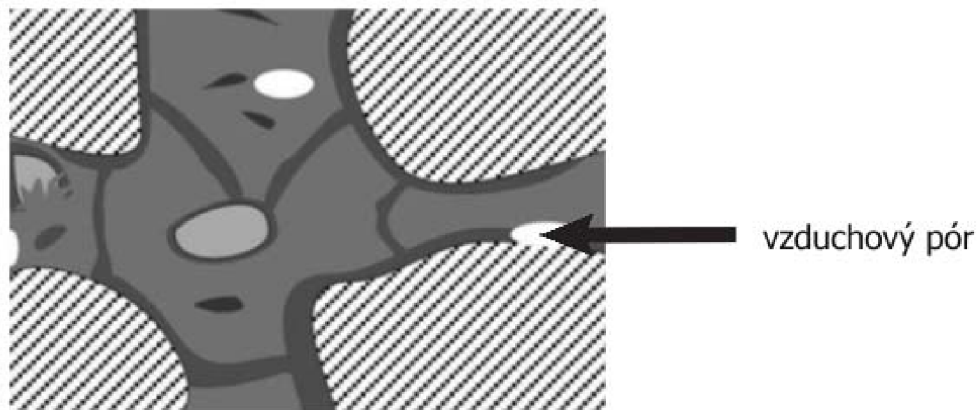
Ve 3. kroku pokračuje hydratace cementu, flokulace polymeru a dochází k tzv. koalescenci, kdy se utváří souvislý polymerní film. Tyto procesy jsou závislé na podmínkách prostředí. Zpomalení tvorby polymerního filmu je v případě nedostatku vlhkosti a tudíž omezení vlivu na vlastnosti malty. Při uložení ve vlhkém prostředí se tvoří polymerní film, který ovlivňuje vývoj vlastností a to zejména pevností v raném stáří vzorku.



Obr. 3: 3. stupeň – tvorba souvislého polymerního filmu [8]

3.1.2.4 Tvorba a struktura PMM – krok 4

4. krok je stupněm posledním, kde dochází k finálnímu vytvoření polymerního filmu. Polymerní částice, které se stále vyskytují v disperzi, jsou zredukovány do kapilárních pórů na rozhraní kamenivo/polymer – cementová fáze. Tyto částice významně přispívají k pružnosti a ke konečným pevnostem malty [8]. Tento krok je zaznamenán na obr. 4.



Obr. 4: 4. stupeň – dokončení polymerního filmu a hydratace cementu [8]

3.1.3 Vlastnosti PMM

Polymery zlepšují tři hlavní vlastnosti malt a to:

1. Zpracovatelnost, tudíž se s maltou snadněji manipuluje a lépe se aplikuje. Některé z polymerů se chovají jako plastifikátory. Tudíž lze snížit vodní součinitel a to vede k lepším pevnostem nebo ke snížení pórovitosti malty.

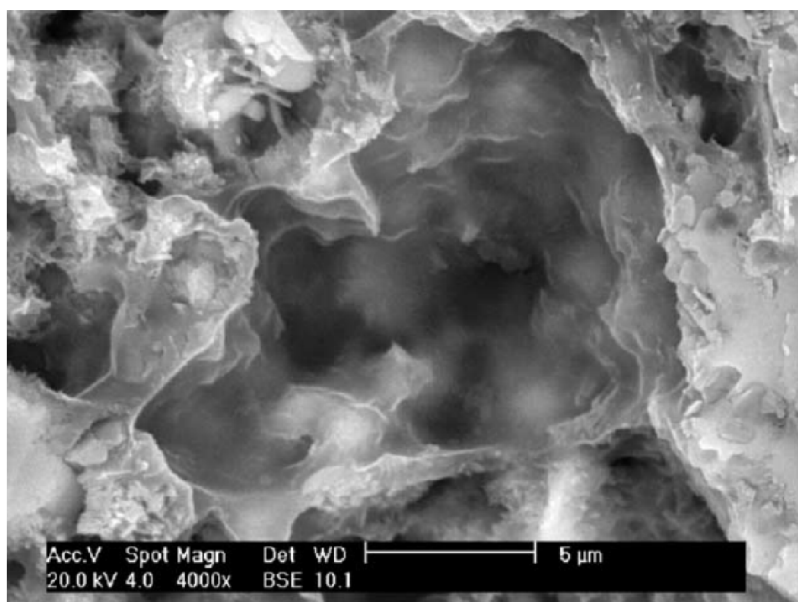
2. Přídržnost. Některé polymery působí jako lepidlo, které umožňují PMM držet na různých površích jako je beton, zdivo, dřevo, sklo, kov aj. Tato vlastnost je důležitá zejména u malt, které jsou použity v prostředí s nadměrnými vibracemi či silným provozem.

3. Pevnost a trvanlivost. Ztvrdlé PMM mají lepší pevnosti v tahu za ohybu. Také jsou odolnější vůči otěru, vodě a chemikáliím.

Kombinace těchto vlastností umožňuje použití PMM například v situacích a na místech, které by byly jinak obtížně konstruovatelné [9].

3.1.4 Kopolymer etylen-vinylacetátu v maltách

Zjednodušeně také kopolymer EVA, který se skládá z nepolárního etylenu a polárního vinylacetátu. Vzniká blokovou vysokotlakou radikálovou polymerací, která probíhá při tlaku 140 MPa a teplotě kolem 180 až 250 °C. Vlastnosti samotné EVA jsou ovlivněny obsahem vinylacetátu (VA). Vyšší obsah VA zvyšuje pružnost materiálu a naopak nižším množstvím je získána vysoká tvrdost materiálu [10]. EVA je dodávána jako polymerní přísada do suchých maltových směsí v podobě redispergovatelného prášku. Bylo zpozorováno, že přidáním kopolymeru EVA do malty dochází k vzájemnému působení organických a anorganických látek, tvořící v průběhu času polymerní film viz obr. 5 [11], [12].



Obr. 5: Polymerní film v cementové pastě s kopolymerem EVA [13]

3.2 Sklo a jeho recyklace

Sklo je amorfni pevná látka, která vznikla ztuhnutím taveniny bez krystalizace. Vyznačuje se vysokou tvrdostí, propustností světla a nerozpustností. Taktéž je odolné vůči chemickým a povětrnostním vlivům [14].

Pod pojmem sklo je možné si představit sklo čiré, barevné, průzračné či křehké. Lze ho také nazvat „nesmrtelným materiálem“, protože může být nekonečně mnohokrát recyklováno. Recyklát se prodává sklárnám k výrobě nových produktů. Teoreticky lze říci, že každá skleněná lahev je z 50 % až 80 % vyrobena z recyklovaného skla. Jestliže by byla zajištěna jednodruhovitost tříděného skla, stala by se nová láhev takřka nekonečně mnohokrát recyklovatelnou [15].

3.2.1 Historie skla

První podoba skla byla použita v Mezopotámii kolem roku 3000 př. n. l. V té době bylo sklářství pomalé a nákladné, jelikož byly malé pece a stěží se dosahovalo teploty tavení. S vynálezem sklářské píšťaly asi v roce 30 př. n. l., se stala výroba skla jednodušší, rychlejší a levnější. Poprvé v historii byly sklářské výrobky dostupné i pro širší veřejnost. První barevné sklo se objevilo v 1. století našeho letopočtu, kdy byl použit mangan. V roce 1674, anglický sklář Jiří Ravenscroft, patentoval nový typ skla, kde využíval velké množství oxidu olovnatého. Tento typ skla byl nazván jako olovnaté sklo (křišťálové sklo). Ve Francii v roce 1688 se vyvinul nový postup k vytváření tabulového skla. To mělo za následek výrobu kvalitních zrcadel. Francouzský vědec Edouard Benedictus v roce 1910 vynalezl pomocí laminační techniky bezpečnostní vrstvené sklo Triplex [16].

3.2.2 Chemické složení

Při výrobě skla je zapotřebí sklářského kmene. Jeho základní surovinou je křemenný písek s obsahem SiO_2 kolem 60–80 %, který musí být chemicky čistý. Pro výrobu okenního skla je přidána barvicí látka Fe_2O_3 do 0,2 %. CaCO_3 upravuje

rozpuštěnost a chemickou odolnost skla. Mezi přídavné látky se řadí Na_2CO_3 a K_2CO_3 ve formě sody nebo potaše, tyto látky snižují teplotu tavení. Jako vedlejší složky jsou použita čeriva. Jejich hlavní funkcí je odstranit nečistoty a homogenizovat sklovinu. Druhou vedlejší složkou jsou skleněné střepy, které urychlují tavení a zlepšují homogenitu [17].

3.2.3 Dělení skla

Sklařské výrobky se dělí dle způsobu výroby na sklo obalové, ploché, užitkové, speciální, nekonečné skleněné vlákno, minerální vlákno a keramické vlákno [18]. Podle chemického složení rozdělujeme skla na sodnovápenatá, křemenná, rozpustná, draselnovápenatá, boritokřemičitá, olovnatý křišťál a speciální.

a) *Sodnovápenaté sklo (francouzské sklo)*

Je složeno ze 71–75 % oxidu křemičitého, 12–16 % oxidu sodného, 10–15 % oxidu vápenatého a z malého množství dalších složek určených k ovlivnění specifických vlastností skla. Sklo se používá na výrobu lahví, sklenic a plochého skla.

b) *Křemenné sklo*

Vyrábí se vakuovým tavením čistého křišťálu nebo žilného křemene při teplotě kolem 2000 °C. Nejčastěji se používá k výrobě osvětlovacích výbojek.

c) *Rozpustné sklo (vodní sklo)*

Vzniká z tavenin alkalických křemičitanů. Ve stavebnictví slouží k ochraně a sanaci přírodního kamene, jako pojivo žáruvzdorných materiálů a kyselino vzdorných tmelů. Dále se využívá jako nástřík pro protipožární ochranu konstrukcí. Své uplatnění našlo při konzervaci vajec nebo jako plnivo do mýdel. Také s ním lze impregnovat papírové tkaniny.

d) *Draselnovápenaté sklo (český křišťál)*

Je zhotovováno tavením sklářského písku s potaší a vápencem. Hůře se taví, ale je tvrdší a stálejší. Používá se k výrobě chemického a stolního skla.

e) *Boritokřemičité sklo*

Skládá se z 70–80 % SiO_2 , 10–15 % B_2O_3 , 4–8 % Na_2O nebo K_2O a 2–7 % Al_2O_3 . Tato skla jsou vysoce odolná vůči chemickým a teplotním změnám. Tudiž mají využití v laboratorním zařízení, používají se k výrobě okének pro sporáky, nádobí a farmaceutických obalů. Ve stavebnictví se s nimi setkáme v podobě skleněného vlákna.

f) *Olovnatý křišťál*

Má zastoupení 54–65 % SiO_2 , 25–30 % PbO , 13–15 % Na_2O nebo K_2O plus další různé minoritní příměsi. Sklo je měkké, má vysoký lesk a index lomu, tudíž se vyznačuje vynikající brilancí, zvukem a opracovatelností. Typickým výrobkem je dekorované zboží, mezi které patří mísy, karafy, číše a mnoho jiných.

h) *Speciální skla*

Zde se zahrnují specializované výrobky, které jsou vyráběny v malém objemu. Jejich složení se mění podle požadovaných vlastností výrobku. Do této kategorie se řadí optická skla, obrazovky, zátavy, pájkové sklo, elektrody, sklokeramika aj. [18], [19].

3.2.4 Technologie výroby

Technologie výroby skla začíná roztavením sklářského písku ve sklářské peci. Existuje několik druhů pecí a to regenerativní, rekuperativní nebo elektrické. Teplota v těchto pecích se nejčastěji pohybuje v rozmezí 1400–1600 °C. Sklářský kmen se roztaví a vzniká sklovina, kterou nejprve zbavíme bublinek pomocí čeřidel. Díky čeřidlům se také sklovina homogenizuje. Neprotavené zbytky jsou vyneseny na hladinu skloviny, zde se sbírají v podobě sklářské pěny (sklářské žluči). Poté se sklovina nechá vychladnout na teplotu 700–1000 °C. Této teplotě říkáme pracovní teplota, kdy sklovinu můžeme tvarovat. Tvaruje se ručně nebo strojově a to foukáním, tažením, válcováním, litím, plavením nebo lisováním. Dále po vytvarování probíhá řízené chlazení skla. Chlazení se provádí v chladících pecích při teplotě 400–700 °C. Tímto chlazením se odstraní vnitřní pnutí výrobku. Po ochlazení se sklo může povrchově zdobit a to mechanicky nebo chemicky. Mezi mechanické zdobení patří broušení, rytí

a pískování. Leptání, malování, lazurování a pokovení patří mezi chemické zdobení skla [18], [20].

3.2.5 Vlastnosti skla

U skla je důležité znát jeho vlastnosti a to jak v roztaveném stavu (tavenina), tak ve stavu pevném.

U roztaveného skla rozlišujeme zejména viskozitu, krystalizační schopnost, povrchové napětí, hustotu, tepelnou kapacitu, tepelnou a elektrickou vodivost.

V pevné fázi rozlišujeme tyto vlastnosti:

- Tvrdost

Na tvrdost skla má zejména vliv chemické složení a teplota tavení sklářského kmene. Podle Mohsovy stupnice se křemenné sklo pohybuje kolem 5–7. Větší tvrdosti skel je dosaženo přidáním 10–12 % B_2O_3 . Naopak menší tvrdosti je dosaženo přidáním PbO .

- Mechanická pevnost

Sklo, podobně jako keramický materiál, se při krátkodobém zatížení za normální teploty chová jako pružná látka. Toto chování lze charakterizovat pomocí modulu pružnosti (E) a Poissonova čísla (μ). U křemenných skel se modul pružnosti pohybuje v rozmezí 50–85 GPa a Poissonovo číslo se pohybuje kolem 0,2, viz tab. 1.

Tab. 1: Modul pružnosti a Poissonovo číslo u vybraných skel

Modul pružnosti a Poissonovo číslo vybraných skel		
SKLO	E [GPa]	μ
křemenné	74,5	0,16
sodnovápenaté	74	0,22
borité	64	0,2
hlinité	83,1	0,24
olovnaté	58	0,21

Pevnost v tahu u běžných skleněných produktů je maximálně do 100 MPa. Avšak skleněná vlákna běžně dosahují pevností v tahu až 3,5 GPa. Pevnost skla rapidně klesá při porušení trhlinami, vyšším obsahem vlhkosti nebo při zvýšené teplotě.

- Tepelné vlastnosti

Z pohledu praktického použití skel je nejvýznamnější tepelnou vlastností skel teplotní roztažnost. Ta závisí především na chemickém složení skla. U křemenného skla se teplotní roztažnost pohybuje kolem $6,7 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$.

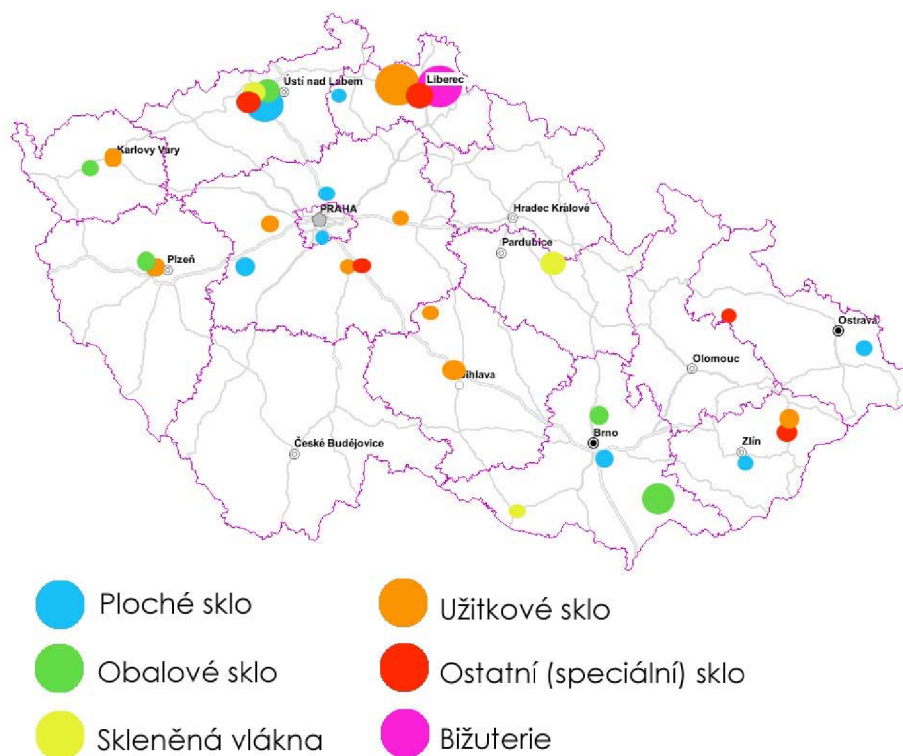
- Chemická odolnost

Je schopnost skla odolávat kyselinám, vodě a plynům z ovzduší. Sklo odolává působením většiny kyselin, až na HF – ta ho leptá. Naopak neodolává vysoce zásaditým látkám – zejména louhům. Ztráta lesku skla je důsledkem působení ovzduší na povrch skla [21].

3.2.6 Sklářský průmysl v České republice

Český sklářský průmysl má velkou tradici a nejvíce je soustředěn v severních Čechách, Podkrušnohoří (např. Karlovarsko, Českolipsko, Liberecko a Teplicko) a na východní Moravě. Sortiment sklářského průmyslu lze rozdělit na výrobní obory plochého skla, obalového skla, užitkového skla, skleněných vláken a speciálního skla. Na obr. 6, je mapa České republiky, kde jsou znázorněny oblasti s danými výrobními obory [19], [22].

Společnost AGC Flat Glass Czech v Teplicích je jediným výrobcem velkoformátového plochého skla. Obalové sklo vyrábí VETROPACK MORAVIA GLASS a O-I Manufacturing Czech Republic. Skleněná vlákna jsou vyráběna ve společnosti SAINT-GOBAIN ADFORS CZ s.r.o., Litomyšl. Českým výrobcem technického a laboratorního skla, trubic a aparatur z borosilikátového skla je společnost KAVALIERGLASS, a.s., Sázava [22].



Obr. 6: Grafické znázornění sklářského průmyslu v České republice [19]

3.2.7 Recyklace skla

Skleněného odpadu na každého člověka ročně je v průměru 9–18 kg, což je zhruba 9 % celkového množství odpadu. Proto je důležité sklo recyklovat [23]. Sklo, jakožto odpad je důležitou druhotnou surovinou, která při recyklaci nemění své vlastnosti [24]. Velkou výhodou je, že se před samotnou recyklací nemusí pracně upravovat. Tudíž se sklo může teoreticky donekonečna recyklovat [23].

Hlavními důvody recyklace skla jsou:

- a) šetření přírodních zdrojů Země (vápence, písky, živce, dolomity atd.) a zásahů do přírody,
- b) snížení a odlehčení skládek s komunálním odpadem, omezení výstavby nových skládek,

c) snížení energetické náročnosti jak při těžbě vstupních surovin, tak při výrobě skla. Při výrobě plochého skla se energetická náročnost pohybuje v rozmezích 9,1–10,1 GJ/t tavené suroviny a u výroby obalového skla je tato hodnota kolem 4,5–5 GJ/t tavené skloviny,

d) snížení emisí CO₂, z toho 78 % emisí tvoří spalování zemního plynu, které se také značně využívá při výrobě skla. Emisní faktor u plochého skla je zhruba 595 kg CO₂/t skloviny a u obalového skla 350–400 kg CO₂/t [19].

3.2.7.1 Historie recyklace skla

V historii se veškerý odpad vyhazoval do účelných odpadních jam, kde bylo možné nalézt zbytky zvířat či poškozené nástroje. Až ve 20. století vzrostl zájem o recyklaci a využití druhotných surovin.

Skelný odpad se recykloval již v Československé republice. Nejvyšší rozmach byl zaznamenán v 70. letech, kdy byla snížena těžba ropy, což vedlo k prudkému nárůstu ceny ropy a dražší průmyslové výrobě skla [25]. V Československu byl systém opětovného využití skla na velmi dobré úrovni. Tenkrát se většina nápojů plnila do sklenic, které byly stejné, proto mohl jeden výrobce používat tytéž sklenice od výrobce druhého. Láhve byly zálohovány, a proto se většina skleněných obalů vrátila zpět do firem, kde byly umyty a znovu použity. Po revoluci v roce 1989 nastoupily na trh nové soukromé firmy, které své výrobky chtěly odlišit různým typem skleněných obalů [26]. Před 25 lety byl zaveden oddělený sběr čirého a barevného skla. Ovšem v roce 2001 sklárny požadovaly vyšší kvalitu a čistotu čirého skla, což mělo za následek pokles vytříděného čirého skla. Dnes opět vzrůstá poptávka po čirém sklu. Jedním z důvodů je to, že recyklace čirého skla je jednodušší [27].

V dnešní době jsou vedeny statistické informace o množství odpadního skla po celém světě. Tab. 2 ukazuje množství odpadního skla a procentuální zastoupení recyklace v zemích po celém světě v různém časovém období.

Tab. 2: Množství odpadního skla a procento recyklace v různých zemích za různé časové období

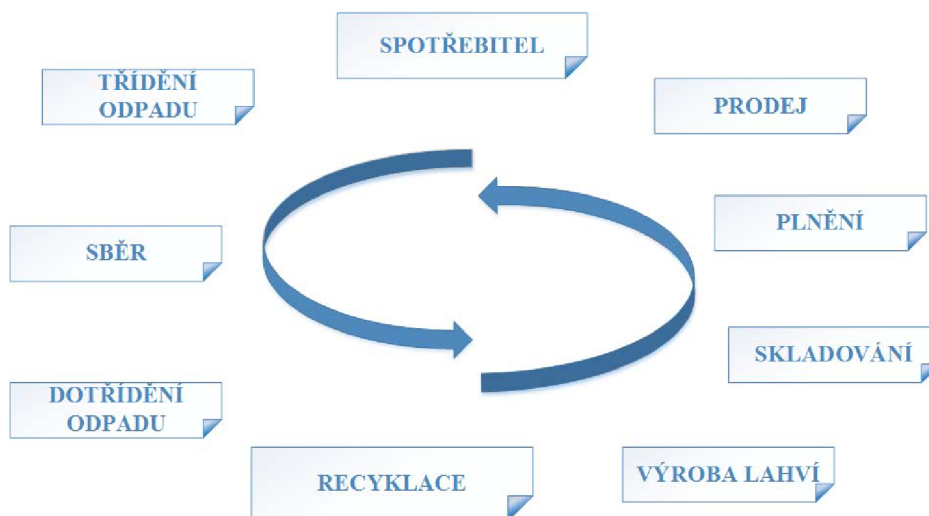
Množství odpadního skla a procento recyklace v různých zemích			
země	skelný odpad [t]	% zrecyklovaného skla	rok
USA	11 500 000	27	2010
Kanada	116 000	68	2009
Singapur	72 800	29	2010
Švédsko	195 000	93	2010
Portugalsko	493 000	25	2001
Turecko	120 000	66	2004
Jordánsko	35	0	2004

Nadějí pro snížení množství recyklovaného skla je stavebnictví, konkrétně v cementovém a betonovém odvětví. Zde skelný recyklát může částečně nahradit cement. Což bude mít za následek úsporu energií, peněz a pokles emisí CO₂. Celkově se jedná o dobrý vliv na životní prostředí [16].

3.2.7.2 Technologie recyklace u různých druhů skel

V této kapitole bude představeno několik druhů recyklovatelných skel a jejich technologie recyklace.

- **Recyklace obalového skla**



Obr. 7: Schéma recyklace obalového skla

1) Vznik odpadu

Odpad vzniká v domácnostech v podobě lahví od nápojů, zavařovacích sklenic aj.

2) Třídění odpadu

Vzniklý odpad z domácnosti je tříděn do příslušných kontejnerů, označených zelenou a bílou barvou. Bílá barva slouží pro čiré sklo, zelená pak pro sklo barevné.

3) Sběr

Pokud je použit zvonový kontejner, je potřeba ke svozu nákladní automobil s otevřenou korbou. Jestliže je korba přepažena, lze najednou svážet sklo čiré i barevné. Sklo se svezí na překladiště, kde dále putuje do dotřídňovacích linek.

4) Dotřídění odpadu

Dotřídění musí být zcela bezchybné, aby nedošlo k znehodnocení výrobků. Nejprve se ručně vyberou nečistoty v podobě keramiky, kovů nebo jiných pevných částic. Dále se sklo nadrtí a pomocí vibračních sít se upravuje. Poslední fází je čištění díky optoelektrickým čidlům, které zajistí vysokou kvalitu čištění.

5) Recyklace / výroba skla

Do sklářského kmene může přijít 60 až 85 % tříděného skla. Společně s dalšími přísadami jsou společně taveny při teplotách 800–1400 °C. Z taveniny se vytváří nové skleněné výrobky, nejčastěji láhve.

6) Skladování

Láhve, či jiné skleněné výrobky jsou uloženy do skladu. Odtud dále putují do plnění.

7) Plnění

Zde už skleněný obal plní funkci, ke které byl primárně vytvořen. V této fázi je výrobek opatřen etiketou, špuntem či zátkou.

8) Prodej

Výrobek je přesunut do procesu prodeje, kde si jej zakoupí spotřebitel.

9) Spotřebitel

V této konečné fázi záleží na spotřebiteli, zda skleněný obal vyhodí do kontejneru na sklo. Pokud se tak stane, uzavře nekonečnou smyčku životního cyklu láhve [28], [29].

- **Recyklace zářivkového skla**

Pomocí řízeného mechanického postupu se zářivka demontuje do původních složek, kde jsou odstraněny hliníkové patice a železné clony. Zbylé skleněné tělo je dále rozdrceno pomocí drtiče a díky vibrační technice jsou střepy zbaveny luminoforu (ten je tvořen halofosfátem vápenatým, příměsí kovů vzácných zemin a nízkým obsahem rtuti) [30].

- **Recyklace plazmových, LCD a CRT obrazovek**

Modulová linka na recyklaci LCD a plazmových obrazovek je řešena mechanickým, suchým procesem, kde nebezpečné látky jsou zachycovány ve filtrech s aktivním uhlím. Tyto látky jsou poté separovány samostatně jako odpad kategorie N (nebezpečný odpad). Demontáž CRT obrazovek a odstranění luminoforu spočívá v průchodu proudu odporovým páskem, který je obepnut okolo obrazovky. Pásek se ohřívá a rozděluje obrazovku. Po rozdělení lze odebrat kónusovou část obrazovky a kovovou masku. Ze stínítka se odsaje luminofor do HAPA filtru, který slouží k bezpečnějšímu odstranění a skladování ve sběrném sáčku [24].

- **Recyklace plochého skla**

Střepy vstupují do recyklační linky, kde jsou odstraněny kovové částice pomocí magnetické separace a hrubé nečistoty jsou odděleny ručně. Tato linka dokáže zpracovat 45 000 t/rok. Detailní vyčištění je provedeno optoelektricky ve dvou fázích. Požadované frakce recyklátu jsou rozděleny pomocí dělicích sít [31].

3.2.8 Využití skelného recyklátu

Skelný recyklát má velký potenciál ve stavebnictví. Konkrétně jde o cementářský a betonářský průmysl s cílem nižší spotřeby energie a využití druhotných surovin. Z recyklovaného skla se vyrábí skelná vata, lehčené kamenivo, izolace, minerální vlna, pěnové sklo atd. [32].

3.2.8.1 Výroba pěnového skla

Pěnové sklo je moderní stavební izolační materiál, který je ekologický a znovu recyklovatelný. V roce 1936 ve Francii byla patentována výroba pěnového skla. V Československu se pěnové sklo vyrábělo od roku 1958 do konce osmdesátých let. Bylo použito například při stavbě československého pavilonu na výstavě EXPO 1958 v Bruselu. V současné době se pěnové sklo vyrábí v České republice pod názvem Refaglass. Základní surovinou je odpadní sklo, z něhož se vyrábí skleněná moučka a poté pěnové sklo. Skleněná moučka je vyrobena ze skleněných střepů, které jsou pomlety v kulovém mlýně. Střepy jsou pomlety na moučku o velikosti zrna nižší jak 90 μm . Moučka dále prochází rotačním sítem, kde jsou separovány nečistoty. Sklo se skladuje v sílech o teplotě 20 $^{\circ}\text{C}$ [33], [34]. Při výrobě pěnového skla se používají chemická činidla s minimální ekologickou zátěží na životní prostředí. Nízkotavitelná sklovina a zpěňovač (saze, uhlí – napěňují sklovinu až o dvacetinásobek původního objemu) se taví při teplotě kolem 1000 $^{\circ}\text{C}$ [34].

Vlastnosti pěnového skla jsou natolik vynikající, že umožňují široké využití ve stavebnictví. Může nahradit izolační materiály jako je polystyren, keramzit, skleněná a minerální vlákna [35]. Pěnové sklo vyniká svou absolutní nehořlavostí (třída A – nehořlavé hmoty dle ČSN 73 0823); vysokou odolností vůči chemickým a biologickým vlivům; dlouhou životností v řádu desítek let. Používá se především na střešní pláště, jelikož má velice dobrou pevnost v tlaku. Dále se může využít jako izolace podlahových desek, na obvodovou izolaci a drenáž, odlehčený násyp pro nadzemní komunikaci a podzemních staveb (tunely) [33], [36].

3.3 Skelný recyklát v cementové matrici

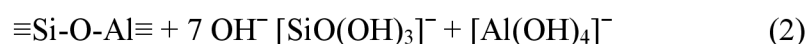
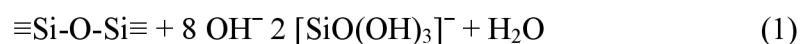
Zařazení skelného recyklátu do receptury jako částečnou náhradu cementu vyžaduje pečlivé zvážení, protože obsahový podíl a granulometrie recyklátu významně ovlivňují vlastnosti malt. Shayan [37] a Xu [38] ve své studii prokázali, že zastoupení 20–30 % skelného recyklátu (z obsahu cementu), který byl pomlet na částice než 13 μm , může být použit jako částečná náhrada cementu s tím, že prokazuje pucolánovou aktivitu, která může způsobit zlepšení mechanických vlastností malt [39]. Studie také prokázaly, že jemně mleté sklo, které má vysoký obsah oxidu křemičitého, nepřispívá k alkalicko-křemičité reakci [40]. U všech těchto poznatků je prokazatelné, že čím vyšší jemnost skelného recyklátu, tím lepší vlastnosti malty. Ovšem musí se brát v potaz procentuální zastoupení a jemnost frakce recyklátu.

3.3.1 Pucolánová aktivita

Pucolánová aktivita je schopnost pucolánových materiálů reagovat s hydroxidem vápenatým a vodou při běžné teplotě (20 °C) za vzniku hydratačních produktů [41]. Pucolánovou aktivitou jsou definovány dvě hodnoty. První hodnota definuje maximální množství $\text{Ca}(\text{OH})_2$, se kterým je pucolán schopen reagovat a druhá hodnota uvádí rychlost reakce mezi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a amorfním SiO_2 . Dosažení co nejlepších hodnot závisí na množství a kvalitě aktivních složek a použitém pucolánu. Dalšími ovlivňujícími parametry je poměr vápno/pucolán, specifický povrch, chemické složení, obsah vody ve směsi, délka doby ošetření a teplota [42].

3.3.1.1 Průběh pucolánové reakce

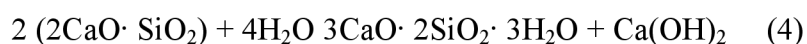
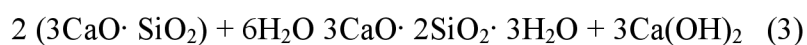
Pucolánová reakce začíná tehdy, kdy se naruší struktury aktivních složek pucolánu OH^- ionty. Důsledkem je rozštěpení křemičitých a hlinitokřemičitých vazeb za vzniku jednoduchých iontů:



Povrch pucolánu je pokryt C-S-H gely a na jejich povrchu se následně mohou tvořit hexagonální hlinitany C_4AH_{13} , popřípadě jiné produkty hydratace. U některých pucolánů, mohou vznikat při reakci s $Ca(OH)_2$ pouze hydratované křemičitany vápenaté [42].

3.3.1.2 Reakce pucolánu s portlandským cementem

Smíchá-li se pucolán s vodou a portlandským cementem, dochází k jeho reakci s hydroxidem vápenatým, který je uvolňován hydratací kalcium silikátů a to především alitu a belitu. Proces hydratace lze popsat zjednodušenými rovnicemi:



Z důvodu pucolánové reakce s hydroxidem vápenatým, který byl uvolněn při hydrataci C_3S a β - C_2S , bude výsledné množství portlanditu menší než v porovnání s referenční záměsí bez pucolánové příměsi. Množství výsledného portlanditu ovšem závisí na aktivitě pucolánu, množství uvolněného hydroxidu vápenatého a na poměru cement/pucolán [42].

3.3.1.3 Vliv skelného recyklátu na vlastnosti malty

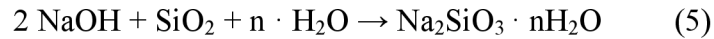
Sklo má vysoký obsah amorfního SiO_2 , pokud je namleto na velmi jemnou frakci a přidáno do malty, tak reaguje za přítomnosti vody s rozpuštěným hydroxidem vápenatým, kde tvoří sloučeniny křemičitanu vápenatého. Tyto sloučeniny, v časové posloupnosti, vytvářejí postupně narůstající pevnosti. Recyklované sklo, jako pucolánový materiál, tvoří CSH gely, které snižují množství pórů. To vede ke snižující propustnosti malt, kde zároveň roste její pevnost a tak se zvyšuje trvanlivost a kvalita malt [43].

3.3.2 Alkalicko-křemičitá reakce

Hlavní obavy ohledně použití skla v maltách je alkalicko-křemičitá reakce (AKR). Je to chemická reakce, kde reagují alkálie, jež jsou nejčastěji NaOH a KOH s amorfním SiO_2 za přítomnosti vlhkosti. Výsledkem je alkalicko-křemičitý gel, který

má schopnost absorbovat vodu a zvyšovat objem. Toto zvýšení objemu způsobuje vysoký tlak uvnitř malty, který může činit až 20 N/mm^2 a dochází k vnitřnímu pnutí, které vede k poškození malty [16], [40], [44].

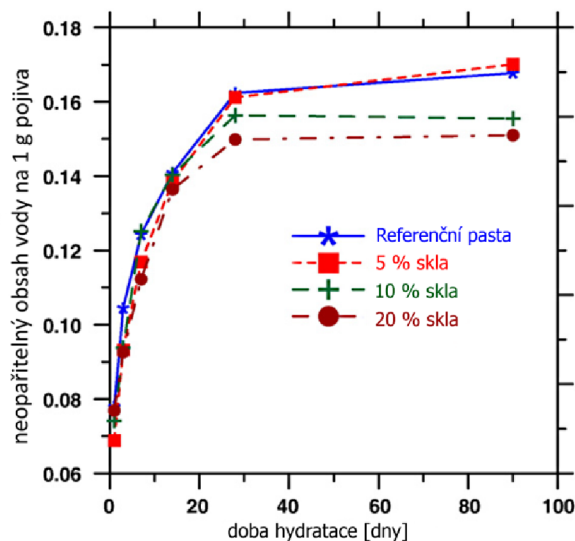
Rovnice ASR:



Experimentální výsledky ukazují, že ASR rozpínání klesá se snižující se velikostí částic odpadního skla [16]. Ve studii [45] bylo použito 30 % odpadního skla o velikosti částic $38 \mu\text{m}$ jako částečná náhrada cementu, kde bylo dokázáno pucolánové chování odpadního skla a zároveň se snížila ASR reakce [45]. Aby byly zachovány všechny vlastnosti malt, je optimální použít 20 % odpadního skla [16]. Jednou z hypotéz, proč skelný prášek snižuje ASR je, že aktivované reakční částice, které jsou velmi jemně namlety, uvolňují expanzní tlak. Další hypotézou je vysoký poměr Na/Si. To má za následek pokles viskozity gelu, tudíž nižší tlak [46].

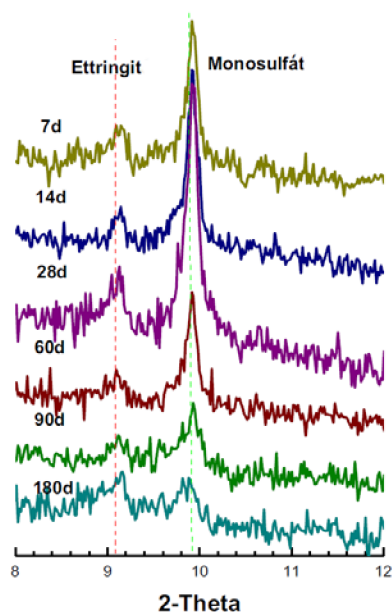
3.3.3 Hydratace malt se skelným recyklátem

Studie prokázaly, že odpadní sklo, které je rozemleto na mikročástice má vliv na hydrataci malty [47]. Konkrétně Schwarz a Neithalath [48] ve studii, která se zabývala hydratací malt se skelným práškem, zjistili, že tyto malty mají rychlý nárůst počáteční hydratace (obr. 8). Hlavním důvodem byla jemnost skelného recyklátu a také poměr sklo/cement [48].

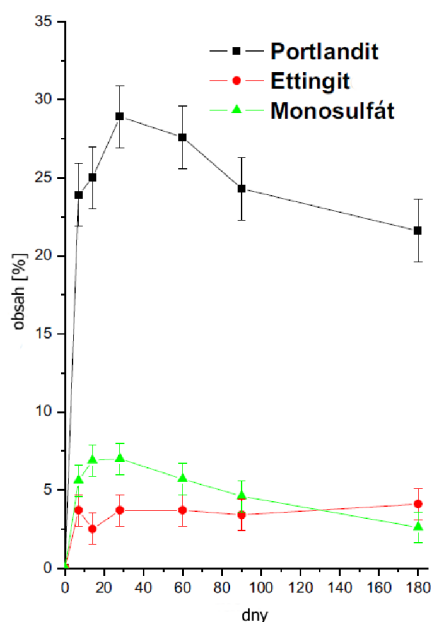


Obr. 8: Hydratace malt s různým procentuálním zastoupením skelného prášku [48]

Výsledky RTG ukazují produkty hydratace, a to portlanditu, ettringitu a monosulfátu viz obr. 9 [47], kde postupem času významně ubývá monosulfátu. Obr 10 [46] znázorňuje množství portlanditu, ettringitu a monosulfátu v různém časovém zastoupení. Pokles obsahu portlanditu v časové linii naznačuje pucolánovou reakci skleněných zrn, které spotřebovávají portlandit ke tvorbě C-S-H gelu. Je tedy možné odvodit, že pucolánová reakce u jemněji mletého skla je následkem vyšší měrné hmotnosti, tudíž lepší reakce s matricí [46].



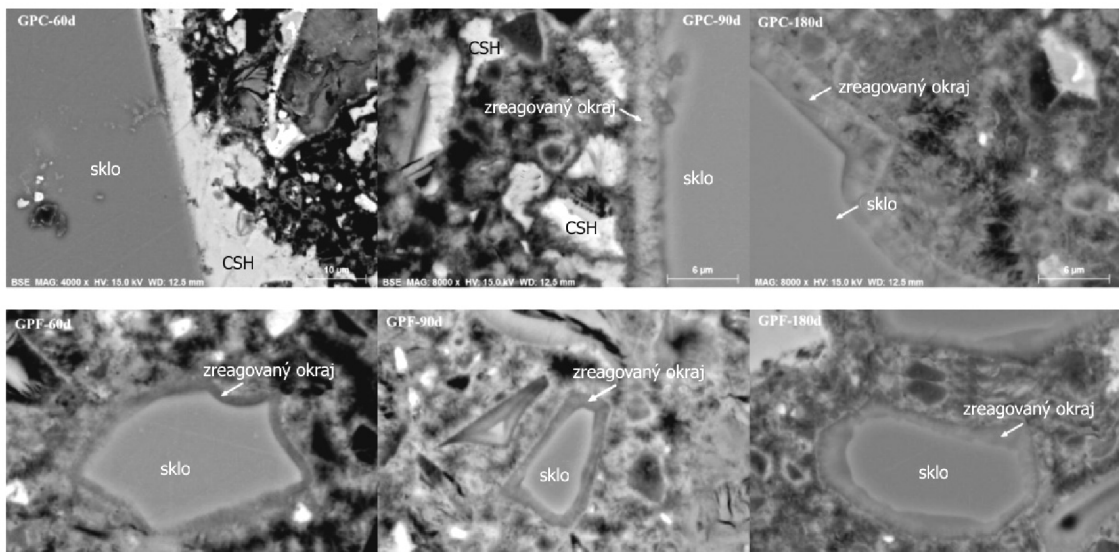
Obr. 9: RTG analýza malt se skelným recyklátem v průběhu hydratace [46]



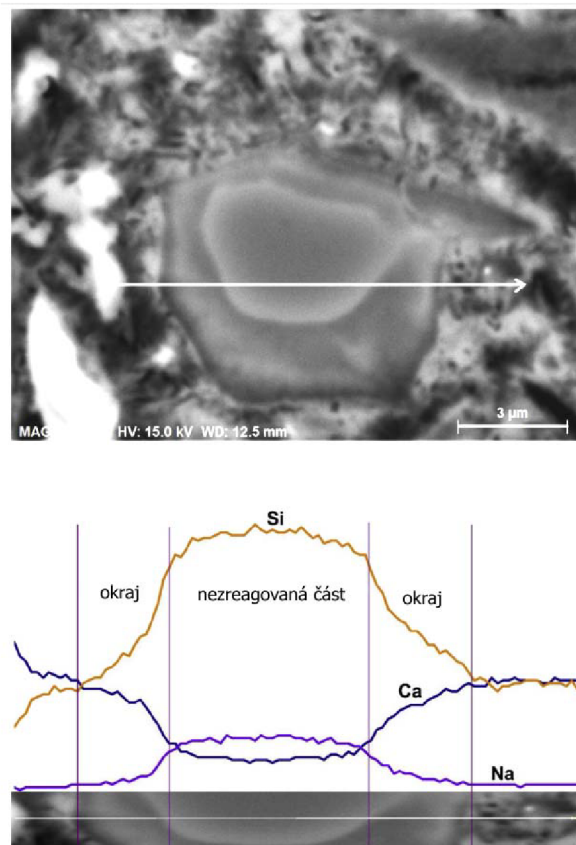
Obr. 10: Zastoupení hydratačních produktů v čase [46]

3.3.4 Mikrostruktura malt se skelným recyklátem

Obr. 11 [46] ukazuje charakteristickou mikrostrukturu malty se skelným recyklátem. Po 60 dnech se vysráží $\text{Ca}(\text{OH})_2$ do podoby C-S-H gelů. Po 90 dnech sklo zreaguje na povrchu. Zreagovaná vrstva postupem času houstne a proniká hlouběji do struktury malt. To má za následek lepší pevnosti, hustší a méně propustnou mikrostrukturu materiálu [39], [46]. Na obr. 12 je znázorněno částečně zreagované skleněné zrno, kde je ukázáno rozdělení elementárních prvků Ca, Na a Si. Je zřejmé, že sklo uvolňuje část Na do pórů a spotřebovává Ca během pucolánové reakce na vznik C-S-H gelu [46].



Obr. 11: Mikrostruktura malt se skelným recyklátem [46]



Obr. 12: Rozložení prvků Ca, Si a Na v řezu částečně zreagovaného skelného zrna [46]

3.3.5 Fyzikální a mechanické vlastnosti malt se skelným recyklátem

Výzkumy byly také zaměřeny na vlastnosti čerstvé malty (ČM), pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu, objemovou hmotnost a nasákavost, kdy cement byl nahrazen v různém poměru skelným recyklátem. Dle očekávání sklo nemělo významný vliv na zpracovatelnost malty. Zjistilo se, že díky nepropustné mikrostruktúře těchto malt se míra absorpce vody snížila. A nejen to. Také bylo dosaženo lepších pevností v průběhu času [37]. Byla také zkoumána částečná náhradou kameniva za odpadní sklo u betonových dlaždic. Ukázalo se, že byla částečně snížena objemová hmotnost a až o 79 % snížena propustnost. I dynamický modul pružnosti vykazoval lepší výsledky. Ovšem skleněné částice větší granulometrie byly náchylné k expanzi v důsledku AKR [49].

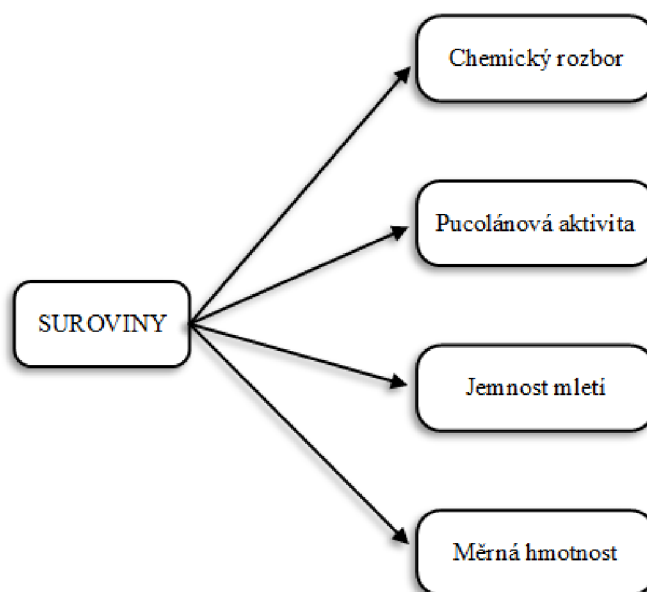
4 Praktická část

4.1 Metodika práce

Experimentální část diplomové práce byla rozdělena do 4 základních etap, které jsou popsány níže v kapitolách 4.1.1 až 4.1.4. Byly připraveny záměsi referenční, s náhradou 3 druhů skelného recyklátu s obsahem 10, 20, 30 % hmotnosti cementu a záměsi se skelným recyklátem a kopolymerem EVA. Experiment byl zaměřen na sledování fyzikálně-mechanických a fyzikálně-chemických vlastností malt.

4.1.1 ETAPA I

V první etapě byly zvoleny vhodné suroviny, které byly podrobeny zkouškám. Tyto zkoušky měly za úkol ověřit vlastnosti vstupních surovin. Provedené zkoušky na surovinách, jsou zaznamenány na obr. 13. Dále, byla navržena vhodná receptura, kde se stanovilo různé procentuální zastoupení skelného recyklátu (viz tab. 3).



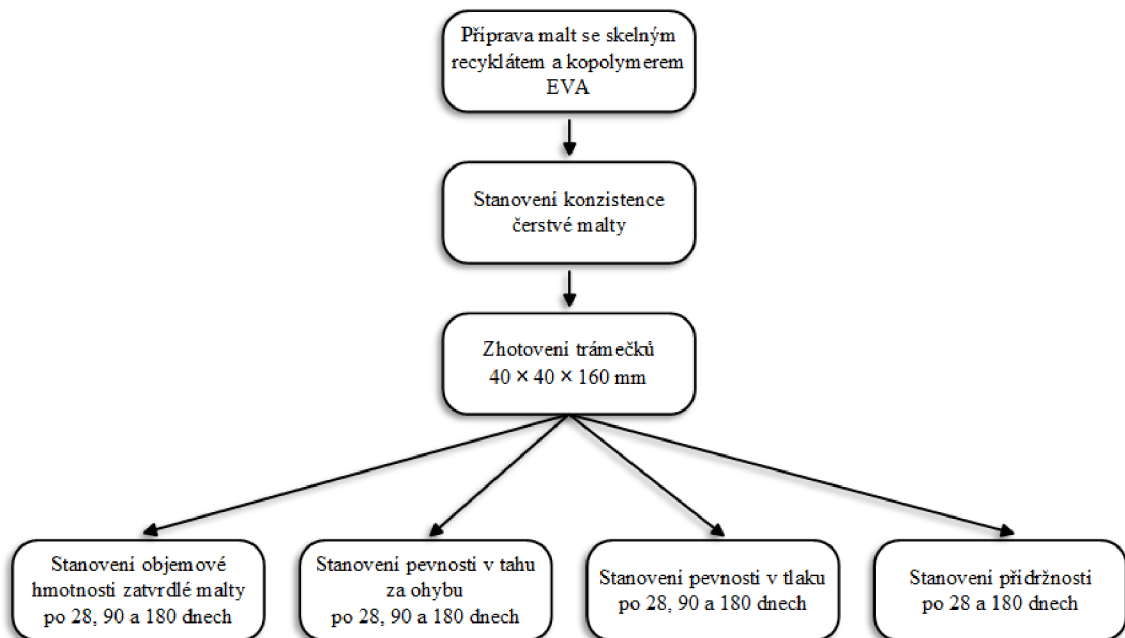
Obr. 13: Postup ETAPY I

Tab. 3: Receptura s různým procentuálním zastoupením skelného recyklátu

Suroviny	Množství [g/1000 g]	
	[g]	[%]
CEM 42,5 R	250	25
kamenivo CEM	750	75
voda	250 ml	w = 0,54
skelný recyklát	25,50,75	10, 20, 30 % z m _c
kopolymer EVA	20	2

4.1.2 ETAPA II

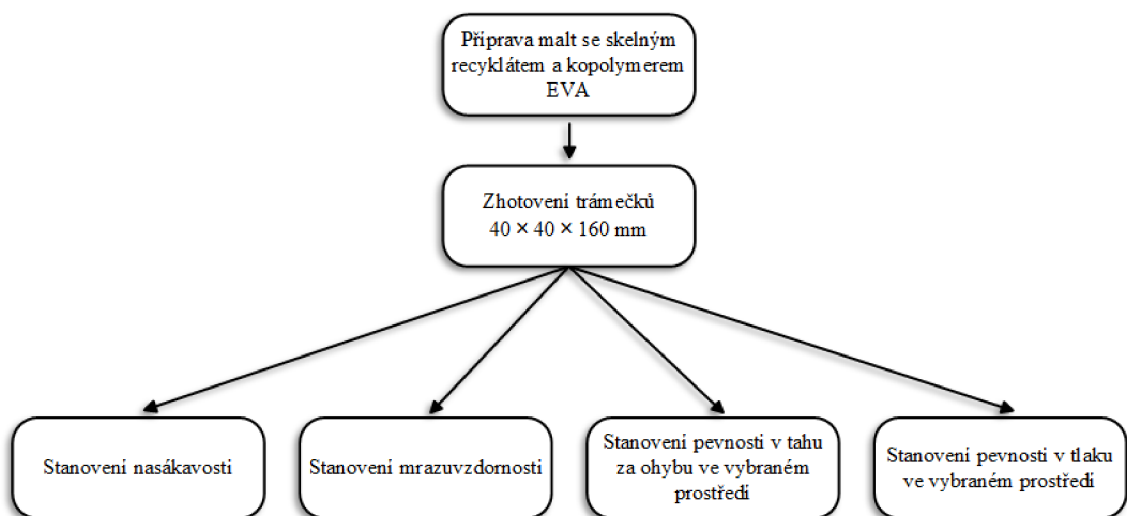
Druhá etapa byla zaměřena na výrobu malt se skelným recyklátem a kopolymerem EVA. Po zhotovení zkušebních trámečků 40 × 40 × 160 mm, byly provedeny navrhované zkoušky, které jsou zaznamenány na obr. 14.



Obr. 14: Postup ETAPY II

4.1.3 ETAPA III

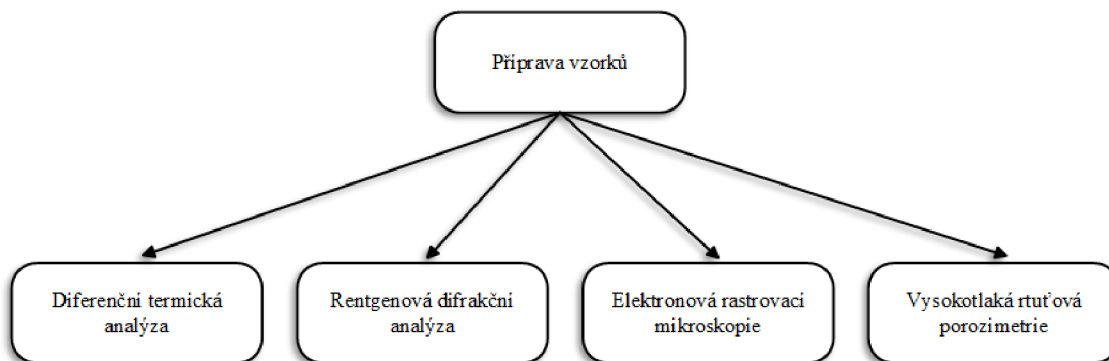
V této etapě byly připraveny trámečky $40 \times 40 \times 160$ mm dle totožné receptury jako v předešlé etapě. Trámečky byly následně uloženy do vybraného prostředí. Konkrétně šlo o prostředí s cyklickým zmrazováním – rozmrazováním (25 cyklů), tepelném stárnutím (14 dnů v sušárně). Vzorky byly také ponořeny do vody po dobu 20 dnů. Po stanoveném čase byly vzorky vyjmuty z daného média a provedeny navrhované zkoušky. Postup ETAPY III je uveden na obrázku 15.



Obr. 15: Postup ETAPY III

4.1.4 ETAPA IV

ETAPA IV byla zaměřena na studium mikrostruktury připravených malt. V této etapě byla využita diferenční termická analýza (DTA), rentgenová difrakční analýza (RTG), elektronová rastrovací mikroskopie (REM) a vysokotlaká rtuťová porozimetrie.



Obr. 16: Postup Etapy IV

4.2 Prováděné zkoušky

4.2.1 Laserová difrakční analýza

Je metoda, která se zabývá analýzou velikosti částic. Princip analýzy je ten, že dochází k interakci částic s laserovým paprskem. Pomocí této interakce je získán difrakční obrazec, který je převeden do digitálního formátu a následně dochází k převodu digitálního formátu na distribuční a kumulativní křivku.

4.2.2 Pucolánová aktivita

Pomocí modifikovaného Chapelleho testu byla stanovena pucolánová aktivita. Princip zkoušky se zakládá na reakci jistého množství Ca(OH)_2 s 1 g pucolánu. Výsledkem je množství Ca(OH)_2 na 1 g pucolánu.

4.2.3 Měrná hmotnost

Měrná hmotnost byla stanovena dle normy ČSN 72 2113 s pomocí pyknometru, který má kalibrovaný objem. Byla stanovena hmotnost suchého pyknometru, hmotnost naplněného pyknometru destilovanou vodou a hmotnost pyknometru, který byl naplněn,

jak vzorkem, tak vodou. Z těchto hodnot byla vypočítána měrná hmotnost pomocí vzorce:

$$\rho = \frac{(m_2 - m_1) \cdot \rho_s}{m_4 - m_3 - m_1 + m_2} \quad [\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$$

- kde ρ_s hustota vody [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]
 m_1 . . . hmotnost suchého pyknometru [g]
 m_2 . . . hmotnost pyknometru se vzorkem [g]
 m_3 . . . hmotnost pyknometru s vodou [g]
 m_4 . . . hmotnost pyknometru s vodou a vzorkem [g]

4.2.4 Stanovení konzistence čerstvé malty

Tato zkouška byla použita v souladu s normou ČSN EN 1015-3. Principem zkoušky je získat průměrnou hodnotu rozlitého vzorku čerstvé malty. K dosažení této hodnoty byl zapotřebí střešací stolek a kovový kužel, který byl naplněn čerstvou maltou a ta následně zhutněna 10 údery dusadla. Poté byl kužel kolmo vzhůru zvednut a 15 nárazy s kontinuální frekvencí 1 zdvih za sekundu byl vytvořen koláč. Ten byl ve dvou na sebe kolmých směrech změřen a tím byl zjištěn průměr koláče v mm.

4.2.5 Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlé malty

Objemová hmotnost zkušebního tělesa byla stanovena jako poměr hmotnosti ve vysušeném stavu a objemu, který těleso nasáкло vodou při ponoření do vody. Tato zkouška byla provedena dle normy ČSN EN 1015-10.

4.2.6 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu

Trámečky o rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm, které byly uloženy v laboratorním

prostředí o relativní vlhkosti vzduchu $50 \pm 5 \%$ a o teplotě $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, byly podrobeny po 28, 90 a 180 dnech zkoušce pevnosti v tahu za ohybu dle normy ČSN EN 1015-11. Tato zkouška byla provedena tříbodovým zatěžováním až do porušení zkušební tělesa a vyhodnocena pomocí vzorce:

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

kde F maximální zatížení na zkušebním tělese [N]
 l = 100 mm, vzdálenost mezi osami podpěrných válců [mm]
 b šířka zkušební tělesa [mm]
 h výška zkušební tělesa [mm]

4.2.7 Stanovení pevnosti v tlaku

Pevnost v tlaku byla zkoušena podle normy ČSN EN 1015-11 na dvou částech trámečku po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu. Jedna polovina trámečku se vložila bočními plochami (kolmo na směr hutnění) mezi ocelové destičky (40×40 mm). Poté se začalo plynule zvyšovat zatížení, až do porušení tělesa. Pevnost v tlaku byla vypočítána podle vztahu:

$$R_c = \frac{F}{A} \quad [\text{N/mm}^2]$$

kde F maximální zatížení na zkušebním tělese [N]
 A = 1600 mm^2 , plocha tlačných destiček [mm^2]

4.2.8 Stanovení přídržnosti

Zkouška přídržnosti byla provedena v souladu s normou ČSN EN 1348 po 28 a 180 dnech. Na očištěnou betonovou desku byla nanášena tenká vrstva maltové směsi. V prvním kroku byla na očištěnou betonovou desku nanášena tenká vrstva maltové směsi. V druhém kroku následovala druhá silnější vrstva maltové směsi.

Ve třetím kroku byla určena přídržnost pomocí odtrhoměru a kovového terče. Ten byl pomocí lepidla přilepen k povrchu zatvrdlé malty. Kolem obvodu terče byla malta proříznuta do tvaru osmistěnu. Poté byl připevněn odtrhoměr k terči a proveden odtrh. K této zkoušce bylo zapotřebí také zapsat, v jakém místě došlo k odtrhu. Zda byl, odtrh v maltě, lepidle či na rozhraní malty – betonová deska. Zkouška byla vyhodnocena dle vztahu:

$$A_s = \frac{L}{A} \quad [\text{N/mm}^2]$$

kde L celková tahová síla [N]

A = 2500 mm², slepená plocha [mm²]

4.2.9 Stanovení nasákavosti

Dle normy ČSN EN 12808-5 byla provedena zkouška nasákavosti. Tělesa o rozměrech 40 × 40 × 160 mm byla podobu 28 dnů ve standardních podmínkách, kdy ve 21. dnu byly boční stěny těles utěsněny silikonovým tmelem. Po 28 dnech byla tělesa zvážena a ponořena do vodní lázně. Po 30 a 210 minutách byla tělesa vyjmuta z vody a opětovně zvážena. Výsledek nasákavosti byl vypočítán dle vztahu:

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

kde m_d hmotnost suchého vzorku [g]

m_t hmotnost nasáklého vzorku [g]

4.2.10 Stanovení mrazuvzdornosti

Vzorky byly v normové době zrání, tedy po 28 dnech, zkoušeny zatížením mrazu dle normy ČSN EN 12 808-3. Před samostatným zmrazováním se tělesa po 28 dnech položí do vody o teplotě 21±2 °C. Poté byly vzorky vystaveny 25 zmrazovacím cyklům v rozmezí – 20 °C a 20 °C. Po zmrazovacích cyklech byly vzorky zkoušeny na pevnost v tahu za ohybu. Mrazuvzdorná malta pro daný počet

cyklů je taková, u níž koeficient mrazuvzdornosti je vyšší než 0,75. Tento koeficient byl vypočítán ze vztahu:

$$KM_f = \frac{R_{f,zmraz.}}{R_{c,ref}}$$

kde $R_{f,zmraz.}$ pevnost v tahu za ohybu vzorku podrobeného zmrazování [N/mm²]

$R_{c,ref}$ pevnost v tahu za ohybu vzorku referenčního [N/mm²]

4.2.11 Stanovení mechanických vlastností po ponoření do vody

Byly vytvořeny trámečky o rozměrech 40 × 40 × 160 mm, které po zatuhnutí byly podobu 7 dní uloženy v laboratorních podmínkách. Dalších 21 dní byly uloženy do vodního prostředí. Po této době byly vytaženy z vody a zkoušeny na pevnost v tahu za ohybu a na pevnost v tlaku.

4.2.12 Stanovení mechanických vlastností po tepelném stárnutí

Zkušební tělesa o rozměrech 40 × 40 × 160 mm, byla po zatuhnutí 14 dní uložena v laboratorních podmínkách. Po 14 dnech byla tělesa přemístěna do sušárny a podrobena tepelnému stárnutí při teplotě 70±3 °C na 14 dní. Po této době byla tělesa podrobena zkoušce pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku.

4.2.13 Diferenční termická analýza

Diferenční termická analýza (DTA) je metoda, která je založena na měření rozdílů teplot zkoumaného a referenčního vzorku v časové závislosti. Spolu s DTA křivkou je v grafu znázorněna i termogravimetrická křivka (TG) znázorňující kvantitativní změny hmotnosti vzorku a derivační křivka (DTG), která zaznamenává rychlosti změny hmotnosti vzorku na teplotě. Charakter reakce a identifikaci vzorku zaznamenává DTA křivka, kde jsou zaznamenány endotermické a exotermické děje. Diferenční termická analýza jemně namletého vzorku byla provedena za použití Mettler Toledo TGA/DSC 1.

4.2.14 Rentgenová difrakční analýza

Podstatou rentgenové difrakční analýzy (RTG) je krátkovlnné elektromagnetické spektrum, které je využito pro studium elementárně uspořádaných částic v pevné látce. Vlnová délka RTG záření koresponduje s meziatomovými vzdálenostmi ve většině struktur pevných látek a tak dochází při jeho dopadu k difrakci na atomech. Touto analýzou lze stanovit strukturní charakteristiky, resp. mineralogické složení. Výstupem je difraktogram, jedinečný pro každou látku, podle kterého lze jednoznačně takové složené identifikovat. Důležitá je příprava vzorku pro tuto analýzu. Významný je zejména jemný práškovitý stav, kde je velikost částic menší než 63 μm . RTG analýza byla provedena pomocí přístroje SAXS EmpyreanSeries 2.

4.2.15 Rastrovací elektronová mikroskopie

Rastrovací elektronová mikroskopie (REM) využívána k analýze struktury látek pomocí elektronového svazku. REM se vyznačuje vysokou rozlišovací schopností a velkou hloubkou ostrosti s trojrozměrným aspektem. Snímky z této analýzy byly získány z elektronového mikroskopu RESCAN MIRA3 XMU.

4.2.16 Vysokotlaká rtuťová porozimetrie

Tato metoda studuje strukturu pórovitých látek. Je založena na jevu kapilární deprese, kde je těleso ponořeno do rtuti a za pomoci vnějšího tlaku rtuť vnikne do pórů. Z množství tlaku, kterého bylo zapotřebí ke vtlačení určitého objemu rtuti do pórů, byl určen poloměr a množství pórů v materiálu.

4.3 Přístroje a pomůcky

- Ocelové formy s rozměrem jednoho trámečku 40 × 40 × 160 mm
- Betonové dlaždice ke stanovení přídržnosti
- Laboratorní nádoby, odměrné válce, špachtle, vařečky
- Váha Kern 440-33 4 200,00±0,01 g

- Míchačka Hobart N50 s příslušenstvím 60±1 ot./min
- Vibrátor na zhutnění ocelových forem
- Odtrhoměr Proceq Dyna Z-16 E 4,77±0,01 MPa
- PASCAL 240 Series na měření vysokotlaké rtuťové porozimetrie
- Rastrovací elektronový mikroskop RESCAN MIRA3 XMU
- Mettler Toledo TGA/DSC 1 měřící diferenční termickou analýzu
- SAXS EmpyreanSeries 2 na stanovení rentgenové difrakční analýzy
- Síto 0,063 mm
- Mlýn na před úpravu surovin

4.4 Vyhodnocení ETAPY I

4.4.1 Cement

Byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R z cementárny Mokrá. V tab. 4 jsou uvedeny základní vlastnosti cementu. Výsledky chemického rozboru jsou uvedeny v tab. 5. Všechny uvedené hodnoty jsou dle technického listu výrobce.

Tab. 4: Vlastnosti cementu dle technického listu výrobce

Vlastnosti	
Měrný povrch	377 m ² /kg
Měrná hmotnost	3110 kg·m ⁻³
Jemnost mletí	3520 cm ² /g

Tab. 5: Chemické složení cementu dle technického listu výrobce

CEM 42,5 R	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	S ^{II-}	Cl ⁻	Na ₂ O	K ₂ O
	65 %	19 %	4 %	3 %	1 %	3 %	0,04 %	0,05 %	0,15 %	0,75 %

4.4.2 Kopolymer ethylvinylacetátu

Redispergovatelný prášek EVA byl přidán jako přísada, která příznivě ovlivňuje vlastnosti malty. Konkrétně byl využit výrobek s názvem Vinnapas 5044 N od firmy Wacker Chemie AG. V tab. 6 jsou uvedeny vlastnosti použitého kopolymeru EVA.

Tab. 6: Vlastnosti kopolymeru EVA dle technického listu

Vlastnosti	
Objemová hmotnost	400–550 kg/m ³
Tepelný rozklad	> 250 °C
Velikost částic	< 63 μm

4.4.3 Skelný recyklát

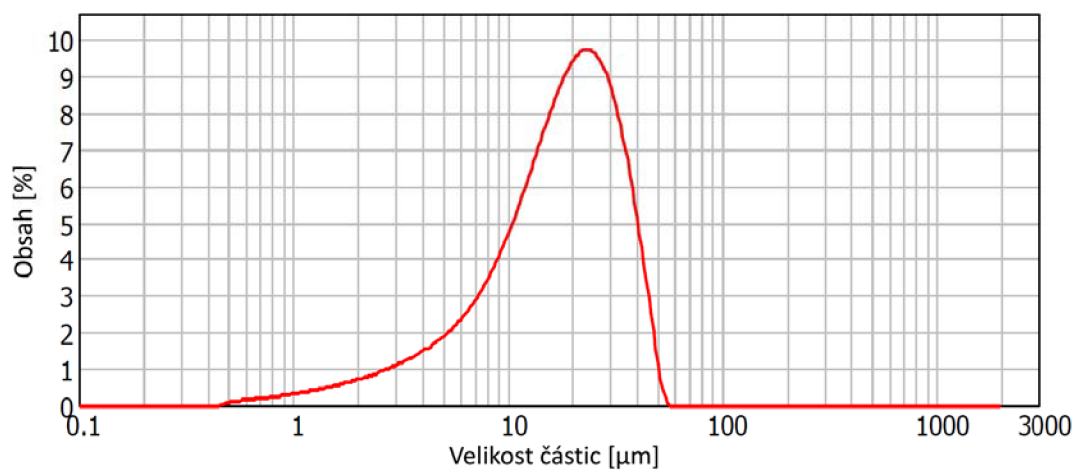
Byly zvoleny tři typy skelného recyklátu a to skelná moučka REFAGLASS, zářivkové sklo a odpadní sklo SIMAX. Skelný recyklát byl pomlet v mlýně na jemný prášek, který byl následně proset přes síto 0,063 mm. Sledované vlastnosti zvolených skelných recyklátů jsou uvedeny v tab. 7–12 a na obr. 17–19.

Tab. 7: Chemické složení REFAGLASS

REFAGLASS					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ CO ₃	K ₂ O
71 %	1,7–2 %	9–11 %	0,5–1,5 %	14–15 %	0,50%

Tab. 8: Vlastnosti REFAGLASS

Pucolánová aktivita	830mg Ca(OH) ₂ na 1g pucolánu
Jemnost mletí	0,260 m ² /g
Měrná hmotnost	0,6305 g·cm ⁻³



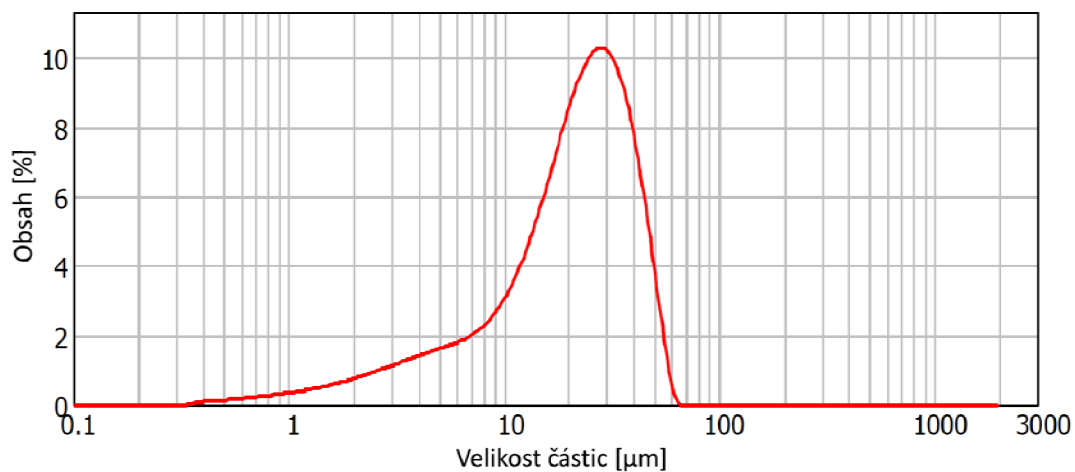
Obr. 17: Křivka zrnitosti REFAGLASS

Tab. 9: Chemické složení zářivkového skla

Zářivkové sklo								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	BaO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Hg
71,9 %	2,15 %	0,14 %	0,32 %	4,82 %	3,32 %	17,41 %	0,93 %	<0,000005 %

Tab. 10: Vlastnosti zářivkového skla

Pucolánová aktivita	803mg Ca(OH) ₂ na 1g pucolánu
Jemnost mletí	0,259 m ² /g
Měrná hmotnost	0,6281 g·cm ⁻³



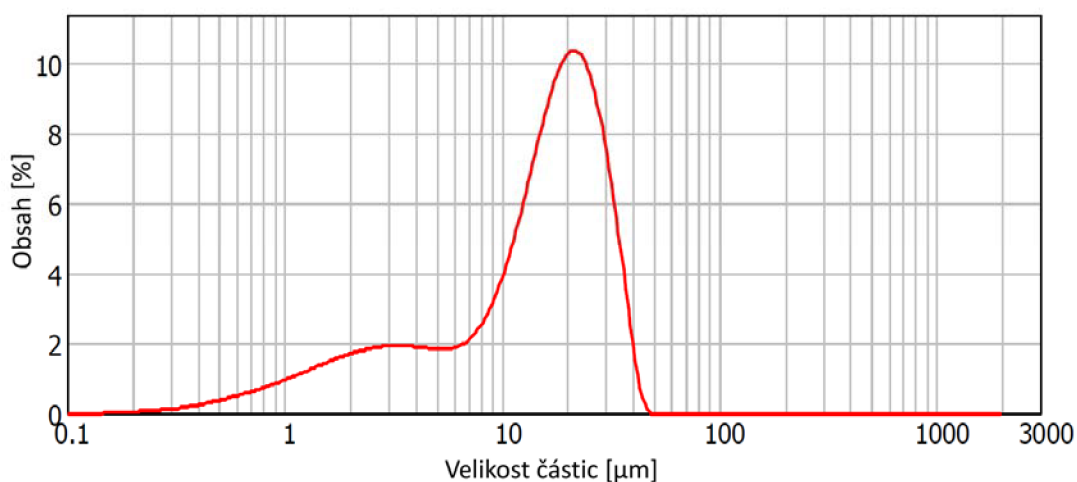
Obr. 18: Křivka zrnitosti zářivkového skla

Tab. 11: Chemické složení SIMAX

SIMAX			
SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O+K ₂ O
80,3 %	13 %	2,4 %	4,3 %

Tab. 12: Vlastnosti SIMAX

Pucolánová aktivita	548mg Ca(OH) ₂ na 1g pucolánu
Jemnost mletí	0,488 m ² /g
Měrná hmotnost	0,6453 g·cm ⁻³



Obr. 19: Křivka zrnitosti SIMAX

4.4.4 Normalizovaný křemenný písek CEN

Křemenný písek byl zvolen dle normy ČSN EN 196-1 pro zkoušení cementu, který odpovídá frakci 0–2 mm a je dodáván v polyethylenových obalech o hmotnosti 1350 ± 5 g.

4.4.5 Voda

Pro výrobu zkušebních těles byla použita pitná voda z vodovodu. Tato voda splňuje požadavky na vodu záměsovou dle normy ČSN EN 1008.

4.5 Vyhodnocení ETAPY II

ETAPA II byla zaměřena na přípravu malt, kde byl smíchán skelný recyklát spolu s cementem, vodou, křemenným pískem a kopolymerem EVA. Byla provedena zkouška konzistence čerstvé malty a následně byly zhotoveny trámečky $40 \times 40 \times 180$ mm. V daném časovém intervalu a to konkrétně po 28, 90 a 180 dnech, byla stanovena objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku. Připravené malty, které byly použity na výrobu trámečků, byly také nanесeny na betonovou desku a po 28 a 180 dnech podrobeny zkoušce přídržnosti. Výsledky všech zmiňovaných zkoušek jsou zaznamenány v tab. 13–23 a na obr. 20–26.

Tab. 13: Konzistence čerstvé malty

% skel. recyklátu s/bez EVA	Konzistence čerstvé malty [mm]			
	REFERENČNÍ	REFAGLASS	ZAŘIVKOVÉ	SIMAX
s EVA	210 × 215			
10 % s EVA		200 × 200	230 × 240	210 × 205
20 % s EVA		200 × 210	240 × 240	220 × 225
30 % s EVA		200 × 200	220 × 220	230 × 225
bez EVA	200 × 205			
10 % bez EVA		190 × 200	200 × 205	210 × 210
20 % bez EVA		180 × 190	190 × 200	200 × 205
30 % bez EVA		200 × 190	210 × 210	210 × 210

Zkouška konzistence čerstvé malty potvrdila, že malty s kopolymerem EVA mají větší rozlité oproti maltám bez kopolymeru EVA.

Tab. 14: Objemová hmotnost po 28 dnech

% skel. recyklátu s/bez EVA	Objemová hmotnost [kg/m ³]			
	REFERENČNÍ	REFAGLASS	ZAŘIVKOVÉ	SIMAX
s EVA	2050			
10 % s EVA		2020	2020	1960
20 % s EVA		2020	2030	2030
30 % s EVA		2000	1970	1990
bez EVA	2090			
10 % bez EVA		2080	2060	2080
20 % bez EVA		2090	2070	2060
30 % bez EVA		1980	2090	2070

Tab. 15: Objemová hmotnost po 90 dnech

% skel. recyklátu s/bez EVA	Objemová hmotnost [kg/m ³]			
	REFERENČNÍ	REFAGLASS	ZAŘIVKOVÉ	SIMAX
s EVA	2010			
10 % s EVA		2010	2040	2080
20 % s EVA		2010	2000	2000
30 % s EVA		2000	2000	2000
bez EVA	2140			
10 % bez EVA		2110	2150	2190
20 % bez EVA		2060	2140	2060
30 % bez EVA		2110	2110	2040

Tab. 16: Objemová hmotnost po 180 dnech

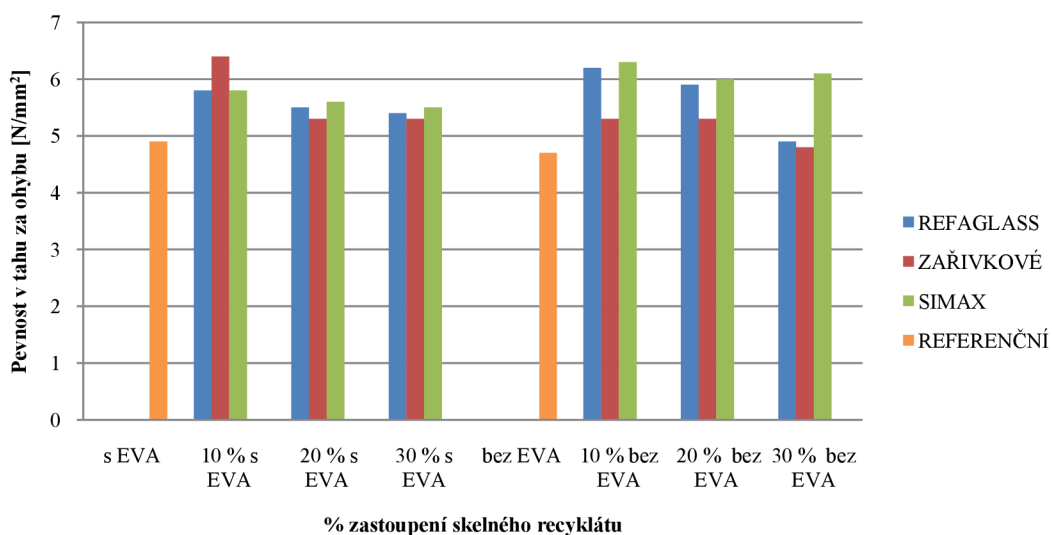
% skel. recyklátu s/bez EVA	Objemová hmotnost [kg/m ³]			
	REFERENČNÍ	REFAGLASS	ZAŘIVKOVÉ	SIMAX
s EVA	2010			
10 % s EVA		2080	2060	2050
20 % s EVA		1980	2020	2000
30 % s EVA		2050	2020	1970
bez EVA	2080			
10 % bez EVA		2050	2050	2190
20 % bez EVA		2130	2070	2070
30 % bez EVA		2040	2100	2040

U malt, kde byl použit kopolymer EVA, se objemová hmotnost v různém časovém rozmezí pohybuje kolem 2000 kg/m³. Malty bez kopolymeru EVA mají objemové hmotnosti pohybující se kolem 2070 kg/m³.

Tab. 17: Pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech

% skel. recyklátu s/bez EVA	Pevnost v tahu za ohybu [N/mm ²]			
	REFERENČNÍ	REFAGLASS	ZAŘIVKOVÉ	SIMAX
s EVA	4,9			
10 % s EVA		5,8	6,4	5,8
20 % s EVA		5,5	5,3	5,6
30 % s EVA		5,4	5,3	5,5
bez EVA	4,7			
10 % bez EVA		6,2	5,3	6,3
20 % bez EVA		5,9	5,3	6,0
30 % bez EVA		4,9	4,8	6,1

Pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech



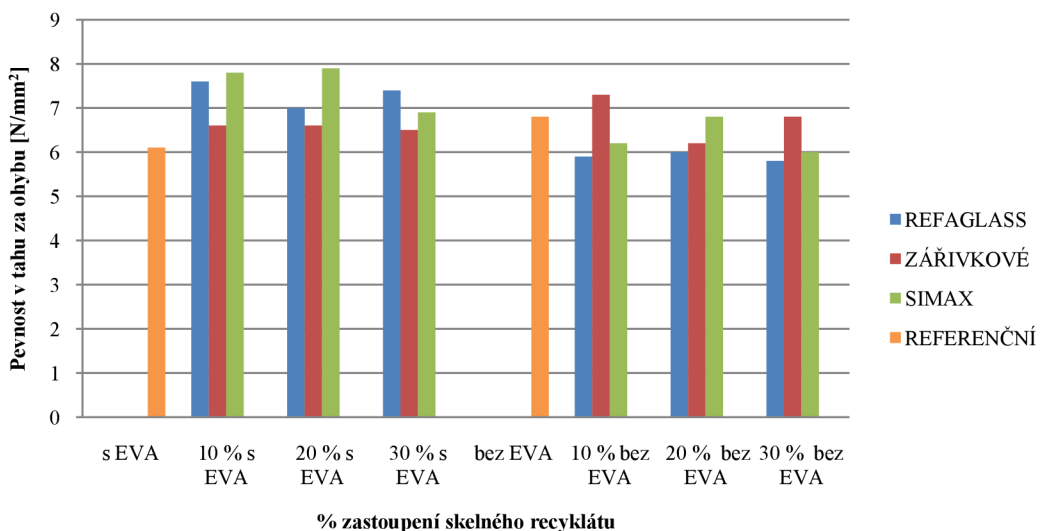
Obr. 20: Pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech

Po 28 dnech zrání vyšly nejvyšší pevnosti v tahu za ohybu u malt, kde bylo použito 10 % zářivkového skla spolu s kopolymerem EVA.

Tab. 18: Pevnosti v tahu za ohybu po 90 dnech

% skel. recyklátu s/bez EVA	Pevnost v tahu za ohybu [N/mm ²]			
	REFERENČNÍ	REFAGLASS	ZÁŘIVKOVÉ	SIMAX
s EVA	6,1			
10 % s EVA		7,6	6,6	7,8
20 % s EVA		7,0	6,6	7,9
30 % s EVA		7,4	6,5	6,9
bez EVA	6,8			
10 % bez EVA		5,9	7,3	6,2
20 % bez EVA		6,0	6,2	6,8
30 % bez EVA		5,8	6,8	6,0

Pevnosti v tahu za ohybu po 90 dnech



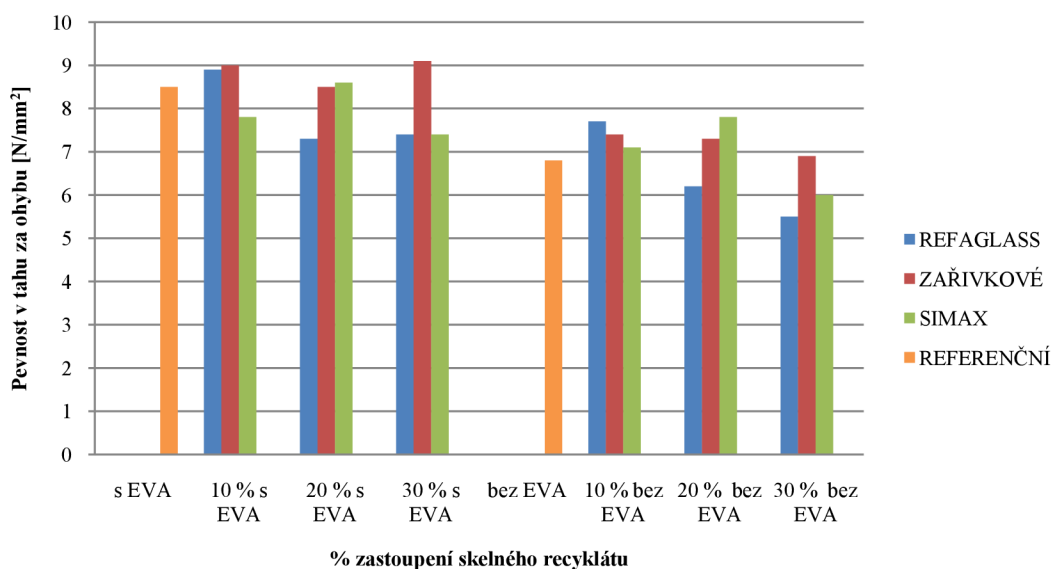
Obr. 21: Pevnosti v tahu za ohybu po 90 dnech

Vyšší hodnoty pevností v tahu za ohybu po 90 dnech byly zjištěny u malt, kde byl použit kopolymer EVA. Nejvyšší hodnoty byly stanoveny u malty s přídavkem skelného recyklátu SIMAX, který je zastoupen v maltě 20 %.

Tab. 19: Pevnosti v tahu za ohybu po 180 dnech

% skel. recyklátu s/bez EVA	Pevnost v tahu za ohybu [N/mm ²]			
	REFERENČNÍ	REFAGLASS	ZAŘIVKOVÉ	SIMAX
s EVA	8,5			
10 % s EVA		8,9	9,0	7,8
20 % s EVA		7,3	8,5	8,6
30 % s EVA		7,4	9,1	7,4
bez EVA	6,8			
10 % bez EVA		7,7	7,4	7,1
20 % bez EVA		6,2	7,3	7,8
30 % bez EVA		5,5	6,9	6,0

Pevnosti v tahu za ohybu po 180 dnech

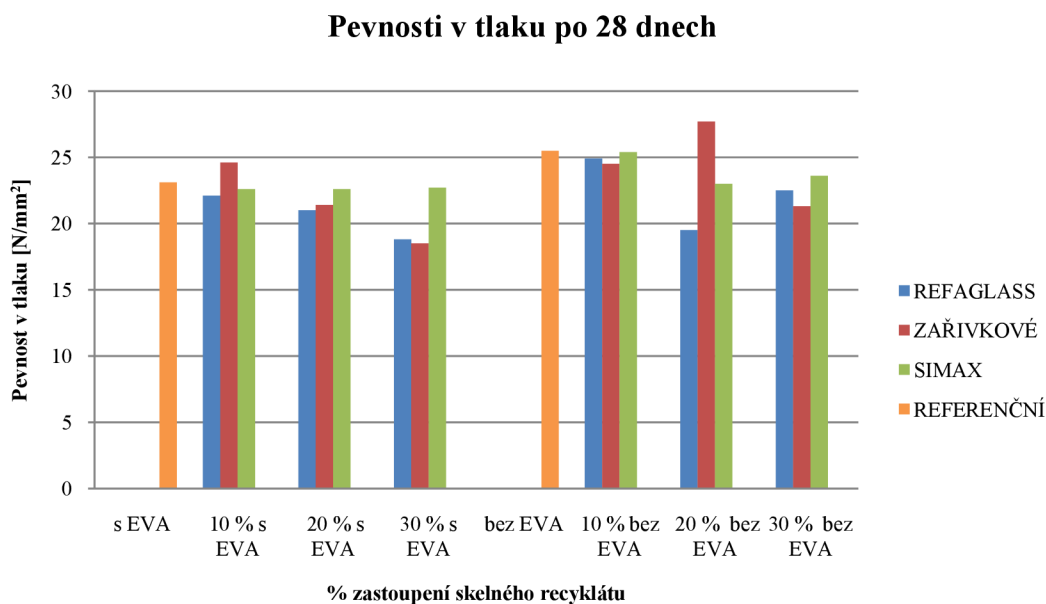


Obr. 22: Pevnosti v tahu za ohybu po 180 dnech

Nejvyšší pevnost v tahu za ohybu po 180 dnech, bylo dosaženo u PMM s přísadkou zářivkového skla, které nahradilo cement z 30 %.

Tab. 20: Pevnosti v tlaku po 28 dnech

% skel. recyklátu s/bez EVA	Pevnost v tlaku [N/mm ²]			
	REFERENČNÍ	REFAGLASS	ZAŘIVKOVÉ	SIMAX
s EVA	23,1			
10 % s EVA		22,1	24,6	22,6
20 % s EVA		21,0	21,4	22,6
30 % s EVA		18,8	18,5	22,7
bez EVA	25,5			
10 % bez EVA		24,9	24,5	25,4
20 % bez EVA		19,5	27,7	23,0
30 % bez EVA		22,5	21,3	23,6



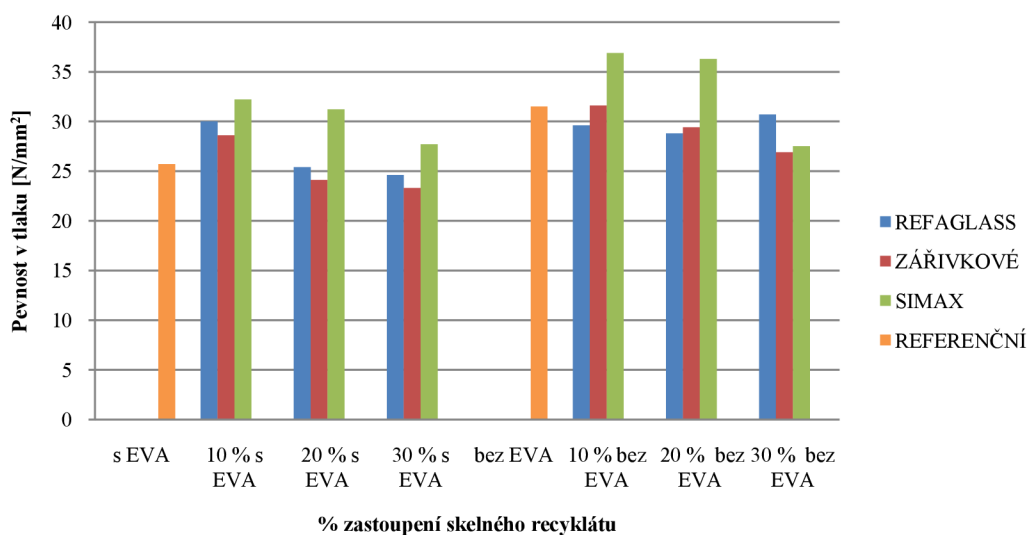
Obr. 23: Pevnosti v tlaku po 28 dnech

Malta, kde bylo zastoupeno 20 % zářivkového skla bez kopolymeru EVA, dosáhla nejvyšší pevnosti a to 27,7 N/mm².

Tab. 21: Pevnosti v tlaku po 90 dnech

% skel. recyklátu s/bez EVA	Pevnost v tlaku [N/mm ²]			
	REFERENČNÍ	REFAGLASS	ZÁŘIVKOVÉ	SIMAX
s EVA	25,7			
10 % s EVA		30,0	28,6	32,2
20 % s EVA		25,4	24,1	31,2
30 % s EVA		24,6	23,3	27,7
bez EVA	31,5			
10 % bez EVA		29,6	31,6	36,9
20 % bez EVA		28,8	29,4	36,3
30 % bez EVA		30,7	26,9	27,5

Pevnosti v tlaku po 90 dnech

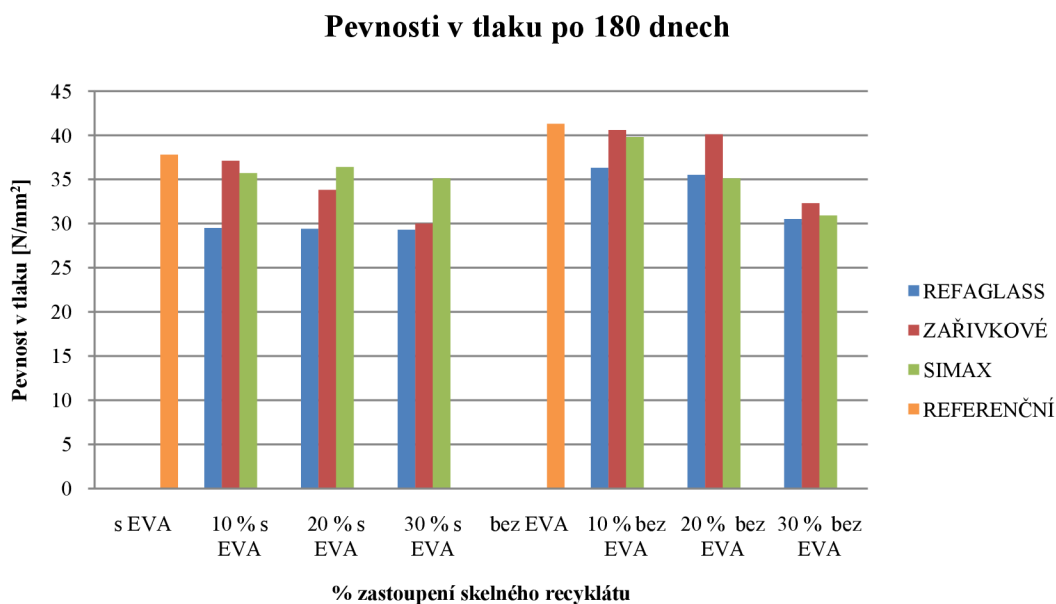


Obr. 24: Pevnosti v tlaku po 90 dnech

Pevnosti v tlaku po 90 dnech byly zjištěny vyšší u malt bez použití kopolymeru EVA. Nejvyšší hodnota byla naměřena u malty, kde byl cement nahrazen 10 % skelného recyklátu SIMAX.

Tab. 22: Pevnosti v tlaku po 180 dnech

% skel. recyklátu s/bez EVA	Pevnost v tlaku [N/mm ²]			
	REFERENČNÍ	REFAGLASS	ZAŘIVKOVÉ	SIMAX
s EVA	37,8			
10 % s EVA		29,5	37,1	35,7
20 % s EVA		29,4	33,8	36,4
30 % s EVA		29,3	30,0	35,1
bez EVA	41,3			
10 % bez EVA		36,3	40,6	39,8
20 % bez EVA		35,5	40,1	35,1
30 % bez EVA		30,5	32,3	30,9

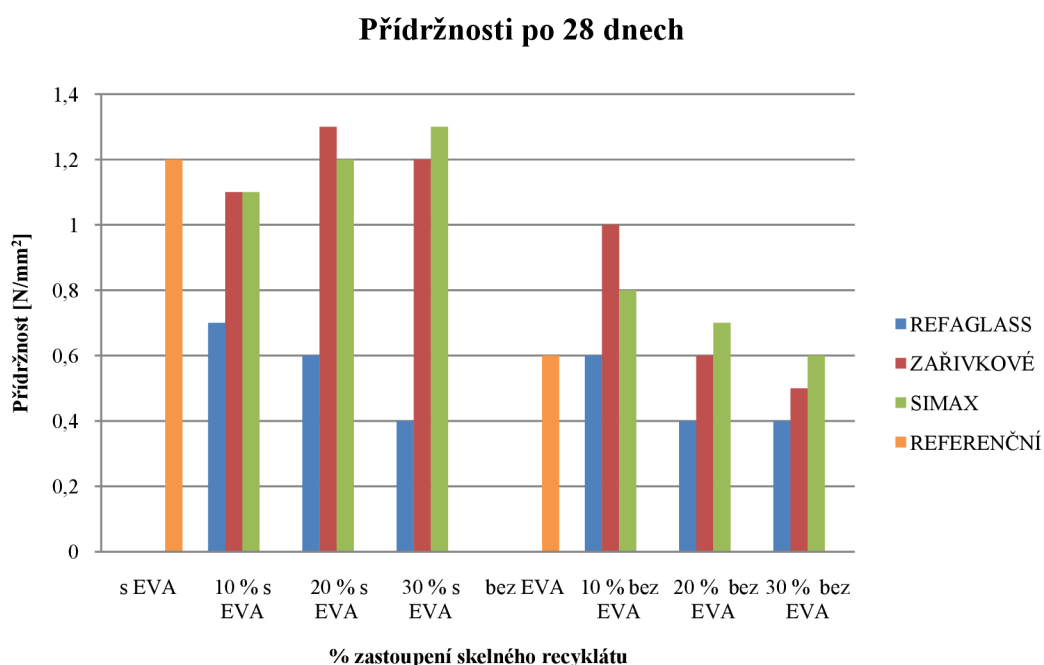


Obr. 25: Pevnosti v tlaku po 180 dnech

Nejvyšší pevnost v tlaku po 180 dnech byla zaznamenána u referenční malty bez kopolymeru EVA. Malta s 10 % zářivkového skla bez kopolymeru EVA, měla druhý nejvyšší výsledek.

Tab. 23: Přídržnosti po 28 dnech

% skel. recyklátu s/bez EVA	Přídržnost po 28 dnech [N/mm ²]			
	REFERENČNÍ	REFAGLASS	ZAŘIVKOVÉ	SIMAX
s EVA	1,2			
10 % s EVA		0,7	1,1	1,1
20 % s EVA		0,6	1,3	1,2
30 % s EVA		0,4	1,2	1,3
bez EVA	0,6			
10 % bez EVA		0,6	1,0	0,8
20 % bez EVA		0,4	0,6	0,7
30 % bez EVA		0,4	0,5	0,6

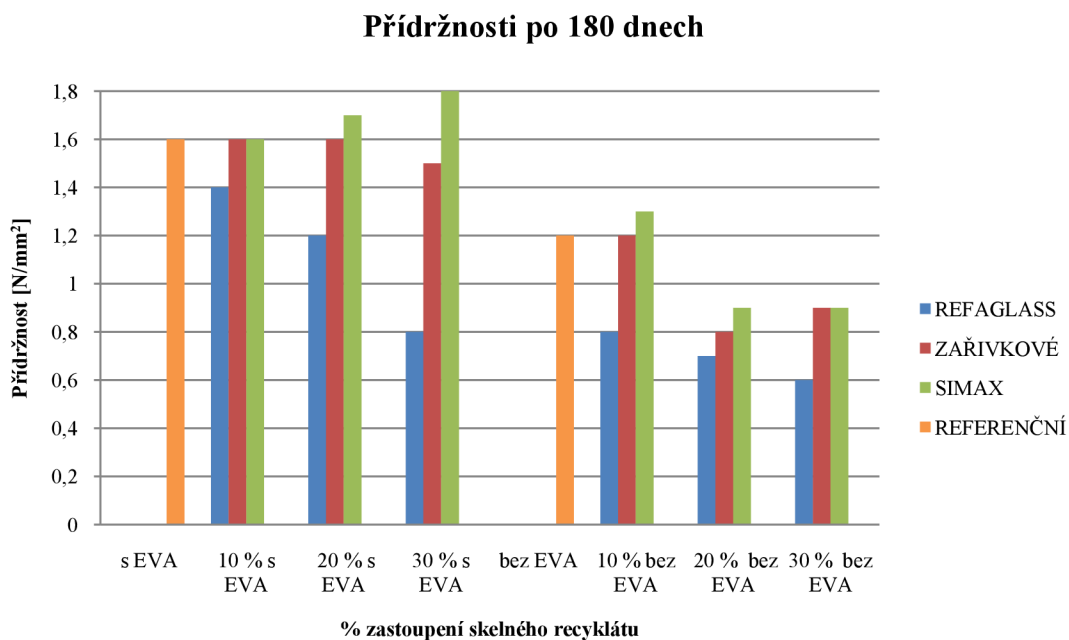


Obr. 26: Přídržnosti po 28 dnech

Hodnoty přídržností po 28 dnech byly dle očekávání vyšší u malt, kde byl použit kopolymer EVA. Nejvyšší naměřené hodnoty byly stanoveny u malty, kde byl nahrazen cement 30 % recyklátu SIMAX a u malty s 20 % zářivkového skla.

Tab. 24: Přídržnosti po 180 dnech

% skel. recyklátu s/bez EVA	Přídržnost po 180 dnech [N/mm ²]			
	REFERENČNÍ	REFAGLASS	ZAŘIVKOVÉ	SIMAX
s EVA	1,6			
10 % s EVA		1,4	1,6	1,6
20 % s EVA		1,2	1,6	1,7
30 % s EVA		0,8	1,5	1,8
bez EVA	1,2			
10 % bez EVA		0,8	1,2	1,3
20 % bez EVA		0,7	0,8	0,9
30 % bez EVA		0,6	0,9	0,9



Obr. 27: Přídržnosti po 180 dnech

Dle naměřených hodnot lze konstatovat, že přídržnost po 180 dnech byla vyšší u malt, kde byl použit kopolymer EVA. Nejvyšší hodnoty dosáhla malta s 30 % recyklátu SIMAX.

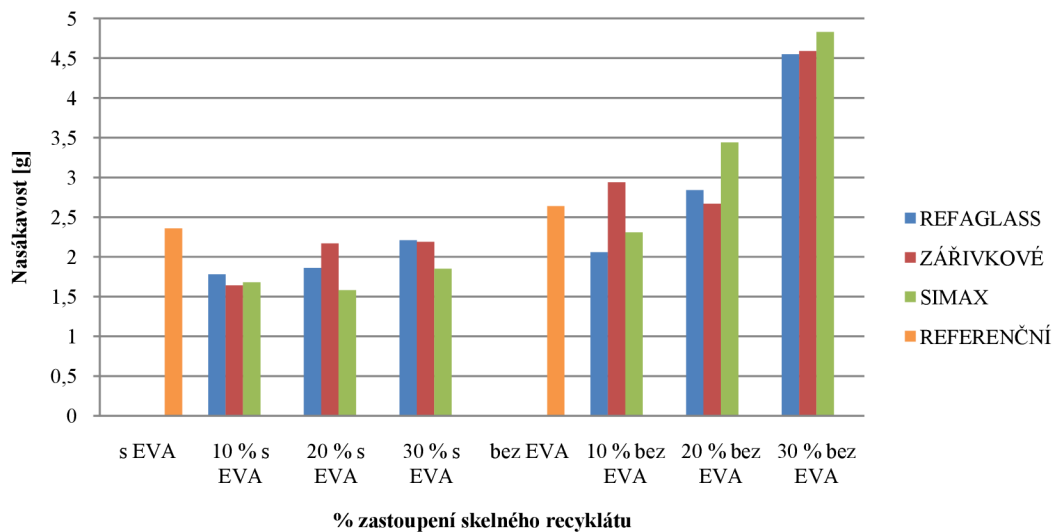
4.6 Vyhodnocení ETAPY III

Dle daných receptur, které byly totožné s ETAPOU II, byly vyrobeny trámečky o rozměrech 40 × 40 × 160 mm. Tyto trámečky byly následně podrobeny zkoušce nasákavosti a mrazuvzdornosti pomocí stanovených norem. Zkušební vzorky byly také uloženy do vybraného prostředí, kde se posuzovaly jejich mechanické vlastnosti a to pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku. Vzorky byly konkrétně vystaveny tepelném stárnutí podobu 14 dnů při teplotě 70 °C, 25 zmrazovacím cyklům v rozmezí teplot – 20 °C až + 20 °C a vodní lázni, kde byly uloženy podobu 20 dní. Výsledky jsou prezentovány v tab. 25–31 a na obr. 28–33 a 37–39. Výsledné hodnoty všech pevností za 28 dní v různém prostředí jsou znázorněny na obr. 34–36, 40–42.

Tab. 25: Stanovení nasákavosti po 30 a 240 minutách

% skel. recyklátu s/bez EVA	Nasákavost [g]							
	REFERENČNÍ		REFAGLASS		ZÁŘIVKOVÉ		SIMAX	
	30 min	240 min	30 min	240 min	30 min	240 min	30 min	240 min
s EVA	2,36	3,80						
10 % s EVA			1,78	3,35	1,64	3,00	1,68	3,08
20 % s EVA			1,86	3,09	2,17	3,60	1,58	2,84
30 % s EVA			2,21	3,87	2,19	3,76	1,85	2,67
bez EVA	2,64	4,64						
10 % bez EVA			2,06	3,95	2,94	4,85	2,31	4,84
20 % bez EVA			2,84	5,03	2,67	5,75	3,44	6,51
30 % bez EVA			4,55	8,34	4,59	7,25	4,83	9,29

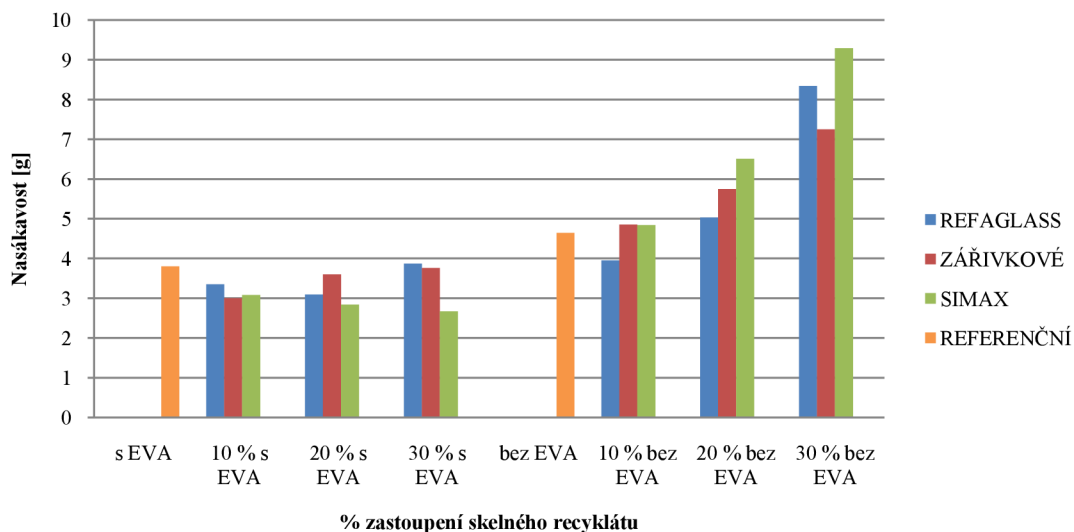
Stanovení nasákavosti po 30 minutách



Obr. 28: Stanovení nasákavosti po 30 minutách

Nejvyšší hodnota nasákavosti po 30 min byla zjištěna u malty bez přídavku kopolymeru EVA a se skelným recyklátem SIMAX, který měl 30 % zastoupení.

Stanovení nasákavosti po 240 minutách



Obr. 29: Stanovení nasákavosti po 240 minutách

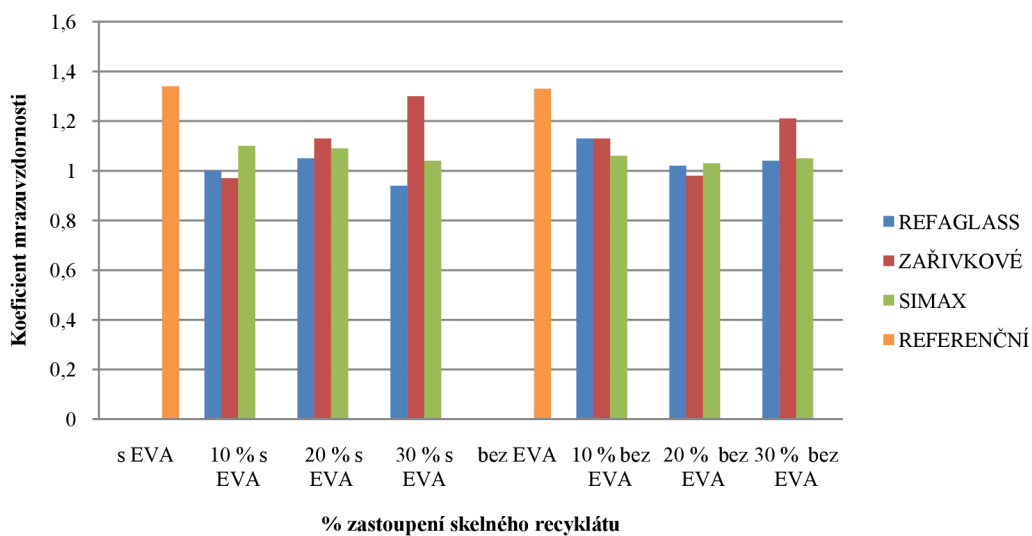
I v tomto případě vykazovala nejvyšší hodnotu nasákavost malta bez kopolymeru EVA a s použitím 30 % skelného recyklátu SIMAX. Pomocí

vysokotlaké rtuťové porozimetrie (viz 4.7 Vyhodnocení ETAPY IV) lze lépe specifikovat tento výsledek.

Tab. 26: Koefficienty mrazuvzdornosti KM_f

% skel. recyklátu s/bez EVA	Koefficient mrazuvzdornosti KM_f			
	REFERENČNÍ	REFAGLASS	ZAŘIVKOVÉ	SIMAX
s EVA	1,34			
10 % s EVA		1,00	0,97	1,10
20 % s EVA		1,05	1,13	1,09
30 % s EVA		0,94	1,30	1,04
bez EVA	1,33			
10 % bez EVA		1,13	1,13	1,06
20 % bez EVA		1,02	0,98	1,03
30 % bez EVA		1,04	1,21	1,05

Koefficienty mrazuvzdornosti KM_f



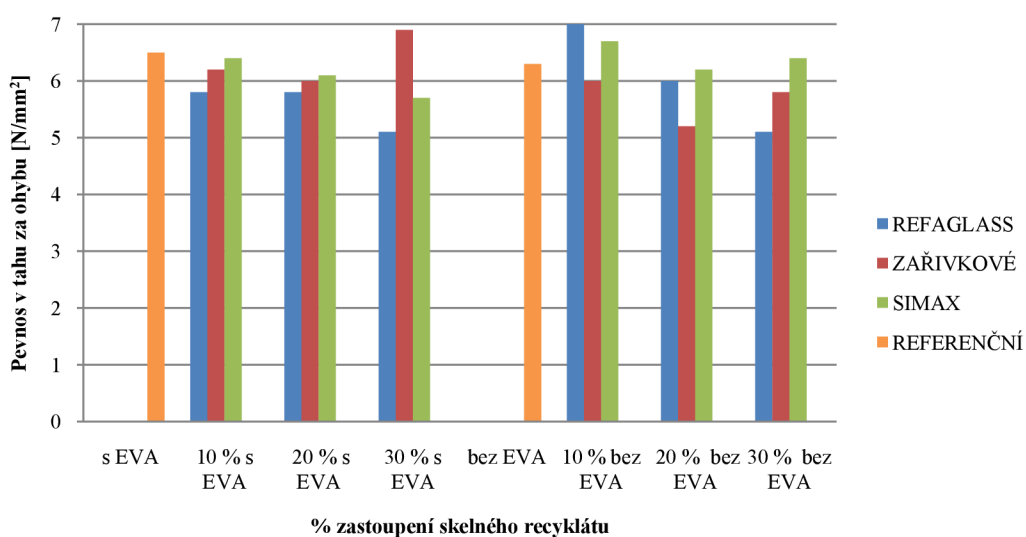
Obr. 30: Stanovení mrazuvzdorností

Z výsledků je patrné, že všechny malty mají vyšší hodnotu mrazuvzdornosti než 0,75, tudíž tyto malty lze hodnotit jako mrazuvzdorné.

Tab. 27: Stanovení pevností v tahu za ohybu po působení 25 zmrazovacích cyklů

% skel. recyklátu s/bez EVA	Pevnost v tahu za ohybu [N/mm ²]			
	REFERENČNÍ	REFAGLASS	ZAŘIVKOVÉ	SIMAX
s EVA	6,5			
10 % s EVA		5,8	6,2	6,4
20 % s EVA		5,8	6,0	6,1
30 % s EVA		5,1	6,9	5,7
bez EVA	6,3			
10 % bez EVA		7,0	6,0	6,7
20 % bez EVA		6,0	5,2	6,2
30 % bez EVA		5,1	5,8	6,4

Stanovení pevností v tahu za ohybu po působení 25 zmrazovacích cyklů



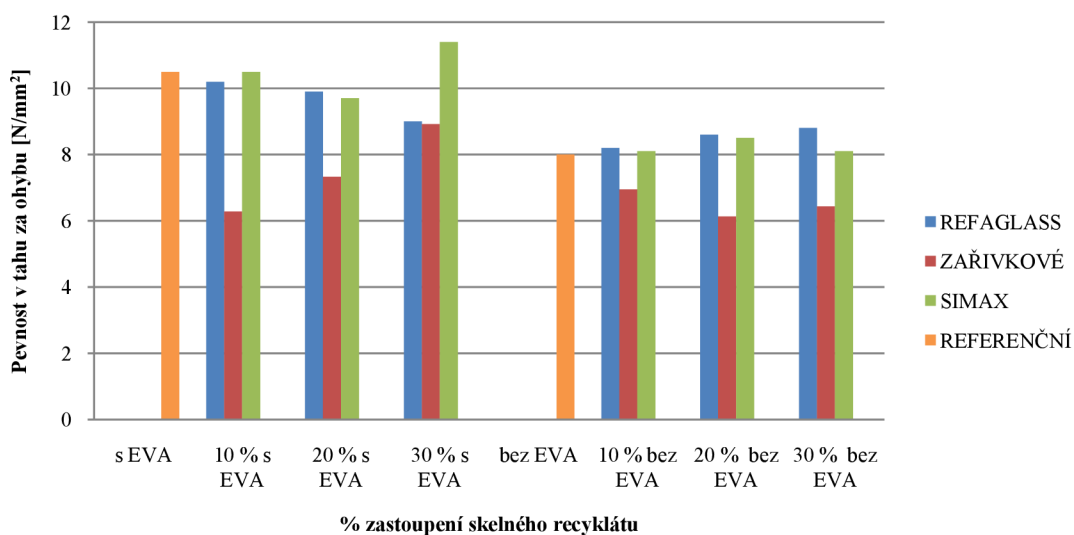
Obr. 31: Stanovení pevností v tahu za ohybu po působení 25 zmrazovacích cyklů

Všechny malty, které byly podrobeny účinkům zmrazování a rozmrazování, po 25 cyklech měly pevnosti vyšší než 5 N/mm². Nejlépe lze hodnotit maltu s 10 % REFAGLASS bez použití kopolymeru EVA, která vykazovala pevnost 7 N/mm².

Tab. 28: Stanovení pevností v tahu za ohybu po 14 dnech působení tepla (70 °C)

% skel. recyklátu s/bez EVA	Pevnost v tahu za ohybu [N/mm ²]			
	REFERENČNÍ	REFAGLASS	ZAŘIVKOVÉ	SIMAX
s EVA	10,5			
10 % s EVA		10,2	6,3	10,5
20 % s EVA		9,9	7,3	9,7
30 % s EVA		9,0	8,9	11,4
bez EVA	8,0			
10 % bez EVA		8,2	6,9	8,1
20 % bez EVA		8,6	6,1	8,5
30 % bez EVA		8,8	6,4	8,1

Stanovení pevností v tahu za ohybu po 14 dnech působení tepla (70 °C)



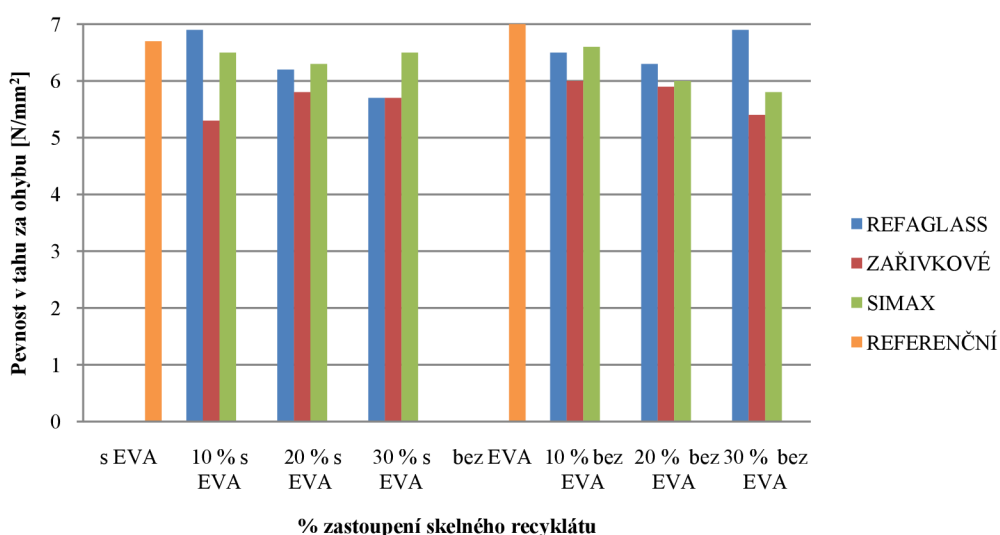
Obr. 32: Stanovení pevností v tahu za ohybu po 14 dnech působení tepla (70 °C)

Podle výsledků nejvyšší pevnost byla naměřena u malty s 30 % SIMAXU a kopolymerem EVA.

Tab. 29: Stanovení pevností v tahu za ohybu ve vodním prostředí

% skel. recyklátu s/bez EVA	Pevnost v tahu za ohybu [N/mm ²]			
	REFERENČNÍ	REFAGLASS	ZAŘIVKOVÉ	SIMAX
s EVA	6,7			
10 % s EVA		6,9	5,3	6,5
20 % s EVA		6,2	5,8	6,3
30 % s EVA		5,7	5,7	6,5
bez EVA	7,0			
10 % bez EVA		6,5	6,0	6,6
20 % bez EVA		6,3	5,9	6,0
30 % bez EVA		6,9	5,4	5,8

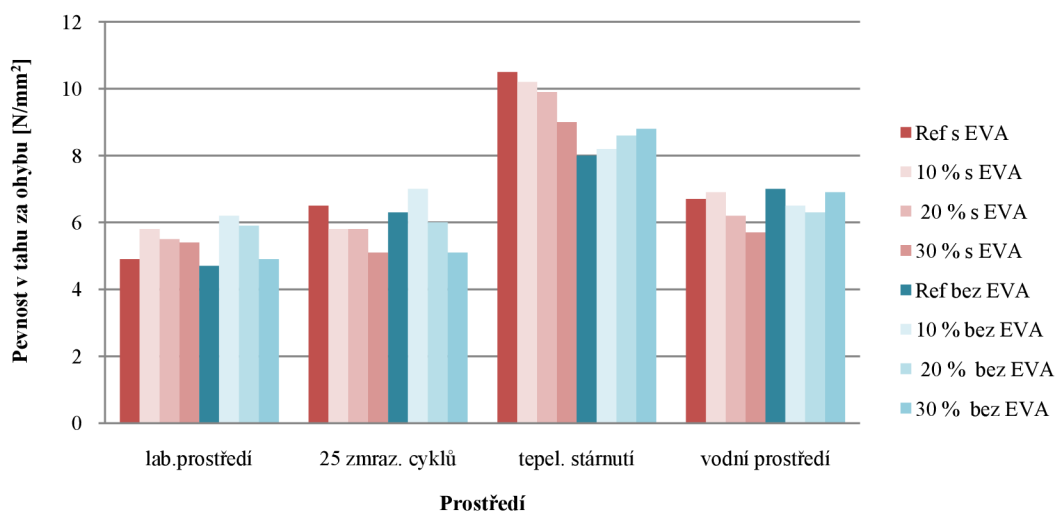
Stanovení pevností v tahu za ohybu ve vodním prostředí



Obr. 33: Stanovení pevností v tahu za ohybu ve vodním prostředí

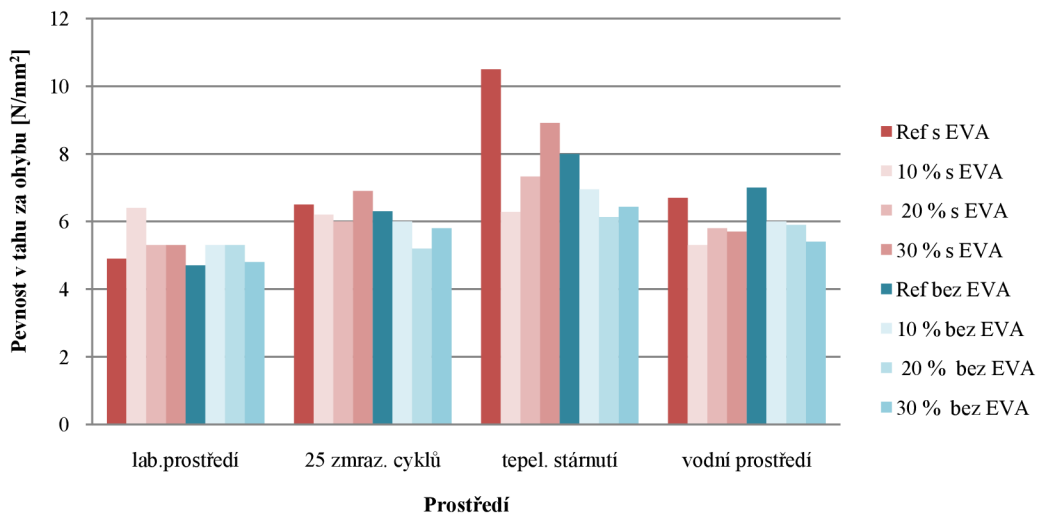
Ze všech malt, které byly namočený po danou dobu ve vodě, byla naměřena nevyšší pevnost v tahu za ohybu u malty referenční bez kopolymeru EVA. Druhá nejvyšší pevnost byla vyhodnocena u malty s 10% zastoupením REGAGLASS a s kopolymerem EVA.

**Pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech se skelným recyklátem
REFAGLASS v různém prostředí**



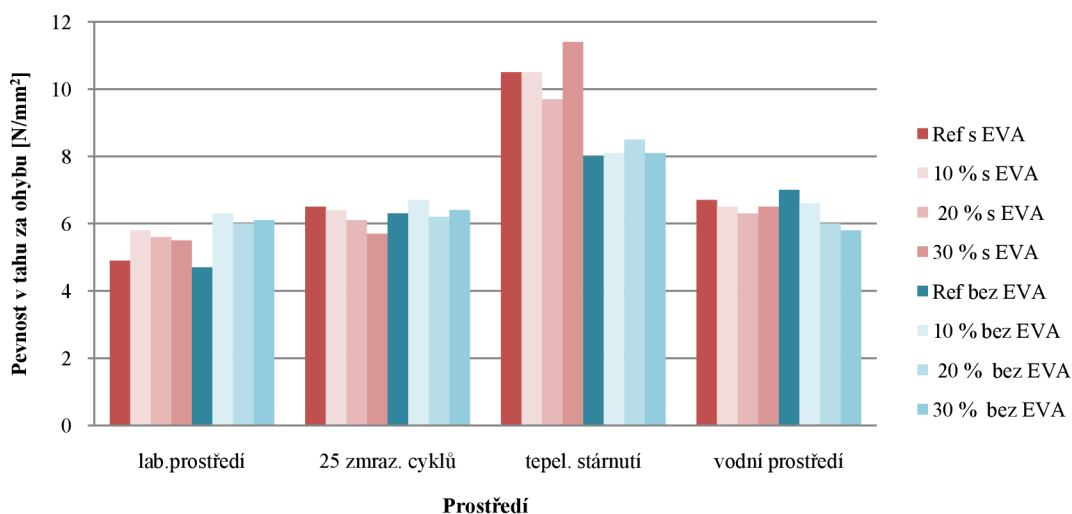
Obr. 34: Pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech se skelným recyklátem REFAGLASS v různém prostředí

**Pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech se zářivkovým sklem v
různém prostředí**



Obr. 35: Pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech se zářivkovým sklem v různém prostředí

Pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech se skelným recyklátem SIMAX v různém prostředí



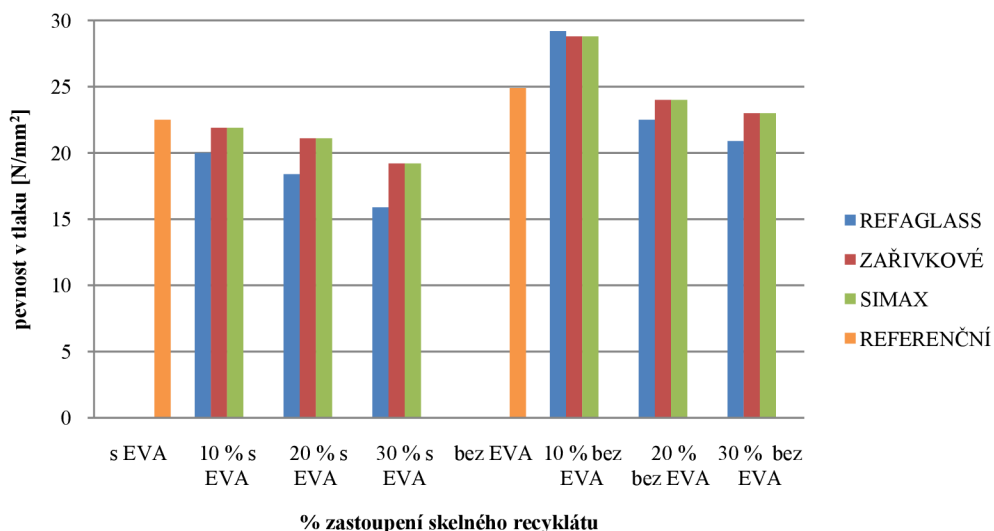
Obr. 36: Pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech se skelným recyklátem SIMAX v různém prostředí

Pevnosti v tahu za ohybu celkově vyšly lépe v prostředí, kde na vzorek působilo 14 dní teplo při 70 °C. Nejvyšší pevnost byla stanovena u PMM se skelným recyklátem SIMAX, který z 30 % nahrazoval cement.

Tab. 30: Stanovení pevností v tlaku po působení 25 zmrazovacích cyklů

% skel. recyklátu s/bez EVA	Pevnost v tlaku [N/mm ²]			
	REFERENČNÍ	REFAGLASS	ZAŘIVKOVÉ	SIMAX
s EVA	22,5			
10 % s EVA		20,0	21,9	21,9
20 % s EVA		18,4	21,1	21,1
30 % s EVA		15,9	19,2	19,2
bez EVA	24,9			
10 % bez EVA		29,2	28,8	28,8
20 % bez EVA		22,5	24,0	24,0
30 % bez EVA		20,9	23,0	23,0

Stanovení pevností v tlaku po působení 25 zmrazovacích cyklů



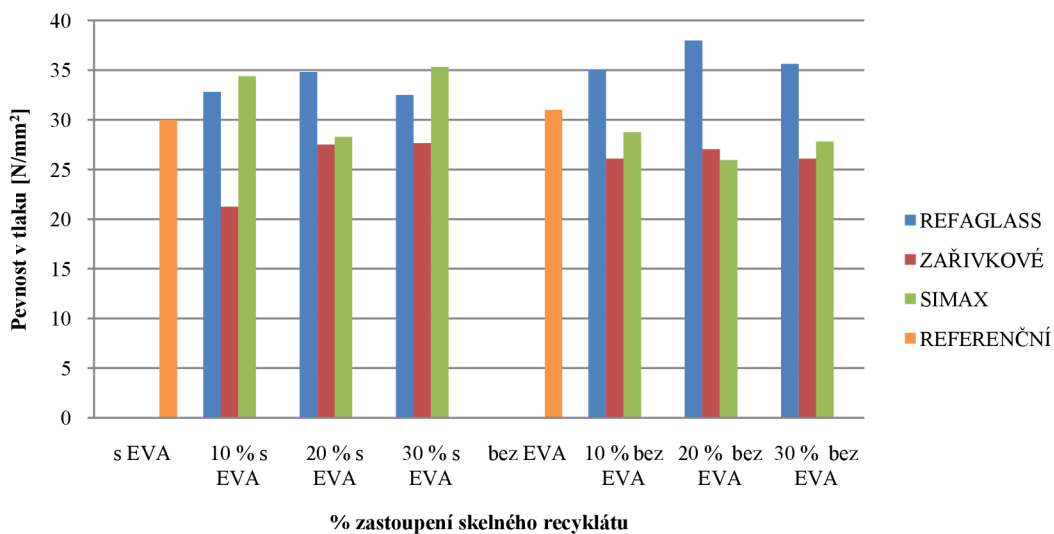
Obr. 37: Stanovení pevností v tlaku po působení 25 zmrazovacích cyklů

Pevnosti v tlaku po 25 zmrazovacích cyklech byly vyšší u malt bez použití kopolymeru EVA. Nejvyšších výsledků bylo dosaženo u malt, kde byly všechny skelné recykláty v zastoupení 10 %.

Tab. 31: Stanovení pevností v tlaku po 14 dnech působení tepla (70 °C)

% skel. recyklátu s/bez EVA	Pevnost v tlaku [N/mm ²]			
	REFERENČNÍ	REFAGLASS	ZAŘIVKOVÉ	SIMAX
s EVA	30,0			
10 % s EVA		32,8	21,3	34,4
20 % s EVA		34,8	27,5	28,3
30 % s EVA		32,5	27,7	35,3
bez EVA	31,0			
10 % bez EVA		35,0	26,1	28,8
20 % bez EVA		38,0	27,0	25,9
30 % bez EVA		35,6	26,1	27,8

Stanovení pevností v tlaku po 14 dnech působení tepla (70 °C)



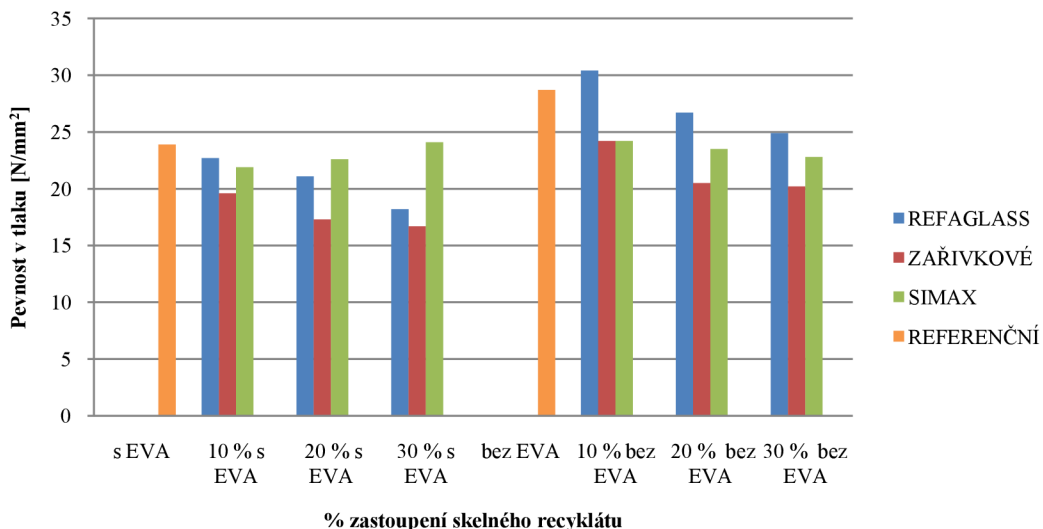
Obr. 38: Stanovení pevností v tlaku po 14 dnech působení tepla (70 °C)

Při tepelném stárnutí se ukázalo, že nejvyšších výsledků bylo dosaženo u všech malt, kde byl použit skelný recyklát REFAGLASS. Pevnosti 38,0 N/mm² dosáhla malta, kde byl cement nahrazen 20 % REFAGLASS bez kopolymeru EVA.

Tab. 32: Stanovení pevností v tlaku ve vodním prostředí

% skel. recyklátu s/bez EVA	Pevnost v tlaku [N/mm ²]			
	REFERENČNÍ	REFAGLASS	ZAŘIVKOVÉ	SIMAX
s EVA	23,9			
10 % s EVA		22,7	19,6	21,9
20 % s EVA		21,1	17,3	22,6
30 % s EVA		18,2	16,7	24,1
bez EVA	28,7			
10 % bez EVA		30,4	24,2	24,2
20 % bez EVA		26,7	20,5	23,5
30 % bez EVA		24,9	20,2	22,8

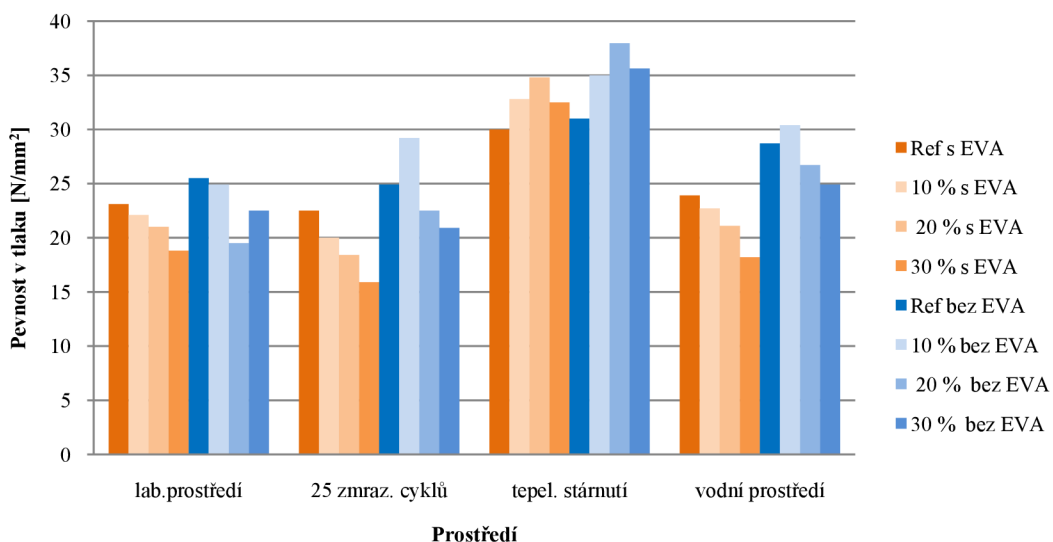
Stanovení pevností v tlaku ve vodním prostředí



Obr. 39: Stanovení pevností v tlaku ve vodním prostředí

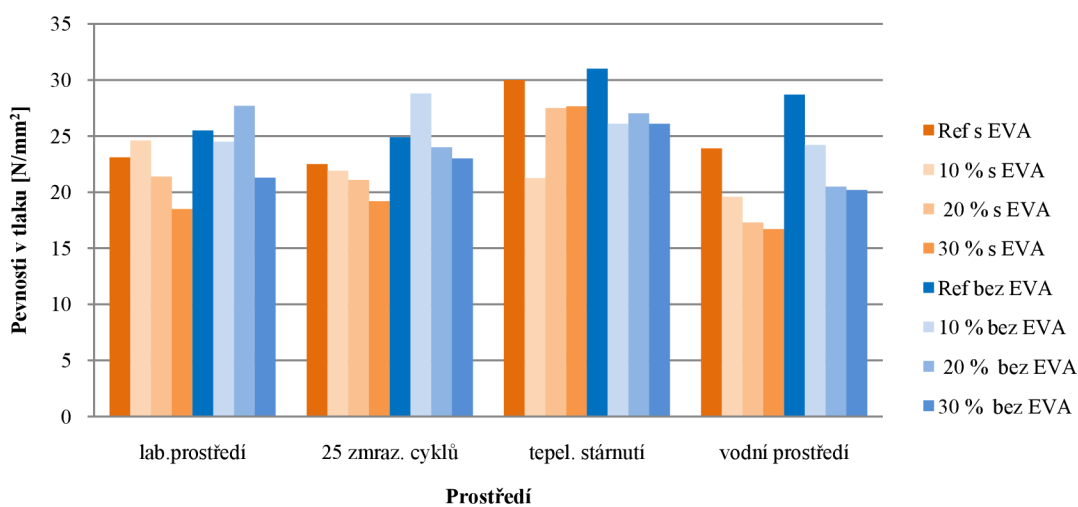
Malta s 10 % REFAGLASS a bez použití kopolymeru EVA dosáhla nejvyšší pevnosti ve vodním prostředí.

Pevnosti v tlaku po 28 dnech se skelným recyklátem REFAGLASS v různém prostředí



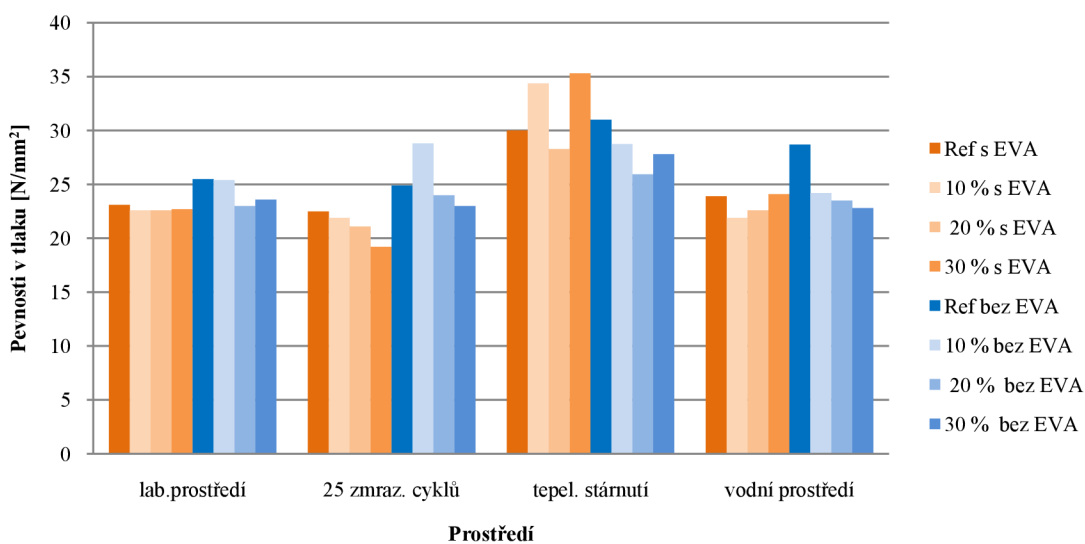
Obr. 40: Pevnosti v tlaku po 28 dnech se skelným recyklátem REFAGLASS v různém prostředí

Pevnosti v tlaku po 28 dnech se zářivkovým sklem v různém prostředí



Obr. 41: Pevnosti v tlaku po 28 dnech se zářivkovým sklem v různém prostředí

Pevnosti v tlaku po 28 dnech se skelným recyklátem SIMAX v různém prostředí



Obr. 42: Pevnosti v tlaku po 28 dnech se skelným recyklátem SIMAX v různém prostředí

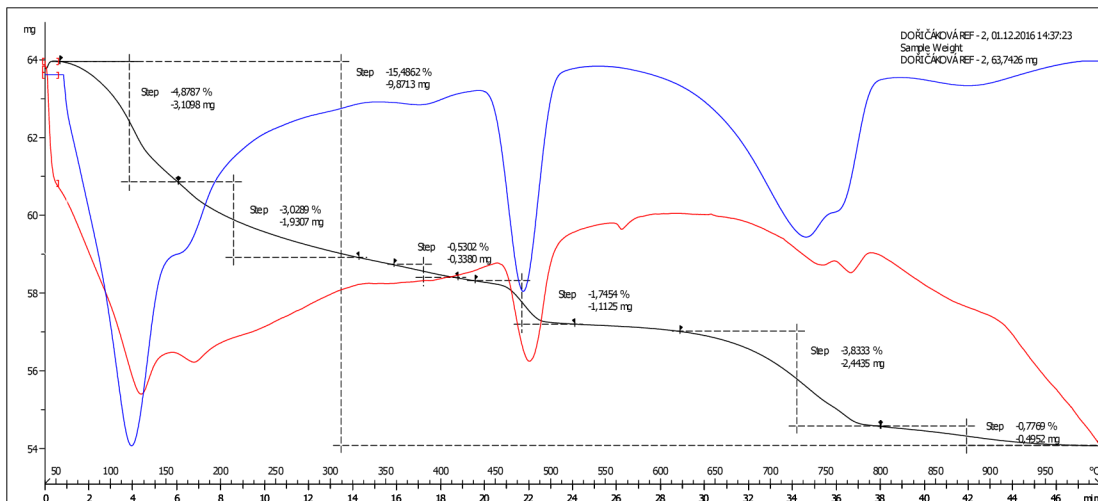
Jedny z nejvyšších pevností bylo dosaženo v prostředí, kde na vzorky působilo 14 dní teplo 70 °C. Nejvyšší pevnosti dosáhla malta s 20 % skelného recyklátu REFAGLASS bez využití kopolymeru EVA.

4.7 Vyhodnocení ETAPY IV

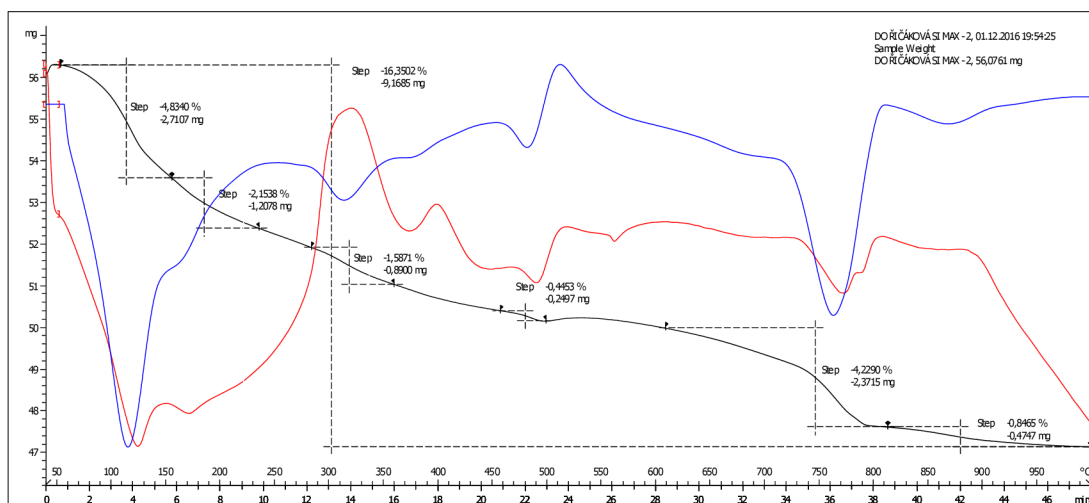
Do ETAPY IV byly vybrány vzorky s kopolymerem EVA a to vzorky referenční a vzorky, kde byl cement nahrazen 30 % recyklátu SIMAX. Vzorky byly uloženy 90 dní v laboratorním prostředí, vystaveny tepelnému stárnutí podobu 14 dnů při teplotě 70 °C, 25 zmrazovacím cyklům v rozmezí teplot – 20 °C až + 20 °C a vodní lázni, kde byly uloženy podobu 20 dní. Tyto vzorky byly podrobeny studiu mikrostruktury. Byl sledován hmotnostní úbytek v závislosti na teplotě pomocí DTA. Dále bylo zjišťováno mineralogické složení prostřednictvím RTG, mikrostruktura na rastrovacím elektronovém mikroskopu (REM) a množství pórů pomocí vysokotlaké rtuťové porozimetrie.

4.7.1 Diferenční termická analýza

Před analýzou byly vzorky rozmělněny na jemný prach, který byl proset přes síto 0,063 mm. Vyhodnocení DTA analýz vzorků je zobrazeno na obr. 43–44 a v příloze 1. V tab. 33 jsou zaznamenány hodnoty, které byly získány z termogramů.



Obr. 43: DTA analýza referenčního vzorku s kopolymerem EVA po 90 dnech uložení v laboratorním prostředí



Obr. 44: DTA analýza vzorku s 30 % recyklátu SIMAX s kopolymerem EVA po 90 dnech uložení v laboratorním prostředí

Tab. 33: Hmotnostní úbytky z termogramů

Vzorky	Hmotnostní úbytek odpovídající rozkladu C-S-H [%]	Hmotnostní úbytek odpovídající rozkladu Ca(OH) ₂ [%]/[mg]	Hmotnostní úbytek odpovídající rozkladu CaCO ₃ [%]/[mg]	Ztráta žiháním [%]
Ref. s EVA (90 dní lab. prost.)	3,0289	1,7454/4,5791	3,8333/5,5584	15,4862
Ref. s EVA (25 zm. cyklů)	3,1448	1,6816/3,4402	3,6988/4,1824	15,1798
Ref. s EVA (tepelné stárnutí)	3,0736	1,6128/3,2966	3,8157/4,3105	15,0557
Ref. s EVA (vodní prostředí)	2,9891	1,6126/3,3748	3,6078/4,1726	14,8208
SIM 30 % s EVA (90 dní lab. prost.)	2,8709	0,4453/1,0277	4,2290/5,3946	16,3502
SIM 30 % s EVA (25 zm. cyklů)	3,5232	0,3790/0,9607	3,2299/4,5254	16,6929
SIM 30 % s EVA (tepelné stárnutí)	4,2910	0,3978/0,8854	2,7345/3,3630	19,4104
SIM 30 % s EVA (vodní prostředí)	4,6066	0,4120/0,8059	2,8488/3,0807	19,1709

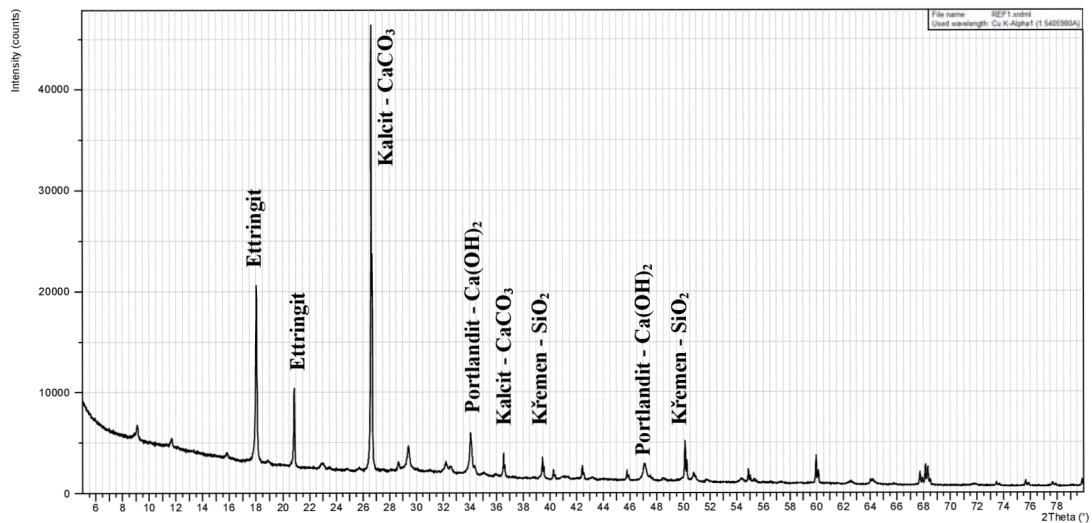
U DTA analýzy byly sledovány hmotnostní úbytky a reakce daných vzorků, kdy teplotní rozklad jednotlivých minerálů byl doprovázen endotermní reakcí spolu s hmotnostním úbytkem.

U referenčních vzorků s kopolymerem EVA (obr. 43, příloha 1) je mezi teplotami 120 až 160 °C analyzována přítomnost ettringitu. Dále lze sledovat rozklad C-S-H fáze mezi teplotami 160 až 330 °C. Poté se začne v několika krocích rozkládat kopolymer EVA. Tento rozklad nastává v rozmezích teplot 300–500 °C. Mezi teplotami 430–520 °C je zaznamenán endoeffekt, kdy dochází k dehydrataci portlanditu Ca(OH)₂. K dalšímu endoeffektu dochází při teplotě 567 °C, dochází k přeměně β-křemene na α-křemen. Úbytek hmotnosti v rozmezích teplot 620 až 800 °C odpovídá rozkladu CaCO₃.

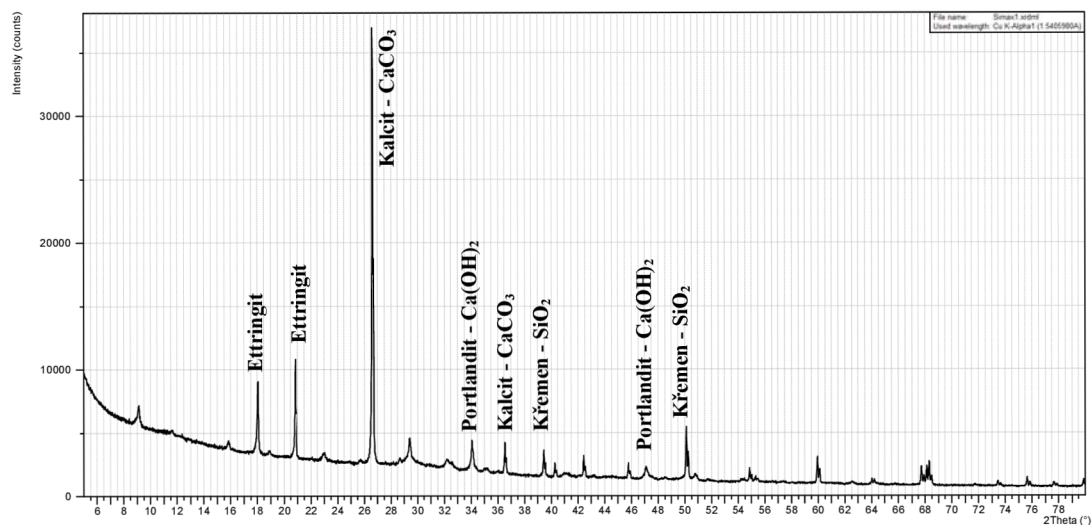
DTA analýzy u vzorků, kde byl použit recyklát SIMAX (obr. 44, příloha 1), mají podobný průběh jako u referenčních vzorků. Ettringit je stanoven mezi teplotami 120–160 °C. V rozmezí teplot 160 až 330 °C je zaznamenán rozklad C-S-H fáze. Mezi teplotami 300–500 °C dochází k rozkladu kopolymeru EVA a v rozmezích teplot 430–500 °C je patrna dehydratace portlanditu Ca(OH)₂. Při teplotě 567 °C je zaznamenána přeměna β-křemene na α-křemen. Mezi teplotami 620 až 800 °C nastal úbytek hmotnosti, který odpovídá rozkladu CaCO₃.

4.7.2 Rentgenová difrakční analýza

Vzorky byly před zkouškou pomlety na jemný prach a přesety přes síto 0,063 mm. Mineralogické složení vzorků je zaznamenáno na obr. 45–46 a v příloze 2.



Obr. 45: RTG analýza referenčního vzorku s kopolymerem EVA po 90 dnech uložení v laboratorním prostředí

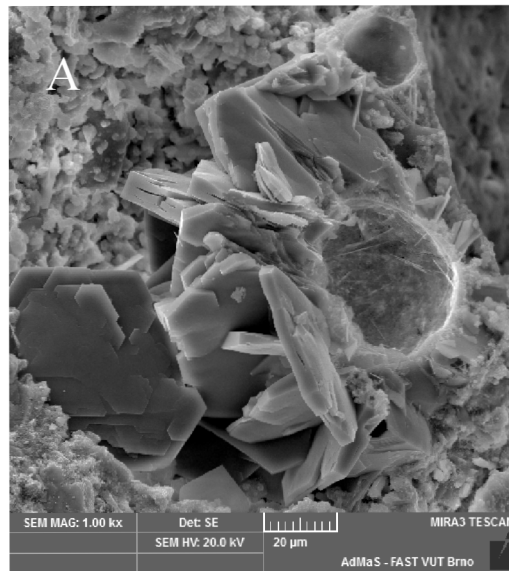


Obr. 46: RTG analýza vzorku s 30 % recyklátu SIMAX a s kopolymerem EVA po 90 dnech uložení v laboratorním prostředí

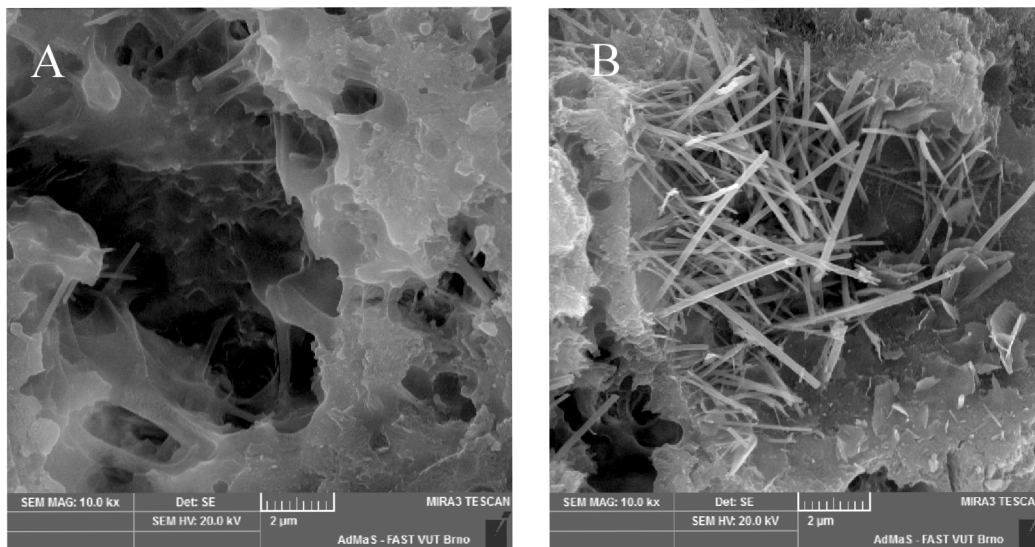
U vzorků byla zjištěna přítomnost ettringitu, kalcitu, portlanditu a křemene. Z obou difraktogramů lze konstatovat, že mají podobné mineralogické složení.

4.7.3 Elektronová rastrovací mikroskopie

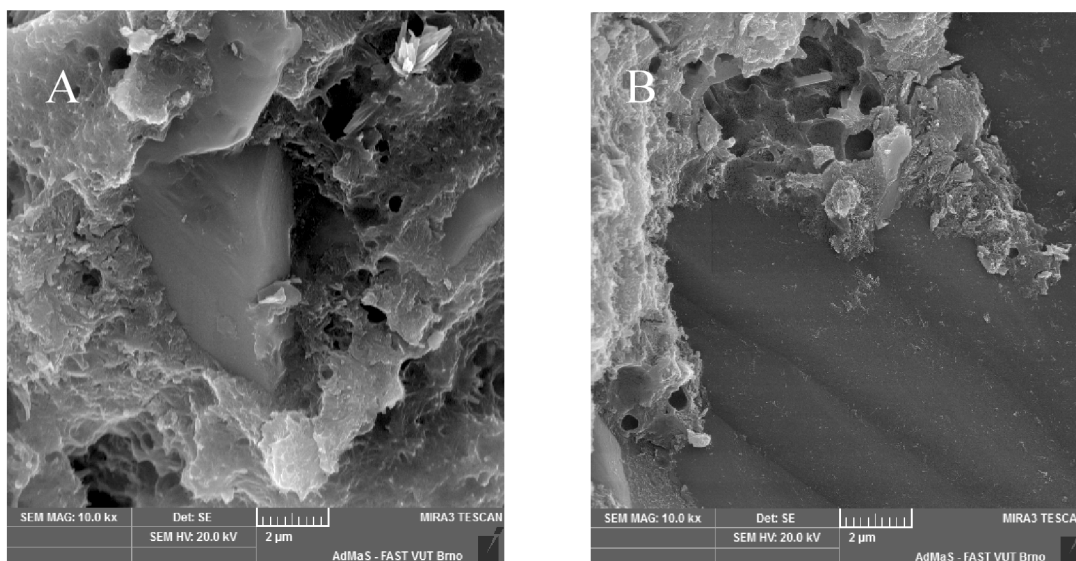
Úlomky vzorků byly zkoumány pod rastrovacím elektronovým mikroskopem. Snímky jsou zobrazeny na obr. 47 až 49.



Obr. 47: REM záznam referenčního vzorku s kopolymerem EVA
A) krystaly portlanditu při zvětšení 1 000×



Obr. 48: REM záznam vzorku s 30 % recyklátu SIMAX a s kopolymerem EVA
A) C-S-H produkty s krystaly ettringitu a polymerním filmem při zvětšení 10 000×,
B) krystaly ettringitu při zvětšení 10 000×



Obr. 49: REM záznam vzorku s 30 % recyklátu SIMAX a s kopolymerem EVA
 A) zrno skla obaleno C-S-H produkty při zvětšení 10 000×, B) prorůstání C-S-H produktů skelným zrnem při zvětšení 10 000×

Na obr. 49 je znázorněno prorůstání C-S-H produktů skelným zrnem. U obr. 47 je možné vidět krystaly portlanditu a na obr. 48 krystaly ettringitu.

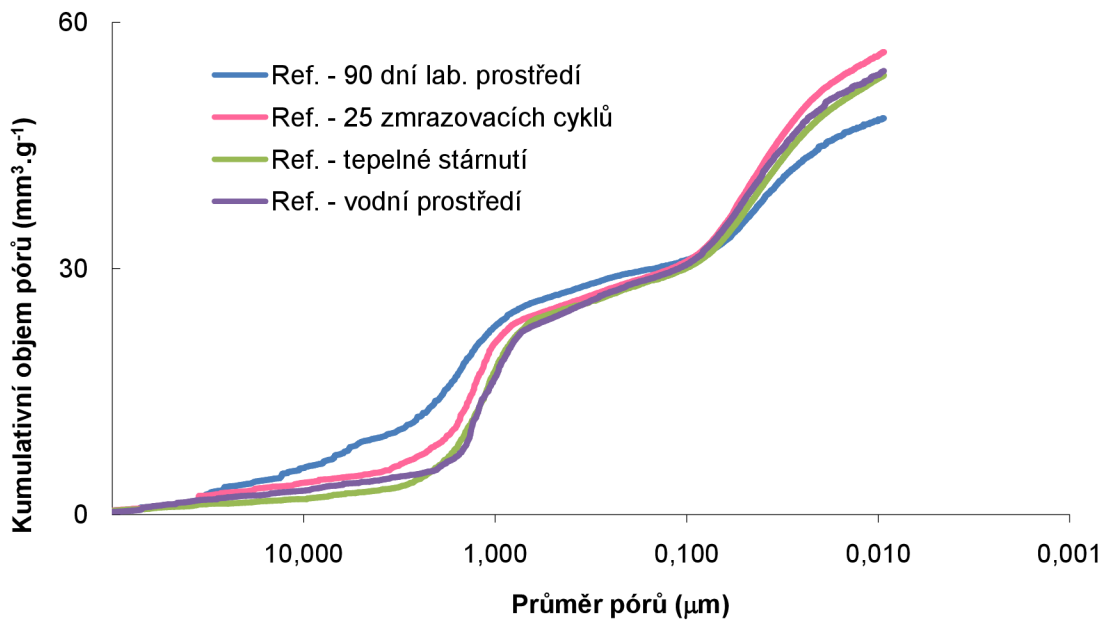
4.7.4 Vysokotlaká rtuťová porozimetrie

Hodnoty, které byly získány vysokotlakou rtuťovou porozimetrií jsou zaznamenány v tab. 34 a na obr. 50–53.

Tab. 34: Výsledky vysokotlaké rtuťové porozimetrie

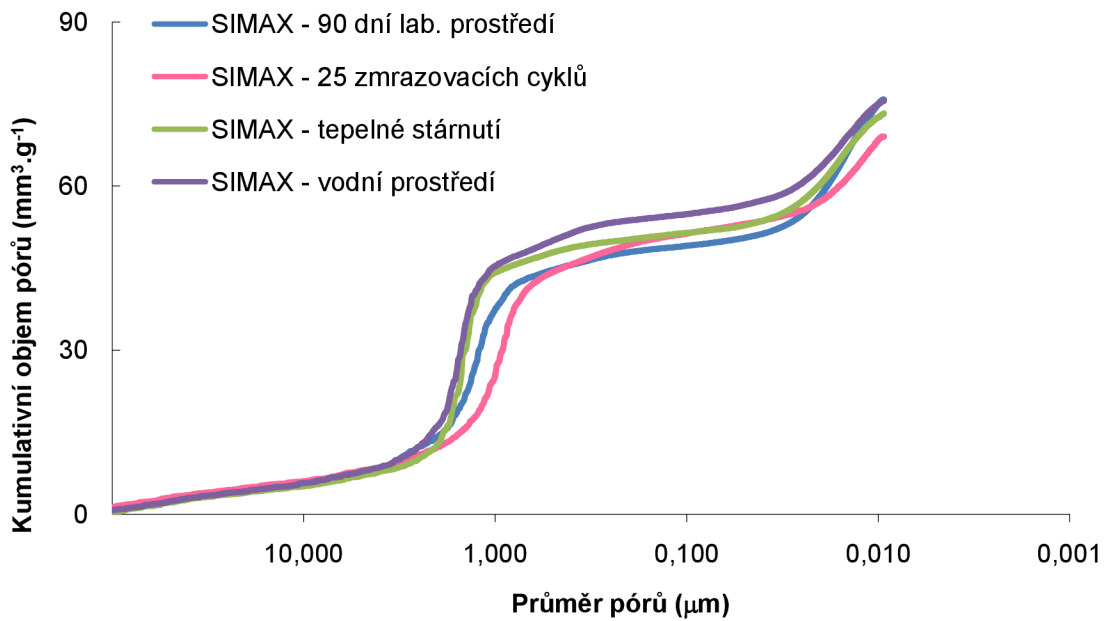
Vzorky	Celkový objem pórů [mm ³ ·g ⁻¹]	Celková plocha pórů [m ² ·g ⁻¹]	Objem. hmotnost [g·cm ⁻³]	Měrná hmotnost [g·cm ⁻³]	Celková pórovitost [%]
Ref. s EVA (90 dní lab. prost.)	48,3175	2,5880	2,2307	2,5002	10,7781
Ref. s EVA (25 zmraz. cyklů)	56,3936	3,6760	2,1795	2,4849	12,2910
Ref. s EVA (tepelné stárnutí)	53,5511	3,5740	2,1674	2,4520	11,6068
Ref. s EVA (vodní prostředí)	54,0931	3,4280	2,1661	2,4536	11,7170
SIM 30 % s EVA (90 dní lab. prost.)	75,8310	6,5890	2,0300	2,3993	15,3936
SIM 30 % s EVA (25 zmraz. cyklů)	69,0593	4,5850	2,0461	2,3828	14,1304
SIM 30 % s EVA (tepelné stárnutí)	73,3046	5,1190	1,9530	2,2793	14,3161
SIM 30 % s EVA (vodní prostředí)	75,7032	4,9110	2,0188	2,3830	15,2832

Kumulativní objem pórů referenčních malt



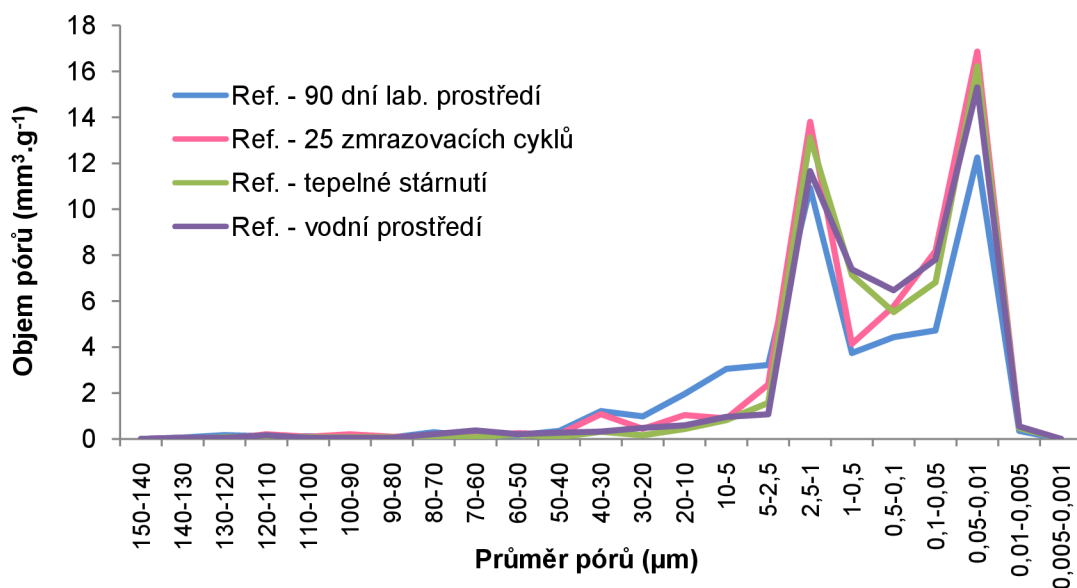
Obr. 50: Kumulativní objem pórů referenčních malt

Kumulativní objem pórů malt se skelným recyklátem SIMAX



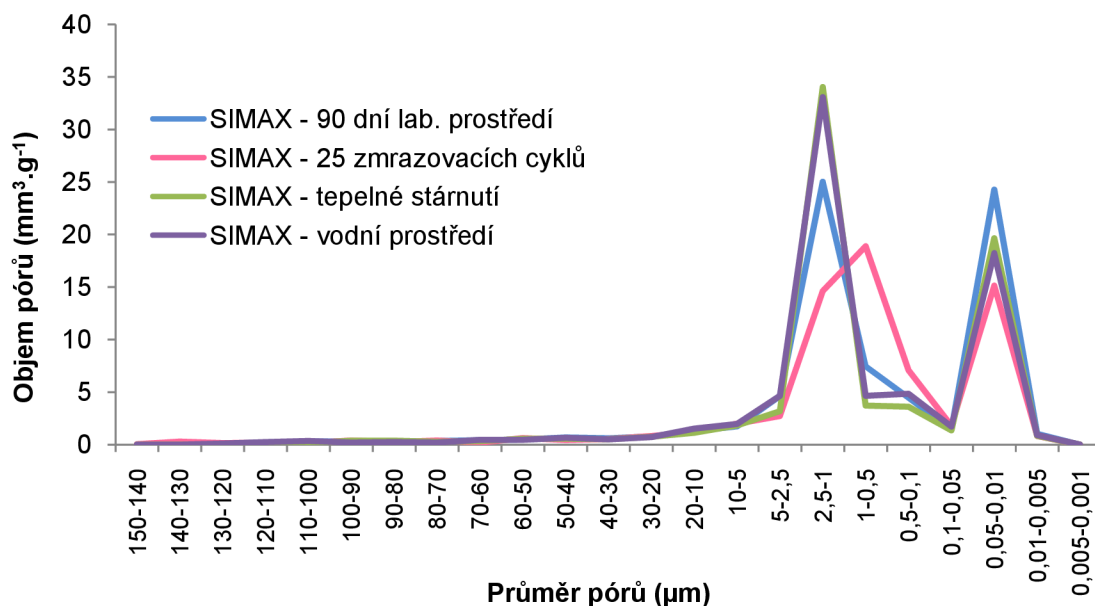
Obr. 51: Kumulativní objem pórů malt se skelným recyklátem SIMAX

Objem pórů referenčních malt



Obr. 52: Objem pórů referenčních malt

Objem pórů malt se skelným recyklátem SIMAX



Obr. 53: Objem pórů malt se skelným recyklátem SIMAX

Celková pórovitost byla o 3–4% nižší u referenčních PMM.

5 Diskuse a shrnutí

Praktická část diplomové práce byla zaměřena na studium vlastností polymery modifikovaných malt s využitím skelného recyklátu. Byly zvoleny tři druhy recyklovatelného skla, a to REFAGLASS, zářivkové sklo a SIMAX.

Tyto skelné recykláty byly v ETAPĚ I podrobeny zkouškám vlastností, kde byla ověřena vhodnost materiálu. Konkrétně šlo o chemický rozbor, pucolánovou aktivitu, jemnost mletí a měrnou hmotnost. U chemického rozboru bylo zjištěno u všech skelných recyklátů vysoké zastoupení SiO_2 , které udává pucolánové vlastnosti. Nejvyšší obsah byl u recyklátu SIMAX, a to 80,3 %. Dále byly přítomny Al_2O_3 , CaO , Na_2O a K_2O , což jsou oxidy běžně přítomné u skelných recyklátů. Nejvyšší pucolánové aktivity bylo dosaženo u skelného recyklátu REFAGLASS a to 830 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na 1g pucolánu. Nejnižší pucolánovou aktivitu měl skelný recyklát SIMAX 548 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na 1 g pucolánu. Jemnost mletí se u skelného recyklátu REFAGLASS a zářivkového skla pohybuje kolem 0,260 m^2/g a u recyklátu SIMAX byla jemnost mletí 0,488 m^2/g . Měrná hmotnost u všech recyklátů byla zaznamenána v rozmezí 0,6281–0,6453 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Dále byla navržena vhodná receptura, kde bylo stanoveno 10, 20 a 30 procentuální zastoupení skelného recyklátu jako částečná náhrada cementu. Jako polymerní přísada byl zvolen kopolymer EVA, který byl dávkován v množství 2 %.

ETAPA II byla zaměřena na stanovení konzistence čerstvé malty a na studium fyzikálně-mechanických vlastností malt při uložení v laboratorních podmínkách. U zkoušky konzistence čerstvé malty byla zaznamenána vyšší hodnota u malt, kde byl použit kopolymer EVA. Po 28, 90 a 180 dnech byla stanovena objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku. Pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku s postupem času rostly u všech vzorků, což je způsobeno delší dobou zrání a probíhající pucolánovou reakcí skla. Hodnoty pevností v tahu za ohybu byly vyšší, téměř u všech vzorků v různém procentuálním zastoupení a s různým skelným recyklátem než u vzorků referenčních. Vzorky, kde byl použit kopolymer EVA, měly vyšší pevnosti v tahu za ohybu než vzorky bez kopolymeru, a to průměrně o 0,7 MPa. Pevnosti v tlaku byly celkově vyšší u vzorků bez použití kopolymeru EVA. Všechny malty, jak s různým procentuálním, tak druhovým zastoupením skelného recyklátu,

měly přibližně stejné nebo nižší pevnosti oproti maltám referenčním. Jedny z nejvyšších pevností v tahu za ohybu a v tlaku dosáhly malty, kde byl použit skelný recyklát SIMAX. V ETAPĚ II byla také stanovena přídržnost po 28 a 180 dnech. Jak se dalo předpokládat, vyšších pevností bylo dosaženo u malt, kde byl použit kopolymer EVA. Nejvyšších hodnot dosáhla PMM s 30 % recyklátu SIMAX po 28 i 180 dnech.

V ETAPĚ III byly vzorky po stanovenou dobu uloženy ve vybraných prostředích. Konkrétně šlo o prostředí s cyklickým zmrazováním – rozmrazováním (25 cyklů), tepelným stárnutím (vzorky 14 dní v sušárně při 70 °C) a ponořením do vody po dobu 20 dnů. Vybrané vzorky byly podrobeny zkouškám nasákavosti, mrazuvzdornosti, pevnosti v tahu za ohybu a na pevnosti v tlaku. Nasákavost byla stanovena po 30 a 240 minutách. Celkově malty, kde byl použit kopolymer EVA, měly nižší nasákavost oproti maltám bez kopolymeru. To je způsobeno kopolymerem EVA, který při hydrataci tvoří polymerní film a ten prorůstá a vyplňuje stěny pórů. Po 240 minutách byla nejnižší nasákavost zaznamenána u malty, kde byl cement z 30 % nahrazen skelným recyklátem SIMAX. Výsledky mrazuvzdornosti ukazují, že všechny malty mají vyšší koeficient mrazuvzdornosti (0,75), tudíž je lze hodnotit jako mrazuvzdorné. Dále byla zkoušena pevnost v tahu za ohybu a v tlaku u vzorků, které byly uloženy ve vybraném prostředí. Celkově nejvyšších pevností jak v tahu za ohybu, tak v tlaku bylo dosaženo u vzorků, které byly uloženy v sušárně na 14 dní při 70 °C. Při krátkodobém působení tepla na maltu jsou počáteční pevnosti vyšší. Ovšem dlouhodobé působení vyšších teplot na maltu má negativní účinek, protože dochází ke ztrátě vody a tím se zamezuje hydrataci. Nejvyšší pevnost v tahu za ohybu a v tlaku byla naměřena u PMM s 30 % skelného recyklátu SIMAX, která byla ponechána v tomto prostředí.

Dle výše uvedených skutečností, byla referenční PMM a malta s 30 % skelného recyklátu SIMAX podrobena v ETAPĚ IV diferenční termické analýze, rentgenové difrakční analýze, elektronové rastrovací mikroskopii a vysokotlaké rtuťové prozimetrii. Za pomoci DTA analýzy byla u všech vzorků identifikována přítomnost ettringitu, C-S-H, portlanditu a uhličitanů. Hmotnostní úbytek C-S-H v rozmezí teplot 160–330 °C odpovídá hydrataci cementu a poukazuje na probíhající pucolánovou reakci. Při porovnání hmotnostního úbytku Ca(OH)_2 u referenční malty a malty s 30 %

skelného recyklátu SIMAX, bylo patrné, že malty se skelným recyklátem spotřebovávají více Ca(OH)_2 při pucolánové reakci. U malt, kde bylo 30 % skelného recyklátu SIMAX, je třeba zohlednit, že bylo sníženo množství cementu, což má vliv na snížení obsahu portlanditu. Přítomné uhličitany, vznikly při uložení vzorků karbonatací. RTG analýza u všech vzorků stanovila ettringit, portlandit, kalcit a křemen. Tudiž výsledky DTA a RTG spolu korespondují a lze říci, že Ca(OH)_2 je spotřebováno na pucolánovou reakci. Výsledky porozimetrie ukázaly, že celková pórovitost je nižší u referenční PMM. Při stanovení nasákavosti, ale výsledky ukázaly, že vyšší nasákavosti dosáhla právě referenční PMM oproti PMM s 30 % skelného recyklátu SIMAX. Tyto výsledky si lze vyložit tak, že referenční PMM mají více kapilárních pórů oproti PMM se skelným recyklátem SIMAX a tudíž jsou více nasákavé, ačkoli mají nižší pórovitost než PMM se skelným recyklátem.

6 Závěr

Diplomová práce byla zaměřena na studium vlastností polymery modifikovaných malt, které využívají skelný recyklát. PMM se skládá z písku, cementu, vody a polymerních látek. Tyto polymerní látky pomáhají zlepšit zpracovatelnost, nepropustnost, adhezi a mechanické vlastnosti. Ve stavebnictví jsou PMM používány k reprofilaci, lepení a omítání.

Jednou z nejdražších složek PMM je cement, který má skvělé mechanické vlastnosti. Ovšem při jeho výrobě dochází k velké spotřebě energie a vzniku agresivních plynů, které ohrožují životní prostředí. Při jeho výrobě se také spotřebovávají přírodní neobnovitelné suroviny.

Na druhé straně přibývá skládek s pevným recyklovatelným odpadem. Do druhotného recyklovatelného odpadu lze zařadit sklo, které se svým chemickým a mineralogickým složením přibližuje přírodním pucolánům. Využití tohoto odpadu může přispět ke snížení počtu nových i stávajících skládek a také přispěje k ochraně přírody. V České republice se ročně zrecykluje přibližně 75 % veškerého skelného odpadu.

Pro tuto práci byl zvolen skelný recyklát REFAGLASS, SIMAX a zářivkové sklo, který byl v maltách zastoupen z 10, 20 a 30 % jako náhrada za cement. Záměrem této diplomové práce bylo srovnání vlastností PMM a malt bez polymeru s různým procentuálním zastoupením skelných recyklátů a návrh použití těchto malt ve stavební praxi. Jedno z diskutovaných témat je alkalicko-křemičitá reakce, kdy při dlouhodobém působení alkálií (např. K_2O , Na_2O) na SiO_2 dochází k objemovým změnám a následně k horším pevnostem malt. Další diskutované téma je pucolánová reakce, která zlepšuje fyzikálně-mechanické vlastnosti na základě chemického složení a jemnosti mletí skelného recyklátu.

Z výsledků praktické části vyplývá, že přídavek skelného recyklátu může být vhodná částečná náhrada cementu. Při srovnání výsledků referenčních malt s maltami, kde byl použit skelný recyklát lze konstatovat, že se hodnoty příliš neliší a v některých případech (pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech, nasákavost) dokonce malty

se skelným recyklátem dosahují vyšších hodnot. Tyto malty by mohly být do budoucna využity ve stavebnictví např. jako reprofilační malty. Dalším důvodem je předpoklad využití skelného recyklovatelného odpadu, který může přispět ke snížení množství skládek a zlepšení životního prostředí. Ze získaných výsledků v praktické části pomocí metody kvantitativního párového srovnání dosáhly nejlepších výsledků polymery modifikované malty s 30 % skelného recyklátu SIMAX v laboratorním prostředí.

Závěrem této práce lze konstatovat, že se skelný recyklát jeví jako vhodná částečná náhrada za cement. Ovšem otázkou je, zda celková cena úpravy a mletí skelného recyklátu v konečném důsledku nepřevýší cenu cementu.

7 Zdroje

- [1] FOWLER, D. W., Polymers in concrete: a vision for the 21 st century. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 21, 1999, p. 449-452
- [2] AGGARWAL, L. K., Properties of polymer-modified mortars using epoxy and acrylic emulsion. *Construction and Building Materials*, Vol. 21, 2007, p. 379-383
- [3] MA. H Microstructures and mechanical properties of polymer modified mortars under distinct mechanisms. *Construction and Building Materials*, Vol 47, 2013, p. 579-587
- [4] OHAMA, Y., *Handbook of Polymer-modified Concrete and Mortars*, 1ed edition: Noyes Publications, New Jersey, USA 1995, ISBN 0-8155-1358-5
- [5] KONG, X., Polymer-modified mortar with a gradient polymer distribution: Preparation, permeability, and mechanical behaviour. *Construction and Building Materials*, Vol. 38, 2013, p. 195-203
- [6] *Historie polymerů*. [online]. [cit. 2016-06-18]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/p1/historie%20polymeru.pdf
- [7] *Polymery - úvod* [online]. [cit. 2016-06-18]. Dostupné z: <http://www.merna.eu/MMC/Polymery-uvod.pdf>
- [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] *Polymer-modified mortars*. [online]. [cit. 2016-06-18]. Dostupné z: http://www.concreteconstruction.net/how-to/polymer-modified-mortars_o
- [10] RAVVE, A. Principles of Polymer Chemistry. 3. vyd. New York: Springer Science+Business Media, 2012, ISBN 978-1-4614-2211-2

- [11] SILVA, D. A., Analysis of C₃A hydration using soft X-rays transmission microscopy: Effect of EVA copolymer. *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, 2005, p. 2026-2032
- [12] GEORGESCU, M., Thermoanalytical and infrared spectroscopy investigations of some mineral pastes containing organic polymers. *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, 2012, p. 1269-1275
- [13] SILVA, D. A., Evidences of chemical interaction between EVA and hydrating Portland cement. *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, 2002, p. 1382-1390
- [14] HLAVÁČ, J., *Základy technologie silikátů*, SNTL - ALFA, 2. vyd. Praha 1988
- [15] *Recyklace skla*. [online]. [cit. 2016-06-18]. Dostupné z: <http://www.assmann.cz/blog-recyklace-skla-detail-34>
- [16] JANI, Y., Waste glass in the production of cement and concrete – A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Vol. 2, 2014, p. 1767-1775
- [17] ADÁMEK, J., NOVOTNÝ, B., KOUKAL, J., *Stavební materiály*, CERM, s.r.o Brno, ISBN 80-214-0631-3
- [18] *Odpady*. [online]. [cit. 2016-06-18]. Dostupné z: [http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/techniky_u_stacionarnich_zdroju_vystup_projektu/\\$FILE/OOO-Odpady-20160222.pdf](http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/techniky_u_stacionarnich_zdroju_vystup_projektu/$FILE/OOO-Odpady-20160222.pdf)
- [19] *O skle*. [online]. [cit. 2016-06-18]. Dostupné z: <http://www.askpcr.cz/o-skle/>
- [20] *Materiály technologie skla a Technická dokumentace materiálů*. [online]. [cit. 2016-06-18]. Dostupné z: <http://ads.fmk.utb.cz/Contexts/atelier/Documents/Materi%C3%A1ly%20technologie%20oskla%20a%20technick%C3%A1%20dokumentace%20materi%C3%A1l%C5%AF.pdf>
- [21] MATOUŠEK, J., *Anorganické nekovové materiály*, 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1992, 160 s. ISBN 80-7080-160-3
- [22] *Sklářský a keramický průmysl*. [online]. [cit. 2016-06-18]. Dostupné z: <http://www.rokprumyslu.eu/prumysl/odvetvi/sklarsky-a-keramicky-prumysl/>

- [23] *Recyklace skla*. [online]. [cit. 2016-06-18]. Dostupné z: <http://www.envy-recycling.cz/recyklace-skla>
- [24] *Recyklace*. [online]. [cit. 2016-06-18]. Dostupné z: <http://www.aquatest.cz/vyzkum/recyklace/>
- [25] GRODA, B., *Technika pro zpracování odpadů II*, 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, © 1997. 168 s. ISBN 80-7157-264-0
- [26] *Obalové odpady: Od zálohy k zálohám*. [online]. [cit. 2016-06-18]. Dostupné z: <http://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/obalove-odpady-od-zaloh-k-zaloham-13>
- [27] *Historie a současnost - sklo*. [online]. [cit. 2016-06-18]. Dostupné z: http://www.jihlava.cz/vismo/dokumenty2.asp?id_org=5967&id=365221&p1=50371Jar mila
- [28] *Recyklace a využití skla*. [online]. [cit. 2016-06-18]. Dostupné z: <http://www.jaktridit.cz/cz/co-se-deje-s-odpadem/recyklace-a-vyuziti-skla>
- [29] *Recyklace skla*. [online]. [cit. 2016-06-18]. Dostupné z: http://www.vetropack.cz/htm/life_cycle_of_glass_5.htm
- [30] *Recyklace*. [online]. [cit. 2016-06-18]. Dostupné z: <http://www.ekovuk.cz/>
- [31] *Recyklace skla a její využití*. [online]. [cit. 2016-06-18]. Dostupné z: http://www.splrecycling.com/recyklace_skla_a_jeji_vyznam.html
- [32] *Jak se recykluje sklo*. [online]. [cit. 2016-06-18]. Dostupné z: <http://www.trideniodpadu.cz/jak-se-recykluje-sklo>
- [33] *Pěnové sklo - tepelná izolace budoucnosti*. [online]. [cit. 2016-06-18]. Dostupné z: http://www.casopisstavebnictvi.cz/penove-sklo-tepelna-izolace-budoucnosti_N4188
- [34] *Využití pěnového skla v provizorních střechách*. [online]. [cit. 2016-06-18]. Dostupné z: <http://www.izolace.cz/clanky/detail/981-vyuziti-penoveho-skla-v-provoznich-strechach>

- [35] *Pěnové sklo - tepelná izolace pro náročné provozní střechy*. [online]. [cit. 2016-06-18]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyrobky/tepelne-izolace/penove-sklo-tepelna-izolace-pronarocne-provozni-strechy>
- [36] *Pěnové sklo Refaglas - materiál vhodný pro všechny stavby*. [online]. [cit. 2016-06-18]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyrobky/penove-sklo-refaglas-material-vhodny-pro-vsechny-stavby>
- [37] PARGHI, A., Physical and mechanical properties of cementitious composites containing recycled glass powder (RGP) and styrene butadiene rubber (SBR). *Construction and Building Materials*, Vol. 104, 2016, p. 34-43
- [38] SHAYAN, A., Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, 2006, p. 457-468
- [39] NASSAR, R., Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement. *Construction and Building Materials*, Vol. 29, 2012, p. 368-377
- [40] VIJAYAKUMAR, G., Studies on Glass Powder as Partial Replacement of Cement in Concrete Production,. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 3, 2013, p. 153-157
- [41] ROVNANÍKOVÁ, P., ROVNANÍK, P., *Stavební Chemie*, Modul 2, Studijní opory VUT, 2004
- [42] ROVNANÍKOVÁ, P. Omítky: chemické a technologické vlastnosti. Vyd. 1. Praha: Společnost pro technologie ochrany památek - Stop, 2002, 89 s. ISBN 80-86657-00-0
- [43] MATULOVÁ, P., *Substituce pojiva v cementových kompozitech jemně mletou recyklovanou sklovinou s ohledem na životní prostředí*, BETON TKS 3/2009, 76 s
- [44] BREITENBÜCHER, R., *Alkalicko-křemičitá reakce - důsledky pro cementobetonové kryty*, Strasse + Autobahn, č. 4/2006, str. 205 – 209
- [45] SHAO, Y., Studies on concrete containing ground waste glass. *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, 2000, p. 91-100

- [46] ZHENG, K., Pozzolanic reaction of glass powder and its role in controlling alkaliesilica reaction. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 67, 2016, p. 30-38
- [47] KAMALI, M., An investigation into the hydration and microstructure of cement pastes modified with glass powders. *Construction and Building Materials*, Vol. 112, 2016, p. 915-924
- [48] SCHWARZ, N., Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration. *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, 2008, p. 429-436
- [49] COTA, F. P., Mechanical properties and ASR evaluation of concrete tiles with waste glass aggregate. *Sustainable Cities and Society*, Vol. 16, 2015, p. 49-56

8 Seznam zkratek a symbolů

PMM – polymerem modifikovaná malta

PM – polymerová malta

AKR – alkalicko-křemičitá reakce

TG – termogravimetrická analýza

DTA – diferenční termická analýza

RTG – rentgenová difrakční analýza

REM – elektronová rastrovací mikroskopie

ČM – čerstvá malta

EVA – etylen-vinyl acetát

VA – vinylacetát

C₃A – trikalcium aluminát

SiO₂ – oxid křemičitý

Ca(OH)₂ – hydroxid vápenatý

CaO – oxid vápenatý

Fe₂O₃ – oxid železitý

CaCO₃ – uhličitan vápenatý

Na₂CO₃ – uhličitan sodný

K₂CO₃ – uhličitan draselný

B₂O₃ – oxid boritý

Na₂O – oxid sodný

K₂O – oxid draselný

Al₂O₃ – oxid hlinitý

PbO – oxid olovnatý

NaOH – hydroxid sodný

Na₂SiO₃ – křemičitan sodný

C₄AH₁₃ – hexagonální hlinitany

CO₂ – oxid uhličitý

H₂O – voda

C₃S – alit

β-C₂S – belit

HF – fluorovodík

KOH – hydroxid draselný

HCl – kyselina chlorovodíková

9 Seznam obrázků

Obr. 1: 1. stupeň – smíchání kameniva, cementu a polymeru s vodou [8].....	15
Obr. 2: 2. stupeň - reakce polymeru s cementovými zrny a vznik polymerního filmu [8]	16
Obr. 3: 3. stupeň – tvorba souvislého polymerního filmu [8].....	16
Obr. 4: 4. stupeň – dokončení polymerního filmu a hydratace cementu [8]	17
Obr. 5: Polymerní film v cementové pastě s kopolymerem EVA [13].....	18
Obr. 6: Grafické znázornění sklářského průmyslu v České republice [19].....	24
Obr. 7: Schéma recyklace obalového skla	26
Obr. 8: Hydratace malt s různým procentuálním zastoupením skelného prášku [48]....	33
Obr. 9: RTG analýza malt se skelným recyklátem v průběhu hydratace [46].....	33
Obr. 10: Zastoupení hydratačních produktů v čase [46].....	34
Obr. 11: Mikrostruktura malt se skelným recyklátem [46]	35
Obr. 12: Rozložení prvků Ca, Si a Na v řezu částečně zreagovaného skelného zrna [46]	35
Obr. 13: Postup ETAPY I	37
Obr. 14: Postup ETAPY II	38
Obr. 15: Postup ETAPY III	39
Obr. 16: Postup Etapy IV.....	40
Obr. 17: Křivka zrnitosti REFAGLASS	48
Obr. 18: Křivka zrnitosti zářivkového skla	49
Obr. 19: Křivka zrnitosti SIMAX	50
Obr. 20: Pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech	53
Obr. 21: Pevnosti v tahu za ohybu po 90 dnech	54
Obr. 22: Pevnosti v tahu za ohybu po 180 dnech	55
Obr. 23: Pevnosti v tlaku po 28 dnech	56
Obr. 24: Pevnosti v tlaku po 90 dnech	57
Obr. 25: Pevnosti v tlaku po 180 dnech	58
Obr. 26: Přídržnosti po 28 dnech	59
Obr. 27: Přídržnosti po 180 dnech	60
Obr. 28: Stanovení nasákavosti po 30 minutách	62

Obr. 29: Stanovení nasákavosti po 240 minutách	62
Obr. 30: Stanovení mrazuvzdorností	63
Obr. 31: Stanovení pevností v tahu za ohybu po působení 25 zmrazovacích cyklů	64
Obr. 32: Stanovení pevností v tahu za ohybu po 14 dnech působení tepla (70 °C)	65
Obr. 33: Stanovení pevností v tahu za ohybu ve vodním prostředí	66
Obr. 34: Pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech se skelným recyklátem REFAGLASS v různém prostředí	67
Obr. 35: Pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech se zářivkovým sklem v různém prostředí	67
Obr. 36: Pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech se skelným recyklátem SIMAX v různém prostředí	68
Obr. 37: Stanovení pevností v tlaku po působení 25 zmrazovacích cyklů	69
Obr. 38: Stanovení pevností v tlaku po 14 dnech působení tepla (70 °C)	70
Obr. 39: Stanovení pevností v tlaku ve vodním prostředí	71
Obr. 40: Pevnosti v tlaku po 28 dnech se skelným recyklátem REFAGLASS v různém prostředí	71
Obr. 41: Pevnosti v tlaku po 28 dnech se zářivkovým sklem v různém prostředí	72
Obr. 42: Obr. 42: Pevnosti v tlaku po 28 dnech se skelným recyklátem SIMAX v různém prostředí	72
Obr. 43: DTA analýza referenčního vzorku s kopolymerem EVA po 90 dnech uložení v laboratorním prostředí	74
Obr. 44: DTA analýza vzorku s 30 % recyklátu SIMAX s kopolymerem EVA po 90 dnech uložení v laboratorním prostředí	74
Obr. 45: RTG analýza referenčního vzorku s kopolymerem EVA po 90 dnech uložení v laboratorním prostředí	76
Obr. 46: RTG analýza vzorku s 30 % recyklátu SIMAX a s kopolymerem EVA po 90 dnech uložení v laboratorním prostředí	76
Obr. 47: REM záznam referenčního vzorku s kopolymerem EVA A) krystaly portlanditu při zvětšení 1 000×	77
Obr. 48: REM záznam vzorku s 30 % recyklátu SIMAX a s kopolymerem EVA A) C-S-H produkty s krystaly ettringitu a polymerním filmem při zvětšení 10 000×, B) krystaly ettringitu při zvětšení 10 000×	77

Obr. 49: Obr. 49: REM záznam vzorku s 30 % recyklátu SIMAX a s kopolymerem EVA A) zrno skla obaleno C-S-H produkty při zvětšení 10 000×, B) prorůstání C-S-H produktů skelným zrnem při zvětšení 10 000×	78
Obr. 50: Komulativní objem pórů referenčních malt	72
Obr. 51: Komulativní objem pórů malt se skelným recyklátem SIMAX	72
Obr. 52: Objem pórů referenčních malt	72
Obr. 53: Objem pórů malt se skelným recyklátem SIMAX	72

10 Seznam tabulek

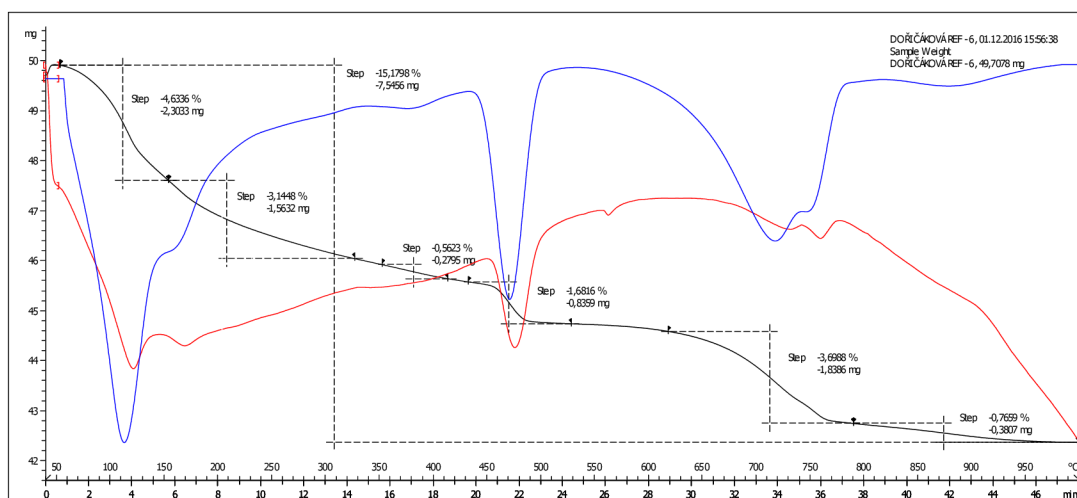
Tab. 1: Modul pružnosti a Poissnovo číslo u vybraných skel [21]	22
Tab. 2: Množství odpadního skla a procento recyklace v různých zemích za různé časové období [16]	26
Tab. 3: Receptura s různým procentuálním zastoupením skelného recyklátu	38
Tab. 4: Vlastnosti cementu dle technického listu výrobce	46
Tab. 5: Chemické složení cementu dle technického listu výrobce	46
Tab. 6: Vlastnosti kopolymeru EVA dle technického listu	47
Tab. 7: Chemické složení REFAGLASS	47
Tab. 8: Vlastnosti REFAGLASS	47
Tab. 9: Chemické složení zářivkového skla	48
Tab. 10: Vlastnosti zářivkového skla	48
Tab. 11: Chemické složení SIMAX	49
Tab. 12: Vlastnosti SIMAX	49
Tab. 13: Konzistence čerstvé malty	51
Tab. 14: Objemová hmotnost po 28 dnech	51
Tab. 15: Objemová hmotnost po 90 dnech	52
Tab. 16: Objemová hmotnost po 180 dnech	52
Tab. 17: Pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech	53
Tab. 18: Pevnosti v tahu za ohybu po 90 dnech	54
Tab. 19: Pevnosti v tahu za ohybu po 180 dnech	55
Tab. 20: Pevnosti v tlaku po 28 dnech	56

Tab. 21: Pevnosti v tlaku po 90 dnech	57
Tab. 22: Pevnosti v tlaku po 180 dnech	58
Tab. 23: Přídržnosti po 28 dnech	59
Tab. 24: Přídržnosti po 180 dnech	60
Tab. 25: Stanovení nasákavosti po 30 a 240 minutách	61
Tab. 26: Koeficienty mrazuvzdornosti KM_f	63
Tab. 27: Stanovení pevností v tahu za ohybu po působení 25 zmrazovacích cyklů.....	64
Tab. 28: Stanovení pevností v tahu za ohybu po 14 dnech působení tepla (70 °C)	65
Tab. 29: Stanovení pevností v tahu za ohybu ve vodním prostředí	66
Tab. 30: Stanovení pevností v tlaku po působení 25 zmrazovacích cyklů	68
Tab. 31: Stanovení pevností v tlaku po 14 dnech působení tepla (70 °C)	69
Tab. 32: Stanovení pevností v tlaku ve vodním prostředí	70
Tab. 33: Hmotnostní úbytky z termogramů	75
Tab. 34: Výsledky vysokotlaké rtuťové porozimetrie	78

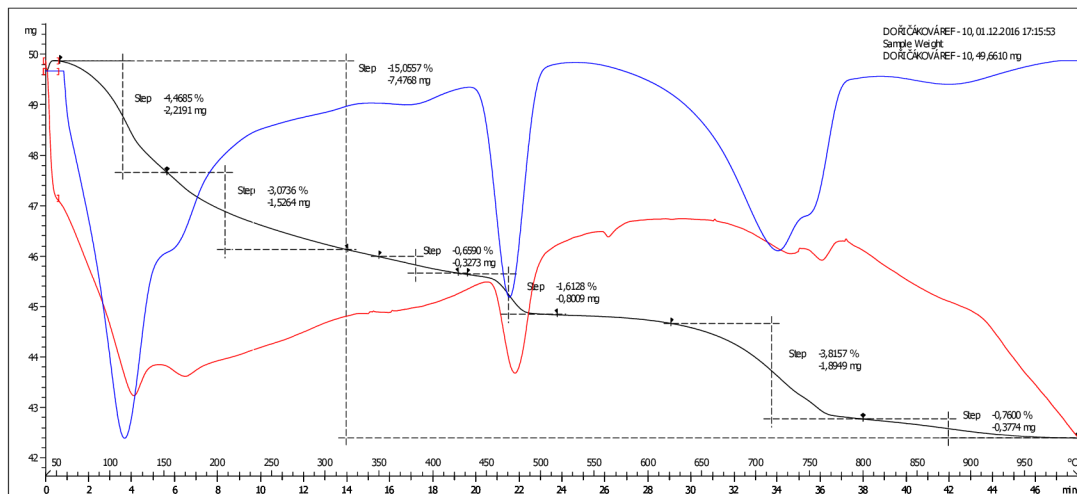
11 Přílohy

Příloha 1 – DTA analýzy vzorků uložených ve vybraném prostředí

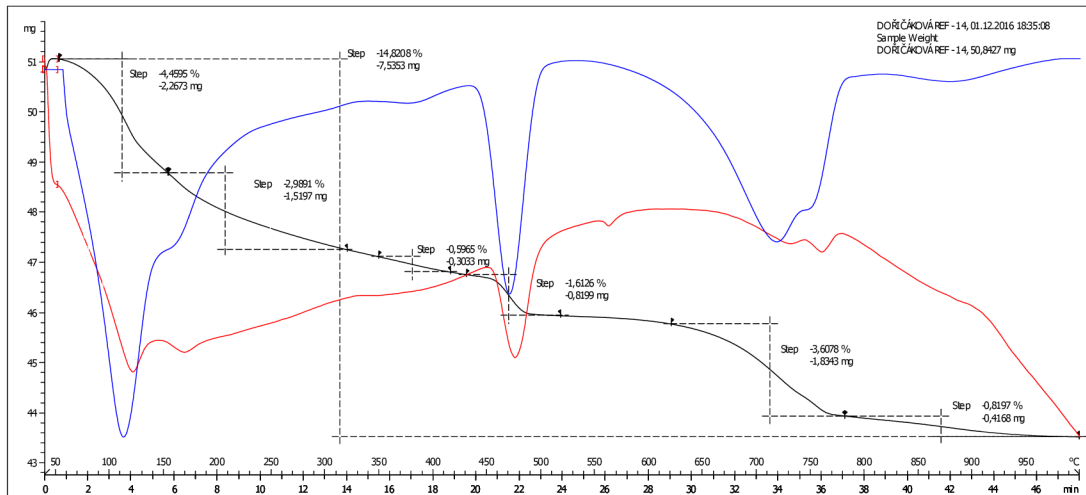
Referenční vzorek s kopolymerem EVA po působení 25 zmrazovacích cyklů



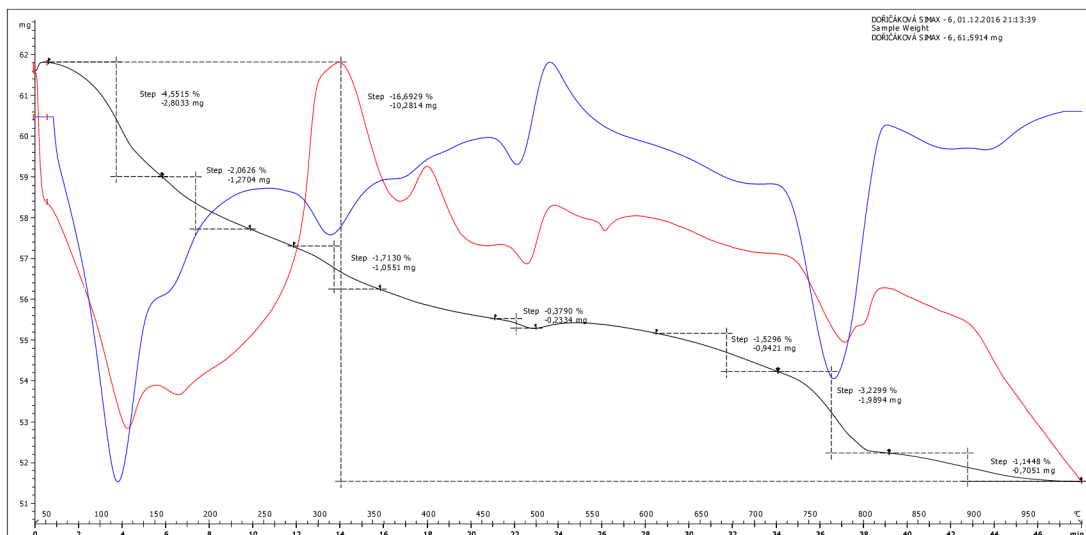
Referenční vzorek s kopolymerem EVA po 14 dnech působení tepla (70 °C)



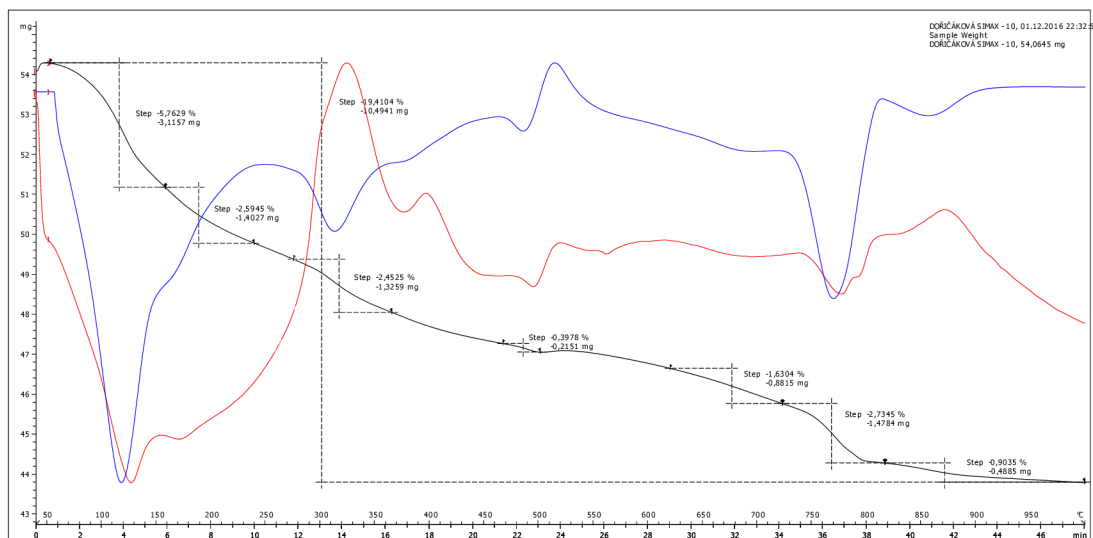
Referenční vzorek s kopolymerem EVA ve vodním prostředí



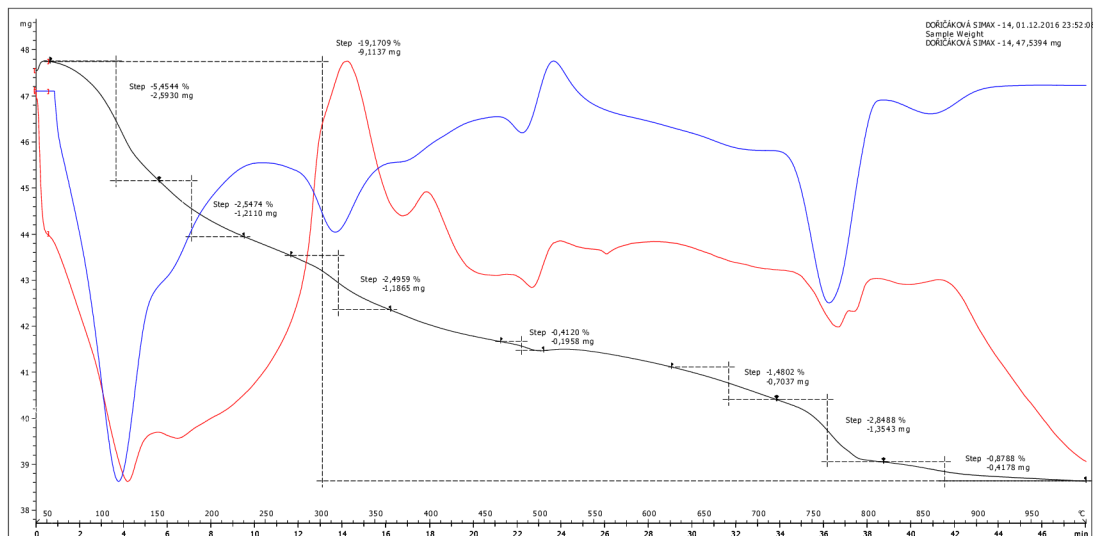
Vzorek s 30 % recyklátu SIMAX s kopolymerem EVA po působení 25 zmrazovacích cyklů



Vzorek s 30 % recyklátu SIMAX s kopolymerem EVA po 14 dnech působení tepla (70 °C)

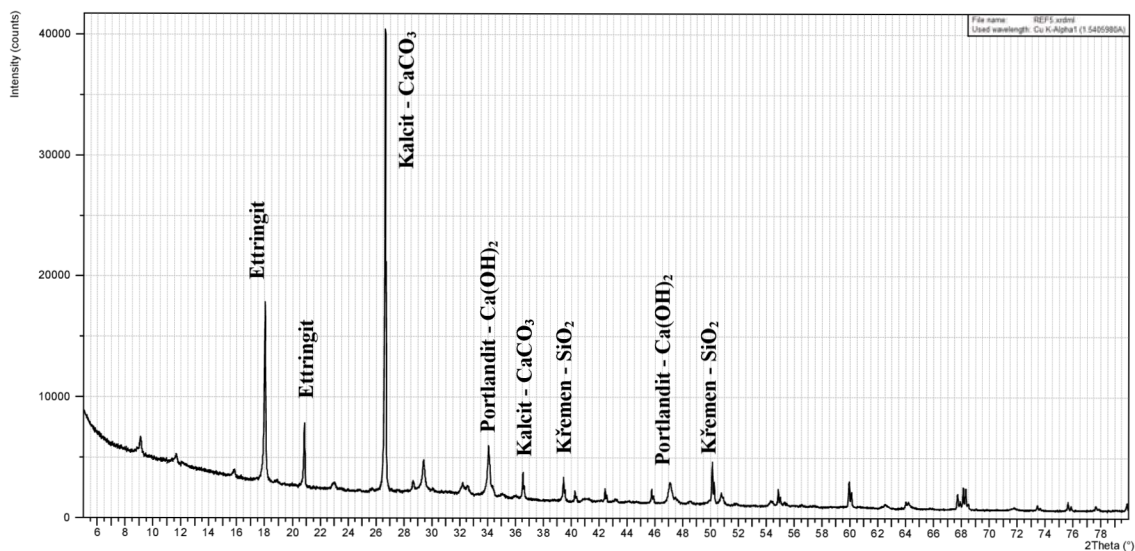


Vzorek s 30 % recyklátu SIMAX s kopolymerem EVA ve vodním prostředí

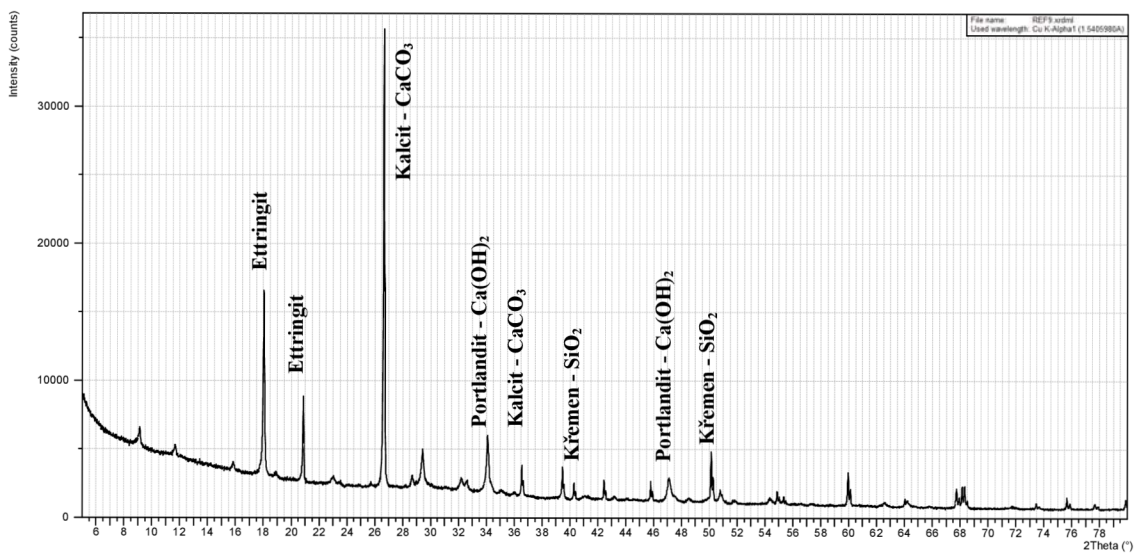


Příloha 2 – RTG analýzy vzorků uložených ve vybraném prostředí

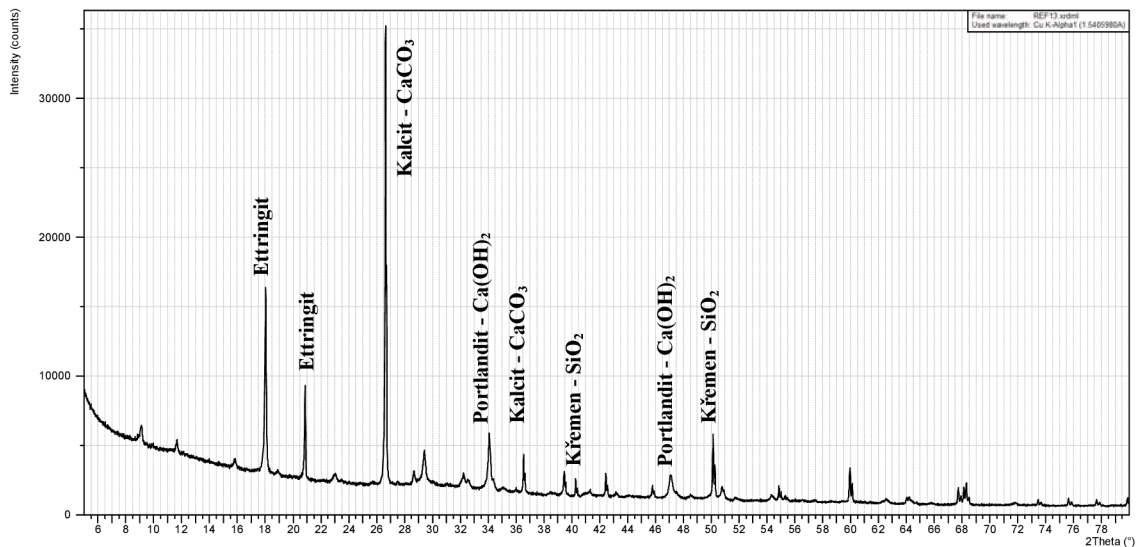
Referenční vzorek s kopolymerem EVA po působení 25 zmrazovacích cyklů



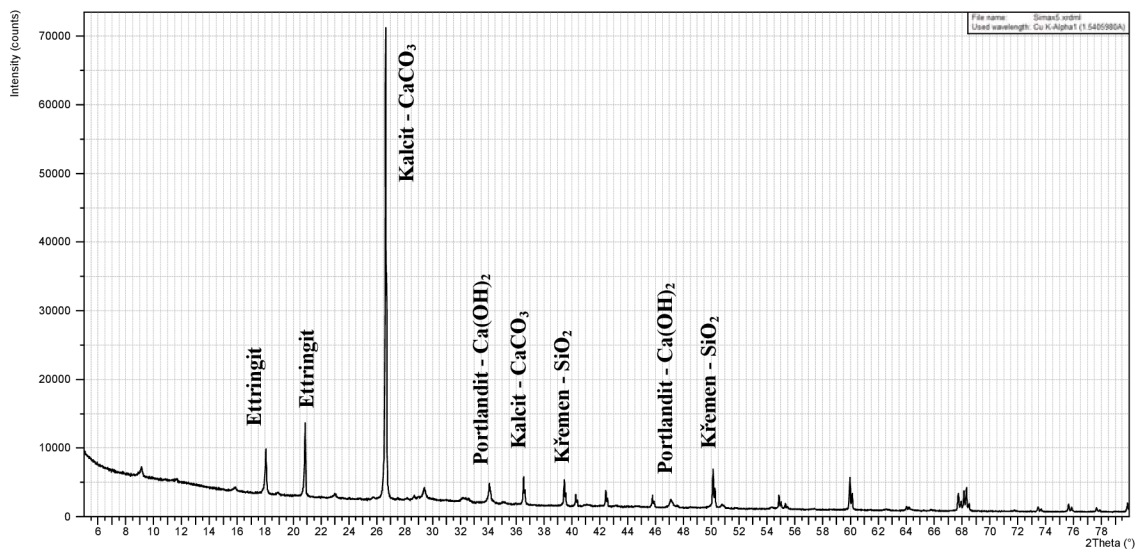
Referenční vzorek s kopolymerem EVA po 14 dnech působení tepla (70 °C)



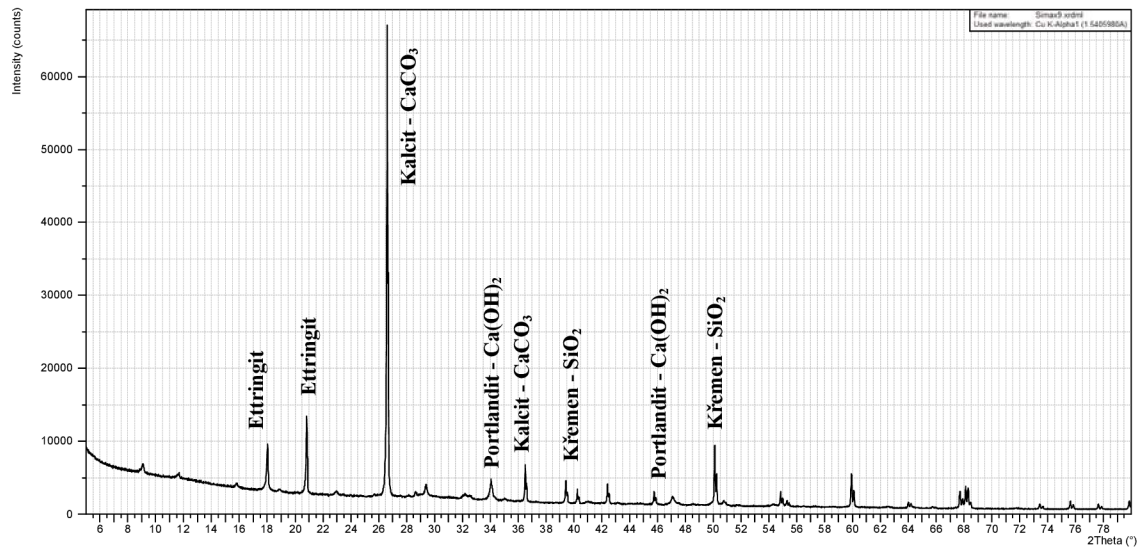
Referenční vzorek s kopolymerem EVA ve vodním prostředí



Vzorek s 30 % recyklátu SIMAX s kopolymerem EVA po působení 25 zmrazovacích cyklů



Vzorek s 30 % recyklátu SIMAX s kopolymerem EVA po 14 dnech působení tepla (70 °C)



Vzorek s 30 % recyklátu SIMAX s kopolymerem EVA ve vodním prostředí

