



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

**SPECIFICKÝ CEMENTOVÝ KOMPOZIT NA BÁZI
DRUHOTNÝCH SUROVIN S DŮRAZEM
NA TRVANLIVOST**

SPECIFIC CEMENT COMPOSITE BASED ON SECONDARY RAW MATERIALS WITH
EMPHASIS ON DURABILITY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Figala

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. ROSTISLAV DROCHYTKA, CSc.,
MBA

BRNO 2018



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. Petr Figala |
| Název | Specifický cementový kompozit na bázi druhotných surovin s důrazem na trvanlivost |
| Vedoucí práce | prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA |
| Datum zadání | 31. 3. 2017 |
| Datum odevzdání | 12. 1. 2018 |

V Brně dne 31. 3. 2017

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

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

PODKLADY A LITERATURA

ČSN EN 13813 Potěrové materiály a podlahové potěry – Potěrové materiály – Vlastnosti a požadavky
ČSN EN 13892-1 Metody zkoušení potěrových materiálů – Část 1: Odběr, úprava a ošetřování vzorků
ČSN 72 2071 Popílek pro stavební účely – Společná ustanovení, požadavky
a metody zkoušení

T. Bilir, O. Gencil, I. B. Topcu; " Properties of mortars with fly ash as fine aggregate", Materials Journal, Volume 93, September 2015, Pages 782–789

Výzkumné zprávy a protokoly ústavu THD, příspěvky ze sborníků konferencí, odborné články, časopisy, normy.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Cílem diplomové práce je vývoj vysokopevnostního kompozitu na cementové bázi se zaměřením na maximální využití optimalizovaných druhotných surovin při zachování nebo zvýšení jeho užitných vlastností. Důraz je kladen zejména na posouzení vlivu úpravy granulometrie a dávky druhotných surovin na strukturu a výsledné vlastnosti potěru.

1. Teoretická část bude věnována současnému stavu problematiky průmyslových podlah a vysokopevnostních cementových kompozitů v ČR i ve světě, především z pohledu možnosti substituce cementu druhotnými surovinami.
2. Na základě dostupné literatury bude popsána problematika alkalicko-křemičité reakce v cementových kompozitech z pohledu normativních požadavků, její identifikace a možnosti eliminace.
3. V další fázi budou navrženy receptury cementového kompozitu s částečnou substitucí cementu druhotnými surovinami při optimalizaci jejich granulometrie. Primární ověření proběhne na normových recepturách dle ČSN EN 13892-2.
4. Současně bude ověřena možnost náhrady cementu vybranými optimalizovanými surovinami v komerčně dostupném výrobku (suchá směs podlahového vysokopevnostního potěru).
5. Vyhodnotte dosažené výsledky z technického i ekonomického hlediska a navrhnete optimální receptury s vysokým podílem druhotných surovin jak pro variantu normových směsí, tak pro variantu komerčního potěru.

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).

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Využití druhotných surovin jako součásti stavebních materiálů je v dnešní době v ČR i ve světě věnována velká pozornost. Tato práce se zabývá možnostmi využití druhotných surovin jako částečné náhrady cementu v průmyslových podlahách. Cílem práce je ověření vlivu míry substituce cementu druhotnými surovinami a jejich jemnosti mletí na vlastnosti podlahového potěru v čase a na jeho strukturu. Na základě získaných poznatků byl posouzen vliv předúpravy na vlastnosti podlahového potěru s důrazem na ekonomické hledisko. Po vyhodnocení stanovených výsledků je možné říct, že určitá substituce cementu v podlahovém potěru druhotnými surovinami je přínosná. Významný vliv intenzivnějšího mletí na parametry potěru se nepotvrdil. Z toho vyplývá, že je možné dosáhnout velmi dobrých výsledků i při použití druhotných surovin s nižším podílem jemných částic. S tím je spojen ekonomický přínos, kdy snížíme náklady nižší dávkou drahého cementu využitím levnějších druhotných surovin, na jejichž předúpravu není nutné vynakládat velké množství energie.

KLÍČOVÁ SLOVA

Podlahový potěr, průmyslová podlaha, malta, druhotná surovina, cement, substituce, vysokoteplotní popílek, škvára, obalové sklo, mikrostruktura, trvanlivost

ABSTRACT

Nowadays the attention to the utilization of secondary raw materials as a component of building materials is being paid to in the Czech Republic and in the world. This thesis deals with possibilities of using secondary raw materials as partial cement substitutes in industrial floors. The aim of this thesis is to verify the influence of cement substitution amount with secondary raw materials and their fineness of grinding on the properties of the floor surface in time and on its structure. On the basis of the acquired knowledge, the influence of the pre-treatment of the secondary raw material on the properties of the floor ceiling with an emphasis on the economic aspect was assessed. After evaluating the results, some substitution of cement in the floor screed with secondary raw materials is beneficial. The significant influence of more intensive milling of the floor screeds base on the parameters of the final floor screed was not confirmed. It seems, that it is possible to achieve very good results even when using secondary raw materials with a lower percentage of fine particles. This brings together the economic benefits of lowering the cost of a lower dose of expensive cement by using cheaper secondary raw materials, because pre-treatment of such materials does not require the use of a large amount of energy.

KEYWORDS

floor screed, industrial floor, mortar, secondary raw material, cement, substitution, fly ash, cinder, ground glass, durability, microstructure

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Petr Figala *Specifický cementový kompozit na bázi druhotných surovin s důrazem na trvanlivost*. Brno, 2017. 108 s., 0 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců.
Vedoucí práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA

PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 12. 1. 2018

Bc. Petr Figala
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval prof. Ing. Rostislavu Drochytovi, CSc., MBA, jako vedoucímu mé diplomové práce, za jeho cenné rady a odborné vedení. Zároveň chci poděkovat Ing. Vítu Černému, Ph.D. a Ing. Michaele Dvořákové a za jejich cenné připomínky, rady a čas strávený při konzultování této práce i během celého výzkumu. V neposlední řadě děkuji také Ing. Lence Mészárosové Ph.D, Ing. Šárce Keprdové Ph.D a paní Blance Bártové za jejich ochotu a čas se mnou strávený ve výzkumném centru AdMaS i na fakultě.

Diplomová práce byla vytvořena s využitím infrastruktury Centra AdMaS při řešení projektu TA04010143 „Výzkum a vývoj nového systému podlah na silikátové bázi pro extrémní mechanické a chemické zatížení“, podporovaného Technologickou agenturou České republiky.

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| I. ÚVOD | 11 |
| II. TEORETICKÁ ČÁST | 12 |
| 1. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY | 12 |
| 1.1 BETON..... | 12 |
| 1.2 VYSOKOPEVNOSTNÍ BETON..... | 12 |
| 1.3 PODLAHY..... | 13 |
| 1.3.1 Všeobecné požadavky..... | 13 |
| 1.3.2 Průmyslové podlahy..... | 13 |
| 1.3.3 Vysokopevnostní (pancéřové) podlahy..... | 14 |
| 1.3.4 Potěry..... | 14 |
| 2. SUROVINY PRO VÝROBU BETONOVÉ PODLAHY | 15 |
| 2.1 CEMENT..... | 15 |
| 2.1.1 Portlandský cement..... | 15 |
| 2.1.2 Hlinitanový cement..... | 17 |
| 2.2 PŘÍMĚSI DO BETONU..... | 18 |
| 2.2.1 Latentní hydraulická..... | 19 |
| 2.2.2 Pucolanita..... | 19 |
| 2.2.3 Druhotné suroviny..... | 20 |
| 2.2.4 Vysokoteplotní popílek..... | 20 |
| 2.2.5 Škvára..... | 25 |
| 2.2.6 Skelný recyklát..... | 25 |
| 3. TRVANLIVOST | 26 |
| 3.1 TRHLINY OD OBJEMOVÝCH ZMĚN..... | 26 |
| 3.1.1 Sedání a sedimentace..... | 27 |
| 3.1.2 Smrštění a expanze..... | 27 |
| 3.1.3 Redukce objemových změn..... | 28 |
| 3.2 POŽADAVKY NA KAMENIVO..... | 29 |
| 3.3 ALKALICKO-KŘEMIČITÁ REAKCE (AKR)..... | 29 |
| 3.3.1 Rizika vzniku AKR..... | 30 |
| 3.3.2 Identifikace AKR..... | 31 |
| 3.3.3 Eliminace AKR..... | 32 |
| III. CÍL PRÁCE | 33 |
| IV. METODIKA PRÁCE | 34 |
| V. METODIKA ZKOUŠENÍ | 40 |
| VI. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST | 44 |
| 4. ETAPA 1 – CHARAKTERIZACE A PŘEDÚPRAVA VSTUPNÍCH SUROVIN | 44 |
| 4.1 VSTUPNÍ SUROVINY..... | 44 |
| 4.1.1 Primární suroviny ČSN EN 196-1..... | 44 |
| 4.1.2 Podlahový potěr..... | 44 |
| 4.1.3 Druhotné suroviny..... | 45 |
| 4.2 PODKLADY PRO NÁVRH ZKUŠEBNÍCH RECEPTUR..... | 53 |

| | |
|---|------------|
| 5. ETAPA 2 - SUBSTITUCE CEMENTU DRUHOTNÝMI SUROVINAMI V NORMOVÉ MALTĚ | 54 |
| 5.1 ZKUŠEBNÍ RECEPTURY | 54 |
| 5.1.1 Označení receptur | 55 |
| 5.2 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ | 55 |
| 5.2.1 Vliv jemnosti mletí přísad na zpracovatelnost | 55 |
| 5.2.2 Vliv jemnosti mletí přísad na počátek tuhnutí a tvrdnutí | 57 |
| 5.2.3 Vliv jemnosti mletí přísad na objemovou hmotnost | 58 |
| 5.2.4 Vliv jemnosti mletí přísad na pevnost v tlaku | 60 |
| 5.2.5 Vliv jemnosti mletí přísad na pevnost v tahu za ohybu | 65 |
| 5.3 SHRNUÍ | 68 |
| 6. ETAPA 3 - PŘÍMĚS DRUHOTNÝCH SUROVIN V NORMOVÉ MALTĚ | 71 |
| 6.1 ZKUŠEBNÍ RECEPTURY | 71 |
| 6.1.1 Označení receptur | 72 |
| 6.2 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ETAPY 3 | 72 |
| 6.2.1 Vliv přídatku jemně mletých přísad na zpracovatelnost | 72 |
| 6.2.2 Vliv jemnosti mletí přísad na objemovou hmotnost | 74 |
| 6.2.3 Vliv přídatku jemně mletých přísad na pevnost v tlaku | 75 |
| 6.2.4 Vliv přídatku jemně mletých přísad na pevnost v tahu za ohybu | 77 |
| 6.3 SHRNUÍ ETAPY 3 | 78 |
| 7. ETAPA 4 - SUBSTITUCE CEMENTU DRUHOTNÝMI SUROVINAMI V PODLAHOVÉM POTĚRU | 80 |
| 7.1 ZKUŠEBNÍ RECEPTURY | 80 |
| 7.1.1 Označení receptur | 81 |
| 7.2 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ | 81 |
| 7.2.1 Volba optimálního vodního součinitele a vliv jemnosti mletí přísad na zpracovatelnost | 81 |
| 7.2.2 Vliv jemnosti mletí přísad na objemovou hmotnost | 84 |
| 7.2.3 Vliv jemnosti mletí přísad na pevnost v tlaku | 86 |
| 7.2.4 Vliv jemnosti mletí přísad na pevnost v tahu za ohybu | 89 |
| 7.3 SHRNUÍ ETAPY 4 | 91 |
| 7.4 VÝBĚR VHODNÝCH RECEPTUR PRO STUDIUM MIKROSTRUKTURY | 93 |
| 8. ETAPA 5 – STUDIUM MIKROSTRUKTURY A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ | 94 |
| 8.1 MIKROSTRUKTURA PODLAHOVÉHO POTĚRU | 94 |
| 8.2 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE | 97 |
| VILZÁVĚR | 100 |
| SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 102 |
| SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ | 106 |
| SEZNAM POUŽITÝCH GRAFŮ | 106 |
| SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK | 107 |
| SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK | 108 |

I. ÚVOD

V současné době jsou na trhu nejrozšířenější stavební materiály na bázi cementového pojiva. To je zapříčiněno širokým spektrem uplatnění v různých podmínkách a zároveň poměrně nízkou cenou ve srovnání s jinými stavebními materiály. Kladen je také stále větší důraz na snížení ekologické stopy člověka na zemi a výroba cementu představuje v tomto ohledu značnou zátěž. Logickým východiskem je snaha o nalezení alternativy za cementové pojivo, bez snížení kvality výsledného kompozitu.

Po stránce ekonomické, a hlavně ekologické se nabízí využití nejrůznějších alternativních surovin. Tento trend se v posledních letech projevuje v mnoha průmyslových odvětvích a stavebnictví není výjimkou. Snahou producentů odpadů je znovu využít tyto materiály jako druhotné suroviny, čímž sníží náklady na jejich skladování a likvidaci. Spotřebitelé naopak hledají levnější alternativy za přírodní materiály.

Tato práce navazuje na bakalářskou práci na téma „Studium možnosti zvýšení odolnosti průmyslových podlah s využitím druhotných surovin“ [1].

II. TEORETICKÁ ČÁST

1. Kompozitní materiály

Jako kompozit můžeme nazvat jakýkoliv materiál složený ze dvou nebo více fází, které zaručí výslednému produktu nové vlastnosti, kterých ani jedna ze složek sama nedosahuje. Kromě přírodních kompozitních materiálů jako je například dřevo si člověk pro své potřeby od nepaměti vyráběl kompozity ve snaze dosáhnout lepších vlastností. Příkladem nestarších stavebních materiálů jsou hliněné stavby, kdy jejich stavitelé mísili hlínu a jíly se slámou a vznikaly tak první stavby z kompozitních materiálů. Ve Starém Egyptě byly identifikovány sloupy z umělého kamene staré až 5,5 tisíce let. Marcus Vitruvius Pollio ve své knize Deset knih o architektuře zmiňuje použití prvních latentně hydraulických látek získaných smícháním sopečného tufu a vápna.

Je tedy zjevné, že kompozitní materiály mají v historii lidstva dlouhou tradici a jedním z nejdůležitějších kompozitů ve stavebnictví je beton. Obvykle je pod pojmem beton chápán stavební materiál složený z anorganického kameniva a hydratovaného cementu.

1.1 Beton

Beton je jedním z nejčastěji využívaných stavebních materiálů na celé zemi. Trvanlivost, odolnost proti ohni a možnost různorodého tvarování činí tento materiál široce flexibilním pro různorodé možnosti aplikací. Betonářská výroba vyžaduje obrovské množství ekologických zdrojů, jako je písek, kámen a voda. Další podstatnou složkou výroby betonu je cement, který reaguje s vodou a s agregáty vytváří pevnou homogenní hmotu.

1.2 Vysokopevnostní beton

Tímto pojmem jsou označována tzv. HSC (High Strength Concrete) betony. Jedná se o betony pevnostní třídy 65 MPa a vyšší, dosahující pevností v tlaku po 28 dnech 80 až 120 MPa. Tyto betony se vyznačují zvýšenou hutností a s tím spojenou přirozeně zvýšenou odolností v mírně kyselém prostředí a odolností proti mrazu. Pro dosažení těchto vlastností je receptura HSC odlišná od klasických betonů. Hodnota vodního součinitele $w = 0,40$ se jeví jako mezní hodnotou mezi běžným a vysokopevnostním betonem. Obvykle se pohybuje v rozmezí $w = 0,20-0,35$, čehož je dosaženo použitím účinných superplastifikátorů. Zároveň mají zvýšený obsah jemných podílů s velikostí částic $0,1-0,2 \mu\text{m}$. [2], [3]

1.3 Podlahy

Podlahy jako nášlapné vrstvy i celý konstrukční systém, vlastnosti a požadavky na ně kladené předepisuje norma ČSN EN 7445 05 Podlahy – Společná ustanovení. Tato norma podlahu definuje jako sestavu podlahových vrstev či souvrství, uložených na nosném podkladu (například stropu, upraveném podloží, nebo jiné nosné konstrukci). Součástí podlahové konstrukce jsou zároveň všechny zabudované podlahové prvky, dilatační i pracovní spáry, řešení styků a přechodů na svislé konstrukce nebo průniky ostatních konstrukcí podlahou. [4]

1.3.1 Všeobecné požadavky

Technická norma ČSN EN 7445 05 Podlahy – Společná ustanovení definuje celou řadu technických požadavků, podle kterých se kvalita provedení těchto konstrukcí posuzuje. Primárně se vždy posuzují charakteristiky viditelného povrchu, tedy nášlapné vrstvy podlahy. Studují se trhliny, rýhy, kavery puchýře či vlny na povrchu. Z širšího pohledu do této kategorie zapadá stálobarevnost povrchu a celková i místní rovinnost povrchové vrstvy.

Dále se sleduje kvalita potěrové vrstvy, do této kategorie zapadá její tloušťka a z materiálového hlediska i rozměrová stálost, mechanická odolnost a stabilita nebo tvrdost povrchu či odolnost proti jeho opotřebení. Mezi další technologické požadavky kladené na podlahy patří:

- Přímost spár,
- Odolnost proti kontaktnímu namáhání,
- Tepelně technické vlastnosti,
- Působení vody a vlhkosti,
- Akustické vlastnosti,
- Chemické a biologické vlastnosti,
- Požární bezpečnost,
- Elektrické a magnetické vlastnosti,
- Skluznost,
- Hygienické požadavky. [4]

1.3.2 Průmyslové podlahy

První průmyslové podlahy se na území ČR objevily koncem osmdesátých let, kdy se jednalo o vakuované strojově hlazené podlahy, které s přibývajícím poznatky postupně dostaly podobu dnešních betonových průmyslových podlah. [5]

Tento typ podlah je nejčastěji využíván v průmyslových a skladových halách, lisovnách a montovnách, obchodních centrech, garážích nebo například v zemědělství. Na průmyslové podlahy jsou kladeny velké nároky jak ze strany kvality provádění, tak ze strany vysoké odolnosti a trvanlivosti. Pro dosažení vysoké kvality průmyslové podlahy se nestačí zaměřit na odolnost nášlapné vrstvy, ale průmyslové podlahy se v dnešní době řeší jako celý systém, obvykle již od specifického způsobu přípravy podloží, až po finální nášlapnou vrstvu. [3], [6]

Rozdíl mezi průmyslovými podlahami a obyčejnými betonovými podlahami (např. v kancelářských prostorech) je v první řadě ve velikosti plochy, kterou průmyslové podlahy zaujímají. Průmyslové podlahy jsou nejčastěji v jednopodlažních objektech zakládány na ztuhlém podloží, ale provádějí se i v rámci vícepodlažních budov, kdy hlavní nosnou část průmyslové podlahy tvoří staticky dimenzované stropní systémy konstrukce celého objektu. [7]

1.3.3 Vysokopevnostní (pancéřové) podlahy

Termín pancéřové betonové podlahy je specifický pojem užívaný u systémů průmyslových podlah tvořených nosnou betonovou deskou a cementovým vsypem či vsypovou stěrkou. Tento typ podlah se používá tam, kde jsou kladeny extrémní nároky na odolnost nášlapné vrstvy podlahy.

Tzv. vsypy představují speciální typ povrchové úpravy zhotovovaný na nosné podkladní vrstvě podlahového systému za účelem zlepšení určitých vlastností podlahy. Nejčastějším způsobem provádění vsypové vrstvy je tzv. metoda „mokry do mokré“, kdy je nová betonová deska ještě v čerstvém stavu překryvaná relativně tenkou vrstvou speciální malty s lepšími fyzikálně-mechanickými vlastnostmi, než má nosná část desky. [7]

1.3.4 Potěry

Podlahový potěr představuje vyrovnávací vrstvu podlahové konstrukce. V současné době existuje celá řada potěrů, lišících se dle technologie provádění na klasické a lité, dále dle materiálové báze na minerální či syntetické, nebo například dle konstrukčního řešení na potěry spojené s konstrukční deskou nebo tzv. potěry plovoucí.

Rozeznáváme i tzv. pancéřové potěry. Jedná se o potěry vyznačující se mimořádnou tvrdostí a houževnatostí. Je možné je použít při konstrukci nové průmyslové podlahy, ale také na starý podkladní beton.

2. Suroviny pro výrobu betonové podlahy

2.1 Cement

Cement je polydisperzní partikulární anorganická látka s hydraulickými vlastnostmi. To znamená, že po smíchání s vodou postupně tuhne a tvrdne. Po zatvrdnutí na vzduchu i ve vodě zachovává svoji pevnost a stálost ve vodě. Hydraulické tuhnutí je důsledkem hydratace vápenatých silikátů a aluminátů. [8]

2.1.1 Portlandský cement

Portlandský cement se vyrábí pomletím slínku a malého množství sádrovce (síranu vápenatého – CaSO_4). Slínek se získává výpalem speciálních jílu a vápence při teplotě okolo $1450\text{ }^\circ\text{C}$. Výroba obyčejného portlandského cementu je proces, při kterém se intenzivně produkuje CO_2 . Konkrétně, při slinovací reakci je vyžadována značná energie ve formě tepla, čehož je dosaženo spalováním celé řady paliv. Zároveň dochází k dekarbonizaci vápence a oba tyto procesy jsou příčinou vzniku velkého množství CO_2 . Produkce cementu se podílí z 6,5 % na celosvětové produkci CO_2 . [9]

Slínek se skládá z několika minerálů, vzniklých reakcí mezi oxidem vápenatým (CaO), oxidem křemičitým (SiO_2), oxidem hlinitým (Al_2O_3) a oxidem železitým (Fe_2O_3). V Tab. 1 je uveden přehled hlavních složek portlandského cementu, jejich označení a základní charakteristiky. Z chemického hlediska je průměrné zastoupení hlavních oxidů: 65 % CaO , 22 % SiO_2 , 5 % Al_2O_3 a 3 % Fe_2O_3 . Mezi nejdůležitější slínkové minerály v portlandském cementu se řadí křemičitany vápníku (C_2S – belit a C_3S – alit), hlinitan vápenatý (C_3A – celit) a aluminoforit vápenatý (C_4AF – tetrakalcium aluminoforit). [8], [10]

Tab. 1 Hlavní složky portlandského cementu

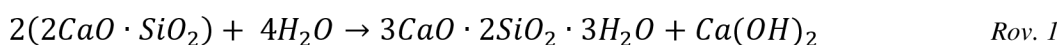
| Název | Vzorec | Obsah [%] | Hydratační teplo [kJ/kg] | Hydratace |
|----------------------------|-----------------------|-----------|--------------------------|--------------|
| Trikalciumsilikát | C_3S | 35 až 75 | 500 | rychlá |
| Dikalciomsilikát | C_2S | 5 až 40 | 250 | střední |
| Trikalciumaluminát | C_3S | 3 až 15 | 910 | velmi rychlá |
| Tetrakalciumaluminát-ferit | C_4AF | 9 až 14 | 42 | rychlá |
| Oxid vápenatý | CaO | <4 | 1160 | pomalá |
| Oxid hořečnatý | MgO | <6 | 840 | pomalá |

Proces hydratace portlandského cementu

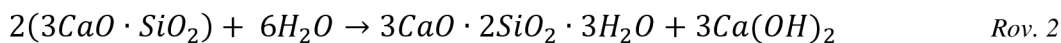
Hydratačních produktů a meziproduktů silikátových minerálů je celá řada, v následující kapitole budou jmenovány pouze ty základní. Obecně platí, že reaktivita cementu nezáleží pouze na jeho složení a čistotě, ale také na jemnosti mletí. [2], [10]

Hydratační procesy čtyř výše zmíněných slinkových minerálů (Tab. 1) probíhají při kontaktu s vodou. Minerály C_2S a C_3S jsou při kontaktu s vodou nestabilní a jejich výslednými produkty jsou hydráty křemičitanu vápenatého (CSH) a hydroxid vápenatý (CH). Průběh těchto reakcí je popsán v Rov. 1 a Rov. 2.

Proces hydratace C_2S :

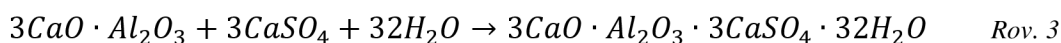


Proces hydratace C_3S :



Při hydrataci slinkového minerálu C_3A dochází k okamžitému navázání na molekuly vody a celý proces je doprovázen silně exotermní reakcí. Právě z tohoto důvodu je do cementu přidáván sádrovec působící jako zpomalovač tuhnutí. V Rov. 3 je popsána hydratační reakce slinkového minerálu C_3A se sádrovcem a vodou. Hydratačním produktem této reakce je ettringit ($C_6A\bar{S}_3H_{32}$) ve formě krátkých prismatických jehliček, čímž je dosaženo prvotních pevností. [2], [10]

Proces hydratace C_3A :



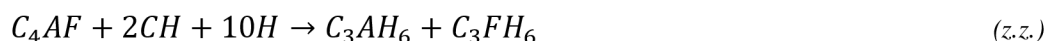
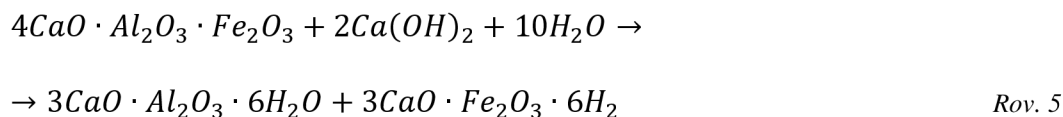
Ettringit vzniká pouze za přítomnosti sádrovce v cementu. Jeho krystaly obalují zrna C_3A a tím dochází ke zpomalení hydratačního procesu. Ettringit je poměrně stabilní v případě, že se pH pohybuje v rozmezí 10,7 – 13,0. [11] Po spotřebování obsaženého sádrovce reaguje vzniklý ettringit se zbylým C_3A a vodou za vzniku monosulfátu ($C_3A \cdot CaSO_4 \cdot H_{12}$) ve formě tenkých hexagonálních lamel (Rov. 4). [2], [10]

Tvorba monosulfátu:



Slinkový minerál C_4AF hydratuje pomaleji, reaguje s vodou a částí již vzniklého hydroxidu vápenatého (Rov. 5). Hydratačním produktem aluminoferitů jsou krystalické C_3AH_6 ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$) nebo C_3FH_6 ($3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot 6H_2O$). [12]

Proces hydratace C_4AF :



2.1.2 Hlinitanový cement

Hlinitanový cement je vyráběn ze speciálního hlinitanového slinku. Na výrobu surovinové směsi se používá bauxit a vápenec, zhruba v poměru 1:1. Výpal hlinitanového cementu se provádí tavením v elektrických obloukových pecích (1800-2000 °C) nebo slinováním v rotačních pecích (1150-1250 °C) [12]. V minulosti byl tento typ cementu hojně využíván z důvodu rychlého nárůstu počátečních pevností, zvýšené odolnosti v chemicky agresivním prostředí (SO^4 , Cl^-) a ve specifických případech se využívalo vysoké hydratační teplo. Chemické zastoupení nejdůležitějších oxidů v hlinitanovém cementu je přibližně: 35-52 % Al_2O_3 , 35-45 % CaO , 3-10 % SiO_2 , 1-15 % Fe_2O_3 . [8], [13], [14]

Z mineralogického hlediska jsou nejdůležitějšími slinkovými minerály ve hlinitanovém cementu méně zásadité kalciumalumináty. Především se jedná o CA , dále se s ohledem na složení surovinové směsi mohou být v hlinitanovém cementu obsaženy $C_{12}A_7$, C_2S , C_2AS , C_2A , CA_2 , a aluminoferity C_4AF a C_6AF . [16]

Hlavní parapety hlinitanových cementů předepisuje norma ČSN EN 14 647. Jak je patrné z Tab. 2, v rámci této normy nejsou hlinitanové cementy děleny dle obsahu hlavních oxidů, ani podle mechanických parametrů na více typů.

Tab. 2 ČSN EN 14 647 – Hlavní parametry hlinitanových cementů

| Parametr | Hodnota |
|------------------------------|---------|
| Pevnost v tlaku - 6 h [MPa] | ≥ 18 |
| Pevnost v tlaku - 24 h [MPa] | ≥ 40 |
| Počátek tuhnutí [min] | ≥ 90 |

Problémem betonů s hlinitanovými cementy je nestabilita hydratovaných slinkových minerálů. Postupem času v betonu probíhá rekrystalizace z nestabilních minerálů do konečných stabilních fází. V důsledku toho dochází k výraznému snížení objemu konvergujících minerálů, vzniká pórovitá struktura cementového kamene, vedoucí až ke

kritické ztrátě pevnosti betonu. Z tohoto důvodu se hlinitanové cementy nesmí používat v konstrukčních betonech. Stále se však využívají tam, kde se neočekávají dlouhodobé stabilní pevnosti. Příkladem jsou žarobetony nebo vysokopevnostní podlahy. [10]

Proces hydratace hlinitanového cementu

Na rozdíl od silikátů mají alumináty tendenci vytvářet hydroalumináty s výrazně krystalickým charakterem. [15] Hydratací hlinitanového cementu za normálních teplot vznikají nestabilní kalciumalumináthydráty CAH_{10} (hexagonální prismata, Rov. 6) a C_2AH_8 (hexagonální destičky, Rov. 7). Dalšími hydratačními produkty jsou C_3AH_6 (stabilní kubické krystaly, Rov. 8) a AH_3 (stabilní hexagonální prismata). Vliv na typ hydratačních produktů má nejen teplota prostředí, ale také vlhkost. S rostoucí teplotou mají v soustavě větší zastoupení stabilní aluminohydráty (C_3AH_6) a gibbsit (AH_3). [10]

Proces hydratace kalciumaluminátů CA:



Nestabilní kubické aluminohydráty mají tendenci se časem měnit na stabilní C_3AH_6 (Rov. 9, Rov. 10, Rov. 11) a AH_3 . Tato konverze je dlouhodobá a s vyšší teplotou prostředí probíhá intenzivněji. Konverzí aluminohydrátů dochází k uvolnění krystalicky vázané vody, zvýšení porozity cementového kamene a v důsledku toho snížení pevnosti. Vedle teploty prostředí má vliv na rychlost konverze také vodní součinitel. Proto je maximální doporučený vodní součinitel $w = 0,4$. [10], [12], [13]

Proces konverze CAH_{10} a C_2AH_8 :



2.2 Příměsi do betonu

Příměsi do betonu jsou nejčastěji práškové látky přidávané do čerstvého betonu za účelem zlepšení vlastností čerstvého či ztvrdlého betonu, případně k dosažení specifických vlastností. Jako příměsi se do podlahových potěrů využívají oba normou stanovené typy. Norma ČSN EN 206 stanovuje Typ I. příměsí do betonu, jako inertní příměsi. Nejčastěji to jsou mleté vápence, kamenné odprašky, tzv. fillery nebo

pigmenty. Typ II. příměsí do betonu jsou tzv. pucolány (vysokoteplotní popílek a mikrosilika) a latentně hydraulické látky (mletá granulovaná vysokopecní struska). [8], [10]

Výhody využití příměsí do betonu:

- Snížení hydratačního tepla – omezení objemových změn a poruch odvíjejících se od hydratačních pochodů,
- Díky nižšímu hydratačnímu teplu je možno prodloužit zpracovatelnost čerstvé směsi a provádět betonáž za vyšších teplot,
- Při volbě správné příměsí můžeme omezit riziko alkalicko-křemičité reakce následkem vysokého obsahu alkálií v cementu,
- Snížení ceny potěru,
- Zlepšení reologických vlastností čerstvého betonu. [10]

2.2.1 Latentní hydraulická

Hydraulicky aktivní jsou látky schopné tuhnut, tvrdnout a zpevňovat se ve vodním prostředí za normálních teplot. Hydraulicky aktivní látky vždy obsahují oxidy CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 . Latentně hydraulické látky se vyznačují stejnou schopností, ale pro nabývání pevností ve vodném prostředí za normální teploty potřebují budiče. Budiče mohou být síranové (např. anhydrit) nebo alkalické (CaSO_4 , Na_2SO_4 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, Na_2CO_3 , NaOH , KOH) s $\text{pH} > 7$. [16]

Může se jednat o vysokopecní strusku nebo pálené jílové zeminy (600-800 °C), obsahující amorfní metakaolinit $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$. Reakcí s $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dochází ke vzniku CSH I a CSH II. Tyto látky obsahují 16-53 % CaO .

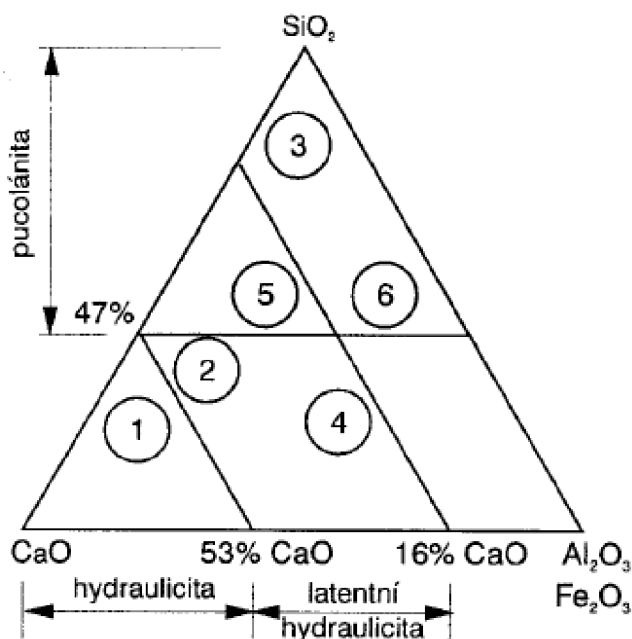
2.2.2 Pucolanita

Pucolánovými vlastnostmi se vyznačují anorganické látky, které nemají samy o sobě, ani vlivem budiče, schopnost tuhnut, tvrdnout a zpevňovat se. Díky vysokému podílu amorfního SiO_2 jsou schopny reagovat s vápennými ionty za vzniku CSH fází.

Mezi uměle vyráběné látky s pucolánovými vlastnostmi patří cihelný a skelný prach, metakaolin (mefisto) nebo druhotné suroviny z energetické či průmyslové výroby: popílky a křemičité úlety.

Látky s pucolánovými vlastnostmi se vyskytují také přirozeně v přírodě. Poblíž italského městečka Pozuoli (odtud název Pucolán) na úpatí Vesuvu, se nachází naleziště přírodních pucolánů (tufy, trasy, sopečné sklo). Jedná se o látky obsahující sopečné sklo vzniklé rychlým ochlazením magmatu. V této lokalitě těžili již před našim letopočtem

staří Římané. Dalšími přírodními látkami s pucolánovými vlastnostmi jsou např. tufity, křemelina, rýnský, bavorský a římský tras, řecký santorin). Jedná se o látky sopečného původu a obvykle obsahují 50-80 % amorfni sklovité fáze a 50-20 % krystalické fáze. Silně reaktivní jsou zeolity (vodnaté hlinitosilikáty, zejména analcitu $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). [8]



Obr. 1 Hydraulické a pucolánové látky v potrojném diagramu C-S-A(-F).

1 – Portlandský cement, 2 – Vysokopeční struska, 3 – Křemičité úlety, 4 – Popílky bohaté na CaO, 5 – Popílky bohaté na SiO₂, 6 – Pucolánové popílky. [8]

2.2.3 Druhotné suroviny

„Nerostné i druhotné suroviny tvoří základní vstupy pro ekonomiku každé země a ovlivňují velmi výrazně její konkurenceschopnost. Průmysl druhotných surovin patří v České republice historicky mezi tradiční obory hospodářství a nyní je opět na vzestupu. Zájem o průmysl druhotných surovin je vyvolán jednak stále se zvyšujícími cenami primárních zdrojů, jejich nedostupností v rámci EU a zejména tím, že jejich využívání přináší významné materiálové a energetické úspory.“ [17]

2.2.4 Vysokoteplotní popílek

Vysokoteplotní elektrárenské popílky jsou nespalitelnými zbytky spalování práškového uhlí v kotlích tepelných elektráren při teplotách přibližně 1 200-1 700 °C. Vysokoteplotní popílky představují přibližně 80 % nespalitelných zbytků. Nejčastějším způsobem odstranění popílku ze spalin je pomocí elektrostatických odlučovačů. Kritéria kladená na popílky do betonu specifikuje norma ČSN EN 450 - 1, 2. Dle odhadů je celosvětově každým rokem vyprodukováno asi 750–800 milionů tun uhelného popílku a

například v Číně činí produkce uhelného popílku asi 4 108 tun/rok. Některé odhady mluví o tom, že za 15 let by celosvětová produkce popílku mohla stoupnout až na 2 100 milionů tun/rok. [18], [19]

Chemickým složením jsou popílky podobné přírodním pucolánům a na rozdíl od cementů mají výrazně nižší podíl CaO. To je důvod, proč se popílky vyznačují pucolánovými vlastnostmi, na rozdíl od hydraulicky působících cementů. Granulometrie, chemické i mineralogické složení popílků je do určité míry proměnlivé. Závisí na druhu spalovaného uhlí, jemnosti mletí, technologii spalování, teploty v kotli i způsobu odlučování ze spalin. Popílky z černouhelného prachu se ve srovnání s popílky z hnědouhelného prachu vyznačují menší diverzitou vlastností a složení, jsou tedy z tohoto ohledu vhodnější jako příměs do betonu. V ČR je přibližně 80 % vyprodukovaných elektrárenských popílků z hnědého uhlí. [8], [10]

Z mineralogického hlediska je v popílcích možné určit:

- Hydraulicky aktivní složky (CS, CA, CF, AS, skla),
- Nehydraulické minerály, v některých případech hydraulické budiče (CaO, MgO, anhydrit),
- Hydraulické budiče (sulfidy, alkalické soli),
- Inertní látky (krystalický křemen, hematit, magnetit, mullit, kyselé silikáty). [8]

Popílky vzniklé vysokoteplotním spalováním jsou tvořeny krystalickými i amorfními fázemi. Krystalické fáze jsou zastoupeny především β -křemenem a mullitem ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$). Amorfní fáze je tvořena látkami, které jsou složením velice blízké mullitu. Amorfní fáze většinou představuje více než 50 % hmotnosti a významně ovlivňuje reaktivitu popílku s vápnem či cementem za normální i zvýšené teploty. [20]

Částice popílku jsou skelné kuličky o měrném povrchu 200-600 m^2/kg . Zrna mohou být dutá (cenosféry), mohou být vyplněny cenosférami menších rozměrů (plerosféry), případně se může jednat o plně sférické částice, ty se však nevyskytují příliš často. Dalšími formami, ve kterých se částice popílku vyskytují mohou být pyrosféry, ferrosféry anebo ve formě shluků jako aglomeráty. [19]

Měrná hmotnost popílku se v závislosti na typu a vlastnostech pohybuje v rozmezí 2100-2600 kg/m^3 a sypná hmotnost 800-1100 kg/m^3 . Černouhelné popílky se vyznačují menší rozmanitostí granulometrie a průměrná velikost částic popílku je podobná zrnům cementu. Hnědouhelné popílky mají velikost zrn nepravidelnější, pohybuje se obvykle v rozmezí 5-150 μm . Zrnitost popílků je také závislá na použité technologii odlučování. Při použití elektrostatických odlučovačů využívajících vysoké napětí je popílek jemnější (zrn > 0,09 mm je do 20 %) a sypná hmotnost se pohybuje kolem 800 kg/m^3 . Tato

technologie je zároveň velice účinná, dosahuje odlučivosti až 99 %. Druhou technologií odlučovačů jsou mechanické odlučovače využívající filtry z ohnivzdorných tkanin. Takto získaný popílek je hrubší (zrn > 0,09 mm je nad 20 %) a sypaná hmotnost se pohybuje kolem 1 100 kg/m³. [8], [10], [21]

Klasifikace popílku

Dle normy ČSN EN 14227-7 a ČSN EN 197-1 se dělí vysokoteplotní popílky na křemičité (V) a vápenaté (W). Základními chemickými složkami křemičitého popílku (hlinitokřemičitého popílku), jsou křemičitany, hlinitany a oxidy železa. Vyjádřené jsou jako SiO₂ (obsah aktivního oxidu křemičitého musí být vyšší než 25 hm%), Al₂O₃ a Fe₂O₃. Obsah aktivního CaO musí být nižší než 10 hm%, zároveň obsah volného oxidu vápenatého musí být nižší než 1 hm%. Křemičité popílky se vyznačují pucolánovými vlastnostmi. Vápenatý popílek (popílek s obsahem síranu vápenatého) obsahuje chemické složky, jako jsou křemičitany, hlinitany, oxid vápenatý a oxid sírový, vyjádřené jako SiO₂, Al₂O₃, CaO, SO₃. Obsah aktivního CaO nesmí být nižší než 10 hm%. Vápenatý popílek má hydraulické a pucolánové vlastnosti. [22], [23]

Hydratace elektrérenských popílků

V dnešní době existuje celá řada studií zaměřených na využití elektrérenského popílku jako částečné náhrady cementu. Dle Golewského [19] se v dnešní době více než 50 % tohoto materiálu používá v cementářském průmyslu jako náhrada cementu. [19]

Při hydrataci pojiva ve formě tvořeného cementem a popílkem dochází ke dvěma jevům. Prvním je pucolánová reakce (Rov. 12 a Rov. 13), kdy popílek za přítomnosti vody reaguje v Ca(OH)₂ (CH) za vzniku sloučenin s pojivovými vlastnostmi. Tyto hydratační produkty jsou velice podobné hydratačním produktům portlandského cementu, ale samotný proces je pomalejší. Opožděný nástup pucolánové reakce se vysvětluje závislostí rozpustnosti amorfni fáze popílku na zásaditosti cementového tmele. To znamená, že pucolánová reakce započne, až po dosažení požadované minimální hodnoty pH v cementové matici. [10], [24]

Princip hydratace portlandského cementu a vysokoteplotních popílků:

Portlandský cement:



Popílek:



Druhým jevem, který je možné pozorovat při hydrataci pojiva s cementem a popílkem, je vybuzení hydratace cementu [24]. U cementových kompozitů s popílkem byl pozorován jev, kdy se na povrchu zrn popílku vysrážely hydratační produkty cementu. Popílek tedy funguje jako nukleační jádro pro hydrataci cementu. U určité části zrn popílků dokonce došlo k jejich zapouzdření, zabránění přístupu vody a zpomalení či úplnému zastavení hydratace takových zrn. Podle N. Narayana je to důvod, proč cementové kompozity s popílkem dosahují nižších pevností v tlaku než kompozity bez něj. [10], [25]

Průběh hydratace popílku, ani vliv popílku na průběh hydratace cementu není možné zobecnit, jelikož jeho složení je proměnné. Studie uvádějí, že míra vývinu hydratačního tepla pojiva s cementem a popílkem bývá nižší, ale může být i vyšší, v závislosti na typu popílku. Popílek má prokazatelný vliv na průběh hydratace cementu. Jeho přidáním můžeme prodloužit latentní fázi, změnit kinetiku reakce, ovlivnit tvorbu portlanditu i složení hydrátu. Zpomalí se také vývoj pevností. Nárůst pevností je zřetelný i v období mezi 28. a 90. dnem zrání betonu. [10]

Mikrostruktura cementových kompozitů s vysokoteplotním popílkem

Saha [26] se zaměřil na pozorování mikrostruktury vzorků betonu s částečnou náhradou cementu popílkem. Zjistil, že v rané době zrání obsahuje beton velké množství nehydratovaných kulovitých částic popílku. Po dlouhodobém vytvrzování jednoho roku se zdá, že mikrostruktura vzorků popílku je velmi kompaktní a nebyly pozorovány žádné známky nehydratovaných částic popílku. [26]

Ve své práci [27] V. Boel zkoumal přínos popílku u samozhutnitelných betonů. Z jeho výsledků lze vyvodit, že přidáním popílku dosáhneme lepší mikrostruktury cementového kamene. Dojde k vyplnění kapilárních pórů hydratačními produkty, struktura je hutnější, čímž se zvýší pevnost, nasákavost a odolnost proti působení chemicky agresivních látek. [27]

Wang [28] zkoumal, do jaké míry dokáže substituce cementu vysokoteplotním popílkem ovlivnit pevnost v tahu betonu, a to při náhradě 15-55 % z m_c. Z jeho závěrů vyplývá, že vliv popílku na rané pevnosti je negativní, ale pevnosti u staršího betonu dosahovaly stejných či vyšších hodnot. To potvrdil při volbě různého vodního součinitele i různé míry substituce cementu. [28]

V případě, že určitá část popílku nezreaguje, stále plní funkci mikroplniva, tzv. fileru. Na vliv nezreagovaného popílku v mikrostrukturu cementového kamene se ve své práci zaměřil Zhang [29]. Zjistil, že i při vysoké náhradě cementu popílkem mají nezreagovaná zrna popílku pozitivní vliv na pevnost. Díky amorfnímu charakteru jsou

podstatně tvrdší a mají vyšší modul pružnosti než hydratační produkty kalciumsilikátů, díky čemuž mikrotrhliny většinu částic popílku obchází [29].

Využití vysokoteplotních popílků

S využitím křemičitého popílku jako částečné náhrady cementu se je možné setkat stále častěji. Saha ve své práci [26] potvrdil předpoklad, že pevnost v tlaku vzorků s popílkem vykazovala nízkou počáteční pevnost ve srovnání s referenčními vzorky. Nicméně kvůli pucolánové reaktivitě popílku se pevnost po delší době zrání zlepšila, zatímco u referenčních vzorků se pevnostní růst zastavil po 56 dnech zrání. Hydratační smrštění se snížilo zvýšením obsahu popílku ve směsi. Zahnutí popílku jako pojiva snížilo poréznost betonu. Výsledkem je, že popílkový beton vykazuje nižší sorptivitu vody a propustnost pro chloridy. [26]

Popílek jako částečná náhrada cementu může mít pozitivní vliv na fyzikálně mechanické vlastnosti v raném i pozdějším stavu. Pozitivní vliv vysoké dávky popílku (náhrada cementu až z 5 %) potvrdil Atis [30]. Tvrdí, že vysoká dávka popílku snížila smrštění betonu až o 30 % ve srovnání s běžným betonem. Účinek popílku na smrštění závisí na jeho jemnosti a spotřebě záměsové vody. U vzorků s hrubším popílkem byl pozorován výrazně nižší vliv na omezení smršťování betonu. Na jemnost popílku se zaměřil i Chindaprasirt a kol. [31]. Ti uvádějí, že popílek složený z velmi jemnozrnných částic vykazuje vyšší pevnost v tlaku ve srovnání s běžným popílkem. [30], [31]

Sujjavanich ve své práci [32] pojednává o účinku interakce metakaolinu a popílku na mikrostrukturu a vývoj vlastností betonu. Prokázal významné zlepšení z hlediska trvanlivosti, odolnosti proti oděru, propustnosti pro chloridy a rizika koroze oceli. Podíl cement: metakaolin: popílek jako 80:10:10 přinesl značné zlepšení ve stabilitě dlouhodobých pevností. Synergické působení v ternární směsi výrazně zlepšilo zpracovatelnost čerstvého betonu a poskytlo homogenní směs, hustší mikrostrukturu a vyšší pevnosti vytvrzeného betonu. [32]

Fan [33] se zabýval využitím vápenatých popílků. V této oblasti jsou výzkumy poměrně nedostatečné, a tak se zaměřil na využitelnost popílků s vysokým obsahem CaO. Zjistil, že při mokřém mletí popílku ve speciálně navrženém kulovém mlýně se povedlo snížit obsah aktivního CaO pod 3,5 %, čímž popílek splnil kritéria na trvanlivost. [33]

Ve své práci [9] Wei zpracoval poznatky týkající se výroby bezslinkových betonů reakcí vápenatých elektrárenských popílků a CO₂. Ukázalo se, že popílky bohaté na Ca reagují s CO₂ rychle, ve vlhkých podmínkách, při atmosférickém tlaku a při teplotách blízkých se teplotě varu (cca 75 °C). [9]

2.2.5 Škvára

Škvára je anorganický odpad, vznikající na roštích nebo v topeništích spalováním uhlí, hořlavých břidlic a jiných pevných paliv. Jedná se o odpadní surovinu, vyznačující se velkou nehomogenitou a možností obsahu většího množství škodlivin. Obvykle bývá škvára hromaděna na haldách. Využitelnost škváry jako agregátu do betonu je ovlivněna řadou faktorů. Na kvalitu škváry má vliv míra mechanického znehodnocujícího znečištění organického nebo anorganického původu, jakost a druh výchozího paliva, způsob spalování, množství spalitelných zbytků paliva, podíl volného CaO a MgO, sloučenin síry a rozpustných solí.

Velký vliv má také stáří škváry a způsob jejího uložení. Před použitím škváry se doporučuje, aby byla uložena po dobu minimálně 6 měsíců na volných odvalech, kde dochází k vyluhování rozpustných solí, které v betonech způsobují tvorbu výkvětů. Dále zde dochází k oxidaci a vyluhování sloučenin síry. Ve škvárách je síra vázaná buď jako siřičková nebo častěji jako sírany. Celkový obsah síry musí být menší než 4 % SO_3 . Sypná hmotnost by se u škvár volně sypaných (frakce 0–16 mm) měla pohybovat v rozmezí 400–850 kg/m^3 . [8], [34]

Požadavkem na škváru jako příměs do betonu je vysoký obsah SiO_2 . Kromě amorfni fáze obsahuje obvykle škvára také mullit, anortit a melilit, dále vápenné jílové horniny magnetit nebo sádrovec. [35]

Dále je použitelnost škváry do betonu limitována maximálním obsahem spalitelných látek 10 %. Vodní výluh škváry musí vykazovat neutrální nebo slabě kyselý charakter (pH v rozmezí 4–8). Zároveň musí být škvára posuzována na měrnou aktivitu ($<150 \text{ Bq/kg}$). [8]

2.2.6 Skelný recyklát

Sklo je pevná látka o vysokém obsahu amorfniho SiO_2 . Jedná se o látku vznikající tuhnutím taveniny bez krystalizačních pochodů. Tvrdost skla na mohsově stupnici tvrdosti je 5.

Pojmem skelný recyklát je myšleno obalové sklo, zejména lahvové, vyráběné z 50 % křemičitého písku, 10 % Na_2CO_3 (soda), 12 % CaCO_3 (vápeneč), 18 % drcených střepeů odpadního skla a 4 % ostatních látek. Tavenina skla ve formě červené žhavé plastické hmoty vzniká za teploty 1 500 °C, kdy se dávkuje do foukacích či lisofoukacích strojů na výrobu lahví. Takto vyrobené sklo může být čiré nebo barevné. [6]

Použití odpadního skla (kontejnerového) ve výrobě skla nového skýtá snížení nákladů na suroviny, energie a opotřebení strojního zařízení. Avšak zdaleka ne všechno sklo je

možné využít ke zpětné recyklaci což představuje značný ekologický problém po celém světě. Z toho důvodu je nalezení nových využití pro odpadní sklo na skládkách velkou výzvou. Omezení zpětné recyklovatelnosti odpadního skla zapříčiňuje různá barevnost, nečistoty atd. Díky tomu sortiment barevného skla již přerostl sortiment třídících nádob. Základní kategorie skla jsou následující: sklo křemičité, vodní, sodnovápenaté, borokřemičité, olovené (křišťálové), hlinitokřemičité. Sodnovápenaté sklo tvoří prakticky 80 % veškerého skelného odpadu (63 % sklo bílé barvy). Z tohoto typu skla se vyrábí např. láhve, sklenice, tabulové sklo atd. [36], [37]

Studium využitelnosti skla jako stavebního materiálu probíhá již desítky let, stále však má své limity. Drcené sklo lze použít jako kamenivo, jako plnivo s vysokým podílem jemnozrnných částic, anebo jako částečnou náhradu cementu. Amorfni struktura skla je předpokladem pucolánových vlastností. Hraniční hodnotou velikosti částic je 75 μm , pod tuto hranici má sklo již dostatečnou pucolánovou aktivitu. V případě použití drceného skla jako kameniva je potřeba brát v potaz možný vznik alkalicko-křemičité reakce (AKR) mezi použitým sklem (zdrojem aktivního SiO_2) a alkáliemi. [36], [37]

Jak již bylo řečeno, jemně mleté sodnovápenaté sklo vykazuje vysokou pucolánovou aktivitu, kdy spotřebovává portlandit za vzniku CSH fází. Ty obalují reakční okraj skleněných zrn a snižují hladinu monosulfátu. Díky této schopnosti jemného skla lze naopak omezit riziko AKR. Podmínkou takových vlastností skla je jemnost mletí. Lee říká, že limitní zrnitost po jejímž dosažení nehrozí AKR by měla být 300 μm . [37], [38]

Ročně se v ČR vyprodukuje přibližně 40 tisíc tun odpadního plochého skla ze stavebních demolic. [17]

3. Trvanlivost

3.1 Trhliny od objemových změn

Tvorba trhlinek v betonu je jednou z jeho zásadních slabin, způsobujících omezení pevnosti a životnosti. Přítomnost trhlin lze předpokládat v každém betonu, přičemž jejich množství a charakter má nezanedbatelný vliv na trvanlivost betonových průmyslových podlah. Zabránění či omezení jejich vzniku a šíření má velký význam. Trhliny v betonu je možné rozdělit na konstrukční (vznikají vlivem stálých a nahodilých statických i dynamických zatížení působících na konstrukci) a nekonstrukční (jejich vznik zapříčiňuje samotné hmoty a mají náhodný charakter).

Nekonstrukční trhliny betonu je možné dále rozdělit:

- Plastické smršťovací trhliny,
- Teplotní trhliny v počátečním stádiu tuhnutí a tvrdnutí,
- Smršťovací trhliny vlivem hydratace,
- Smršťovací trhliny vlivem vysychání,
- Expanzní trhliny vlivem alkalické reakce kameniva, síranová koroze, karbonatace nebo koroze výztuže. [7]

U podlah můžeme objemové změny rozeznávat ve vertikálním (sedání a sedimentace) a horizontálním směru (smrštění a expanze).

3.1.1 Sedání a sedimentace

Jedná se o objemové změny ve vertikálním směru, zapříčiněné gravitací. Sedání je způsobené únikem vzduchu z čerstvého betonu nebo prvotním chemickým smrštěním. Sedimentace je jev, při kterém dochází k segregaci těžších zrn kameniva, jejich poklesu a vytlačení jemných částic a cementového tmele k povrchu betonu. Používaným je termín bleeding, při kterém dochází k odměsení zrn kameniva a vody a znehodnocení betonu. Segregaci lze eliminovat plastifikačními přísadami či příměsmi jemnozrnných podílů, například křemičitých úletů, popílků či kameninových odprašků.

3.1.2 Smrštění a expanze

Je známá celá řada typů smršťování betonu. Obecně je možné říct, že smrštění zapříčiňuje voda obsažená v betonu. Může se jednat o molekulární vodu nacházející se mezi zrny hydratujícího cementu, či vodu obsáhlou se struktury CSH gelu. V obou případech se jedná o smrštění zapříčiněné vysycháním či únikem této vody.

Plastické smrštění

K plastickému smrštění dochází do 10 až 12 hodin od zamísení betonu, dokud je beton stále v plastickém stavu. Dochází k němu, pokud je relativní vlhkost okolního vzduchu nižší než 95 % a pokud je beton vystaven větru či vysoké teplotě. V případě ukládání čerstvého betonu na suchý podklad může také docházet k odvádění záměsové vody.

Charakter trhlín od plastického smršťování je náhodný, jedná se o diagonálně nebo všesměrně se propagující trhliny. [5]

Smrštění vlivem vysychání a hydratace cementu

Teplotní trhliny vznikají v raném stádiu tuhnutí a tvrdnutí a jsou vyvolány teplotami vyvozenými hydratací cementu. Riziko teplotních trhlin je závislé na geometrii konstrukce a použitém cementu. Zároveň jsou všechny chemické reakce probíhající při hydrataci cementu doprovázeny objemovými změnami. Dominantní vliv na vznik smršťovacích trhlin má však vysychání. Vliv chemického procesu hydratace je pro běžné betonu minoritní. Znamená to, že rozhodující pro smrštění je obsah vody v betonu. Minimalizací obsahu záměsové vody se sníží i konečné smrštění betonu. [7]

3.1.3 Redukce objemových změn

Projev objemových změn betonu je možné ovlivnit přímým zásahem do receptury betonu nebo vhodným ošetřováním již uloženého betonu.

Receptura betonu

Vliv vysychání na smrštění je možné zmírnit zvětšením velikosti maximálního zrna kameniva. Na smáčení většího zrna není potřeba tak velké množství vody, přitom zůstane zachována konzistence. Snížení vodního součinitele při zachování pevnosti je možné také dosáhnout použitím superplastifikačních přísad. Zároveň je možné zachovat vodní součinitel snížením dávky vody i cementu, za vzrůstajícího podílu kameniva.

V určitých podmínkách je možné smrštění omezit zvýšením podílu jemných částic přídavkem například popílků, křemičitých úletů, mikrosilika nebo filerů.

Ošetřování betonu

Cílem ošetřování betonu je získání největší možné pevnosti betonu využitím hydratace cementu a zajištění nerušené tvorby hydratačních produktů. Samotné ošetření musí započnou co nejdříve po ztuhnutí betonu, což závisí na použité metodě ošetřování. [5]

I přes to, že je položený beton pochůzí během jednoho dne, je nezbytné udržovat vlhkost betonu v určitých mezích po dobu nejlépe 7 dní, kdy se pevnost pohybuje již kolem 70 % pevnosti po 28 dnech. Zajištění nezbytné vlhkosti v celém průřezu podlahové desky lze dosáhnout několika způsoby:

- Kropení vodou po ukončení tuhnutí,
- Položení ochranné fólie z měkčeného PVC,
- Položení geotextilie s fólií,
- Postříkem parotěsnou látkou. [5], [7]

3.2 Požadavky na kamenivo

Technologické požadavky na kamenivo do betonu definuje norma ČSN EN 12 620 + A1. V normě je kamenivo rozděleno podle třídy jakostí kameniva, druhů a frakcí. Na trvanlivost betonu má velký vliv složení kameniva. Existuje řada látek, kterého se mohou při kontaktu s cementovým tmelem projevat nežádoucími objemovými změnami. Nebezpečné jsou také látky, negativně ovlivňující vývin pevností betonu nebo jeho fyzikálně mechanické vlastnosti. Veliký důraz je kladen také na obsah alkálií v kamenivu. Alkálie mohou být obsaženy nejen v cementu, vodě, příměsích, ale také v kamenivu. Alkálie reagují s aktivním SiO_2 a vyvolávají tzv. alkalicko-křemičitou reakci. Mezi kameniva obsahující alkálie patří například rhyolity, dacity, andezity, křemičité břidlice, flint, opál, chalcedon, cristobalit nebo kryptokrystalinická skla. [8]

3.3 Alkalicko-křemičitá reakce (AKR)

AKR bývá popisována jako soubor interních reakcí mezi reaktivním kamenivem a alkáliemi za určité vlhkosti. V důsledku rozpínání, jímž bývá doprovázena, může docházet ke vzniku trhlin v cementové pastě i kamenivu, vedoucích v krajních případech k nenávratnému narušení statiky betonové konstrukce. [10], [39]

AKR je vyvolána působením alkálií z cementu, z vody i z kameniva na aktivní SiO_2 . K AKR dochází díky rozpustnosti a mobilitě SiO_2 , které reakcí s ionty Na^+ , K^+ a Ca^{2+} vytváří alkalicko-křemičité hydráty (AKR gel). Ten na sebe váže okolní vodu a díky tomu zvětšuje svůj objem, což je vlastní příčinou porušení betonových konstrukcí. V ČR se kamenivo s reaktivním křemenem vyskytuje ojediněle. [8]

Reaktivita SiO_2 , jeho rozpuštění a vysrážení, je určována termodynamickými a kinetickými faktory. Různé modifikace SiO_2 se rozpouštějí ve vodě, přičemž rozpustnost vzrůstá v řadě: křemen – α -cristobalit – β -cristobalit – tridimit – amorfní SiO_2 . Na rozpustnost křemene, obecněji SiO_2 , působí řada vnějších faktorů. Jsou to zejména pH, teplota, velikost a specifický povrch zrn (křemene nebo dalších minerálů). [39]

3.3.1 Rizika vzniku AKR

Výskyt reaktivních forem kameniva je jednou z nejzákeřnějších forem porušení betonu. To vyplývá z kombinace několika příčin, kterými jsou:

- Na rozdíl od snadného a rychlého zjištění obsahu síranů nebo chloridů je velmi obtížné a zdlouhavé zjistit a zhodnotit přítomnost reaktivních forem křemene,
- Reaktivní silika není rozdělena pravidelně, je přítomna v některých zrnech kameniva, v jiných zcela chybí. V kamenivu tedy není zjištěna, pokud daný vzorek neobsahuje dostatek reaktivních zrn,
- Sklon betonu k AKR závisí na obsahu alkálií v betonu; pokud je v 1 m³ betonu přítomno více než 2 kg alkálií, může dojít k AKR. Obsah alkálií závisí na obsahu cementu a na původu cementu, někdy se obsah alkálií i pro jednu cementárnu s časem výrazně mění. Podle toho může i při použití „stejných“ surovin AKR někdy nastat a jindy ne,
- Dalšími zdroji alkálií může být kamenivo například kontaminované solemi, pronikání mořské vody nebo roztoky rozmrazovacích solí,
- AKR nastává pouze ve vlhkém prostředí, takže k ní dochází zejména u venkovních konstrukcí. Ovšem může nastat i u průmyslových podlah, které nejsou opatřeny izolací proti vodě z podkladu,
- AKR probíhá velmi pomalu. Může být urychlena vyšší teplotou. [8], [40]

Doba, za kterou se může AKR reakce projevit závisí na celé řadě faktorů. Podle stupně reaktivity kameniva, vlhkosti a teploty prostředí a obsahu alkálií se může AKR projevit v řádu měsíců až desetiletí.[40]

Mnohé studie uvádějí, že nedojde k AKR mezi alkáliemi a částicemi skla, pokud tyto částice budou <300 μm (někteří autoři uvádí i 1 mm [10]). Při použití skla jako hrubého kameniva by tedy k AKR již dojít mohlo. Existuje mnoho způsobu, jak omezit expanzi způsobenou AKR, uvádí se např.: aplikace provzdušňovacích přísad, použití lehkého kameniva, popř. využití příměsí jako je mikrosilika, velice efektivní je i metakaolin. [36]

Podle Breitenbüchera [41] dochází k AKR také u velmi jemných částic (<1 mm) jako u hrubších zrn, ale tlak při bobtnání zůstává vlivem menší velikosti zrn tak malý, že nevznikne žádné poškození ve formě trhlin. Také tvrdí, že k AKR dojde pouze pokud je celkový obsah alkálií v betonu větší než 3 kg/m³. [41]

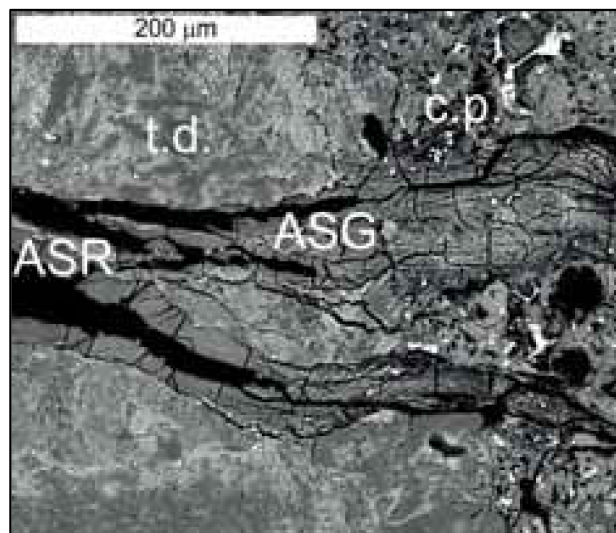
3.3.2 Identifikace AKR

AKR se projevuje mozaikou nepravidelných trhlin na povrchu betonu nebo odprýskáním kousků betonu. [40]

Stanovení pevností na zkušebních trámcích, které byly dlouhodobě vystaveny podmínkám příznivým pro vznik AKR je obecně považováno za nejjednodušší metodu, jak ověřit náchylnost betonu a účinnost preventivních opatření proti vzniku AKR. [42]

Pro detekci AKR, resp. pro vznikající gel byla vyvinuta metoda využívající fluorescence uranylacetátu (UAC) navázaného na gel, jehož pomocí se dá AKR zjistit dříve, než se vyvine závažné poškození betonu. Pro vyhodnocení je potřeba zařízení s UV zdrojem, kterým se zkušební roztok po absorpci na gelu zviditelní. Tento zkušební postup je vhodný pro diagnostiku in situ i v laboratorních podmínkách. [43]

K diagnostice poškození betonu AKR se standardně používají mikroskopické metody. S pomocí základních mikroskopických metod (polarizační a elektronová mikroskopie) je možné přímo identifikovat produkty AKR na základě jejich chemického složení a morfologie. Na Obr. 2 je snímek mikroskopických projevů AKR na vzorku betonu odebraného z cementobetonového krytu dálnice D11, pořízený pomocí skenovacím elektronovým mikroskopem kombinovaným s energiově disperzním spektrometrem. (t.d. – vulkanogenní tufická droba, c.p. – cementové pojivo, ASG – alkalicko-křemičitý gel). [39]



Obr. 2 Mikroskopický projev AKR [46]

3.3.3 Eliminace AKR

Breitenbücher se zabýval AKR z pohledu silničního betonu a tvrdí, že pokud kamenivo nebo příměs do betonu obsahuje aktivní SiO_2 , není možné vzhledem k alkáliím obsaženým v cementu AKR zabránit. Je prý pouze nutné zpomalit průběh reakce tak, aby nebyla ohrožena životnost cementobetonového krytu vozovky. Vzhledem k tomu, že u silničního betonu není reálné omezit vlhkost, zaměřil se na jiné faktory zapříčínující vznik AKR. Například je nutné použít cement s minimálním obsahem alkálií (<0,6 % hmotnostního ekvivalentu). [41]

L'Hopital prokázal, že riziko AKR může být sníženo částečnou náhradou cementu jinými aktivními agregáty jako je vysokoteplotní popílek nebo křemičité úlety, čímž se změní poměr C/S v CSH fázi, což vede k vyšší absorpci alkalických látek ve CSH struktuře. [44]

Afshinnia studoval možnosti využití skelného recyklátu jako kameniva do betonu a zároveň jemnozrnné náhrady cementu. Z výsledků jeho práce vyplývá, že při dostatečné jemnosti mletí skla (pracoval s průměrnou velikostí částic 17-70 μm) použitého jako příměs do betonu, je možné nahradit část kameniva drceným sklem bez toho, aby započala AKR. Podmínkou bylo dostatečné množství jemného skleněné prášku v cementovém tmelu. [45] Ke stejným závěrům došel také Zheng, který tvrdí, že dostatečně jemná zrna sodnovápenatého skla nebudou reagovat za přítomnosti alkálií a mohou dokonce AKR zmírnit. [38]

III. CÍL PRÁCE

Cílem této práce je ověření možnosti náhrady silikátového pojiva druhotnou surovinou ve vysokopevnostním podlahovém potěru na cementové bázi. Bude sledován zejména vliv druhotné suroviny na vývoj fyzikálně mechanických vlastností a struktury výsledného kompozitu.

Práce zahrnuje několik dílčích cílů. Prvním z nich je prokázání vlivu druhotné suroviny na vlastnosti normové malty jako částečné náhrady cementu a také jako aditiva.

Dalším z cílů je studium vlivu částečné náhrady cementu druhotnou surovinou na vlastnosti podlahového potěru. Záměrem je ověřit vliv jednotlivých druhotných surovin na parametry jak z pohledu vývoje v čase, tak z pohledu míry substituce cementu.

Následujícím dílčím cílem je ověření vlivu jemnosti mletí druhotných surovin na vlastnosti studovaných stavebních hmot. Také je cílem ověření vlivu úpravy popílku s vyšším měrným povrchem.

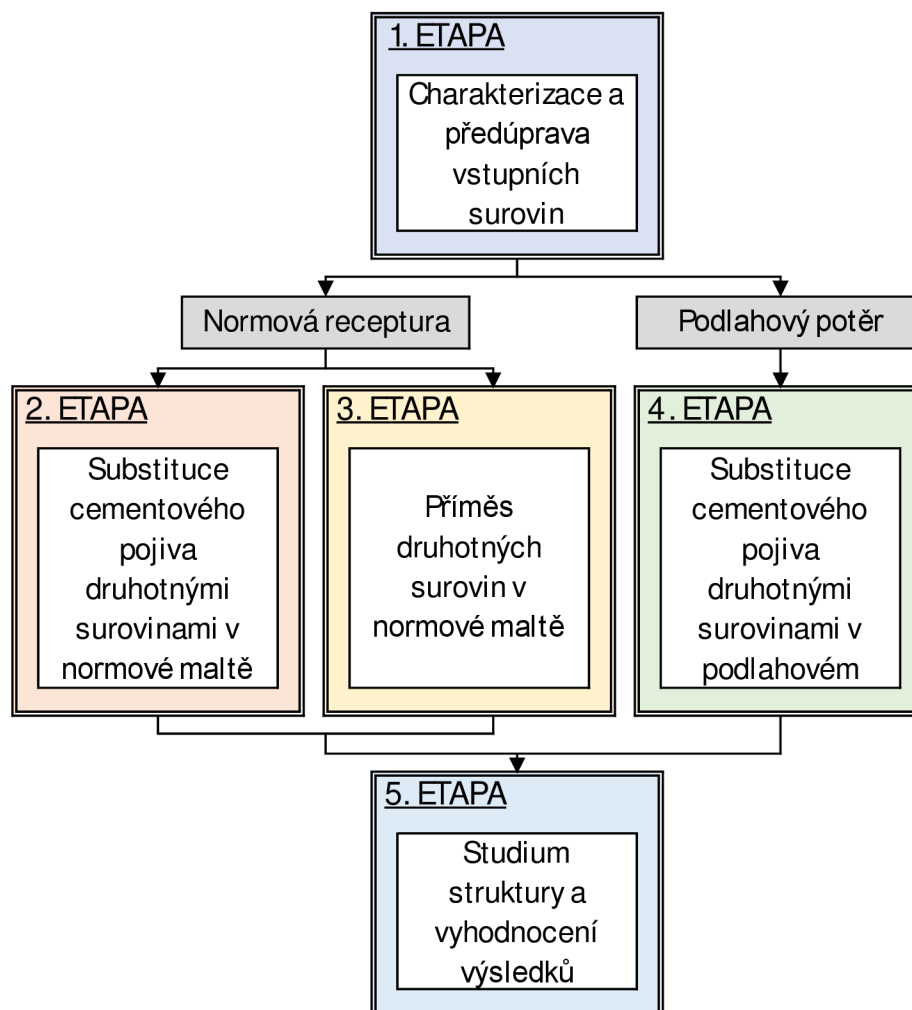
Posledním cílem je studium vlivu druhotné suroviny na strukturu podlahového potěru.

IV. METODIKA PRÁCE

Experimentální část bude rozdělena do pěti navazujících etap. První etapa si klade za cíl charakterizaci vstupních surovin. Dále se bude věnovat popisu předúpravy jednotlivých druhotných surovin. Na konec se zaměří na vypracování podkladů pro návrh zkušebních receptur.

Druhá a třetí etapa se bude věnovat zobecnění vlivu předúpravy druhotných surovin určených jako příměs do cementového kompozitu. Čtvrtá etapa se zaměří na zužitkování nabytých poznatků z předešlých etap a popíše vliv předúpravy druhotných surovin ve specifické stavební hmotě. Dále si klade za cíl vyhodnocení dosavadních výsledků práce a výběr reprezentativních receptur pro studium mikrostruktury podlahového potěru.

Pátá etapa se bude věnovat vlivu příměsi druhotných surovin na mikrostrukturu cementového kompozitu. Dále si klade za cíl vyhodnocení výsledků práce a výběr optimální receptury s důrazem na fyzikálně mechanické vlastnosti.



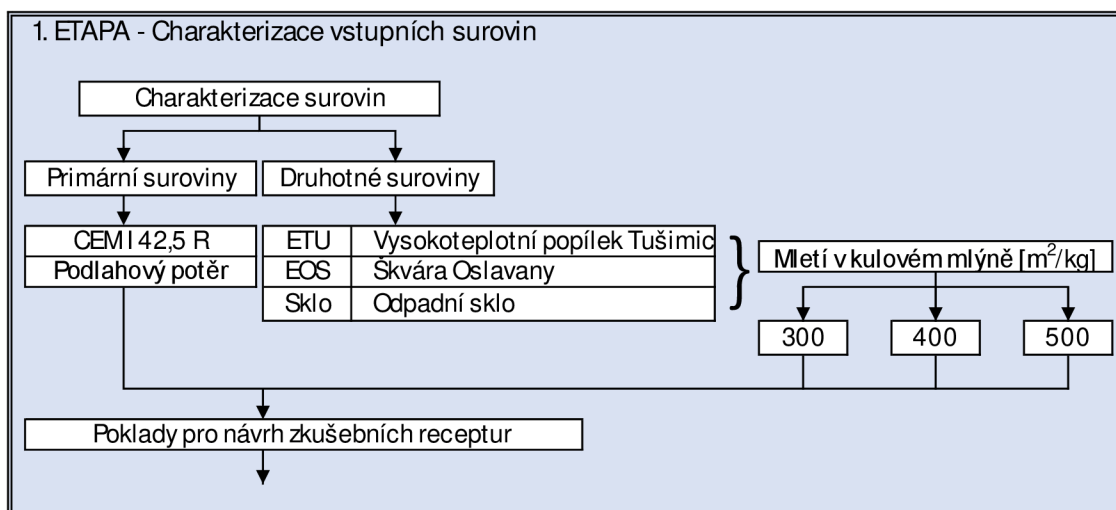
Obr. 3 Souhrnné schéma metodiky práce

Etapa 1 – Charakterizace a předúprava vstupních surovin

V rámci první etapy budou charakterizovány vstupní suroviny, jejich chemické a mineralogické složení a výběr fyzikálních charakteristik. Tato část bude zaměřená na suroviny použité v následujících etapách jako příměs do cementového kompozitu. Bude se jednat o druhotné suroviny, konkrétně vysokoteplotní popílek z tepelné elektrárny Tušimice, elektrárenskou škváru z haldy v Oslavanech a obalové sklo ze sklárny Vetropack.

Následně budou popsány prováděné zkoušky a postup předúpravy těchto surovin mletím v omílacím bubnu s diskontinuálním mletím na specifický měrný povrch 300, 400 a 500 m²/kg (± 50 m²/kg).

V další fázi budou vypracovány podklady pro návrh zkušebních receptur. Míra substituce cementu druhotnými surovinami bude navržena na základě zkušeností nabytých v rámci bakalářské práce na téma „Studium možnosti zvýšení odolnosti průmyslových podlah s využitím druhotných surovin“ [1].

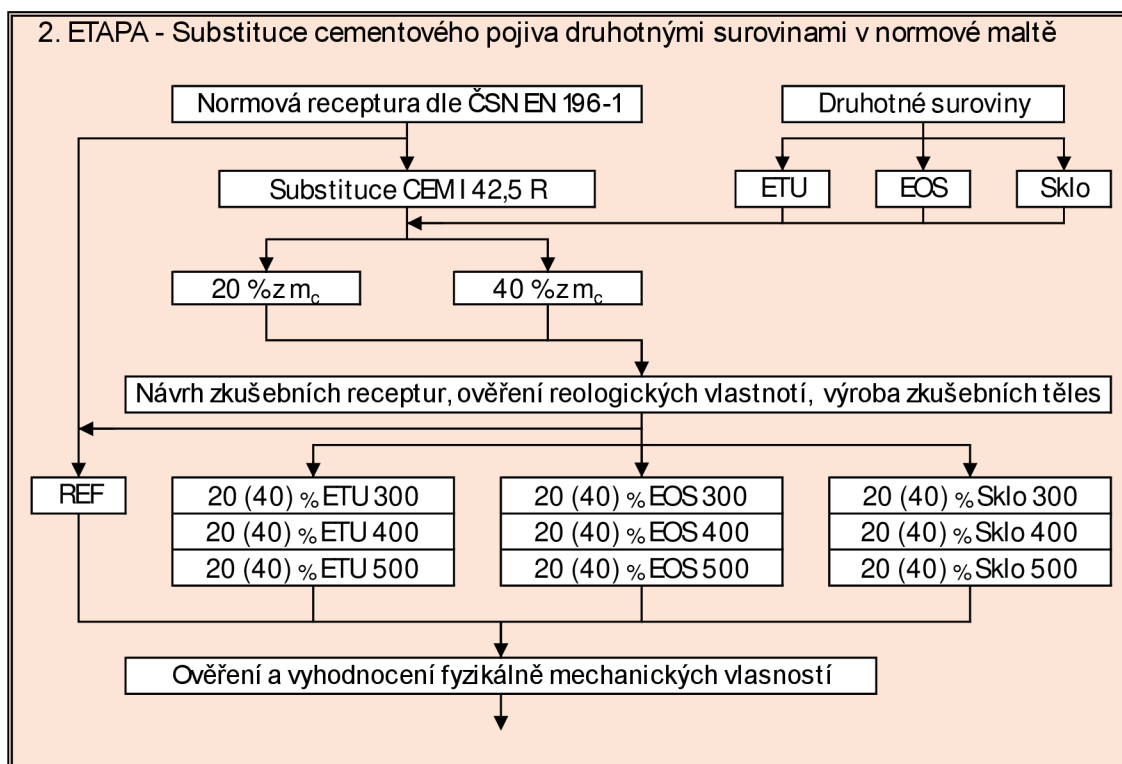


Obr. 4 Schéma Charakterizace a předúprava vstupních surovin

Etapa 2 – Substituce cementu druhotnými surovinami v normové maltě

V druhé etapě bude provedeno posouzení možnosti využití druhotných surovin jako částečné náhrady cementu. Pro tento účel bude vyrobena referenční receptura dle normy ČSN EN 196-1 a modifikací této receptury bude proveden návrh a výroba celkem 20 zkušebních receptur. Budou použity celkem tři druhotné suroviny s rozdílnými fyzikálními i chemickými vlastnostmi, každá o celkem třech různých měrných povířích. Těmito surovinami bude substituován cement v míře 20 a 40 hm% cementu. Vodní součinitel bude ponechán, je předpoklad, že se na zpracovatelnosti čerstvé malty projeví rozdílná nasákavost jednotlivých druhotných surovin.

Všechna zkušební tělesa budou uložena v laboratorních podmínkách pod igelitovou folií a budou na nich provedeny zkoušky pevnosti po 3, 7, 28 a 90 dnech zrání.



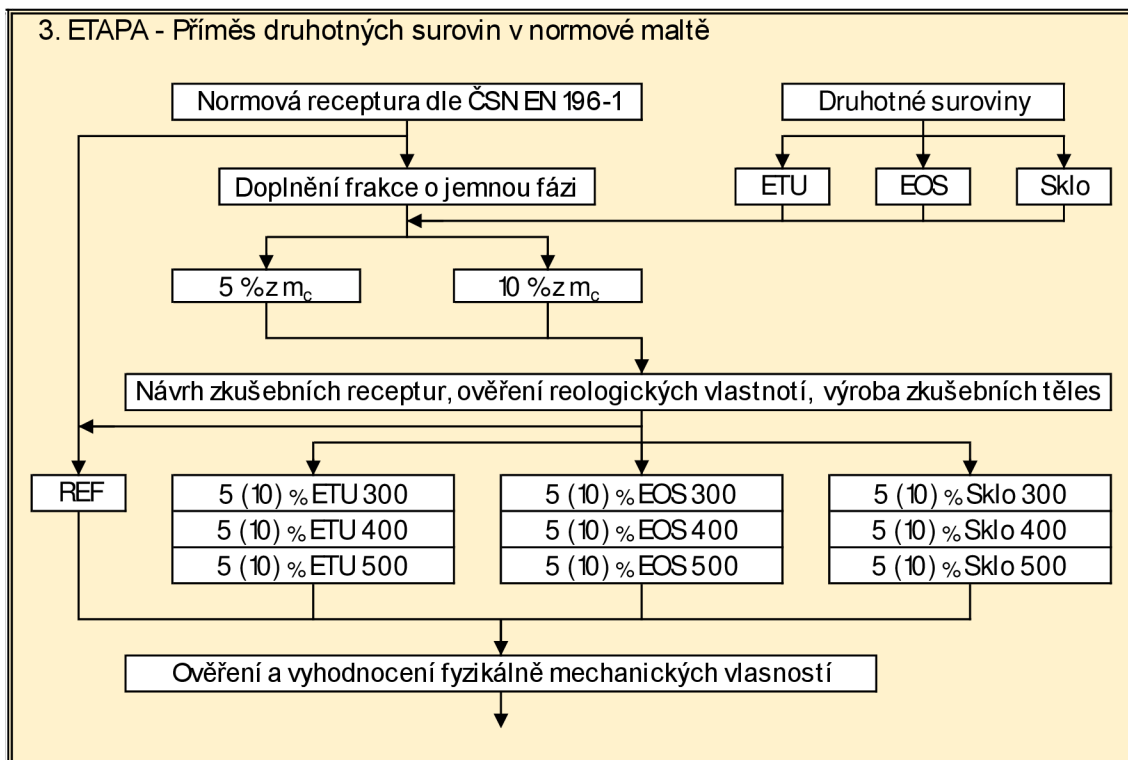
Obr. 5 Schéma Substituce cementu druhotnými surovinami v normové maltě

Etapa 3 – Příměs druhotných surovin v normové maltě

Ve třetí etapě bude provedeno doplnění poznatků z druhé etapy. V této etapě bude posouzen vliv druhotných surovin jako příměsí I. typu, tedy jemnozrnné inertní příměsí.

Budou vyrobena referenční tělesa dle normy ČSN EN 196-1 a modifikací normové směsi bude proveden návrh a výroba celkem 20 zkušebních receptur. Tentokrát bude poměr vstupních složek zanechán a dojde k příměsí druhotných surovin v dávkce 5 a 10 hm% cementu. Bude provedeno adekvátní navýšení vodního součinitele o 5 respektive 10 hm% záměsové vody. Dle předpokladu budou mít zkušební tělesa hutnější strukturu, což může vést k navýšení pevností.

Všechna zkušební tělesa budou uložena v laboratorních podmínkách ve vodním prostředí a budou na nich provedeny zkoušky pevnosti po 7 a 28 dnech zrání.



Obr. 6 Schéma Příměs druhotných surovin v normové maltě

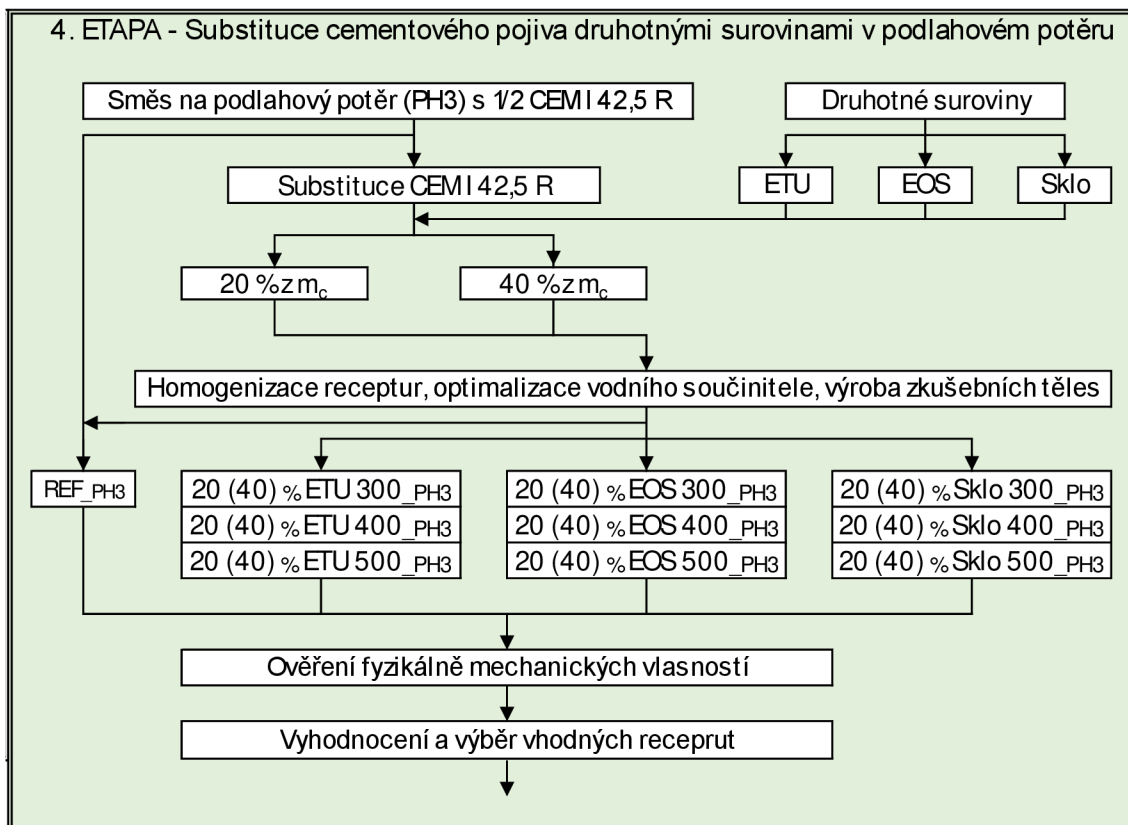
Etapa 4 - Substituce cementu druhotnými surovinami v podlahovém potěru

Ve čtvrté etapě bude provedeno posouzení možnosti využití druhotných surovin jako částečné náhrady cementu ve specifické stavební hmotě. Pro tyto účely bude vybrán vysokopevnostní podlahový potěr (dále PH3) na cementové bázi od renomovaného českého výrobce stavebních hmot.

Modifikací referenční receptury formou částečné náhrady cementu druhotnými surovinami (v míře 20 a 40 hm% cementu) bude připraveno celkem 20 zkušebních receptur. Pro dosažení optimálního promísení referenční směsi i ostatních zkušebních hmot, budou v suchém stavu míseny pomocí vertikálního šnekového homogenizátoru.

Vodní součinitel bude pro každou zkušební recepturu zvolen tak, aby konzistence čerstvého betonu byla vždy odpovídající referenční hmotě. Zkušební tělesa budou vyrobená v souladu s technologickými listy výrobce podlahového potěru.

Všechna zkušební tělesa budou uložena v laboratorních podmínkách pod igelitovou folií a budou na nich provedeny zkoušky pevnosti po 3, 7 a 28 dnech zrání.

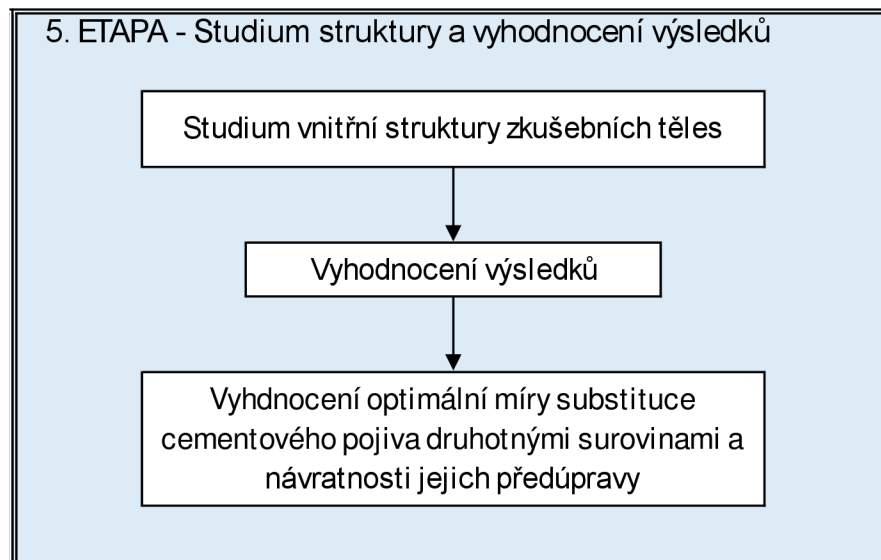


Obr. 7 Schéma Substituce cementu druhotnými surovinami v podlahovém potěru

Etapa 5 – Studium struktury a vyhodnocení výsledků

V páté etapě bude provedeno posouzení vlivu příměsí druhotných surovin na mikrostrukturu specifického cementového kompozitu.

Dále bude provedeno vyhodnocení výsledků práce a bude vybrána optimální receptura s důrazem na fyzikálně mechanické vlastnosti výsledného kompozitu.



Obr. 8 Schéma Studium struktury a vyhodnocení výsledků

V. METODIKA ZKOUŠENÍ

Prováděné zkoušky na surovinách

Chemické složení

Chemické složení vysokoteplotního popílku bylo stanoveno ve zkušební laboratoři ALS Czech Republic, s.r.o. Složení škváry bylo stanoveno ve zkušební laboratoři VUSTAH, a.s. Složení obalového skla bylo stanoveno ve zkušební laboratoři Labtech s.r.o.

Měrná hmotnost

Měrná hmotnost surovin byla stanovena pomocí héliového pyknometru AccuPyc II 1340 Pycnometer ve výzkumném centru AdMaS. Jedná se o velmi přesnou metodu měření pomocí změny objemu hélia (nebo jiného plynu).

Měrný povrch

Jemnost mletí všech druhotných surovin byla stanovena permeabilní metodou dle Blainova přístroje v souladu s ČSN EN 196-6. Vyjádření měrného povrchu vychází z odečteného času, který je zapotřebí k prosátí definovaného množství vzduchu lůžkem ztuhlého sypkého materiálu. Pro stanovení byl použit přístroj ZEB MAXAM PC Blain Star ve výzkumném centru AdMaS.

Distribuce velikosti částic a granulometrie

Zrnitost druhotných surovin a cementu byla stanovena metodou Laserové difrakční analýzy pomocí zařízení Malvern Mastersizer 2000 ve výzkumném centru AdMaS. Při této zkoušce jsou částice prozařovány laserovým paprskem, který se v kyvetě se vzorkem rozptyluje. Díky částicím vzorku dochází k ohybu (difrakci) laserového paprsku. Úhel ohybu světla je nepřímo úměrný velikosti částice.

Nasákavost druhotných surovin

Nasákavost surovin je jednou ze základních charakteristik. Byla stanovena pro ověření změny nasákavosti jednotlivých druhotných surovin v závislosti na jemnosti mletí. Principem zkoušky je ponechání předem definovaného množství suroviny v destilované vodě po dobu minimálně 24 hodin a následném přefiltrování suspenze přes mokré filtrační papír (Obr. 9). Nasákavost byla stanovena jako rozdíl hmotností suché a nasáklé suroviny.



Obr. 9 Filtrování jednotlivých surovin během zkoušky nasákavosti

Úprava surovin mletím

Pro mletí druhotných surovin byl vybrán omílací buben pro diskontinuální mletí OM-20 (fa BRIO Hranice) ve výzkumném centru AdMaS, který je přímo určen pro úpravu surovin v laboratořích a zkušebnách stavebních hmot. Zvolený mlýn je limitován maximální velikostí zrna 4 mm, proto byly některé suroviny předupraveny v čelistovém drtiči BB 200 (fa Retsch) na 0-3 mm.

Otáčky bubnu byly vždy nastaveny na 49 ot./min. a navážka mleté suroviny vždy představovala 5 kg. Tento režim byl stanoven jako optimální pro daný typ mlýnu počítačovým modelováním (Obr. 10).



Obr. 10 Model omílacího bubnu s virtuálním materiálem [Výzkumná zpráva TAČR TA04010143-2016V001]

Pro minimalizování proměnných byla doba vysypávání mlýna stanovena na 10 minut pro každé mletí. Jedinou proměnnou pro dosažení správného měrného povrchu byl čas mletí. Minimální možný čas mletí byl 5 minut.

Homogenizace suchých hmot

Pro dosažení dokonalého rozmísení zkušebních hmot v suchem stavu byl použit vysoce účinný vertikální šnekový homogenizátor HV50 od firmy Pharmix.

Zkoušky prováděné na zkušebních hmotách

Stanovení konzistence s použitím střešacího stolku

Tato zkouška určená primárně pro malty se řídí normou ČSN EN 1015-3. Podstatou zkoušky je hodnota rozlití malty, která se získá změřením průměru rozlitého vzorku čerstvé malty. Zkouška se provádí na dvou zkušebních vzorcích. Liší-li se jednotlivé hodnoty rozlití od jejich průměrné hodnoty o více než 10 %, zkouška se opakuje. Výsledkem je průměrná hodnota rozlití v mm, zaokrouhlená na 5 mm.

Stanovení počátku tuhnutí a tvrdnutí čerstvého betou

Zkouška byla prováděna dle normy ČSN EN 196-3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti. Zkouška byla prováděna pomocí automatických měřicích zařízení Vicamatic 2 ve výzkumném centru AdMaS.

Počátek tuhnutí a tvrdnutí se stanovuje jako doba od přidání záměsové vody do směsi, až do chvíle, kdy se jehla vpichovaná do zkušebního vzorku zastaví v normou stanovených mezích ode dna nádoby.

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku

Pevnost v tahu za ohybu a tlaku dle normy ČSN EN 13892-2 je jednou z normou stanovených zkoušek přímo pro potěrové systémy. Zkouška se provádí na zkušebních trámcích o rozměrech 160×40×40 mm. Nejprve se stanoví pevnost v tahu za ohybu ze zatížení, které vede k porušení zkušebního tělesa při zatížení, vyvozeném v jeho středu. Dvě poloviny zlomeného zkušebního tělesa se potom použijí pro stanovení pevnosti v tlaku. Každá polovina se zkouší při zatížení tlakem, rovnoměrně rozloženém po části zlomeného tělesa. Pevnost v tlaku se vypočítá ze zatížení, které vede k porušení tělesa.

Objemová hmotnost v čerstvém a zatvrdlém stavu

Objemová hmotnost čerstvé malty či podlahového potěru byla stanovena dle normy ČSN EN 12350-6, kdy zhutněná čerstvá hmota byla vážena přímo ve zkušebních formách.

Objemová hmotnost ztvrdlé malty či podlahového potěru byla stanovena dle normy ČSN EN 12390-7 přičemž byla použita hmotnost zkušebního tělesa v laboratorních podmínkách a rozměry pomocí posuvného měřítka.

Studium struktury rentgenovým tomografem

Vnitřní mikrostruktura zkušebních vzorků byla studována pomocí rentgenového (RTG) tomografu GE Phoenix v|tome|x m 300, ve výzkumném centru AdMaS. Tato metoda je založená na prozařování vzorku z nejrůznějších úhlů v jedné rovině, čímž vznikne zpravidla několik set projekcí. Pomocí výkonného počítače, který je nedílnou součástí RTG tomografu, je zrekonstruován plošný řez zkoumaným objektem.

Metodika výroby a uložení zkušebních těles

Vzhledem k tomu, že návrh surovinových receptur pro výrobu zkušebních těles v druhé a třetí etapě bude prováděn dle normy ČSN EN 196-1, bude z této normy přejata i metodika výroby (Tab. 3).

Tab. 3 Metodika výroby zkušebních těles

| Míchání malty dle ČSN EN 196-1 | |
|--|---------|
| Pracovní úkon | čas [s] |
| Vnesení cementu do míchačky a její zapnutí | 0 |
| Vmísení záměsové vody | 0–30 |
| Vmísení písku | 30–60 |
| Míchání vysokou rychlostí | 60–90 |
| Setření malty z lopatek a stěn míchačky | 90–105 |
| Odpočívání směsi | 105–180 |
| Míchání vysokou rychlostí | 180–240 |

Uložení zkušebních těles se bude odvíjet od jednotlivé etapy. Ve třetí etapě budou zkušební tělesa po jednou dni zrání odformována a uložena ve vodě v souladu s normou ČSN EN 196-1.

S ohledem na charakter stavební hmoty použité v rámci čtvrté etapy, tedy podlahového potěru, je uložení ve vodním prostředí vyhodnoceno jako nevhodné. Proto budou zkušební tělesa po jednom dni zrání odformována, uložena v laboratorních podmínkách pod igelitovou fólií a během prvního týdne zrání pravidelně ošetřována vodou. Stejný způsob ošetřování a uložení zkušebních těles jako ve čtvrté etapě bude zvolen i v etapě druhé. Zkušební tělesa určená pro stanovení mechanických vlastností budou normové trámečky o rozměrech 160×40×40 mm.

VI. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4. ETAPA 1 – Charakterizace a předúprava vstupních surovin

Prvním krokem experimentální části byl výběr surovin. Primární suroviny pro druhou a třetí etapu jsou dány normou ČSN EN 196-1. Pro potřeby čtvrté etapy byla zvolena již komerčně dostupná směs vysokopevnostního podlahového potěru na cementové bázi.

Dále byly vybrány tři druhotné suroviny. Jednalo se o elektrárenský vysokoteplotní popílek z prvního elektroodlučovače elektrárny Tušimice, elektrárenskou škváru z haldy v Oslavanech a obalové sklo ze sklárny Vetropack. Na všech druhotných surovinách bylo třeba stanovit chemické složení, měrnou hmotnost a upravit měrný povrch na požadovanou mez jemnosti. Doplňkově byla stanovena u pomletých druhotných surovin nasákavost.

4.1 Vstupní suroviny

4.1.1 Primární suroviny ČSN EN 196-1

Norma ČSN EN 196-1 stanovuje normovou maltu jako směs tří složek normalizovaný písek: cement: voda v poměru 3: 1: 0,5.

Cement

Pro experimentální část byl zvolen cement CEM I 42,5 R.

Normalizovaný písek

Normalizovaný písek CEN je normou stanoven jako přírodním křemičitým pískem s převážně zaoblenými částmi s obsahem oxidu křemičitého minimálně 98 % hmotnosti.

4.1.2 Podlahový potěr

Pro potřeby této práce byl zvolen vysokopevnostní podlahový potěr od firmy Betosan s r.o., která dodala hotovou směs na potěr v upravené verzi. Suchá směs byla dodána v homogenním stavu, ale pouze s poloviční dávkou pojiva CEM I 42,5 R. Zároveň výrobce dodal i složení potěrové směsi (Tab. 4), ale z důvodu udržení know-how není uvedeno přesné dávkování jednotlivých složek.

Tab. 4 Složení suché směsi na vysokopevnostní podlahový potěr dodané výrobcem

| Receptura podlahového potěru | | |
|--------------------------------|---------------------|------|
| Surovina | Dávka – rozmezí [%] | |
| Portlandský cement CEM I | 28 | 32 |
| Elektrárenský popílek Počerady | 7 | 8 |
| Štěrkodrt' 4/8 mm | 12 | 16 |
| Křemenný písek 0,1 - 0,6 mm | 6 | 10 |
| Křemenný písek 0,6 - 1,0 mm | 6 | 10 |
| Křemenný písek 1,0 - 4,0 mm | 10 | 15 |
| Jemně mletý vápenec | 3 | 5 |
| Polypropylenová vlákna | 0,04 | 0,06 |
| Křemičité úlety | 1,5 | 1,8 |
| Hlinitanový cement | 9 | 14 |
| Přísada pucolánového typu | 1,5 | 2 |
| Odpěňující přísada | 0,2 | 0,3 |
| Superplastifikátor | 0,5 | 0,8 |
| Zpomalující přísada | 0,4 | 0,7 |

4.1.3 Druhotné suroviny

V rámci experimentální práce byly vždy použity tři druhotné suroviny (popílek, škvára a sklo). Volba těchto konkrétních druhotných surovin proběhla na základě poznatků nabytých v rámci teoretické části této práce.

Před výrobou samotných zkušebních těles bylo u všech druhotných surovin stanoveno chemické složení a následně byly upraveny mletím na specifické měrné povrchy. Cílem bylo získat od každé druhotné suroviny tři hmoty o rozdílném měrném povrchu 300, 400 a 500 m²/kg (± 50 m²/kg). V Tab. 5 jsou uvedeny vstupní fyzikální charakteristiky a měrný povrch jednotlivých druhotných surovin dosažený po mletí.

Tab. 5 Použité druhotné suroviny, jejich vstupní fyzikální charakteristika a měrných povrch po mletí

| Surovina | Označení | Měrná hmotnost [kg/m ³] | Frakce před mletím [mm] | Měrný povrch [m ² /kg] | | |
|---------------------|----------|--|----------------------------|--------------------------------------|-----|-----|
| Popílek Tušimice | ETU | 2100 | Na síť 0,063 > 62 % | 348 | 450 | 530 |
| Škvára Oslavany | EOS | 2610 | 0–8 | 298 | 410 | 530 |
| Obalové sklo | Sklo | 2560 | 0–32 | 300 | 400 | 541 |

Popílek (ETU)

Elektrárna Tušimice disponuje třemi elektroodlučovači. Nejmenší množství popílku o nejjemnější frakci se zachytává na třetí odlučovači (dále označovaný ETU 03). Tento

popílek měl měrnou hmotnost $2\,400\text{ kg/m}^3$, a v surovém stavu nabýval jeho měrný povrch hodnoty $636\text{ m}^2/\text{kg}$. Takto vysoká hodnota měrného povrchu značně převyšuje požadovaný rozsah, zároveň je ETU 03 nejdražší a nejméně dostupný. Proto nebyl pro další aplikaci využíván. Pro vyhodnocení efektivity mletí popílku byl použit popílek se vysokým zastoupením jemných částic z druhého elektroodlučovače stejné elektrárny (dále označovaný ETU 02). Tento popílek měl měrnou hmotnost $2\,250\text{ kg/m}^3$, bez úpravy mletím byla hodnota jeho měrného povrchu $473\text{ m}^2/\text{kg}$. Popílek z prvního odlučovače (dále označovaný ETU 01) měl měrnou hmotnost $2\,100\text{ kg/m}^3$, a ještě před mletím dosahoval měrného povrchu $266\text{ m}^2/\text{kg}$.

Tab. 6 Fyzikální charakteristiky popílku elektrárny Tušimice z jednotlivých elektroodlučovačů

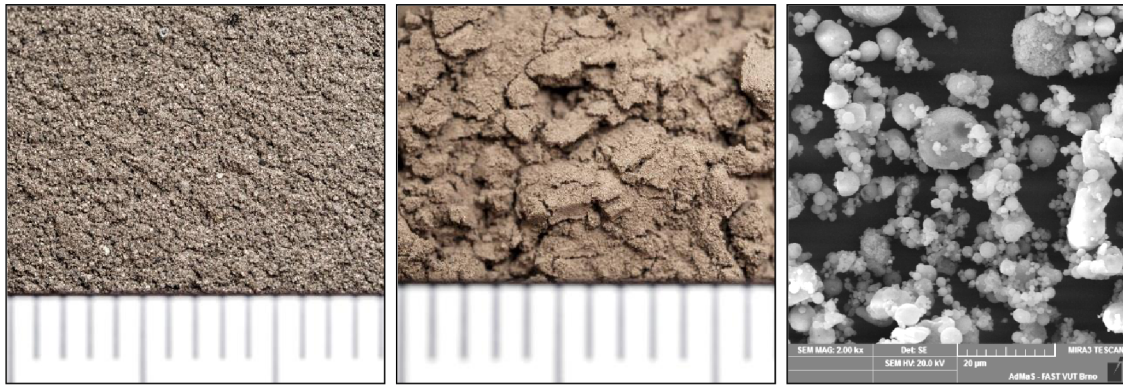
| Popílek Tušimice | | | |
|---------------------|----------|---------------------------------------|--|
| Původ | Označení | Měrná hmotnost [kg/m^3] | Měrný povrch [m^2/kg] |
| 1. Elektroodlučovač | ETU 01 | 2 100 | 266 |
| 2. Elektroodlučovač | ETU 02 | 2 250 | 473 |
| 3. Elektroodlučovač | ETU 03 | 2 400 | 636 |

Jako částečná náhrada cementu do betonu byl použit popílek ETU 01. Na prvním odlučovači je zachyceno převážné množství popílku vzniklého při spalování hnědouhelného prachu a zároveň je frakce popílku poměrně kolísavá. Zbytek popílku na síti $0,063\text{ mm}$ byl $> 62\%$. Proto byl popílek z prvního odlučovače zvolen jako vhodný pro předúpravu mletím. Chemické složení popílku ETU 01 (Tab. 7) odpovídá normou ČSN EN 450-1 + A1 stanoveným limitům. Celkový obsah oxidů SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 je $> 70\%$, obsah MgO je $< 4\%$, obsah CaO je $< 10\%$ a celkový obsah alkálií je $< 5\%$.

Tab. 7 Chemické složení popílku z elektrárny Tušimice

| Složení | Označení | SiO_2 | Al_2O_3 | Fe_2O_3 | SO_3 | CaO | MgO | K_2O | Na_2O | P_2O_5 |
|----------|----------|----------------|-------------------------|-------------------------|---------------|--------------|--------------|----------------------|-----------------------|------------------------|
| Tušimice | ETU | 50 | 23,4 | 14,5 | 0,26 | 3,42 | 1,72 | 1,07 | 0,29 | 0,16 |

U popílku ETU 01 bylo potřeba pro dosažení měrného povrchu $348\text{ m}^2/\text{kg}$ pouze pět minut mletí, což je zároveň minimální možný čas mletí použitého mlýnu. Popílek se i nadále velice rychle mlel a k dosažení měrného povrchu $450\text{ m}^2/\text{kg}$ postačovalo pouze 15 minut.



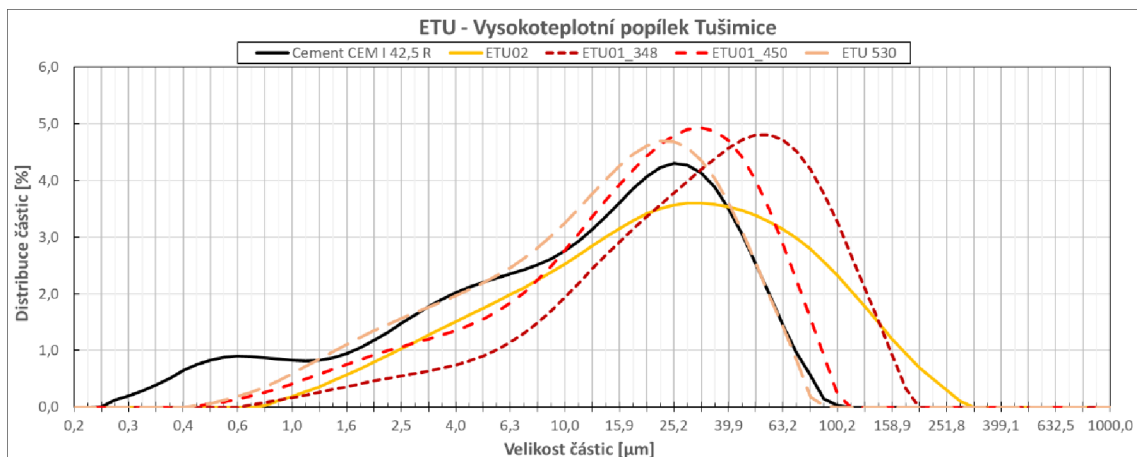
Obr. 11 Popílek ETU 01 (surový, mletý, mikroskopický snímek mletého)

Při snaze dosažení vyššího měrného povrchu však docházelo k výraznému kolísání měrného povrchu v čase. Například po 20 minutách byl měrný povrch popílku $492 \text{ m}^2/\text{kg}$, po 25 minutách $389 \text{ m}^2/\text{kg}$ a po 35 minutách $494 \text{ m}^2/\text{kg}$. Toto kolísání při delším čase mletí mohlo být zapříčiněno sbalkováním zrn popílku. Při opakovaném mletí se tento jev neprojevil a po 27 minutách mletí bylo dosaženo měrného povrchu $530 \text{ m}^2/\text{kg}$. Je tedy pravděpodobné, že první várka popílku byla nedostatečně vysušená, což negativně ovlivnilo chování popílku při delším čase mletí. Souhrnně jsou všechny popílky ETU 01 upravené na specifický měrný povrch shrnuty v Tab. 8. Dále budou upravené popílky ETU 01 značeny dle svého specifického měrného povrchu.

Tab. 8 Fyzikální parametry mletého Popílku ETU 01

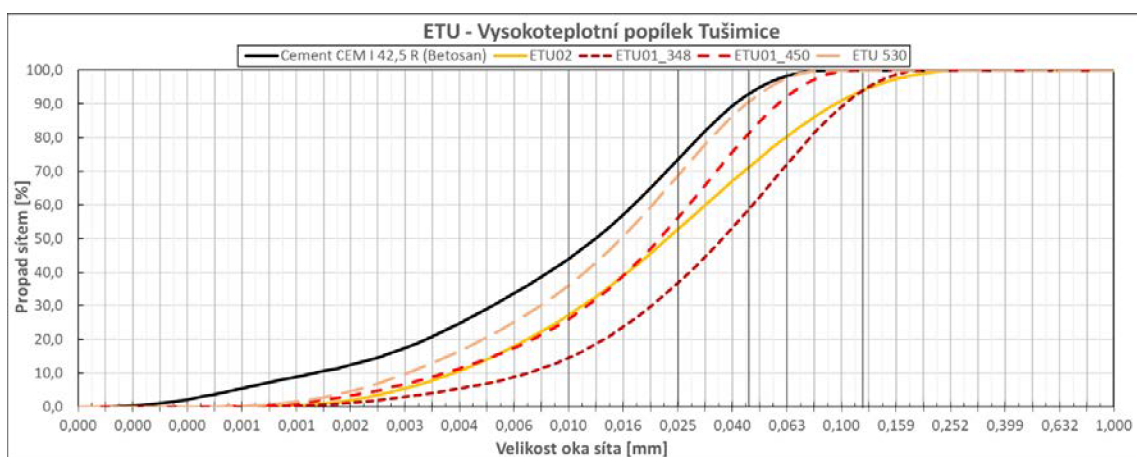
| Surovina | Značení | Měrná hmotnost [kg/m^3] | Doba mletí [min] | Měrný povrch [m^2/kg] |
|--------------------------|---------|--|---------------------|--|
| Popílek – Tušimice 01 | ETU 348 | 2 100 | 5 | 348 |
| | ETU 450 | | 15 | 450 |
| | ETU 530 | | 27 | 530 |

Záměrem mletí druhotných surovin bylo, aby výsledné směsi měly měrný povrch, ale i distribuci velikosti částic obdobnou jako referenční cement. Z grafického vyjádření distribuce velikosti částic mletého popílku ETU 01 je patrné, že s delším časem mletí se vliv na granulometrii snižoval. V Graf 1 je zároveň s popílky ETU 01 vyobrazena distribuce částic substituovaného cementu CEM I 42,5 R a surového popílku ETU 02. Je zřejmé, že zrnitost částic cementu a ETU 530 je velice podobná, cement má pouze větší zastoupení částic $0,25\text{-}1 \text{ }\mu\text{m}$. Téměř totožný je 50 % kvantil u ETU 02 a ETU 450, přes výrazně vyšší zastoupení hrubozrnných částic u ETU 02 jsou tyto dva popílky nejbliže přímému srovnání.



Graf 1 Distribuce velikosti částic mletého popílku ETU 01, popílku ETU 02 a cementu CEM I 42,5 R

Z křivky zrnitosti (Graf 2) je zřejmé, že žádný z upravených popílků nemá takové zastoupení jemnozrnných částic jako referenční cement. Víceméně všechny popílků, i nemletý ETU 02, mají podíl nejjemnějších částic totožný, mezi 0,5 a 1 µm. Je pravděpodobné, že se jedná o limitní jemnost mletí popílku, které je možné dosáhnout pomocí použitého mlýnu.



Graf 2 Křivka zrnitosti mletého popílku ETU 01, popílku ETU 02 a cementu CEM I 42,5 R

Škvára (EOS)

Jako další druhotná surovina byla použita elektrárenská škvára z haldy vlastněné společností Prefa Brno a.s., kde se nacházejí velké deponie této odpadní látky, což představuje značnou ekologickou zátěž, ale zároveň potenciální surovinu pro využití ve stavebnictví.

Škvára Oslavany se na haldách nachází ve velmi rozmanitých frakcích. Pro potřeby této práce byla využita již vytřížená škvára ve frakci 0-8 mm. Měrná hmotnost škváry byla stanovena 2610 kg/m³. Dále bude škvára Oslavany označována EOS. Chemické složení

škváry uvedené v Tab. 9 udává, že celkový obsah oxidů SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 je dostačující. Celkový obsah alkálií je vyhovující.

Tab. 9 Chemické složení škváry z haldy v Oslavanech

| Složení | Označení | SiO_2 | Al_2O_3 | Fe_2O_3 | SO_3 | CaO | MgO | K_2O | Na_2O | P_2O_5 |
|-----------------|----------|----------------|-------------------------|-------------------------|---------------|------|-----|----------------------|-----------------------|------------------------|
| Škvára Oslavany | EOS | 51 | 22,44 | 0,86 | 1,11 | 4,37 | 1,7 | 3,32 | 1,77 | 0,34 |

Použitá škvára (Obr. 12) byla v mnohem větším rozmezí jemnosti částic než popílek a tomu také odpovídala potřebná příprava před mletím i samotný čas mletí. Škvára byla předupravena pomocí čelistového drtiče na frakci 0-3 mm a následně mleta. Pro dosažení měrného povrchu $298 \text{ m}^2/\text{kg}$ bylo potřeba 25 minut mletí a zbytek na síti 1,4 mm byl 2,03 %. Po 45 minutách mletí bylo dosaženo měrného povrchu $410 \text{ m}^2/\text{kg}$ se zbytkem 0,9 % na síti 1,4 mm.



Obr. 12 Škvára (surová, mletá, mikroskopický snímek mleté)

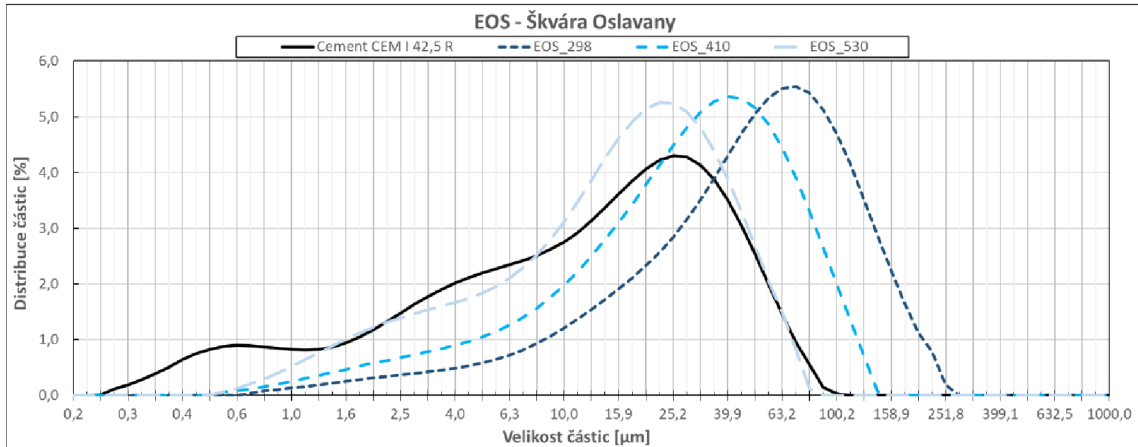
Po 60 minutách mletí byl měrný povrch škváry $530 \text{ m}^2/\text{kg}$, přičemž zbytek na síti 1,4 mm byl menší než 0,1 %. V Tab. 10 jsou souhrnně shrnuty všechny vzorky škváry, upravené na specifický měrný povrch. Dále již bude škvára EOS označována dle charakteristického měrného povrchu. Doba mletí potřebná pro úpravu EOS byla na rozdíl od ETU téměř úměrná rostoucímu měrnému povrchu.

Tab. 10 Fyzikální parametry mleté škváry EOS

| Surovina | Značení | Měrná hmotnost [kg/m^3] | Doba mletí [min] | Měrný povrch [m^2/kg] |
|-----------------|---------|--|---------------------|--|
| | EOS 298 | | 25 | 298 |
| Škvára Oslavany | EOS 410 | 2 610 | 45 | 410 |
| | EOS 530 | | 60 | 530 |

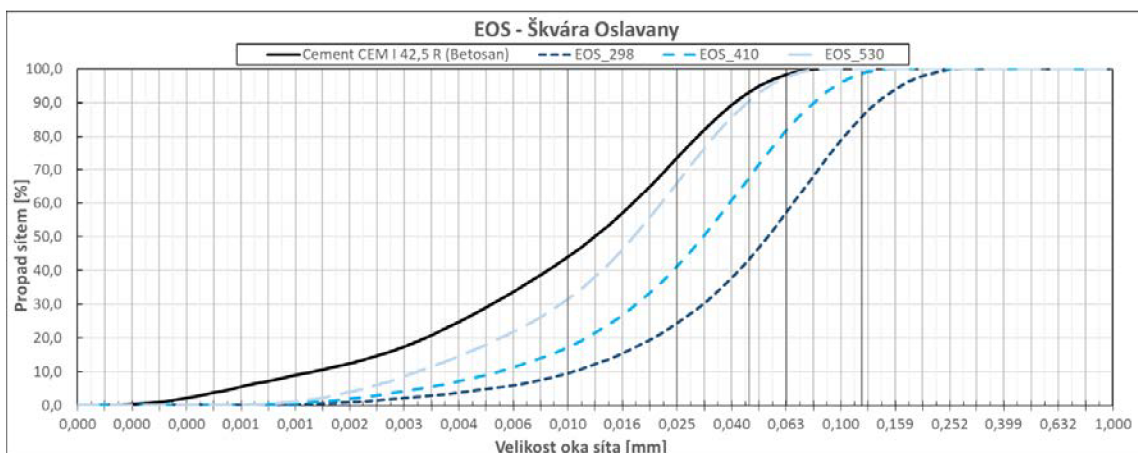
Také z Graf 3 lze vyčíst téměř lineární závislost mezi dobou mletí a měrným povrchem škváry. Avšak ani u nejjemněji mleté škváry (EOS 530) nebyl získán tak vysoký podíl jemnozrných částic jakým disponoval referenční cement. Při srovnání dvou příměsí

upravených na stejný měrný povrch, tedy popílku ETU 530 a škváry EOS 530, je zjevný totožný 50 % kvantil, i jejich velice podobná distribuce částí. Taktéž bylo prokázáno, že při mletí popílku i škváry bylo zastoupení nejjemnějších částic v rozmezí 0,5 a 1 μm stejné.



Graf 3 Distribuce velikosti částic mleté škváry Oslavany a cementu CEM I 42,5 R

Také Graf 4 potvrzuje, že podíl nejjemnějších částic škváry se s dobou mletí zvyšoval, ale limitní jemnost pro použitý kulový mlýn je zjevně 0,001 mm. Naopak průmyslově mletý cement má vyšší podíl jemných částic.



Graf 4 Křivka zrnitosti mleté škváry Oslavany a cementu CEM I 42,5 R

Obalové sklo

V České republice množství vytríděného a recyklovaného skla každoročně stoupá. Nicméně je to dáno i tím, že je produkováno stále více skleněného odpadu. Možné přínosy využití mletého skla jako příměsí do betonu jsou známy, a proto byl tento materiál také zahrnut mezi použité druhotné suroviny.

Drcený recyklát obalového skla pochází z kontrolované výroby společnosti Vetropack, což zaručuje konstantní vlastnosti v čase. Použito bylo čiré obalové sklo ve frakci

0-32 mm o měrné hmotnosti 2560 kg/m^3 . Po potvrzení pozitivního vlivu jemně mletého obalového skla použitého jako příměs do betonu by se pozornost při řešení výzkumných prací zaměřila na další typy skelných recyklátů. Předpokladem bylo, že sklo negativně neovlivní zpracovatelnost čerstvé směsi, jelikož má minimální nasákavost.

V Tab. 11 je uvedeno chemické složení stanovené u obalového skla. Vzhledem k tomu, že sklo obsahuje oxid křemičitý převážně v amorfní fázi, že jeho obsah dostatečný. Poměrně vysoký je celkový obsah CaO a také alkálií. Přesto vzhledem k jemnosti mletí, na kterou bude sklo upraveno, by neměla hrozit alkalicko-křemičitá reakce.

Tab. 11 Chemické složení obalového skla

| Složení | Označení | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | SO ₃ | CaO | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | P ₂ O ₅ |
|--------------|----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|------|------|------------------|-------------------|-------------------------------|
| Obalové sklo | Sklo | 69,73 | 1,76 | 0,41 | - | 9,96 | 2,29 | 0,88 | 12,2 | - |

Odpadní sklo Obr. 13 bylo z důvodu široké vstupní frakce (0-32 mm) předupraveno pomocí čelistového drtiče na frakci 0-3 mm. Pro dosažení měrného povrchu skla $300 \text{ m}^2/\text{kg}$ bylo potřeba 20 minut mletí. Skelný prášek o měrném povrchu $400 \text{ m}^2/\text{kg}$ byl získán po 45 minutách mletí a měrný povrch $541 \text{ m}^2/\text{kg}$ byl dosažen po 75 minutách. Po tomto čase byl zbytek na síti 1,4 mm $<0,02 \%$.



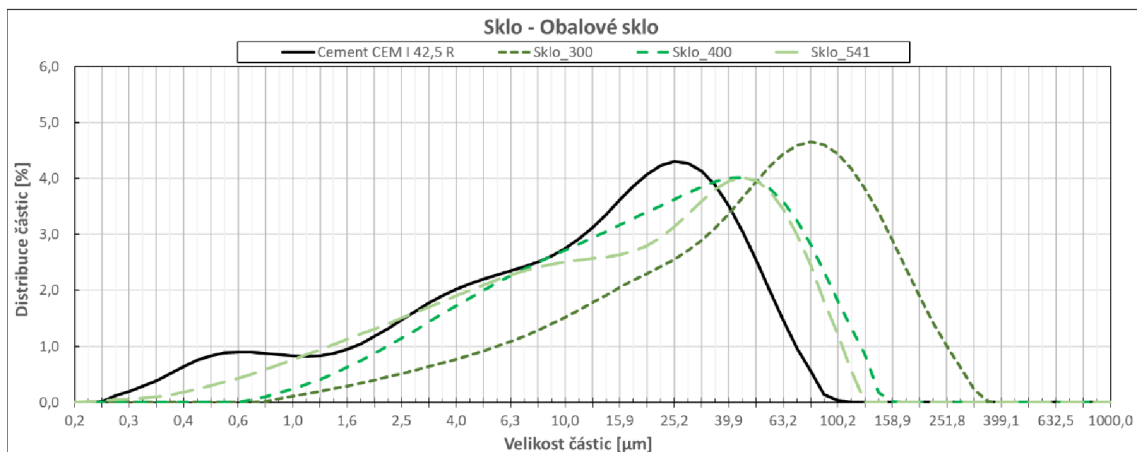
Obr. 13 Drcené obalové sklo (surové, mleté, mikroskopický snímek mletého)

V Tab. 12 jsou souhrnně shrnuty všechny vzorky mletého skla, upravené na specifický měrný povrch. Dále již budou označovány pouze jako Sklo s přívlastkem charakteristického měrného povrchu.

Tab. 12 Fyzikální parametry mletého odpadního Sklo

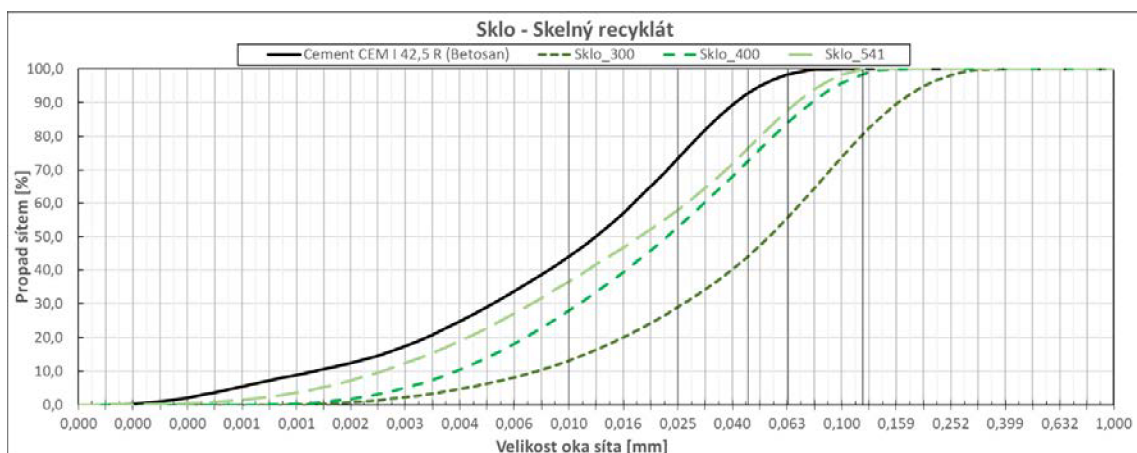
| Surovina | Značení | Měrná hmotnost [kg/m ³] | Doba mletí [min] | Měrný povrch [m ² /kg] |
|--------------|----------|--|---------------------|--------------------------------------|
| | Sklo 300 | | 20 | 300 |
| Obalové sklo | Sklo 400 | 2 560 | 45 | 400 |
| | Sklo 541 | | 75 | 541 |

Z Graf 5 a Graf 6 je zjevné, že mleté obalové sklo má širší rozsah distribuce velikosti částic než popílek i škvára. Po 75 minutách mletí (Sklo 541) byl získán nezanedbatelný podíl částic menších než 0,001 mm. Ve srovnání s referenčním cementem je zastoupení částic pod 0,001 mm stále podstatně menší.



Graf 5 Distribuce velikosti částic mletého obalového skla a cementu CEM I 42,5 R

I přes poměrně výrazně odlišný měrný povrch u Sklo 541 a Sklo 400 mají obě směsi totožný 50 % kvantil na síť o jemnosti 0,045 mm a liší se hlavně v zastoupení jemnozrnných částic pod 0,004 mm.

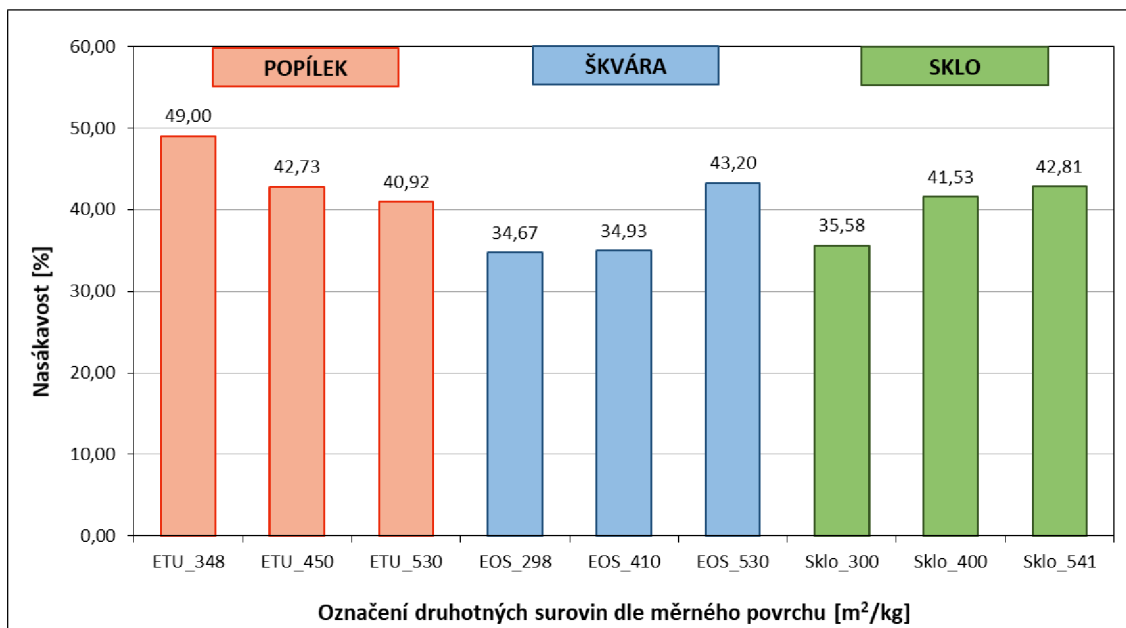


Graf 6 Křivka zrnitosti mletého obalového skla a cementu CEM I 42,5 R

Nasákavost druhotných surovin

Nasákavost surovin je jednou z hlavních vlastností ovlivňujících zpracovatelnost čerstvého betonu. Nasákavost nejenom druhotných surovin je závislá na měrném povrchu zm, jejich tvaru a pórovitosti. U všech tří druhotných surovin se nasákavost v závislosti na jemnosti mletí pohybovala v rozmezí 34-50 % (Graf 7). U popílku byla stanovena obecně nejvyšší nasákavost a s rostoucí jemností mletí klesala. Předpokládá se, že po kratší dobu mletý popílek si zachoval více částečně otevřených zm, které pojal větší množství vody (ETU 348 = nasákavost 49 %), než delší dobu mletý popílek

s vyšším podílem rozemletých částic (ETU 530 = nasákavost 40,9 %). Škvára disponuje větším podílem skelné fáze než popílek, díky tomu se vyznačovala nižší nasákavostí (EOS 298 = nasákavost 34,7 %), ale s rostoucí jemností částic narůstala i nasákavost (EOS 530 = nasákavost 43,2 %). Nejnižší předpokládaná nasákavost obalového skla díky vysokému podílu skelné fáze se nepotvrdila. U skelného prachu se však projevoval stejný trend jako u škváry, tedy že s rostoucím měrným povrchem (Sklo 300 = nasákavost 35,6 %) narůstalo množství adsorbované vody na povrchu zrn (Sklo 541 = nasákavost 42,8 %).



Graf 7 Nasákavost druhotných surovin v závislosti na jemnosti mletí

4.2 Podklady pro návrh zkušebních receptur

V první řadě bylo potřeba navrhnout zkušební receptury k čemuž byly využity zkušenosti nabyté v rámci bakalářské práce „Studium možnosti zvýšení odolnosti průmyslových podlah s využitím druhotných surovin“ [29] na kterou tato práce navazuje.

V rámci druhé a čtvrté etapy byly druhotné suroviny použity jako částečná náhrada cementu v míře 20 a 40 % z m_c . Toto dávkování bylo stanoveno na základě zkušeností získaných v rámci předešlého výzkum i s ohledem na informace nabyté v rámci teoretické části této práce.

Ve třetí etapě byly druhotné suroviny použity jako aditivum do normové malty, a to v míře 5 a 10 % z m_c . Sledován byl vliv příměsí druhotných surovin a jemnosti mletí, proto byla zvolena nižší dávka příměsí, tak aby nedošlo ke kompletní změně reologických vlastností.

5. ETAPA 2 - Substituce cementu druhotnými surovinami v normové maltě

Na základě poznatků nabytých v rámci první etapy byly navrženy zkušební receptury, ověřen vliv druhotných surovin a jemnosti mletí na reologické vlastnosti čerstvé malty. V další fázi byla vyrobena zkušební tělesa, na nichž byly stanoveny fyzikálně mechanické vlastnosti.

5.1 Zkušební receptury

Referenční receptura byla navržena dle normy ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu. Část 1: Stanovení pevností. [46]

Referenční malta byla připravena z 1 dílu cementu CEM I 42,5 R (450±2 g), tří dílů vysušeného normalizovaného písku CEN (1350±5 g) a 1/2 dílu pitné vody (225±1 g). Vodní součinitel (voda/cement) byl 0,5. [46]

Tab. 13 Seznam použitých receptur, jejich značení a míra substituce cementu

| Značení receptury | Druhotná surovina | Náhrada cementu [%] |
|-------------------|--------------------------|---------------------|
| REF | - | 0 |
| 20 % ETU 348 | Popílek – Tušimice 01 | 20 |
| 40 % ETU 348 | | 40 |
| 20 % ETU 450 | | 20 |
| 40 % ETU 450 | | 40 |
| 20 % ETU 530 | | 20 |
| 40 % ETU 530 | | 40 |
| 20 % ETU 02 | Popílek – Tušimice 02 | 20 |
| 40 % ETU 02 | | 40 |
| 20 % EOS 298 | Škvára – Oslavany | 20 |
| 40 % EOS 298 | | 40 |
| 20 % EOS 410 | | 20 |
| 40 % EOS 410 | | 40 |
| 20 % EOS 530 | | 20 |
| 40 % EOS 530 | | 40 |
| 20 % Sklo 300 | Obalové sklo – Vetropack | 20 |
| 40 % Sklo 300 | | 40 |
| 20 % Sklo 400 | | 20 |
| 40 % Sklo 400 | | 40 |
| 20 % Sklo 541 | | 20 |
| 40 % Sklo 541 | | 40 |

Ostatní zkušební receptury byly navrženy s ohledem k předepsanému dávkování surovin u referenční hmoty. Dávky jednotlivých druhotných surovin o specifickém měrném povrchu částečně nahradily pojivo v míře 20 a 40 % hmotnosti cementu z referenční receptury. Vodní součinitel byl zachován a díky tomu bylo možné

pozorovat změny konzistence a zpracovatelnosti cementové malty v čerstvém stavu. Výstupem byla jedna referenční hmota (REF) a celkem 20 s ní porovnávaných zkušebních receptur (Tab. 13).

5.1.1 Označení receptur

Zkušební receptury byly označeny v závislosti na míře substituce cementu, druhu použité příměsi a jejím specifickém měrném povrchu.

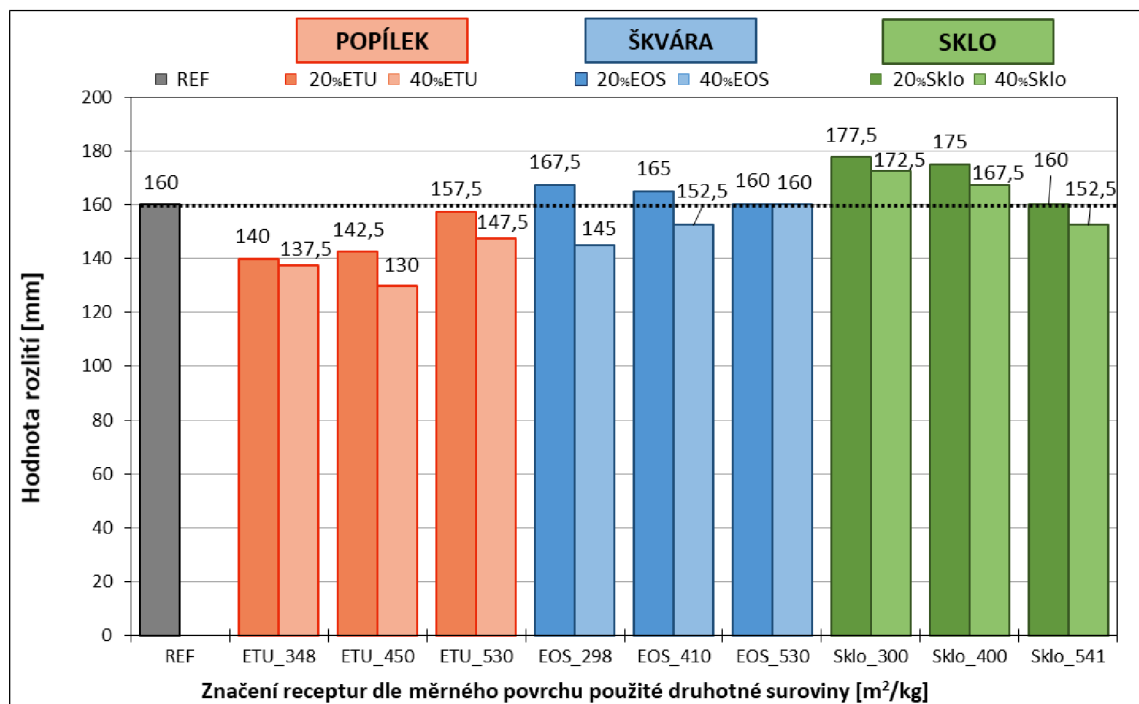
20 % ETU 348

- 20 % míra substituce cementu druhotnou surovinou,
- ETU druhotná surovina popílek,
- 348 jemnost mletí měřená Blainovým přístrojem [m^2/kg].

5.2 Vyhodnocení výsledků

5.2.1 Vliv jemnosti mletí přísad na zpracovatelnost

Byl potvrzen vliv jemně mletých druhotných surovin jako částečné náhrady cementu na zpracovatelnost čerstvé malty. Zároveň byly potvrzeny předpoklady o vlivu jednotlivých druhotných surovin (Graf 8).



Graf 8 Vliv jemnosti mletí druhotných surovin na rozlití na střešacím stolku

Referenční směs (REF) dosáhla rozlití na střešacím stolku 160 mm. Pro příklad směs s vyšší dávkou nejjemněji namletého popílku (40 % ETU 530 m²/kg) měla nižší rozlití 147,5 mm a zpracovatelnost byla naprosto odlišná (Obr. 14).



Obr. 14 Zkouška rozlitím u směsi REF a receptury 40 % ETU 530

U popílku se projevila vyšší nasákavost zrn ve srovnání s cementem, čerstvá směs byla mnohem tužší, hůř se míchala i vibrovala. Projevily se však u ní tixotropní vlastnosti a díky nim měly všechny směsi s popílkem rozlití blízké tomu referenčnímu.



Obr. 15 Zkouška rozlitím u receptury 40 % EOS 530 a 40 % Sklo 541

U vzorků obsahujících určitou příměs škváry se projevil její pozitivní vliv na rozlití i na samotnou zpracovatelnost. Pro příklad receptura s vyšší dávkou nejjemněji namleté škváry (40 % EOS 530 m²/kg) měla rozlití 160 mm, což je totožné rozlití jako u referenční směsi. Bylo prokázáno, že čerstvá hmota s přidavkem škváry zůstala poměrně tuhá. Zároveň však ve srovnání s popílky byla zpracovatelnost znatelně lepší (Obr. 15).

Přídavek skla zapříčinil nejlepší zpracovatelnost čerstvé hmoty. Rozlití čerstvé směsi s vyšší jemností použitého skla postupně klesalo a přibližovalo se referenčnímu. Nejvyššího rozlití 177,5 mm (oproti referenční směsi nárůst o 11 %) dosáhla směs s hrubě mletým sklem (Sklo 300) a nejmenšího rozlití 152,5 mm (4 % pokles ve

srovnání s referenční) poté směs s vyšší dávkou jemně mletého skla (40 % Sklo 541 m²/kg). Potvrdil se tak předpoklad, že mleté sklo bude minimálně nasákavé a jeho přidavkem se pozitivně ovlivní rozlití. Snižující se rozlití zapříčinil větší měrných povrch zrn a spotřeba většího množství vody na jejich smáčení. Je možné očekávat, že při vyšších dávkách než 40 % náhrady cementu hlavně sklem o nízkém měrném povrchu, by mohlo docházet ke krvácení.



Obr. 16 Zkouška rozlitím u receptury 40 % ETU 450 a 40 % ETU 02

Na Obr. 16 jsou srovnány rozdílné rozlití čerstvých malt s totožnou mírou substituce cementu popílkem ETU 450 a neupraveným popílkem ETU 02 z druhého elektrodlučovače o měrném povrchu 473 m²/kg. Jedná se o popílky o velice podobném měrném povrchu zrn, ale s velice rozdílným vlivem na zpracovatelnost. Ten může být zapříčiněn vyšším podílem hrubozrnných částic > 63 μm v případě ETU 02. Zároveň podle jeho vyšší měrné hmotnosti se dá předpokládat, že obsahuje vyšší podíl hutných zrn bez otevřených pórů, což vede k nižší nasákavosti a dosažení většího rozlití na střešacím stolku.

5.2.2 Vliv jemnosti mletí přísad na počátek tuhnutí a tvrdnutí

Na zpracovatelnost čerstvé směsi navazuje i doba, po kterou je ji možné zpracovávat. Doby počátku tuhnutí a tvrdnutí byly stanovovány pomocí automatických zařízení typu Vicat, Vicamatic 2.

Z hodnot v Tab. 13 vyplývá, že částečnou náhradou cementu druhotnými surovinami je možné výrazně ovlivnit počátek tuhnutí i tvrdnutí cementové malty. Přidavkem popílku došlo k urychlení tuhnutí, ale naopak, tvrdnutí bylo oddáleno. V případě vyšších dávek ETU bylo tuhnutí urychleno o téměř 30 % (40 % ETU 348), respektive dokonce o 42 % v případě receptury 40 % ETU 450. Jednalo se o receptury s nejnižším rozlitím, je tedy zřejmé, že u těchto záměsů došlo k největší spotřebě vody, a tudíž i při nižším obsahu cementu započala hydratace dříve. Naopak díky nižšímu obsahu cementu započalo

tvrdnutí u stejných receptur později, konkrétně o 32 %, respektive 30 % oproti referenční záměsi.

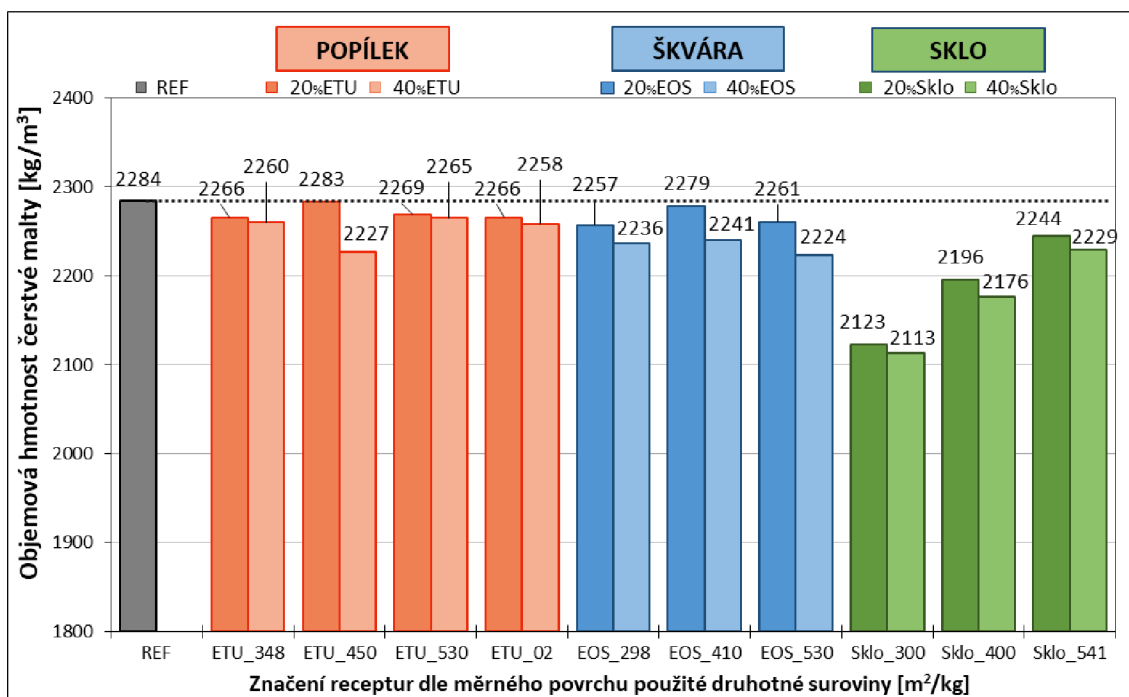
Tab. 14 Stanovené doby počátku tuhnutí a tvrdnutí

| Značení receptury | Počátek tuhnutí [min] | Počátek tvrdnutí [min] |
|-------------------|-----------------------|------------------------|
| REF | 169 | 311 |
| 20 % ETU 348 | 173 | 317 |
| 40 % ETU 348 | 120 | 410 |
| 20 % ETU 450 | 175 | 357 |
| 40 % ETU 450 | 98 | 405 |
| 20 % ETU 530 | 187 | 369 |
| 40 % ETU 530 | 171 | 403 |
| 20 % EOS 298 | 183 | 405 |
| 40 % EOS 298 | 195 | 495 |
| 20 % EOS 410 | 202 | 384 |
| 40 % EOS 410 | 219 | 411 |
| 20 % EOS 530 | 182 | 384 |
| 40 % EOS 530 | 215 | 453 |
| 20 % Sklo 300 | 199 | 341 |
| 40 % Sklo 300 | 231 | 355 |
| 20 % Sklo 400 | 173 | 437 |
| 40 % Sklo 400 | 197 | 379 |
| 20 % Sklo 541 | 165 | 357 |
| 40 % Sklo 541 | 182 | 376 |

Dle stanovených konzistencí nedocházelo u receptur obsahujících škváru a sklo k tak výrazné spotřebě záměsové vody, což se také odrazilo na zpomalení nejen počátku tvrdnutí jako u receptur s popílkem, ale také k oddálení počátku tuhnutí. Souhrnně jsou všechny stanovené časy počátku tuhnutí a tvrdnutí zkušebních receptur malt uvedeny v Tab. 14.

5.2.3 Vliv jemnosti mletí přísad na objemovou hmotnost

Vliv jemnosti mletí druhotných surovin na objemovou hmotnost čerstvé malty se jednoznačně projevil pouze v případě mletého obalového skla, kdy jednoznačně rostla objemová hmotnost s rostoucím měrným povrchem použité příměsi (Graf 17). Vliv měla nižší objemová hmotnost skla a s rostoucí jemností jeho zrn rostla zároveň hmotnost cementového kamene.

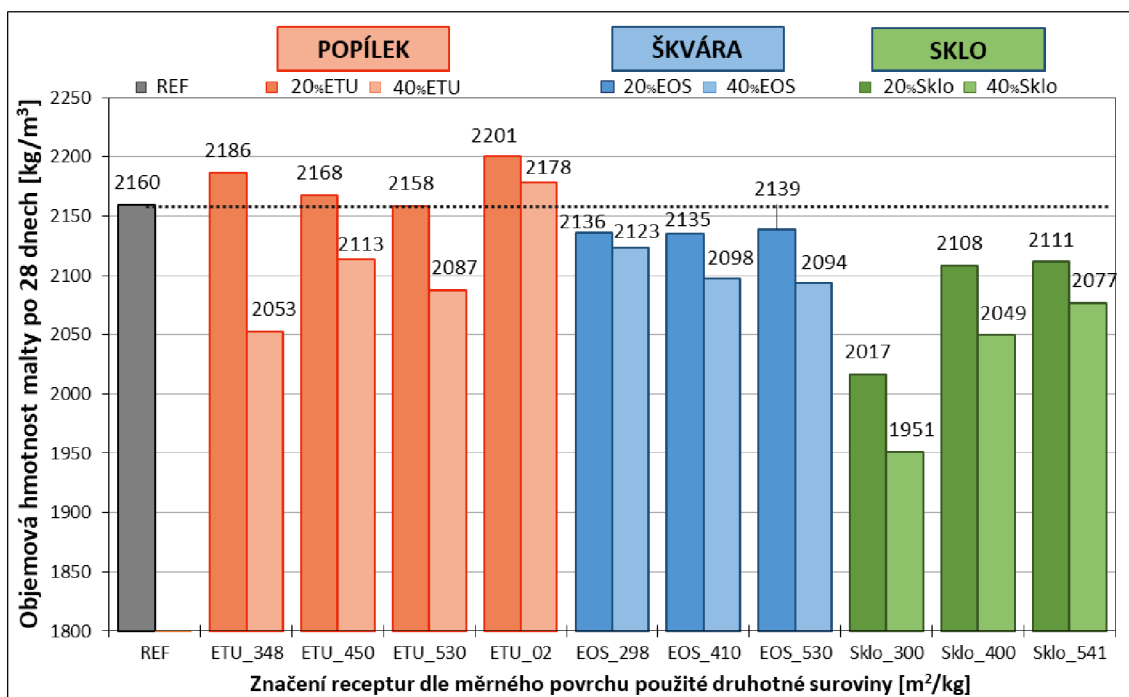


Graf 9 Vliv jemnosti mletí druhotných surovin na objemovou hmotnost čerstvé malty

V případě popílku i škváry se spíše jeví, že nejvyšší objemové hmotnost dosahovaly receptury s příměsí upravenou na střední měrný povrch (ETU 450 a EOS 410). Rozdíly mezi naměřenými hodnotami jsou velice malé, není tedy možné tyto výsledky považovat za směrodatné.

Je však zjevné, že přidavek všech druhotných surovin zapříčinil pokles objemové hmotnosti, což potvrzuje i fakt, že s vyšší dávkou příměsí se objemová hmotnost čerstvé malty snížila. Pravděpodobně na to má vliv i nejvyšší podíl jemných částic u suspendovaného cementu, ve srovnání se všemi použitými příměsími.

Objemová hmotnost zkušebních těles byla stanovena i po 28 dnech zrání (Graf 18). Potvrdila se většina poznatků zjištěných stanovením objemové hmotnosti v čerstvém stavu. Vliv jemnosti mletí druhotných surovin je nejpatrnější u vzorků obsahujících obalové sklo. Zároveň bylo prokázáno, že u všech zkušebních těles klesla objemová hmotnost s vyšší dávkou příměsí.



Graf 10 Vliv jemnosti mletí druhotných surovin na objemovou hmotnost ztvrdlé malty

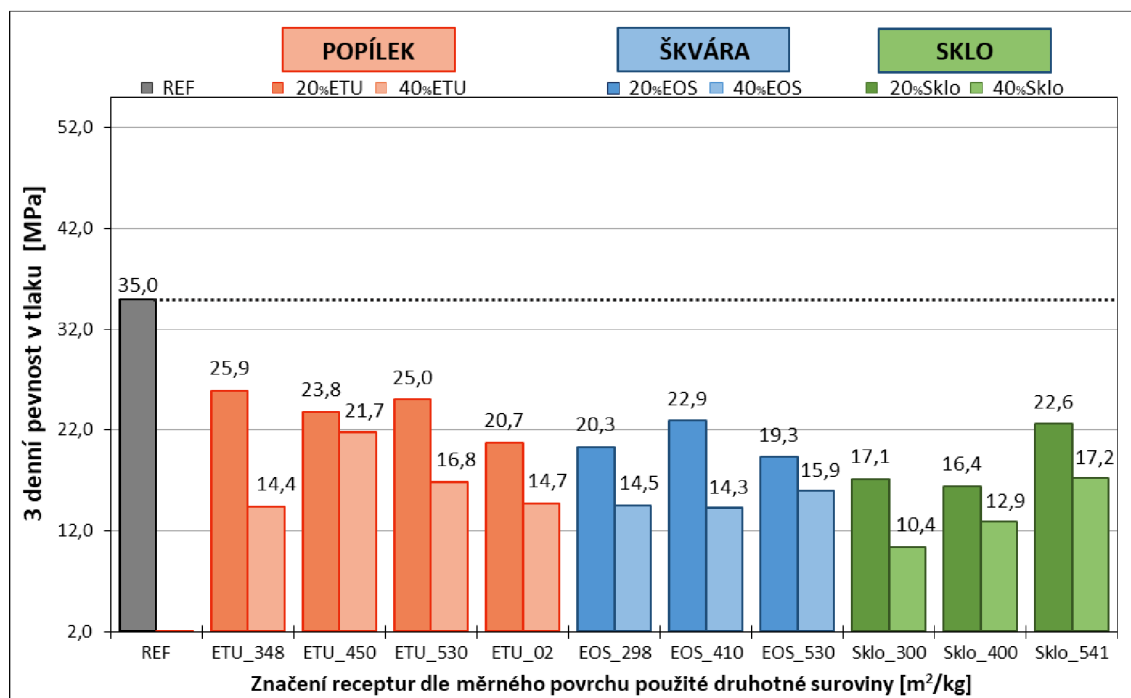
Objemová hmotnost vzorků receptur obsahujících nižší dávku popílku ETU 01 a obou receptur s ETU 02 dosáhla hodnot stejných nebo vyšších, než jakých dosáhla referenční receptura. Je to zapříčiněno vysokou hutností výsledného kompozitu. Vyšší objemovou hmotnost měly vzorky, které vykazovaly nižší konzistenci, tedy větší spotřebu záměsové vody. I přes přebytek záměsové vody u receptur s ETU 02 vykazovaly tyto vzorky nejvyšší objemovou hmotnost po 28 dnech zrání. To měla za následek hutnější struktura samotného popílku ve srovnání s ETU 01.

5.2.4 Vliv jemnosti mletí přísad na pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku je nejvíce sledovanou fyzikálně mechanickou vlastností v ztvrdlém stavu. Předpokladem bylo, že druhotné suroviny bez přídavku jakékoliv chemické přísady ovlivní krátkodobé pevnosti spíše negativně a jejich přínos se může projevit hlavně u dlouhodobých pevností. U třídních vzorků měla výrazně nejvyšší pevnost v tlaku referenční receptura (Graf 9). U většiny receptur s druhotnými surovinami byl patrný trend, lineární závislosti množství cementu ve směsi a pevnosti tlaku. U všech druhotných surovin bez výjimky bylo prokázáno, že s vyšší mírou substituce poklesla pevnost.

U vzorků s popílkem se projevilo trend snižující se pevností se zvyšujícím se měrným povrchem zrn použitého popílku. V případě receptury 20 % ETU 348 poklesly pevnosti o průměrně 25 % ve srovnání s referenční a při totožné náhradě 20 % ETU 530 byl naměřen pokles pevnosti o 52 %. Vzorky se škvárou dosahovaly při srovnání s popílkem nižších pevností. U škváry se při třídních pevnostech nepotvrdila závislost

mezi jemností mletí a pevností v tlaku. Naopak u vzorků obsahujících mleté sklo se již závislost mezi jemností mletí a pevností v tlaku projevila. S rostoucím měrným povrchem použitého skla rostla i pevnost v tlaku zkušebních těles. Avšak nejvyšší dosažená pevnost byla u receptury 20 % Sklo 541 a představovala pouze 65 % z referenční pevnosti. Nejnižší pevnost dosažená u vzorků s mletým sklem dokonce nedosáhla ani 30 % z referenční pevnosti.



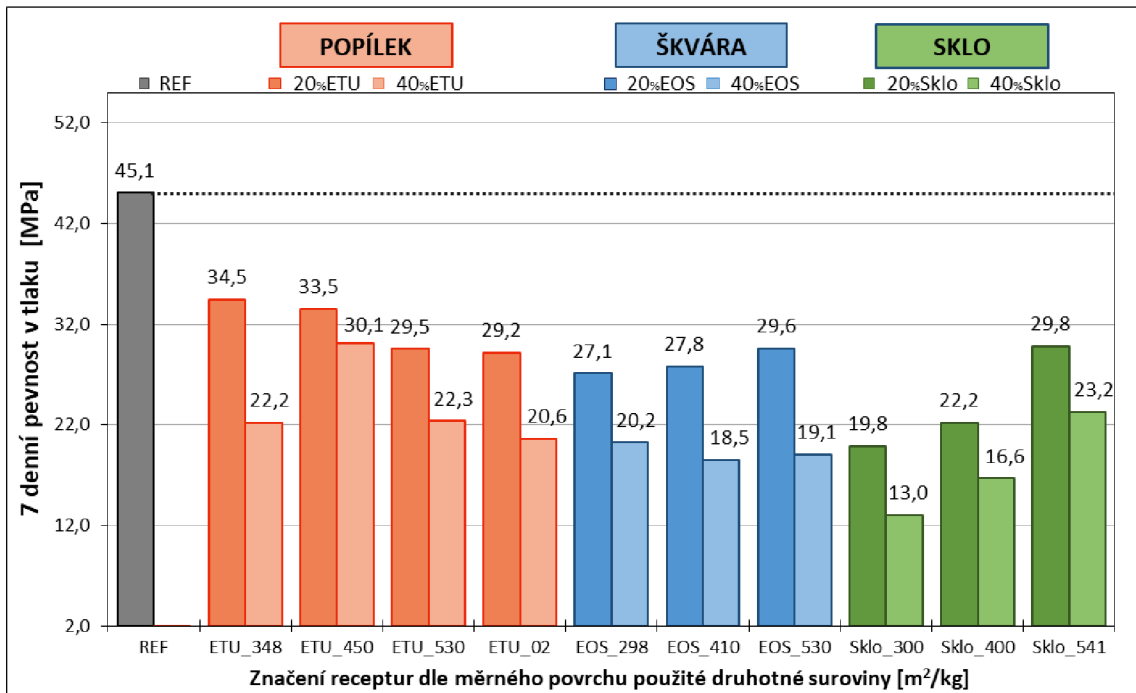
Graf 11 Pevnost v tlaku po 3 dnech zrání

Vzorky obsahující neupravený popílek ETU 02 dosahovaly nejnižších pevností v tlaku ze všech receptur s popílkem. Při porovnání receptur s popílkem o obdobném měrném povrchu, tedy ETU 450 a ETU 02, byl při nižší dávce příměsí rozdíl v pevnosti v tlaku 3 MPa a při vyšší dávce 7 MPa, což představuje 30 % z pevnosti receptury 40 % ETU 450. Důvodem může být příliš vysoký vodní součinitel u receptur s ETU 02.

Po sedmi dnech zrání (Graf 10) se u receptury s popílkem mletým na měrný povrch 450 m²/kg projevila nejmenší rozdíl pevností mezi 20 a 40 % dávkou druhotné suroviny, ale i zde bylo prokázáno, že vyšší dávka snížila pevnost. U sedmidenních pevností je trend snižujících se pevností s rostoucí jemností mletí popílkem ještě výraznější. Receptury s mletou škvárou stále dosahovaly nižších pevností než vzorky s popílkem. Zároveň je již u nich možné pozorovat opačný trend vývoje pevností v závislosti na jemnosti mletí škváry.

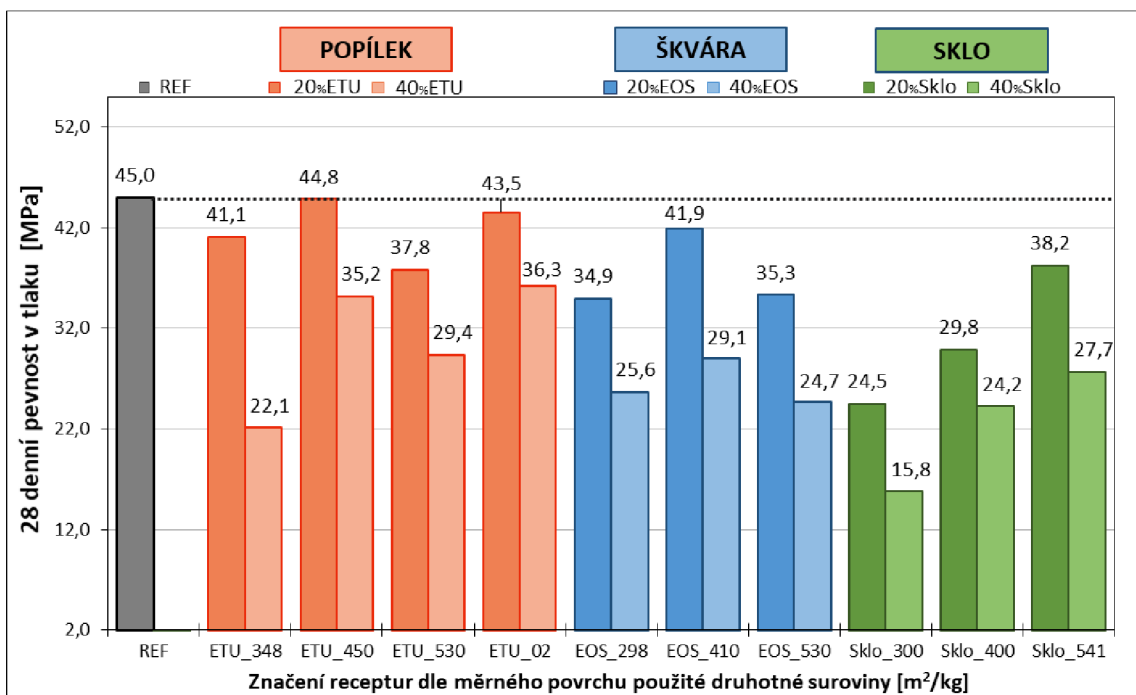
U vzorků s mletým sklem se zvýraznil pozitivní vliv jemněji mletého skla na pevnosti v tlaku. Také je vidět, že pevnost v tlaku vzorků obsahujících Sklo 300 roste velice pomalu a tato rychlost nárůstu pevnosti se zvyšuje s jemností použitého skla. Projevuje

se tedy jeho vyšší reaktivnost. Pevnosti vzorků se Sklo 541 se již vyrovnaly s pevnostmi zbývajících druhotných surovin mletých na podobnou jemnost.



Graf 12 Pevnost v tlaku po 7 dnech zrání

V případě sedmidenních pevností zůstal rozdíl v tlakových pevnostech, mezi předupraveným popílkem ETU 450 a popílkem v surovém stavu o obdobném měrném povrchu ETU 02, víceméně stejný.



Graf 13 Pevnost v tlaku po 28 dnech zrání

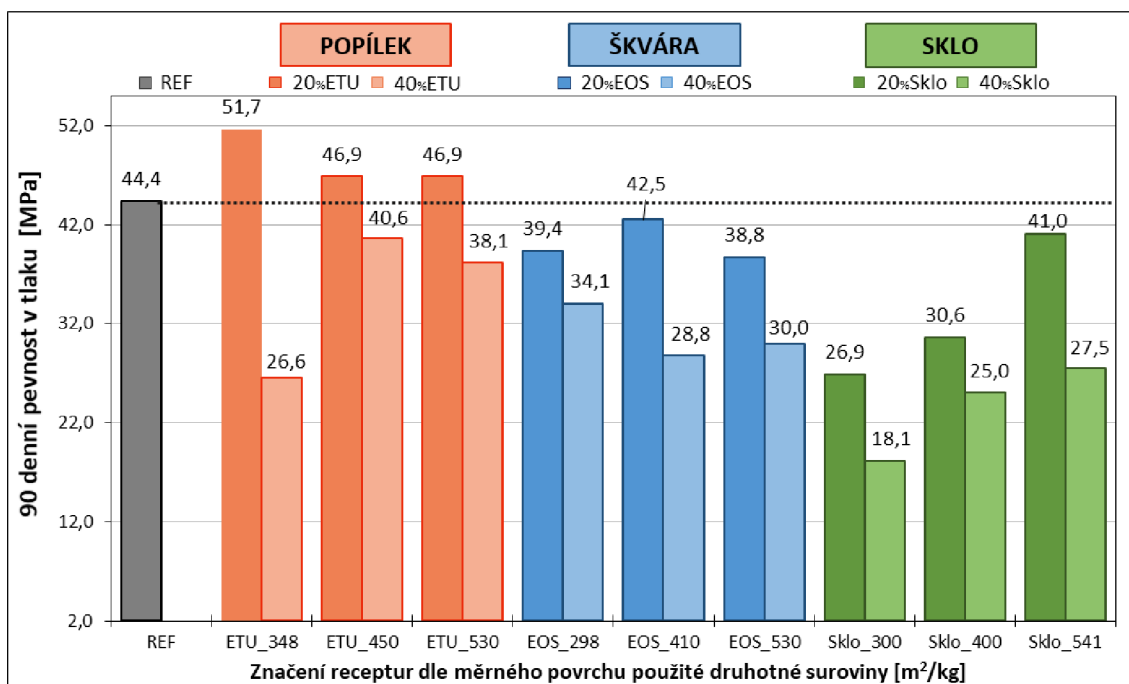
Po 28 dnech zrání se potvrdil předpoklad, že s dobou zrání se postupně začnou vyrovnávat rozdíly mezi referenční recepturou a srovnávanými recepturami (Graf 11). V případě vzorků 20 % ETU 420 bylo dosaženo 100 % z referenční pevnosti. I další receptury s nižší náhradou cementu popílkem dosáhly dobrých pevností. Vůči referenční pevnosti se jednalo o pokles o 9 % (20 % ETU 348), respektive o 17 % (20 % ETU 450).

Také u všech vzorků s EOS došlo k navýšení pevností v tlaku ve srovnání s referenční recepturou. Vliv jemnosti mletí byl znatelný a nejvyšších pevností stejně jako u vzorků s ETU dosáhla receptura se střední jemností mletí (20 % EOS 410).

U vzorků s popílkem i škvárou se po 28 dnech zrání projevil trend, kdy nejvyšších pevností v tlaku nedosahovaly receptury s nejjemněji mletými přísadami (měrný povrch > 500 m²/kg), ale ty s měrným povrchem pohybujícím kolem 400 m²/kg. Pravděpodobně se projevila větší spotřeba vody popílkem a škvárou a s tím související nedostatek záměsové vody pro dostatečnou hydrataci pucolánů a latentně hydraulických přísad.

U vzorků s mletým obalovým sklem byl stále velice zřetelný vliv jemnosti mletí, kdy s jemností mletí rostla i nabytá pevnost v tlaku. Receptura 20 % Sklo 300 dosáhla pouze 55 % referenční pevnosti, avšak receptura 20 % Sklo 541 dosáhla na 85 % referenční pevnosti.

Po 28 dnech zrání se takřka vymazal rozdíl v pevnostech v tlaku mezi recepturami obsahujícími srovnávané popílků ETU 450 a ETU 02. Průběh vývinu pevností byl rozdílný, pravděpodobně zapříčiněný rozdílnou nasákavostí obou popílků. Popílek ETU 01 disponoval nižší měrnou hmotností, tudíž byla jeho struktura více pórovitá a díky tomu mohla adsorbovaná voda zapříčinit částečné samošetřování malty a s tím spojený rychlejší vývin krátkodobých pevností. Vzhledem ke stejnému měrnému povrchu popílků však byly konečné dlouhodobé pevnosti velice podobné.



Graf 14 Pevnost v tlaku po 90 dnech zrání

Po 90 dnech zrání se dle očekávání pevnost referenční receptury nenavýšovala, jelikož všechny pro pevnost důležité slinkové minerály obsažené v portlandském cementu zreagovaly během prvních 28 dní (Graf 12).

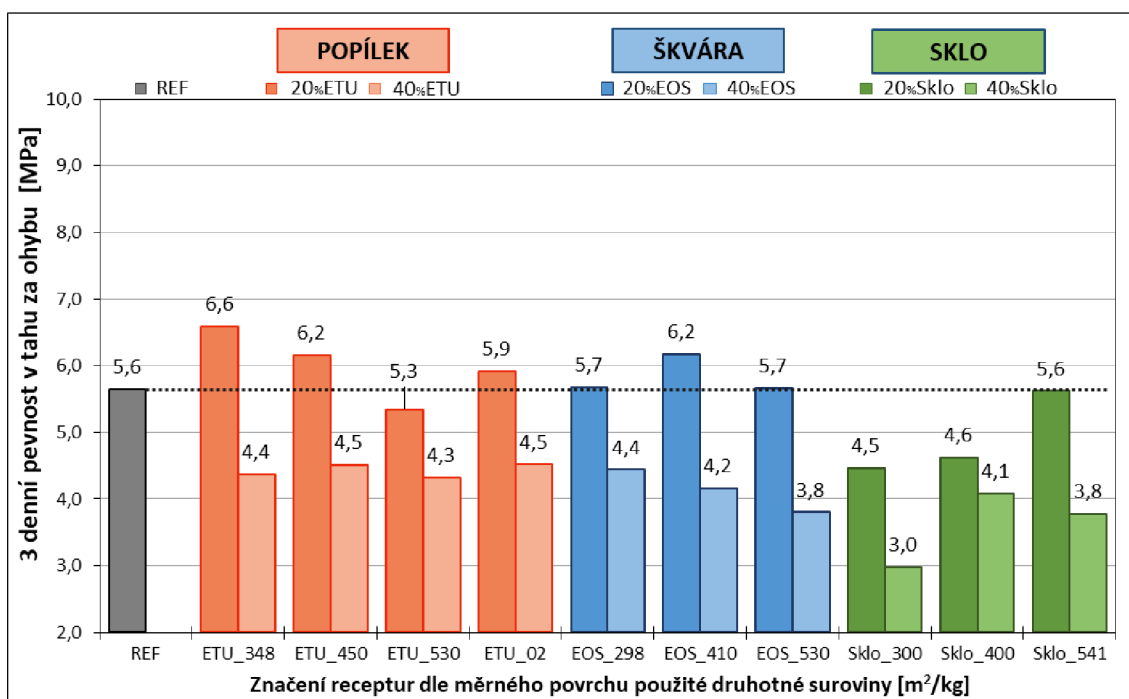
K žádným výrazným změnám v tlakových pevnostech, které nejsou pravděpodobně zapříčiněny vlivem prostředí, měření a například hutnění do forem, nedošlo ani u vzorků s mletým sklem.

Nejvyššího nárůstu pevností v období mezi 28. a 90. dnem zrání proběhl dle předpokladu u vzorků ETU s popílkem, což bylo zapříčiněno pucolanitou příměsí. K nejvýraznějšímu nárůstu pevnosti v tlaku během daného období došlo u receptury s nižší 20 % mírou náhrady cementu hrubozrnným popílkem (20 % ETU 348). Po 90 dnech zrání dosahovala tato receptura o 17 % vyšší pevnosti než receptura referenční. Po 90 dnech zrání dosáhly všechny receptury s nižší dávkou popílku ETU 01 vyšších pevností než referenční.

K mírnému nárůstu pevností v období mezi 28. a 90. dnem zrání došlo také u vzorků obsahujících škváru EOS. Tento nárůst byl ve všech případech v rozmezí 1–10 %. Také jako u vzorků s ETU došlo k nejvýraznějšímu nárůstu pevností u vzorků s přísadou upravenou na nejnižší měrný povrch (EOS 298).

5.2.5 Vliv jemnosti mletí přísad na pevnost v tahu za ohybu

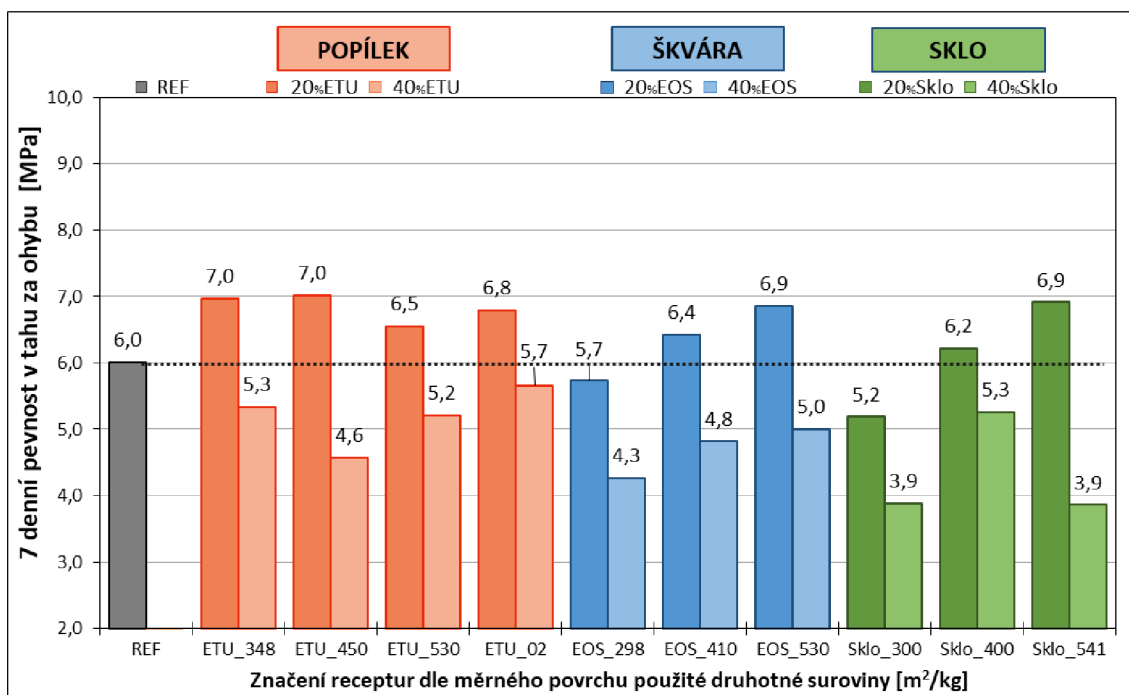
Pevnost v tahu za ohybu je další významnou veličinou sledovanou u cementových kompozitů.



Graf 15 Pevnost v tahu za ohybu po 3 dnech zrání

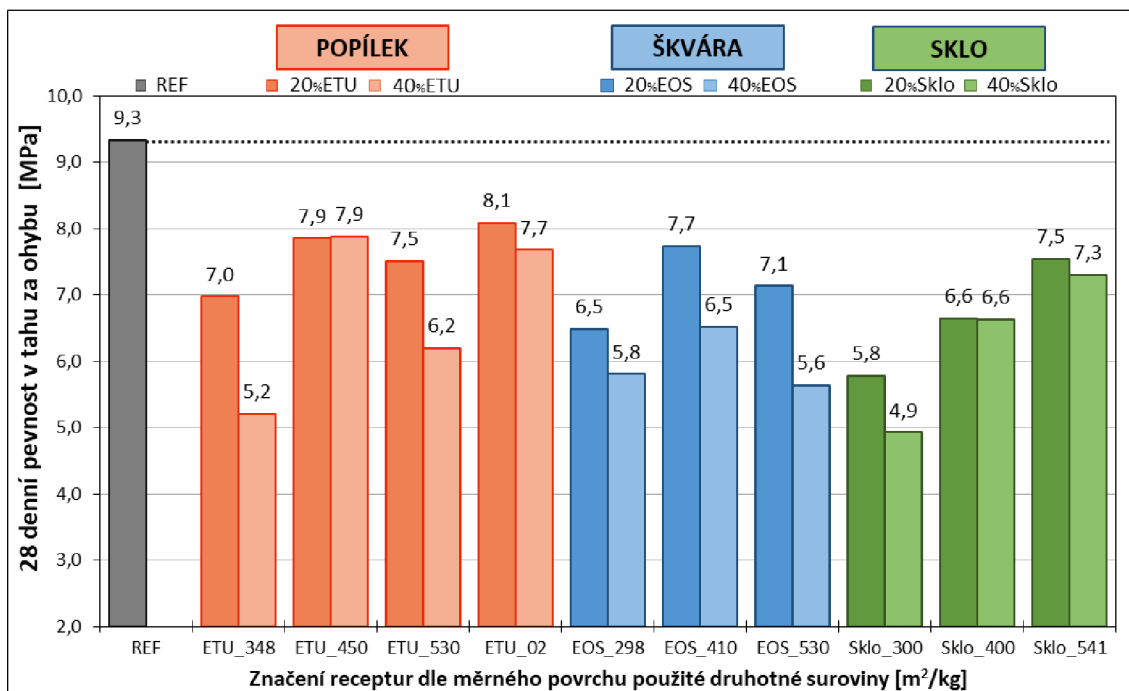
Z naměřených výsledků je patrné, že částečná náhrada cementu popílkem ETU a škvárou EOS ve výši 20 % měla pozitivní vliv na vývoj krátkodobých pevností v tahu za ohybu (Graf 13). Krátkodobé pevnosti u těchto receptur byly při porovnání s referenční recepturou stejné nebo dokonce vyšší (u receptury 20 % ETU 362 byla o cca 16 % vyšší).

U receptur se srovnávanými popílkami, tedy ETU 450 a ETU 02 nedocházelo v rámci krátkodobých pevností k výrazným rozdílům. Je pravděpodobné, že na pevnost v tahu za ohybu neměla tak významný vliv nasákavost příměsí a s ní spojená spotřeba záměsové vody, jak samotná velikost zrn popílku. Zjevně se totiž u všech receptur s popílkem snižovala pevnost v tahu za ohybu s jejich rostoucím měrným povrchem.



Graf 16 Pevnost v tahu za ohybu po 7 dnech zrání

Současně byl zaznamenán klesající trend pevnosti v závislosti na jemnosti mletí u receptur s 20 % náhradou cementu popílkem ETU, a naopak rostoucí trend ve vývoji pevností u receptur s 20 % náhradou cementu jemně mletým obalovým sklem a škvárou EOS (Graf 14). Tento fakt byl pravděpodobně způsoben rozdílnou nasákavostí druhotných surovin a také rozdílným tvarem zrn.

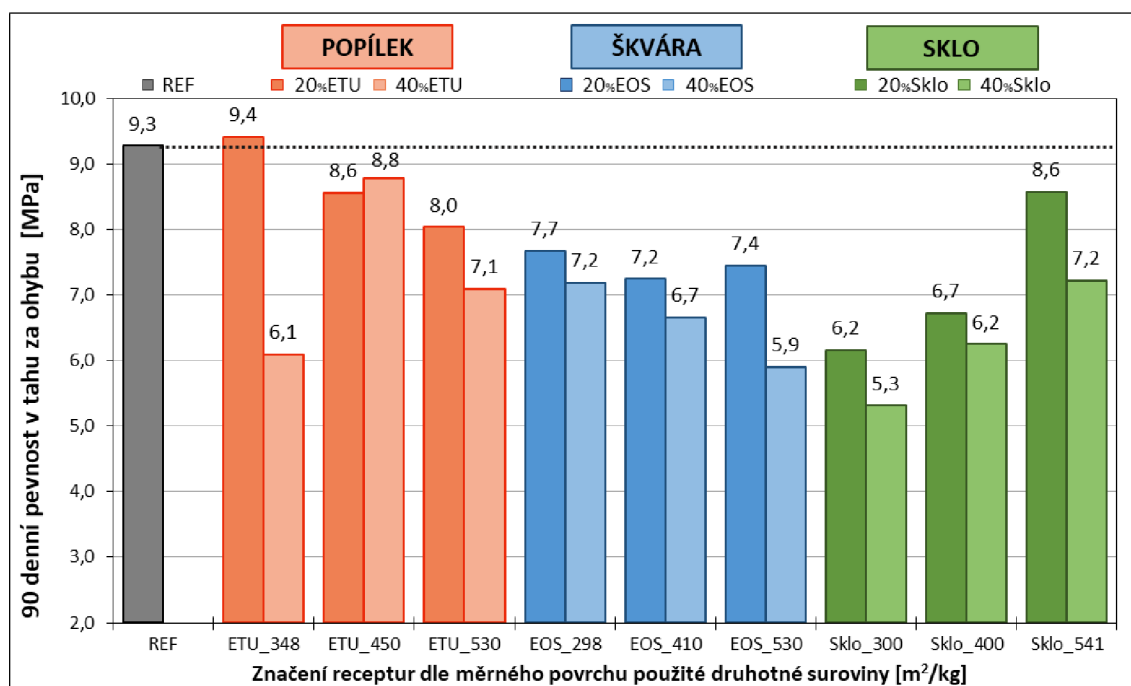


Graf 17 Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech zrání

Po 28 dnech zrání došlo u receptur s 40 % přídavkem skla k vysokému nárůstu pevností ve srovnání s recepturami s nižší (20 %) dávkou stejné příměsi. Tento jev byl zapříčiněn vyšším podílem skla, které zpomalilo vývin raných tahových pevností.

Naopak pevnost v tahu za ohybu u referenčních těles v období mezi 7. a 28. dnem zrání výrazně narostla vůči všem ostatním recepturám, což zapříčinila pucolánová aktivita popílku ETU a s ní související tvorba CSH fází.

Výrazný byl vývin tahových pevností referenčních zkušebních těles v období mezi sedmým a osmadvacátým dnem zrání, kdy pevnost narostla o 55 % původní pevnosti. U starších referenčních těles další nárůst pevností nebyl zaznamenán.



Graf 18 Pevnost v tahu za ohybu po 90 dnech zrání

V období mezi osmadvacátým a devadesátým dnem zrání malty došlo k nárůstu pevností většiny modifikovaných receptur. Dle předpokladu došlo k největšímu růstu pevností u receptur s popílkem ETU 01. Konkrétně u receptury 20 % ETU 348 došlo v daném mezidobí k 35 % nárůstu pevnosti na 101 % z referenční pevnosti a u ostatních receptur s popílkem došlo v průměru k nárůstu pevností v daném období o 12 %.

K nejvýraznějšímu nárůstu pevností zkušebních těles obsahujících škváru ve sledovaném období došlo u receptur s EOS 298. V případě receptury 20 % EOS 298 došlo k nárůstu pevnosti o 25 %, avšak bylo dosaženo pouze 75 % z referenční pevnosti. Mnohem vyšší pevnosti bylo dosaženo u receptury 20 % Sklo 541 (92 % z referenční pevnosti). U ostatních zkušebních těles s příměsí skla však bylo dosaženo podstatně nižších pevností.

5.3 Shrnutí etapy 2

Částečné nahrazení cementu druhotnou surovinou mělo významný vliv na zpracovatelnost čerstvé hmoty. Při zachování vodního součinitele bez ohledu na použitou recepturu byl prokázán negativní vliv přídavku mletého popílku. Se zvyšujícím se měrným povrchem použitého popílku se zpracovatelnost zlepšovala. Jediné receptury, které obsahovaly popílek a zároveň vykazovaly lepší zpracovatelnost než referenční hmota, obsahovaly nemletý surový popílek ETU 02 z druhého elektroodlučovače. Nejvyššího rozlití bylo dosaženo u receptury 20 % ETU 02 (15 % nárůst rozlití). Je zjevné, že na zpracovatelnost čerstvé malty s popílkem měla větší vliv pórovitost zrn popílku a větší podíl uzavřených zrn popílku než samotný měrný povrch. Další vlastností, kterou se projevila čerstvá malta s přídavkem popílku byly sklony k tixotropii. Plnění forem a hutnění pomocí vibrování bylo u receptur obsahujících mletý popílek jednoznačně nekomplikovanější.

Substituce cementu škvárou měla pouze minimální vliv na zpracovatelnost. Konzistence čerstvé malty se u většiny receptur pohybovala na stejných či velice podobných hodnotách jako konzistence referenční receptury. Naopak použitím mletého obalového skla jako částečné náhrady cementu bylo zjištěno, že v závislosti na měrném povrchu použitého skla se zpracovatelnost čerstvé malty mohla i výrazně zlepšit. Nejlepší konzistenci měly receptury obsahující sklo o měrném povrchu $300 \text{ m}^2/\text{kg}$ (20 % Sklo 300 = 177,5 mm rozlití), naopak u receptur obsahujících nejjemněji mleté sklo již ke zlepšování konzistence nedocházelo a rozlití bylo stejné jako u referenční hmoty (160 mm). U všech druhotných surovin se tak projevila jejich rozdílná nasákavost.

Prokazatelný vliv mletí druhotných surovin na objemovou hmotnost čerstvé malty mělo pouze mleté sklo. V jeho případě bylo patrné, že s rostoucím měrným povrchem rostla objemová hmotnost čerstvé malty. V případě vlivu mletí popílku a škváry jsou rozdíly mezi naměřenými hodnotami velice malé, není tedy možné tyto výsledky považovat za směrodatné.

U všech receptur obsahujících druhotné suroviny byl prokázán vliv míry substituce cementu na objemovou hmotnost čerstvé i ztvrdlé malty. S vyšší náhradou cementu jednotlivými druhotnými surovinami klesala objemová hmotnost. To bylo zapříčiněno nejvyšším podílem jemných částic u suspendovaného cementu, ve srovnání se všemi použitými příměsmi. Referenční cement disponoval nejvyšším podílem jemnozrnných částic.

Hutnost ztvrdlé malty obsahující určitý podíl popílku zapříčinila vyšší objemovou hmotnost těchto zkušebních těles ve srovnání s referenčními. Tento jev se projevil u

receptur s nižší mírou substituce cementu popílkou, a to vzhledem k větší spotřebě záměsové vody.

U krátkodobých (≤ 7 dní zrání) pevností v tlaku i tahu za ohybu se výrazně projevil vliv druhu a jemnosti mletí použité druhotné suroviny. Kromě referenční hmoty dosahovaly nevyšších pevností v tlaku i tahu za ohybu receptury s určitým obsahem popílku. Nejvyšších krátkodobých pevností v tlaku bylo dosaženo u receptury 20 % ETU 348, u které tyto pevnosti v tlaku nabývaly 75 % z hodnoty referenční pevnosti. U téže receptury bylo dosaženo i nejvyšších pevností v tahu za ohybu, konkrétně nabyla 117 % z referenční pevnosti.

Nejnižších krátkodobých pevností v tlaku i tahu za ohybu dosahovala zkušební tělesa obsahující mleté sklo. Zároveň se s časem zrání postupně projevoval pozitivní trend závislosti vyššího měrného povrchu použitého skla na vyšších pevnostech. Nejvyšších pevností v tlaku dosahovala receptura 20 % Sklo 541 (65 % z referenční pevnosti). U stejné receptury bylo dosaženo i nejvyšších pevností v tahu za ohybu (po sedmi dnech zrání 115 % z referenční pevnosti).

U všech receptur se projevil negativní vliv vyšší dávky druhotné suroviny nižší pevností v tlaku i v tahu za ohybu. Rozdíl mezi pevností receptur s 20 % a 40 % náhradou cementu se snižoval se stářím zkušebních vzorků.

Pevnost v tlaku referenčních zkušebních těles byla v období mezi sedmým a devadesátým dnem zrání víceméně neměnná. V případě receptur obsahujících druhotné suroviny tomu bylo jinak. U všech těchto zkušebních těles docházelo do stáří 28 dní k výraznému nárůstu pevností. Poté se již pevnosti u vzorků se škvárou a mletým sklem víceméně ustálily. U receptur obsahujících popílek však docházelo vzhledem k pucolánovým vlastnostem popílku k nárůstu pevností až do 90. dne zrání.

Na rozdíl od pevnosti v tlaku, narostla pevnost v tahu za ohybu referenčních zkušebních těles významně mezi sedmým a osmadvacátým dnem zrání. Je zjevné, že všechny hydratační procesy s výrazným vlivem na pevnosti v tlaku proběhly během prvních sedmi dní zrání a vznik dalších hydratačních novotvarů cementu se odrážel pouze na tahových pevnostech.

Nejvyšších dlouhodobých (> 7 dní zrání) pevností v tlaku dosahovaly znovu receptury s obsaženým popílkem. Nejvyšší pevnosti po 90 dnech zrání dosáhla receptura 20 % ETU 348 (116 % z referenční pevnosti). Avšak receptura se stejným popílkem, ale jeho vyšší dávkou (40 % ETU 348) nabývala vůbec nejnižších dlouhodobých pevností v tlaku ze všech receptur s popílkem. Pravděpodobně měl výrazný vliv nízký měrný

povrch, s ním spojená přílišná spotřeba záměsové vody a související nedostatečné zhydratování popílku.

U receptur se škvárou bylo dosaženo nejvyšších pevností v tlaku po 28 dnech zrání u receptury 20 % EOS 410 (91 % z referenční pevnosti), po 90 dnech již dosahovala receptura 20 % EOS 410 téměř referenční pevnosti. V krátkodobých tahových pevnostech dosahovaly receptury s nižší mírou substituce škvárou vysokých hodnot (u receptury 20 % EOS 530 šlo o 115 % z referenční pevnosti po sedmi dnech zrání). Avšak z dlouhodobého hlediska se tento trend nepotvrdil a nejvyšších pevností v tahu za ohybu po 90 dnech zrání dosahovala receptura 20 % EOS 298 (pouze 83 % z referenční pevnosti).

Z dlouhodobého hlediska se u receptur obsahujících mleté sklo potvrdil trend z krátkodobých pevností, tedy že s rostoucím měrným povrchem příměsi rostla pevnost v tlaku i v tahu za ohybu. Po 90 dnech zrání zkušební tělesa receptury 20 % Sklo 541 nabyly 92 % z referenční pevnosti v tlaku a 92 % z referenční pevnosti v tahu za ohybu.

6. ETAPA 3 - Příměs druhotných surovin v normové maltě

Smyslem třetí etapy bylo doplnění poznatků z předešlých etap. V rámci této etapy byly druhotné suroviny použity a posuzovány jako příměs I. Typu, tedy jemnozrnná inertní příměs. Byly navrženy nové zkušební receptury, ověřen vliv druhotných surovin a jemnosti mletí na reologické vlastnosti čerstvé malty a v další fázi byla vyrobena zkušební tělesa, na nichž byly stanoveny fyzikálně mechanické vlastnosti.

6.1 Zkušební receptury

Referenční receptura byla navržena dle normy ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu. Část 1: Stanovení pevností. [46]

Referenční malta byla připravena z 1 dílu cementu CEM I 42,5 R (450±2 g), tří dílů vysušeného normalizovaného písku CEN (1350±5 g) a 1/2 dílu pitné vody (225±1 g). Vodní součinitel (voda/cement) byl 0,5. [46]

Tab. 15 Seznam použitých receptur, jejich značení a míra přidané příměsi

| Značení receptury | Druhotná surovina | Přídavek druh sur. [% z m _c] |
|-------------------|--------------------------|--|
| REF | - | 0 |
| 5 % ETU 348 | | 5 |
| 10 % ETU 348 | | 10 |
| 5 % ETU 450 | Popílek – Tušimice 01 | 5 |
| 10 % ETU 450 | | 10 |
| 5 % ETU 530 | | 5 |
| 10 % ETU 530 | | 10 |
| 5 % ETU 02 | Popílek – Tušimice 02 | 5 |
| 10 % ETU 02 | | 10 |
| 5 % EOS 298 | Škvára – Oslavany | 5 |
| 10 % EOS 298 | | 10 |
| 5 % EOS 410 | | 5 |
| 10 % EOS 410 | | 10 |
| 5 % EOS 530 | | 5 |
| 10 % EOS 530 | | 10 |
| 5 % Sklo 300 | Obalové sklo – Vetropack | 5 |
| 10 % Sklo 300 | | 10 |
| 5 % Sklo 400 | | 5 |
| 10 % Sklo 400 | | 10 |
| 5 % Sklo 541 | | 5 |
| 10 % Sklo 541 | | 10 |

Další zkušební receptury byly navrženy na základě referenční receptury. Jednotlivé druhotné suroviny o specifickém měrném povrchu byly dávkovány v míře 5 a 10 % z hmotnosti cementu. Vodní součinitel byl adekvátně navýšen, bez ohledu na vlastnosti

přidané příměši, v míře 2,5 a 5 % z hmotnosti cementu. Výstupem byla jedna referenční hmota (REF) a celkem 18 s ní porovnávaných zkušebních receptur (Tab. 14).

6.1.1 Označení receptur

Zkušební receptury byly označeny v závislosti na množství přidané druhotné suroviny vůči hmotnosti cementu, druhu použité příměši a jejím specifickém měrném povrchu.

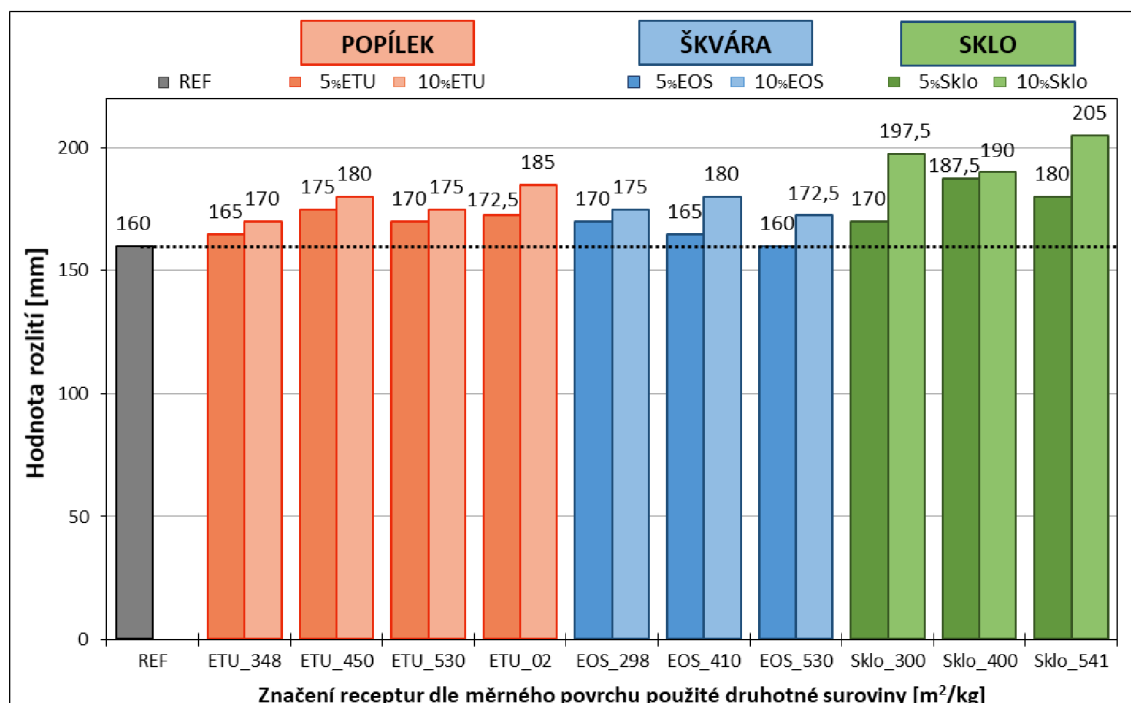
5 % ETU 348

- 5 % množství přidané druhotné suroviny vůči hmotnosti cementu,
- ETU druhotná surovina popílek,
- 348 jemnost mletí měřená Blainovým přístrojem [m^2/kg].

6.2 Vyhodnocení výsledků etapy 3

6.2.1 Vliv přidavku jemně mletých přísad na zpracovatelnost

Vliv jemně mletých druhotných surovin jako jemnozrné příměši se na zpracovatelnosti čerstvé malty znatelně projevil (Graf 19) a zároveň se ověřil vliv jednotlivých jemně mletých příměsí, sledovaný již v předešlé etapě.



Graf 19 Vliv jemnosti mletí druhotných surovin na rozlití na střešacím stolku

Referenční směs (REF) dosáhla rozlití na střešacím stolku 160 mm. Čerstvá malta s popílkem (10 % ETU 530 m^2/kg) dosáhla rozlití 175 mm. I přes prokázaný negativní

vliv popílku na zpracovatelnost bylo vzhledem k zvýšenému vodnímu součiniteli rozlití na střešacím stolku větší a konzistence na srovnatelné úrovni s referenční recepturou.

I nízká dávka jemně mletých druhotných surovin minimálně zachovala a ve většině případů zlepšila konzistenci a s ní spojenou zpracovatelnost čerstvé malty. S rostoucí dávkou přísady se dál reologické vlastnosti čerstvé malty zlepšovaly. Nejvýraznější vliv na zpracovatelnost malty v čerstvém stavu mělo dle předpokladu mleté obalové sklo. Nízká nasákavost přísady v kombinaci s příznivým tvarem zrn mletého skla měla za následek výrazné zvýšení rozlití na střešacím stolku.

Vliv přidavku jemně mletého popílku ETU a škváry EOS jako přísady do betonu na reologické vlastnosti byl srovnatelný. Došlo k vyššímu rozlití na střešacím stolku, ale zpracovatelnost zůstala u většiny receptur obdobná vůči referenční. Nejvyššího rozlití a nejlepší zpracovatelnosti dosahovaly receptury s vyšší dávkou druhotných surovin upravených na střední měrný povrch, tedy 10 % ETU 450 a 10 % EOS 410.



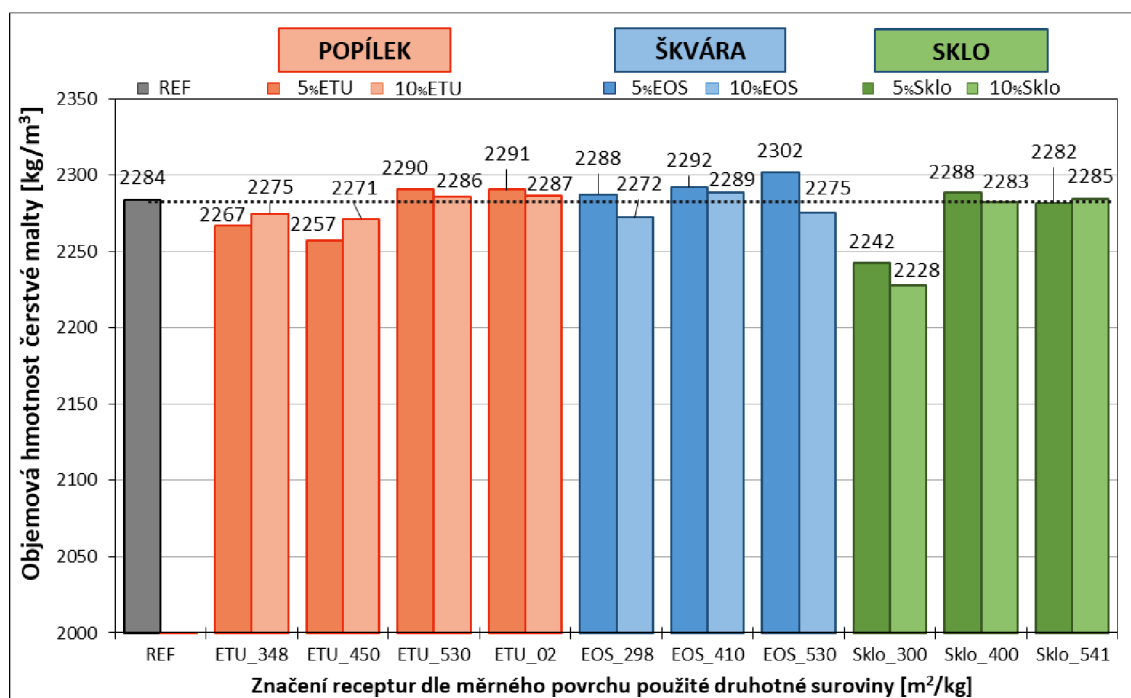
Obr. 17 Zkouška rozlitím u receptur 10 % EOS 530 a 10 % Sklo 541

Pro srovnání jsou na Obr. 17 vidět vzorky receptur 10 % EOS 530 a 10 % Sklo 541. Rozlití vzorku s vyšší dávkou nejjemnější škváry bylo 172,5 mm. To je sice o poznání více než u referenční receptury, ale zpracovatelnost se zvýšila pouze nepatrně. Výrazně odlišného výsledku rozlití (205 mm) bylo dosaženo u vzorku receptury se stejně velkou dávkou nejjemněji mletého skla. Tato malta už byla znatelně tekutější oproti referenční záměsi, což se projevilo při velice jednoduchém plnění do forem. Nejlepší reologické vlastnosti vykazovaly všechny čerstvé hmoty s příměsí mletého obalového skla. Pozitivní vliv skla se projevil nejen při zkoušce konzistence, ale také při samotném plnění forem a jejich hutnění na vibračním stole.

Stejně jako v předešlé etapě, receptura s popílkem ETU 02 dosáhla ze všech receptur obsahujících popílek ETU největšího rozlití. Projevil se tak vliv hutnější struktury a nižší pórovitosti zrn popílku a s tím související nižší nasákavosti.

6.2.2 Vliv jemnosti mletí přísad na objemovou hmotnost

Vliv jemnosti mletí druhotných surovin na objemovou hmotnost čerstvé malty se projevil u receptur s příměsí mletého skla a částečně i popílku ETU.

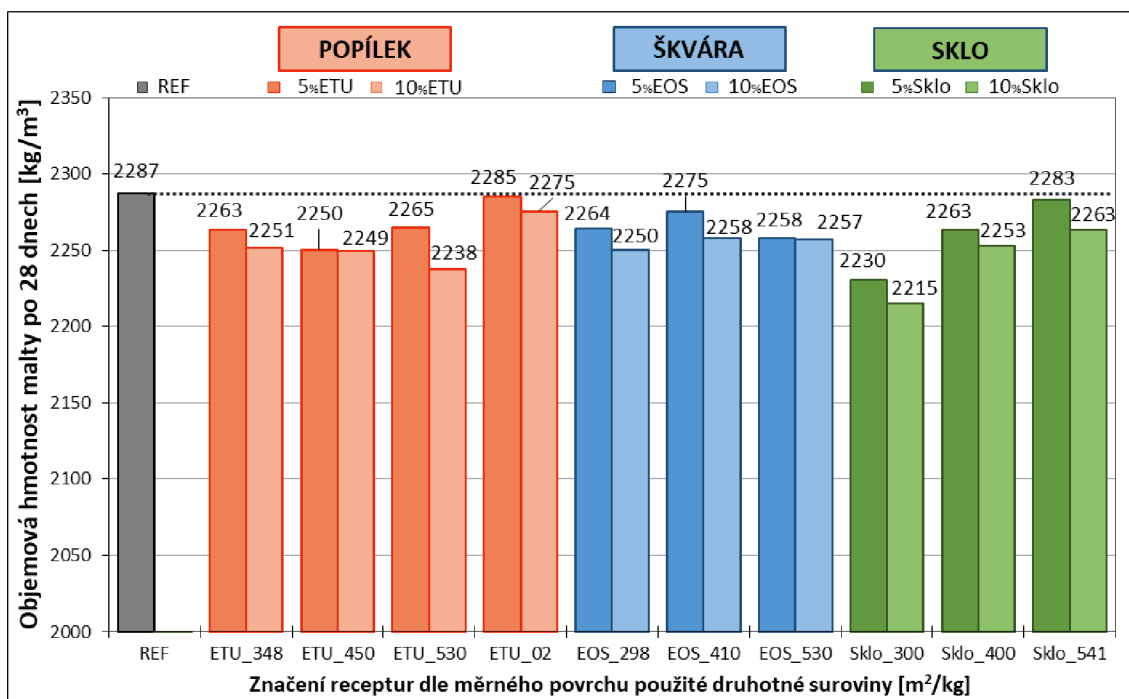


Graf 20 Vliv jemnosti mletí druhotných surovin na objemovou hmotnost čerstvé malty

Objemová hmotnost čerstvých matl s příměsí popílku ETU rostla s rostoucím měrným povrchem jeho zrn, čímž se potvrdil pozitivní vliv jemnosti mletí na hutnost malty. Nejvyšší objemové hmotnosti však dosáhly receptury s příměsí ETU 02, což zapříčinila menší nasákavost tohoto popílku a do jisté míry zřejmě i jiný tvar zrn. Stejný trend jako u popílku byl sledován i u malt s obsahem škváry. V případě přídavku škváry i popílku však byly rozdíly v objemové hmotnosti v závislosti na jemnosti mletí víceméně zanedbatelné.

Pouze u receptur s příměsí skla o měrném povrchu 300 m²/kg byl zjevný vliv jemnosti mletí na druhotné suroviny na objemovou hmotnost. Příčinou byl vyšší podíl hrubozrnných částic skla a s tím spojená horší hutnost.

Vliv jemnosti mletí obalového skla se projevil i u objemové hmotnosti ztvrdlé malty stanovené po 28 dnech zrání. S rostoucí jemností zrn skla rostla objemová hmotnost malty a vznikala hutnější struktura cementového kamene.



Graf 21 Vliv jemnosti mletí druhotných surovin na objemovou hmotnost ztvrdlé malty

Stanovením objemové hmotnosti ztvrdlé malty u všech receptur s příměsí popílku či strusky nebyl potvrzen vliv jemnosti mletí. Rozdíly v naměřených hodnotách jednotlivých receptur byly velice malé. Snížení objemové hmotnosti všech zkoušených receptur vůči referenční normové maltě zapříčila nižší objemová hmotnost příměsí ve srovnání s normalizovaným kamenivem.

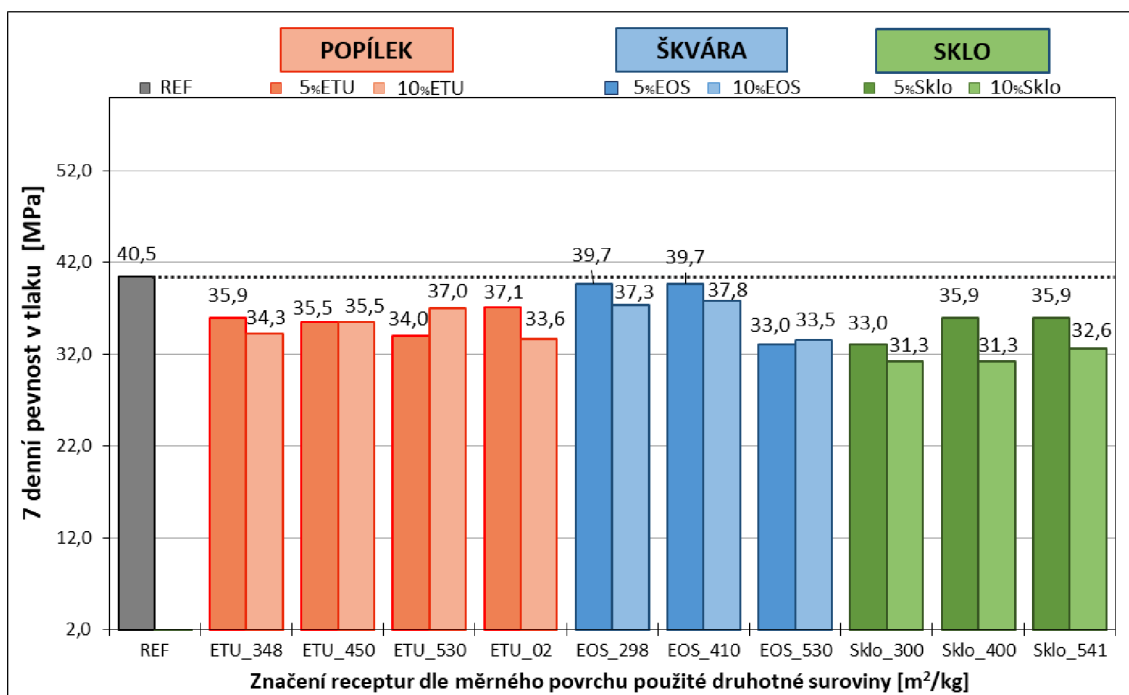
Nejvyšší objemové hmotnosti bylo dosaženo příměsí popílku ETU 02, který se vyznačuje vysokou měrnou hmotností a příměsí 5 % skla o měrném povrchu 300 m²/kg, čímž byl dosažen optimální podíl jemných částic.

6.2.3 Vliv přidavku jemně mletých přísad na pevnost v tlaku

U pevnosti v tlaku byl předpoklad, že příměs jemně mletých druhotných surovin zvýší hutnost cementového kamene a dojde tak ke zlepšení vlastností ztvrdlé malty.

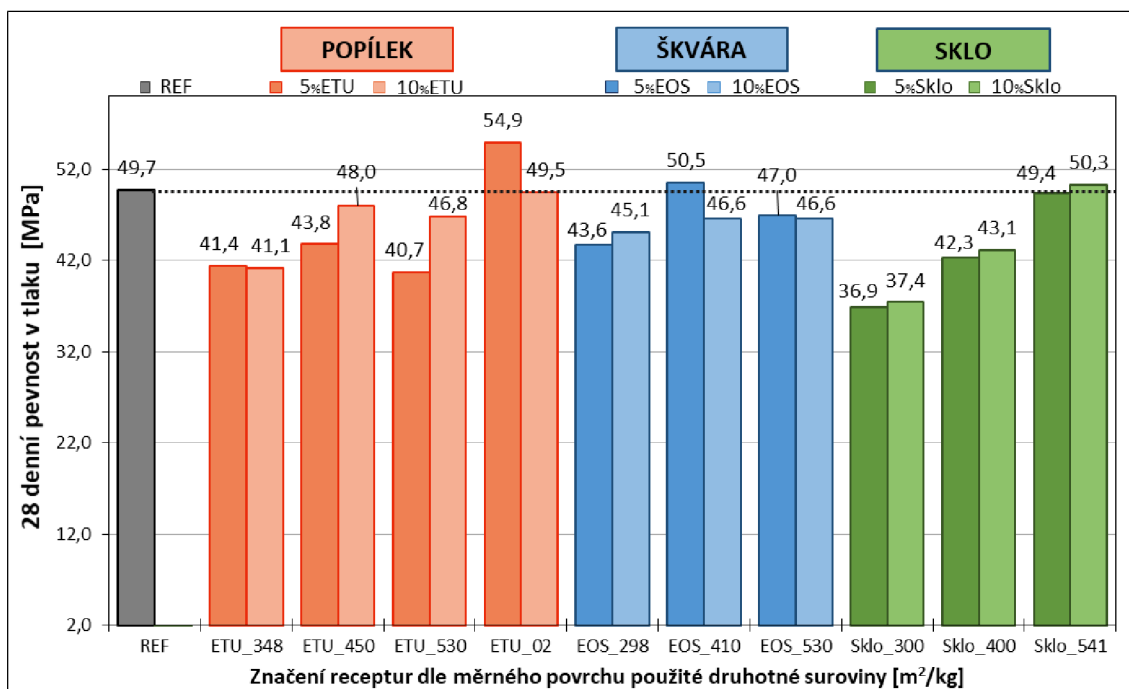
Z krátkodobých pevností po sedmi dnech zrání je možné vyvodit negativní vliv příměsí druhotných surovin v normové maltě. Velký vliv na pokles pevností měl bezesporu také zvýšený vodní součinitel.

U zkušebních těles s příměsí popílku a skla není patrný vliv jemnosti mletí, rozdíly v pevnostech mezi jednotlivými recepturami jsou malé (Graf 22). Nejvyšších krátkodobých pevností bylo dosaženo příměsí škváry EOS 298 a EOS 410. Projevila tak menší spotřeba záměsové vody.



Graf 22 Pevnost v tlaku po 7 dnech zrání

Po osmadvaceti dnech zrání zkušebních těles se vliv jemnosti mletí jednotlivých příměsí projevil (Graf 23). Jako optimální měrný povrch popílku ETU 01 se jevil 450 m²/kg. Příměsí popílku ETU 02 se srovnatelným měrným povrchem, ale jinou pórovitostí a tvarem zrn však bylo dosaženo u receptury 20 % ETU 02 o 25 % vyšší pevnosti, než jaké nabyla receptura 20 % ETU 450.

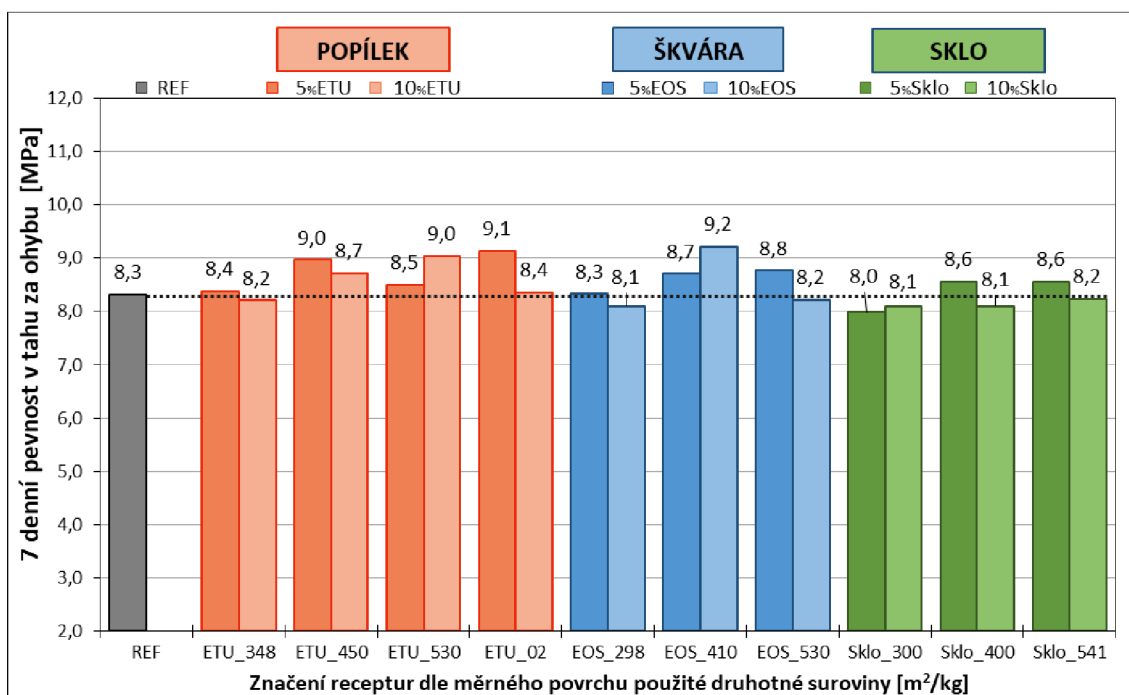


Graf 23 Pevnost v tlaku po 28 dnech zrání

Nejvyšší dlouhodobé pevnosti v tlaku normové malty s příměsí škváry bylo dosaženo, podobně jako při příměsí popílku, u středně jemné škváry EOS 410. Pouze u receptury 20 % EOS 410 byla pevnost srovnatelná s referenční. Nejvýraznější vliv měrného povrchu druhotné suroviny použité jako jemnozrné příměsi byl patrný u receptur s obsahem mletého skla. S rostoucím měrným povrchem bylo dosaženo vyšších pevností. Receptury s příměsí Sklo 541 nabyly pevností rovných referenčním.

6.2.4 Vliv případku jemně mletých přísad na pevnost v tahu za ohybu

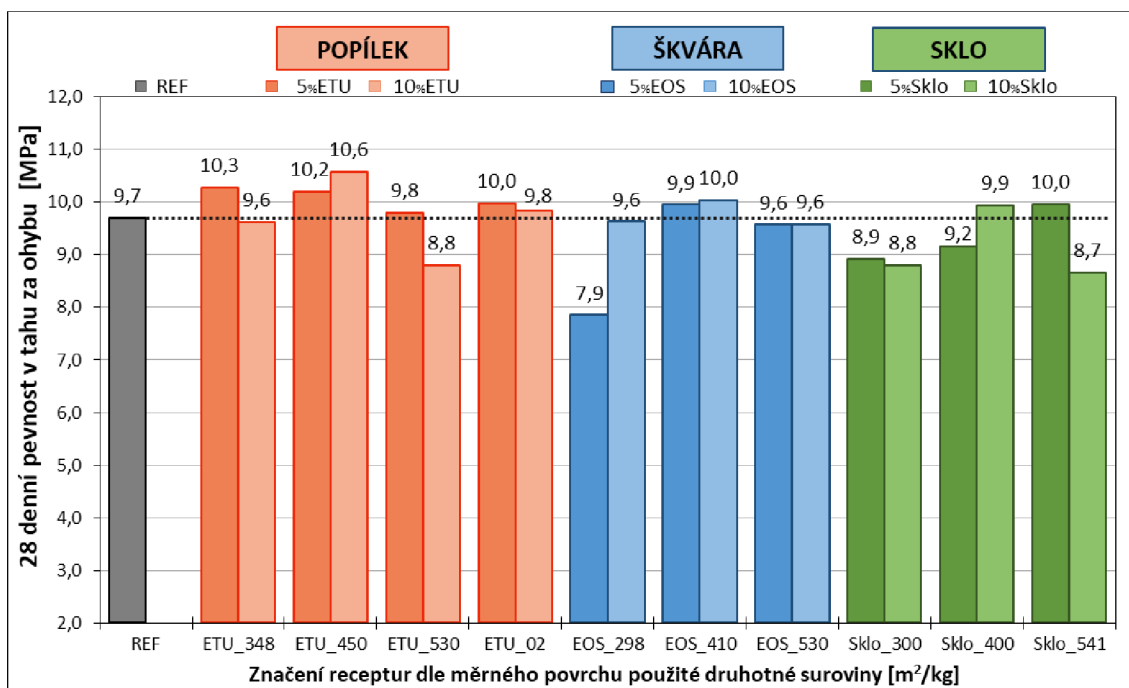
Z krátkodobých pevností v tahu za ohybu normové malty je patrný vliv uložení zkušebních těles. V etapě 2 (655.2.5) byly zkušebních vzorky uloženy jiným než normou předepsaným způsobem. Nyní byla zkušební tělesa uložena ve vodním prostředí a referenční receptura nabyla po sedmi dnech zrání o 14 % vyšší tahové pevnosti (Graf 24).



Graf 24 Pevnost v tahu za ohybu po 7 dnech zrání

Příměs mletého popílku ETU 01 a škváry EOS pozitivně ovlivnila krátkodobé pevnosti v tahu za ohybu normové malty, a to hlavně při použití jemněji mletých druhotných surovin. V případě příměsí škváry byla dosažena nejvyšší pevnost u receptury 40 % EOS 410 (112 z referenční pevnosti). Zkušebních vzorky s obsahem popílku dosahovaly nejvyšších pevností při použití popílku ETU 450 (receptura 20 % ETU 450 nabyla 111 % referenční pevnosti).

Příměs mletého skla do normové malty nijak významně neovlivnila krátkodobé pevnosti v tahu za ohybu.



Graf 25 Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech zrání

Pozitivní vliv příměsí mletého popílku se potvrdil i u dlouhodobých pevností v tahu za ohybu. Nejvyšších pevností znovu dosahovala zkušební tělesa s příměsí ETU 450 (receptura 40 % ETU 450 nabyla 111 % referenční pevnosti). Při použití jako jemnozrnné příměsí nedosahovaly receptury se surovým popílkem ETU 02 takových pevností jako receptury se srovnatelným popílkem ETU 450. Důvodem je vyšší podíl hrubozrnných částic v surovém popílkem.

6.3 Shrnutí etapy 3

Použitím mletých druhotných surovin jako jemnozrnné příměsí do normové malty byly získány hmoty s lepší konzistencí. Nezanedbatelný vliv za konzistenci a zpracovatelnost mělo také navýšení vodního součinitele.

V druhé etapě byla prokázána větší spotřeba záměsové vody mletým popílkem než suspendovaným cementem. Ve třetí etapě byl navýšen vodní součinitel adekvátně k navázce popílku i ostatních příměsí, ale byl vztahován ke spotřebě vody cementem. Přesto, že bylo rozlité u všech receptur s popílkem vyšší než rozlité referenční malty, konzistence těchto hmot byly velice podobné. Potvrdil se tím sklon malty s příměsí popílku k tixotropnímu chování.

Vliv škváry jako příměsí na konzistenci a zpracovatelnost čerstvé malty byl nejméně průkazný. Konzistence malty byla ve většině případů podobná konzistenci referenční a zpracovatelnost při plnění a hutnění forem také odpovídala normové maltě. Pozitivní vliv na konzistenci i zpracovatelnost měla příměs mletého skla. Rozlité malty na

střásacím stolku bylo podstatně větší a zpracovatelnost při hutnění do trojforem byla výborná. Důvodem je téměř nulová nasákavost mletého skla a všechny záměsové voda je spotřebovaná pouze na smáčení povrchu zrn.

Vliv druhotných suroviny jako příměsí do normové malty nebyl při sledování objemových pevností nijak výrazný. Dávka příměsí nebyla tak výrazná a samotnou objemovou hmotnost ovlivnil i rozdílný vodní součinitel. Přitom stanovené objemové hmotnosti při použití popílku ETU a škváry EOS byly neměnné v závislosti na jejich měrném povrchu. Pouze při použití mletého skla se projevil vliv rozdílné jemnosti mletí přísady, kdy s rostoucím měrným povrchem rostla i objemová hmotnost ztvrdlé malty. To zapříčinil zvyšující se podíl jemných částic vedoucí k hutnější mikrostruktuře cementového kamene.

Z pohledu zvýšení krátkodobých, sedmidenních pevností v tahu za ohybu byla nejvýhodnější příměs popílku ETU, a to jak předupravovaného mletím (ETU 01) tak i v surovém stavu (ETU 02). Použitím popílku bylo dosaženo hutnější mikrostruktury. Zároveň je možné, že na rané pevnosti měl vliv minerál mullit, případně minerály jemu velmi podobné, které vysokoteplotní popílků běžně obsahují. Mullit je hlinitokřemičitan a v amorfní fázi je velice reaktivní za vzniku CASH fází již v raných stádiích hydratace.

Na vývin krátkodobých pevností v tlaku mělo navýšení vodního součinitele negativní vliv. Pozitivně zapůsobila příměs druhotných surovin s pucolánovými a latentně hydraulickými vlastnostmi až po delší době zrání (28denní pevnosti). Reaktivnost amorfního SiO_2 obsaženého v obalovém skle výrazně roste s jemností mletí. To se také podepsalo na pevnostech v tlaku, kdy nejvyšších pevností ze všech receptur obsahujících příměs mletého skla dosahovaly ty s se sklem upraveným na nejvyšší měrný povrch ($541 \text{ m}^2/\text{kg}$). U zkušebních těles s obsahem příměsí popílku byla nejvyšší tlaková pevnost dosažená recepturami s popílkem ETU 02 na což měl vliv tvar zrn, jejich nižší pórovitost a celkově hutnější struktura cementového kamene.

Použitím mletého skla i škváry jako příměsí do normové malty nebylo dosaženo vyšších osmadvacetidenních tahových pevností. Pouze příměs popílku o nižším měrném povrchu vedle k navýšení referenčních tahových pevností.

7. ETAPA 4 - Substituce cementu druhotnými surovinami v podlahovém potěru

V rámci čtvrté etapy došlo k posouzení vlivu použitých druhotných surovin o různém měrném povrchu na mechanické vlastnosti specifické stavební hmoty na cementové bázi.

7.1 Zkušební receptury

Jako referenční hmota byl zvolen vysokopevnostní podlahový potěr (dále označovaný PH3) od renomovaného výrobce stavebních hmot. Suchá směs dodaná výrobcem byla ochuzena o 50 % dávky cementu CEM I 42,5 R. Referenční zkušební tělesa byla vyrobena dle stanovené metodiky, která se zároveň nevylučuje s technickými listy potěru PH3. Vodní součinitel pro referenční hmotu byl stanoven výrobcem na 0,17 kg vody/1 kg suché směsi se 100 % dávkou cementu.

Tab. 16 Seznam použitých receptur, jejich značení a míra substituce cementu

| Značení receptury | Druhotná surovina | Náhrada cementu [%] |
|-------------------|--------------------------|---------------------|
| REF_PH3 | - | 0 |
| 20 % ETU 348_PH3 | Popílek – Tušimice 01 | 20 |
| 40 % ETU 348_PH3 | | 40 |
| 20 % ETU 450_PH3 | | 20 |
| 40 % ETU 450_PH3 | | 40 |
| 20 % ETU 530_PH3 | | 20 |
| 40 % ETU 530_PH3 | | 40 |
| 20 % ETU 02_PH3 | Popílek – Tušimice 02 | 20 |
| 40 % ETU 02_PH3 | | 40 |
| 20 % EOS 298_PH3 | Škvára – Oslavany | 20 |
| 40 % EOS 298_PH3 | | 40 |
| 20 % EOS 410_PH3 | | 20 |
| 40 % EOS 410_PH3 | | 40 |
| 20 % EOS 530_PH3 | | 20 |
| 40 % EOS 530_PH3 | | 40 |
| 20 % Sklo 300_PH3 | Obalové sklo – Vetropack | 20 |
| 40 % Sklo 300_PH3 | | 40 |
| 20 % Sklo 400_PH3 | | 20 |
| 40 % Sklo 400_PH3 | | 40 |
| 20 % Sklo 541_PH3 | | 20 |
| 40 % Sklo 541_PH3 | | 40 |

Další zkušební receptury byly založeny na modifikovaném složení referenční receptury PH3_REF (Tab. 16). Výrobcem předepsaný poměr mísení složek k výrobě referenční suché směsi byl: 1 kg suché směsi + 0,2 kg CEM I 42,5 R. Stejně jako v druhé etapě bylo navrženo a vyrobeno celkem 20 modifikovaných receptur, obsahujících tři různé

příměsí, z nichž každá byla upravena na tři rozdílné jemnosti mletí. Samotný cement byl částečně nahrazen těmito druhotnými surovinami v míře 20 a 40 hm% cementu.

Suchá směs o hmotnosti 20 kg byla následně mísená ve vysoce účinném vertikálním šnekovém homogenizátoru HV50 s tím, že optimální dobou homogenizace pro zajištění dokonalého rozmísení příměsí bylo 30 minut.

Následně byl pro jednotlivé směsi stanoven optimální vodní součinitel pomocí zkoušky konzistence na střešacím stolku. Optimální vodní součinitel byl stanoven tak, aby konzistence čerstvého potěru byla vždy odpovídající referenční hmotě V další fázi byla vytvořena zkušební tělesa s 20 % a 40 % náhradou cementu mletou druhotnou surovinou, na nichž byly stanoveny fyzikálně mechanické vlastnosti.

7.1.1 Označení receptur

Zkušební receptury byly označeny v závislosti na míře substituce cementu, druhu použité příměsí a jejím specifickém měrném povrchu.

20 % ETU 348_PH3

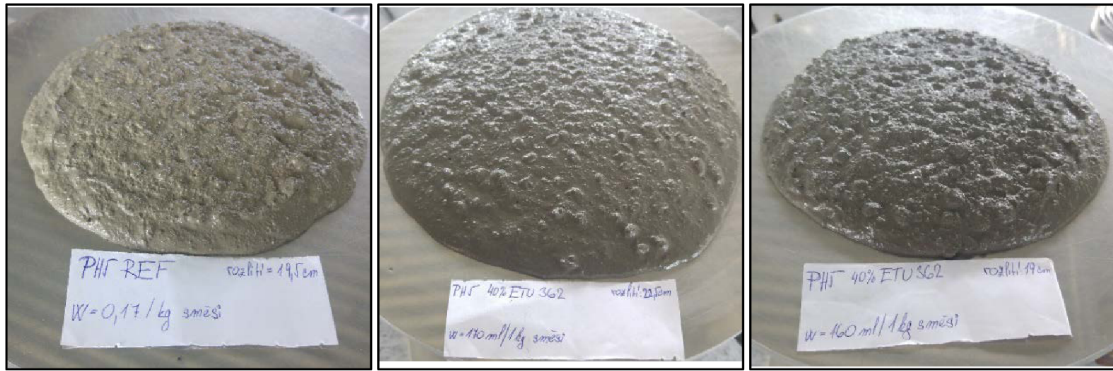
- 20 % míra substituce cementu druhotnou surovinou,
- ETU druhotná surovina popílek,
- 348 jemnost mletí měřená Blainovým přístrojem [m^2/kg],
- PH3 základní matrice z podlahového potěru PH3

7.2 Vyhodnocení výsledků

7.2.1 Volba optimálního vodního součinitele a vliv jemnosti mletí přísad na zpracovatelnost

Vodní součinitel pro referenční hmotu byl stanoven výrobcem na 0,17 kg vody/1 kg suché směsi se 100 % dávkou cementu. Při tomto vodním součiniteli bylo stanoveno rozlité na střešacím stolku 195 mm (Graf 21).

Pro ostatních 20 zkušebních receptur byl stanoven specifický vodní součinitel tak, aby výsledná čerstvá směs dosahovala stejného rozlité jako referenční, tedy 195 ± 10 mm. Na Obr. 20 je srovnána referenční hmotu a její konzistence při použití vodního součinitele předepsaného výrobcem referenční potěrové směsi.



Obr. 18 Konzistence REF_PH3 a 40 % ETU 348 s předepsaným a optimálním „w“

Dále je na Obr. 18 hmota receptury 40 % ETU 348_PH3 se stejným vodním součinitelem (0,17 kg vody/1 kg suché směsi). Konzistence však byla příliš tekutá, rozliti dosahovalo hodnoty 225 mm. Proto byl vodní součinitel snižen na 0,16 kg vody/1 kg suché směsi a výsledné rozliti bylo 190 mm, tedy optimální pro danou recepturu.

Stejným postupem byl optimální vodní součinitel stanoven pro všechny zkušební receptury. Na Obr. 19 je srovnání odlišné konzistence při použití rozdílného vodního součinitele u receptury 20 % ETU 450_PH3. V prvním případě byl vodní součinitel 0,165 kg vody/1 kg suché směsi a rozliti 175 mm. V druhé případě při vodním součiniteli 0,17 kg vody/1 kg suché směsi bylo rozliti stanoveno na 195 mm. Je patrné, že použitý podlahový potěr byl velice citlivý na volbu optimálního vodního součinitele, jelikož v tomto případě došlo při snížení vodního součinitele o 3 %, ke zhoršení konzistence o 11 %.



Obr. 19 Rozdílná konzistence receptury 20 % ETU 450 s optimálním a vysokým „w“

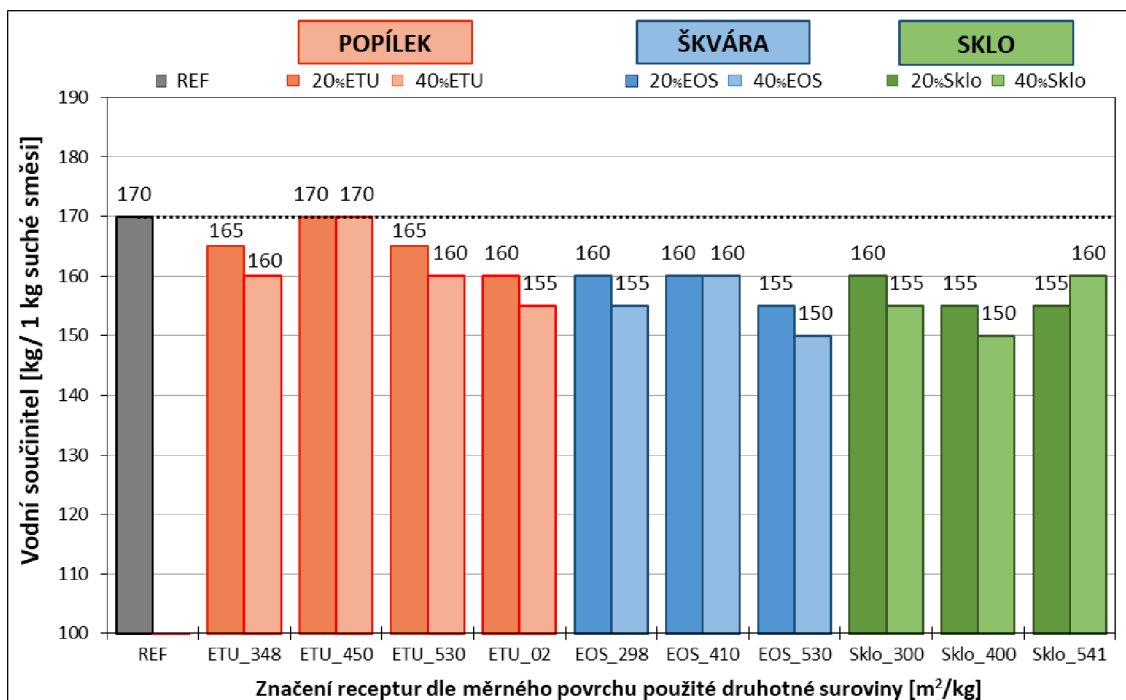
Na Obr. 20 je srovnána referenční receptura s rozlitem 195 mm a receptura 40% ETU 530_PH3 o rozlitem 185 mm, ale s použitým vodním součinitelem 0,160 kg vody/1 kg suché směsi. Snížení vodního součinitele u téměř všech zkušebních receptur bylo zapříčiněno vyšším podílem hrubozrnných částic v předpřipravených druhotných surovinách.



Obr. 20 Zkouška rozlitem u receptury REF_PH3 a 40 % ETU 530

Vyšší míra substituce cementu druhotnými surovinami ve většině případů pozitivně ovlivnila zpracovatelnost čerstvého potěru což umožnilo snižovat vodní součinitel. Velký vliv na zpracovatelnost měly i přísady obsažené v podlahovém potěru.

Značný rozdíl ve spotřebě záměsové vody byl mezi recepturami s popílkou ETU 450 a ETU 02. Stejně jako při aplikaci těchto popílků v normové maltě, i přes velmi podobný měrný povrch obou příměsí měla značný vliv různá pórovitost a hutnost těchto popílků.



Graf 26 Vliv jemnosti mletí druhotných surovin na vodní součinitel podlahového potěru

Při započetí hydratačních procesů podlahového potěru byl pozorován značný vývoj hydratačních teplot, pravděpodobně zapříčiněných obsaženým hlinitanovým cementem. Vzhledem ke výraznému vývinu hydratačního tepla a velice rychlému nárůstu počátečních pevností bylo navrženo, že u zkušebních vzorků vybraných receptur bude studována vnitřní mikrostruktura struktura cementového kamene a vliv druhotných surovin na vývin hydratačních trhlin.

V celém objemu cementové matrice se zároveň začaly tvořit jakési krystalizační zárodky, které postupně prorůstaly mezi sebou a vytvořily základ cementového kamene (Obr. 21).



Obr. 21 Kamenivo vzniklé při počátku hydratačních procesů potěru PH3.

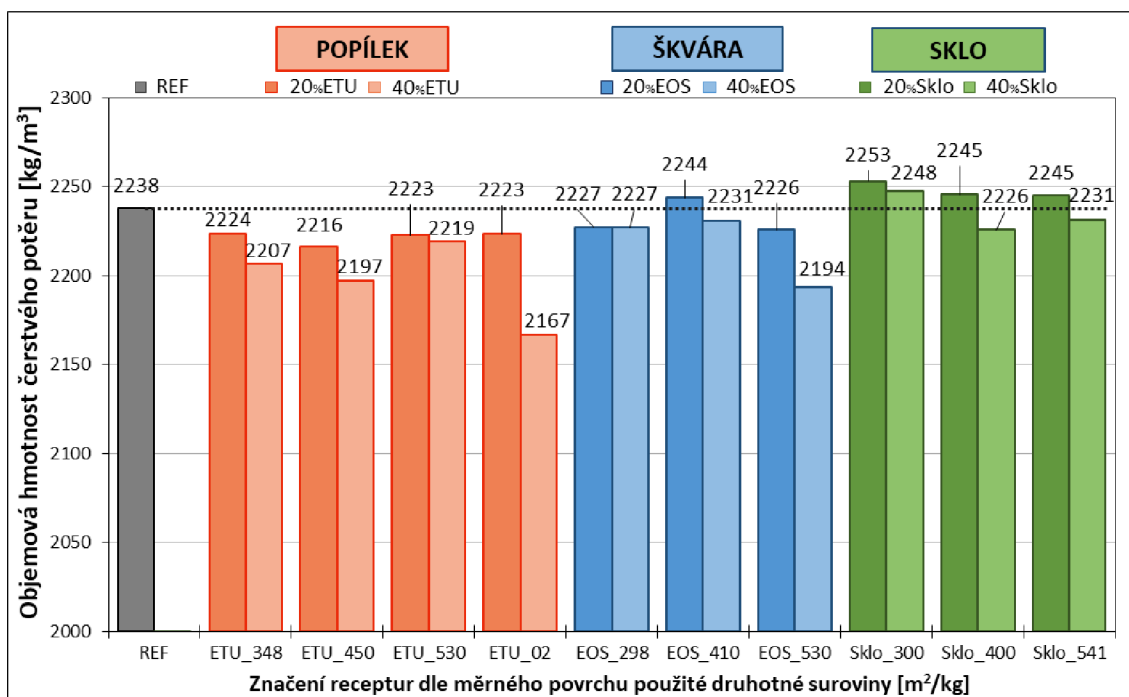
Vinou vzniku těchto novotvarů nebylo možné u podlahového potěru stanovit čas počátku tuhnutí a tvrdnutí pomocí přístroje typu Vicat, jelikož dříve, než nastalo souvislé tuhnutí v celém objemu cementového tmele, vzniklé „kamenivo“ zabránilo vniknutí měřicí jehly.

7.2.2 Vliv jemnosti mletí přísad na objemovou hmotnost

Vliv náhrady cementu druhotnými surovinami na objemové hmotnosti se projevil v čerstvém i ztvrdlém stavu.

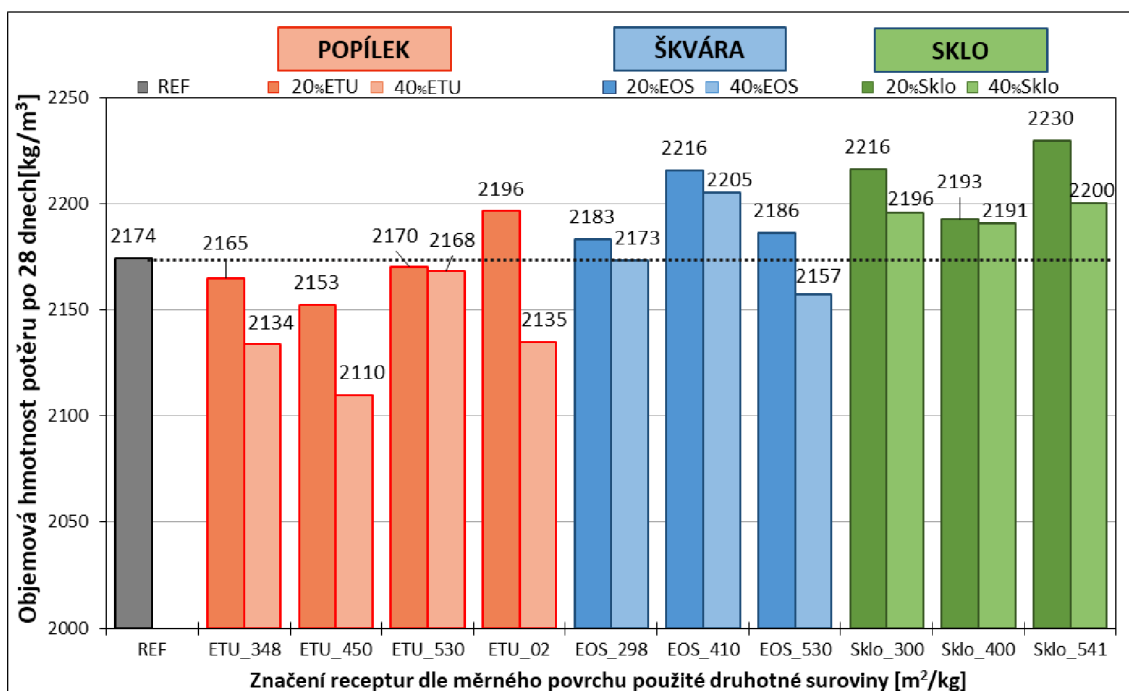
Nejvyšší objemové hmotnosti u čerstvého potěru byly stanoveny recepturám obsahujícím mleté sklo. S navyšujícím se měrným povrchem skla se objemová hmotnost snižovala. Tento jev je spojen s nejlepší zpracovatelností receptur obsahujících mleté sklo. Došlo tedy k optimálnímu zhutnění potěru, čímž se snížil obsahem makropórů.

Nejvyšší vodní součinitel pro receptury s příměsí škváry byl zvolen u směsí obsahujících škváru EOS 410. Z toho důvodu dosahovaly objemové hmotnosti čerstvého potěru se škvárou EOS 410 nejvyšších hodnot.



Graf 27 Vliv jemnosti mletí druhotných surovin na objemovou hmotnost čerstvého potěru

Hodnoty objemových hmotností stanovené u receptur s nižší 20 % dávkou popílku jsou si velice podobné. Vliv příměsi se výrazněji projevila až u receptur s vyšší 40 % dávkou popílku. Volba nejnižšího vodního součinitele u receptury 40 % ETU 02_PH3 vedla k dosažení zároveň nejnižší objemové hmotnosti. Je patrné, že i přes poměrně dobrou konzistenci nebylo u této receptury dosaženo optimálního ztuhnutí.



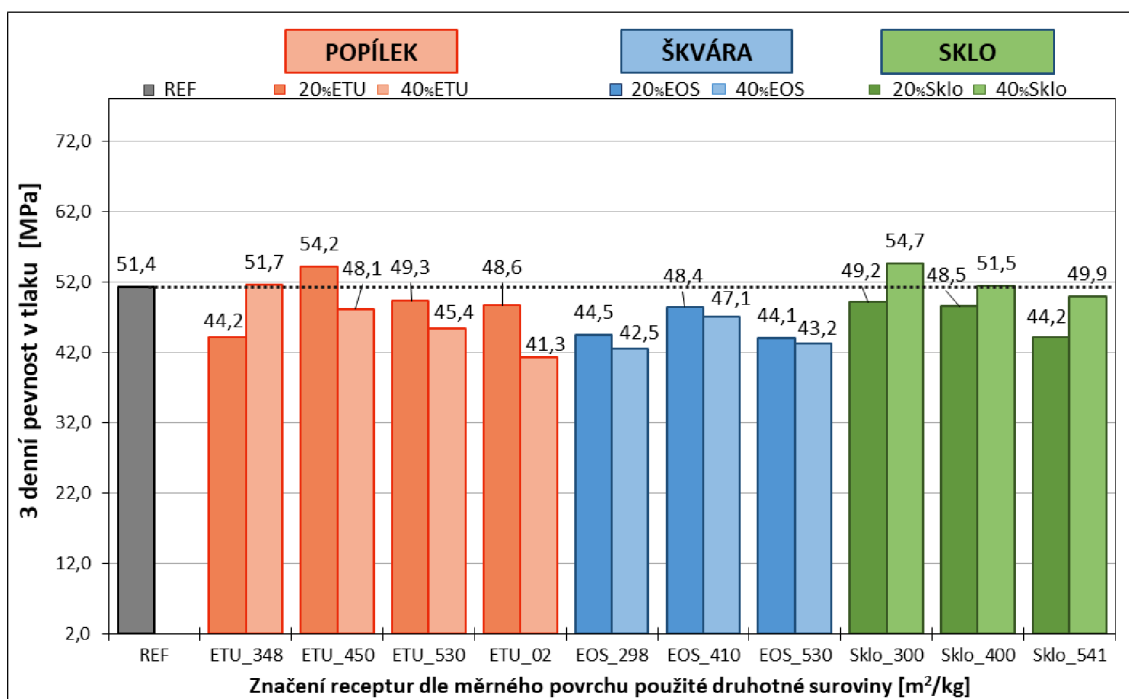
Graf 28 Vliv jemnosti mletí druhotných surovin na objemovou hmotnost ztvrdlého potěru

Z hodnot objemových hmotností zkušebních těles stanovených po 28 dnech zrání je patrné, že příměs mletého skla v podlahovém potěru měla velice pozitivní dopad na hutnost, což mohlo mít pozitivní vliv i na pevnostní charakteristiky stanovené u těchto receptur. Všechna zkušební tělesa receptur obsahujících mleté sklo dosáhla vyšší objemové hmotnosti než referenční potěr.

Při srovnání receptur s příměsí škváry dosáhla na nejvyšší objemovou hmotnost zkušební tělesa obsahující škváru EOS 410. U zkušebních těles s popílkem ETU 248 a hlavně ETU 450 se během zrání projevila větší spotřeba záměsové vody, a to vedlo k dosažení nižší objemové hmotnosti.

7.2.3 Vliv jemnosti mletí přísad na pevnost v tlaku

Použitý podlahový potěr měl velký vliv nejen na konzistenci čerstvého potěru, ale také na vývoj krátkodobých i dlouhodobých pevností. Ve srovnání s normovou maltou se v tomto případě jednalo o mnohem komplexnější stavební hmotu obsahující celou řadu přísad, které výrazně ovlivnily mechanické vlastnosti výsledného kompozitu. V rámci této práce byl sledován pouze vliv jednotlivých druhotných surovin a jemnosti mletí. Druh a dávka přísad obsažených v potěru nebyly při vyhodnocení zohledňovány.

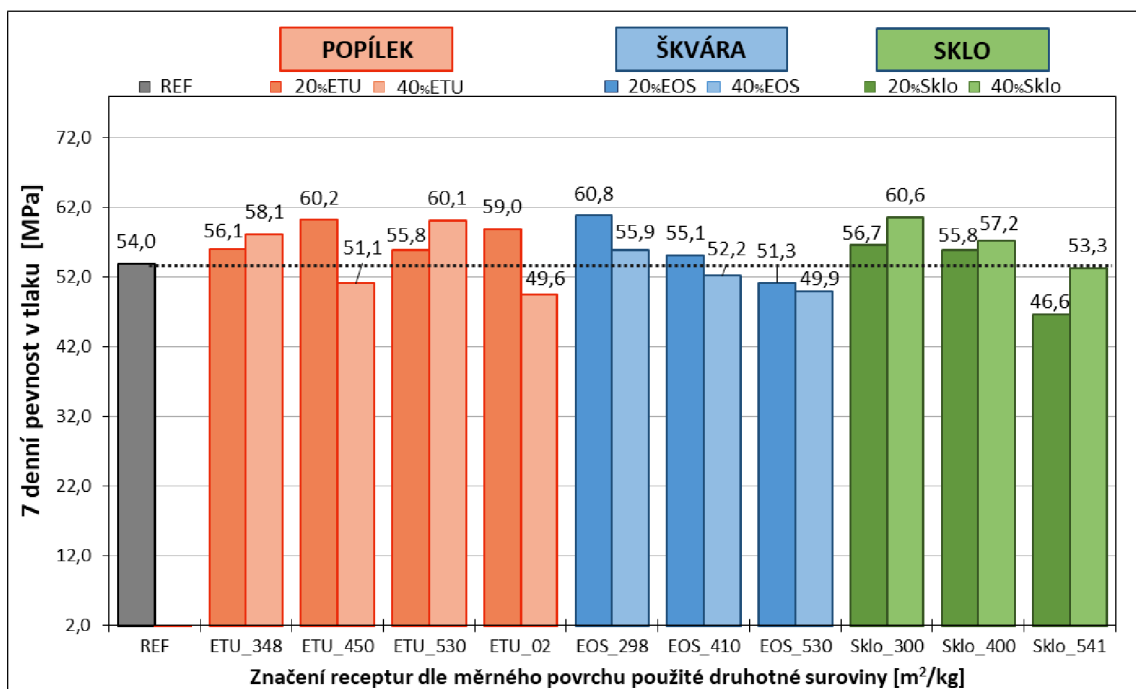


Graf 29 Pevnost v tlaku po 3 dnech zrání

Z grafického vyjádření třídních pevností v tlaku (Graf 29) jednotlivých zkušebních receptur je patrné, že referenční receptura REF_PH3 již dosáhla více než 50 MPa. Tutu hranici překonaly také receptury s hrubě mletým sklem (40 % Sklo 300_PH3,

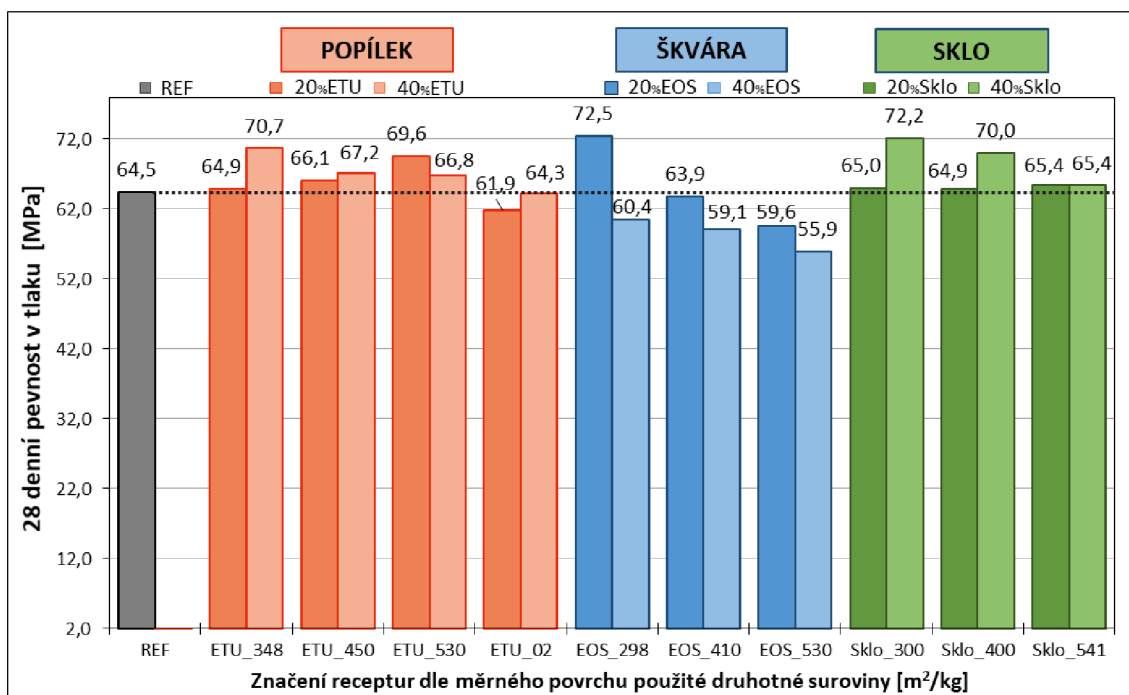
40 % Sklo 400_PH3) a hrubě mletým popílkem (40 % ETU 348_PH3, 20 % ETU 450_PH3).

Po sedmi dnech zrání se tlaková pevnost referenčních těles nijak nezvýšila, ale naopak výrazně vzrostly pevnosti u ostatních zkušebních těles obsahujících přidané druhotné suroviny (Graf 30). U vzorků obsahujících škváru EOS se projevil trend snižující se pevnosti s rostoucí dávkou příměsi a zároveň s jejím rostoucím měrným povrchem. Nejvyšší pevnosti tak bylo dosaženo u receptury 20 % EOS 298_PH3 (o 22 % vyšší než referenční pevnost). Také použití mletého skla o vyšším měrném povrchu mělo za následek snižující se pevnost. Avšak vyšší míra substituce cementu sklem vedla k navýšení pevnosti. Nejvyšší pevnosti tak bylo dosaženo u receptury 40 % Sklo 300_PH3 (o 21 % vyšší než referenční pevnost).



Graf 30 Pevnost v tlaku po 7 dnech zrání

Mnohem složitější bylo vyhodnotit vliv jemnosti mletí popílku na pevnost. Nejvyšších pevností totiž dosáhly receptury 20 % ETU 450_PH3 a 40 % ETU 530_PH3 (o 20 % vyšší než referenční pevnost). Obecně je však možné říct, že použitím popílku o jakékoliv jemnosti mletí bylo možné dosáhnout vyšší krátkodobé pevnosti v tlaku.



Graf 31 Pevnost v tlaku po 28 dnech zrání

V období mezi třetím a sedmým dnem zrání se pevnost referenční receptury výrazně nezměnila, ale dále do osmadvacátého dne zrání došlo k navýšení pevnosti o 20 % (Graf 31). Rychlý nárůst pevností zapříčinil hlinitanový cement obsažený v potěru PH3 a s jeho hydratací spojený vznik kalciumaluminátů. Pozdější nárůst pevností zapříčinila hydratace portlandského cementu za vzniku kalciumsilikátů a zřejmě i hydratace pucolánových příměsí.

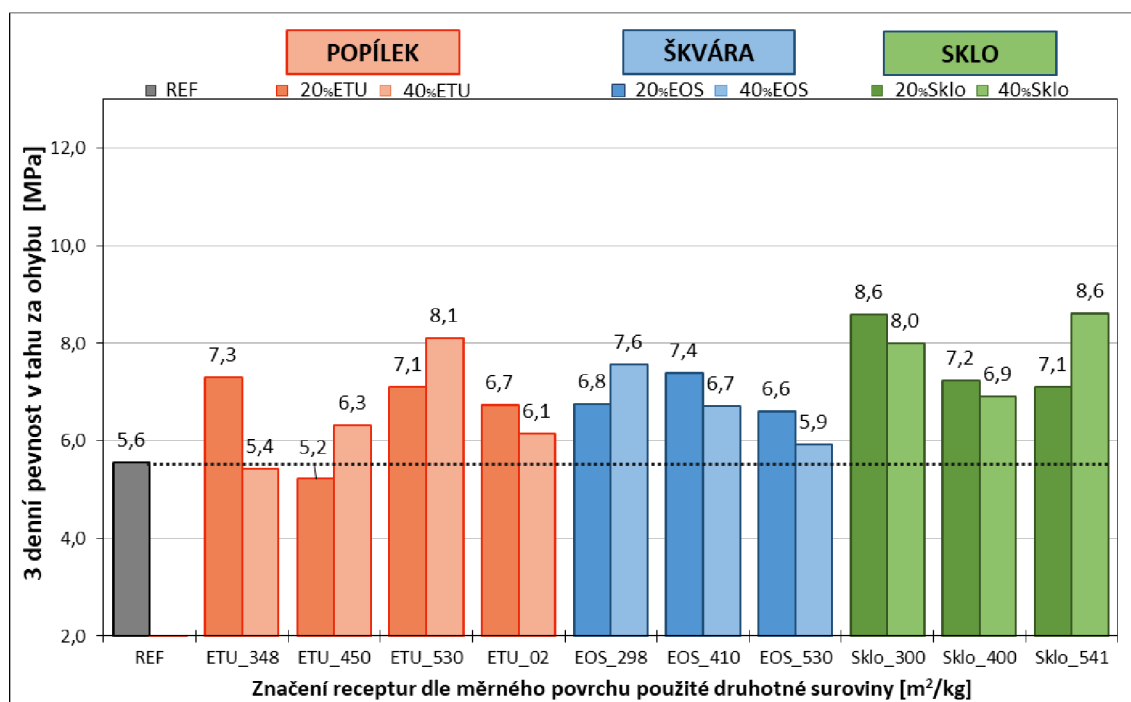
U receptur s mletou škvárou i sklem bylo prokázáno, že v období mezi sedmým a dvacátým osmým dnem zrání rostly pevnosti u jednotlivých receptur rovnoměrně a znovu dosahovaly nejvyšších a nejnižších pevností stejné receptury jako v raném stádium zrání. Nejvyšší pevnosti dosáhly receptury 20 % EOS 298_PH3, respektive 40 % Sklo 300_PH3 (v obou případech pevnosti v tlaku vyšší o 15 % oproti referenční).

V případě receptur s určitou náhradou cementu popílkem ETU se projevil trend snižující se pevnosti s rostoucím měrným povrchem. Nejvyšší pevnosti dosáhla receptura 40 % ETU 348_PH3 (o 13 % vyšší než referenční pevnost).

Stejně jako v případě použití v normové maltě, tak i v potěru PH3 dosahovaly receptury s popílkem ETU 450 vyšších krátkodobých pevností v tlaku než s ním srovnávané receptury obsahující popílek ETU 02. Tento rozdíl se po sedmi dnech zrání minimalizoval a dále již vývoj pevností v tlaku těchto receptur probíhal stejně.

7.2.4 Vliv jemnosti mletí přísad na pevnost v tahu za ohybu

U zkušebních těles byly stanoveny krátkodobé (≤ 7 dní) i dlouhodobé (28 dní) pevnosti v tahu.

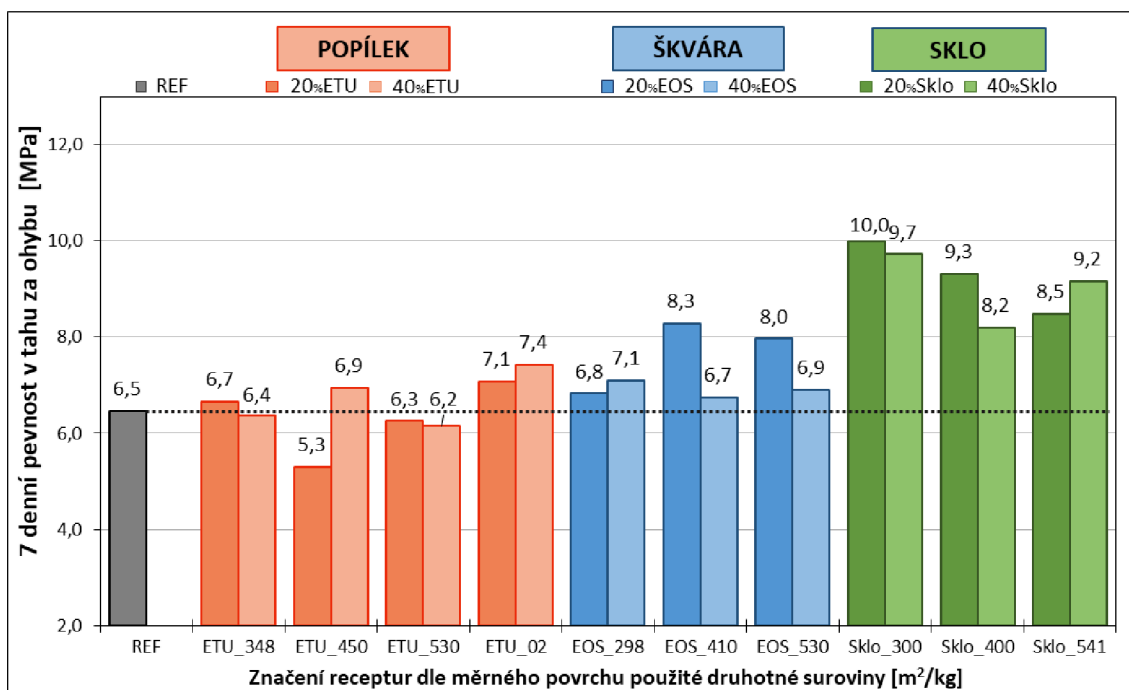


Graf 32 Pevnost v tahu za ohybu po 3 dnech zrání

U krátkodobých pevností v tahu za ohybu se značně projevil vliv hutnosti jednotlivých zkušebních těles. V normové maltě měla náhrada cementu mletým sklem negativní vliv na vývin tahových pevností, zvláště při vyšší míře substituce pojiva. V případě podlahového potěru tomu bylo naopak, na čemž měla do značné míry podíl hutnost cementové matrice.

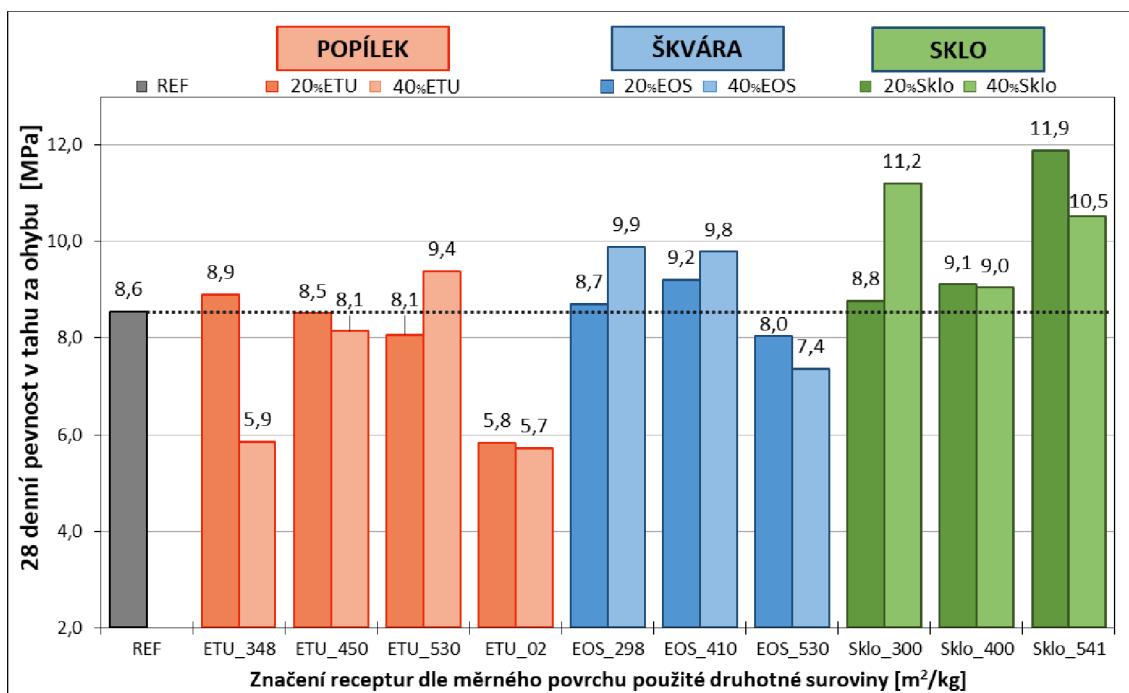
Vyšší, než referenční krátkodobé pevnosti v tahu za ohybu bylo dosaženo také u všech receptur s příměsí škváry a popílku (Graf 32). Výjimkou byla receptura 20 % ETU 450_PH3, kdy bylo po sedmi dnech zrání dosaženo pouze 81 % referenční pevnosti. V období mezi třetím a sedmým dnem zrání probíhal výrazný nárůst tahových pevností pouze u receptur s příměsí mletého skla. To mohlo být zapříčiněno zklidněním vývinu hydratačního tepla a nárůstu počátečních pevností, což vedlo ke vzniku kompaktnější struktury cementového kamene.

Při studiu vývoje krátkodobých pevností v tahu byl pozorován pokles pevností u některých receptur s příměsí popílku ETU 01 (Graf 33). U zkušebních těles receptur s popílkem ETU 02 tento trend nebyl pozorován, je tedy možné, že mletí popílku mělo za následek rychlejší vývin tahových pevností v prvních dnech zrání, ale jiná mikrostruktura zrn popílku negativně ovlivnila soudržnost.



Graf 33 Pevnost v tahu za ohybu po 7 dnech zrání

U zkušebních těles obsahujících škváru EOS 298 nedošlo v období mezi třetím a sedmým dnem zrání k nárůstu pevností. Vzhledem k tomu, že u ostatních receptur pevnosti narůstaly, souvisel tento jev s příliš nízkým měrným povrchem škváry. Naopak po 28 dnech zrání dosáhla receptura 40 % EOS 298_PH3 nejvyšší tahové pevnosti mezi všemi recepturami s příměsí škváry (Graf 34).



Graf 34 Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech zrání

Z výsledků dlouhodobých pevností v tahu za ohybu receptur s příměsí popílku ETU je zjevné, že až na výjimky došlo k významnému nárůstu pevností. Zastavení vývinu pevností v případě receptury 20 % ETU 348_PH3 mohlo být zapříčiněno příliš vysokou dávkou hrubozrnného popílku. U receptur s vyšší mírou substituce cementu popílkem ETU 01 byla patrná závislost jemnosti mletí na pevnosti v tahu. Nejvyšší pevnosti dosáhly zkušební tělesa receptury 40 % ETU 530 (111 % z referenční pevnosti).

V případě dlouhodobých pevností v tahu za ohybu zkušebních těles obsahujících příměs mletého skla bylo nejvyšší pevnosti dosaženo u receptury 40 % Sklo 300_PH3 (130 % z referenční pevnosti) a dále u receptur s jemně mletým Sklo 541. V případě receptury 20 % Sklo 541_PH3 se jednalo o 38 % nárůst oproti referenční pevnosti.

7.3 Shrnutí etapy 4

Podlahový potěr PH3 se vyznačoval rychlým nárůstem pevností a vývinem vysokých hydratačních teplot. To přináší výhody v rychlé pokládce a možnosti brzkého zatížení podlahové konstrukce, to však sebou nese některá rizika. Vzhledem k rychlému nárůstu počátečních pevností a vývinu vysokých hydratačních teplot hrozí nadměrný odpar záměsové vody, nejen z povrchu, ale z celého objemu potěru. S tím souvisí riziko vzniku smršťovacích trhlin. Použitím druhotných surovin jako částečné náhrady cementu může dojít ke zmírnění hydratačních pochodů, zajištění hutnější mikrostruktury, a to hlavně bez snížení dlouhodobých pevností potěru.

Stanovení specifických vodních součinitelů pro jednotlivé receptury, bylo snahou udržet nejpodobnější konzistence referenční hmotě. Z poznatků nabytých v předešlých etapách bylo zřejmé, že při použití některých druhotných surovin nemusí být konzistence čerstvé hmoty určená rozlitím na střešacím stolku odpovídající její zpracovatelnosti. Přídavkem popílku byla vytvořená hmota hutnější a vykazovala tixotropní vlastnosti. Proto při dosažení stejné konzistence jako u referenční hmoty byla zpracovatelnost obtížnější a potěr byl lepivější. Zpracovatelnost potěru s popílkem se s časem a delší dobou míchání zlepšovala, s tím, jak se uvolňovala voda navázaná na zrna popílku.

Naopak použitím mletého skla jako částečné náhrady cementu v potěru bylo možné dosáhnout snadno zpracovatelné hmoty i s nižším vodním součinitelem. Je však třeba říct, že spotřeba záměsové vody druhotnými surovinami v normové maltě a podlahovém potěru byla odlišná, což bylo zapříčiněno obsaženými plastifikačními přísadami.

Nejvyšší objemové hmotnosti čerstvého potěru byly stanoveny u receptur obsahující mleté sklo. Jedná se o úplně opačný vliv, než jaký mělo mleté sklo při stejných dávkách v normové maltě (5.2.3). Při porovnání výsledků jednotlivých objemových hmotností

potěru v čerstvém a ztvrdlém stavu se zvolenými vodními součiniteli, je mezi nimi patrná závislost. U receptur s částečnou náhradou cementu sklem byla prokázána přímá úměra, kdy s vyšším vodním součinitelem bylo dosaženo vyšších objemových hmotností. U receptur obsahujících popílek ETU je tomu naopak. S nižším vodním součinitelem bylo dosaženo hutnější struktury a vyšší objemové hmotnosti.

Stanovením raných pevností v tlaku bylo prokázáno, že již po třech dnech zrání je možné v potěru nahradit větší množství cementu, a přitom dosáhnout vyšších pevností. Při použití popílku ETU 01 nabyly zkušební tělesa receptur 40 % ETU 348_PH3 a 20 % ETU 450_PH3 stejných či vyšších pevností než referenční potěr. V případě použití mletého skla tomu tak bylo u receptur 40 % Sklo 400_PH3 a 40 % Sklo 300_PH3.

Vyhodnocením sedmidenních pevností v tlaku bylo prokázáno, že vyšších, než referenčních pevností potěru je možné dosáhnout všemi použitými druhotnými surovinami, v závislosti na jejich jemnosti mletí. Je patrné, že nižší měrný povrch příměsí měl pozitivnější vliv na tlakové pevnosti. Předpokládá se, že tento trend souvisí s nižší reaktivností mletých druhotných surovin, čímž byl zpomalen počáteční nárůst pevností, a to zabránilo značnému narušení vnitřní mikrostruktury potěru.

U dlouhodobých pevností byla znovu prokázána závislost mezi nižším měrných povrchem druhotných surovin (300–400 m²/kg) a vyššími pevnostmi v tlaku. Nejvyšších pevností po osmadvaceti dnech zrání bylo dosaženo u receptur 40 % ETU 348_PH3 (110 % z referenční pevnosti), 20 % EOS 298_PH3 (113 % z referenční pevnosti) a 40 % Sklo 300_PH3 (112 % z referenční pevnosti).

Pevnost v tahu za ohybu není v případě podlahového potěru natolik zásadní charakteristikou jako pevnost v tlaku. Přesto, i u tahových pevností byl prokázán pozitivní vliv částečné substituce cementu druhotnými surovinami. Nejprínosnější dopad na pevnosti v tahu podlahového potěru byl prokázán příměsí mletého skla. U receptur se sklem upraveným na měrný povrch 300 m²/kg došlo k navýšení pevnosti v tahu po třech i sedmi dnech zrání až o 15 % oproti referenční receptuře.

V dlouhodobých tahových pevnostech zkušebních těles s popílkem ETU došlo k výraznému poklesu u receptur s ETU 02. Tento jev mohl být zapříčiněn chybou v měření. Spojitost však mohou mít tyto výsledky s dlouhodobými pevnostmi v tahu receptury 20 % ETU 348_PH3. V případě vyšší dávky popílku ETU 348 došlo k nízkému vývinu dlouhodobých tahových pevností také při jeho použití v normové maltě. V případě ETU 02 i ETU 348 se jednalo o popílků s vyšším podílem hrubozrnných částic, který při určité míře substituce cementu zapříčinil nedostatečnou soudržnost potěru v tahu.

7.4 Výběr vhodných receptur pro studium mikrostruktury

Negativní vliv rychlého nárůstu pevností i vyvinu vysokých hydratačních teplot podlahového potěru PH3 na mikrostrukturu cementového kamene byl laboratorně ověřen. Stejně tak bylo předmětem studia, jaký vliv na mikrostrukturu měla částečná náhrada cementu v potěru druhotnými surovinami. Z toho důvodu byla vyrobena nová sada zkušebních těles referenční receptury.

Na základě vyhodnocení pevností stanovených u jednotlivých zkušebních receptur, byly vybrány celkem tři reprezentativní receptury pro studium mikrostruktury cementového kamene.

Z finančního a technologického hlediska je žádoucí minimalizovat čas mletí druhotných surovin. Z toho důvodu byl výběr zúžen na receptury s měrným povrchem příměsí $300 \pm 50 \text{ m}^2/\text{kg}$. Bylo tak rozhodnuto také v závislosti na stanovených pevnostech. U zkušebních těles receptur ETU 348_PH3, EOS 298_PH3 a Sklo 300_PH3 bylo dosaženo vysokých pevností v tlaku i tahu za ohybu. Pro průkazné ověření vlivu částečné náhrady cementu druhotnými surovinami na mikrostrukturu byly vybrány receptury s 40 % dávkou příměsí.

Jako reprezentativní receptury pro studium mikrostruktury byly vybrány:

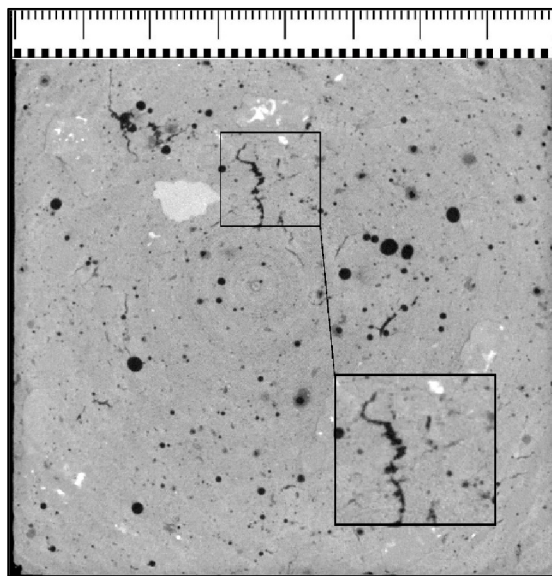
- REF_PH3
- 40 % ETU 348_PH3
- 40 % EOS 298_PH3
- 40 % Sklo 300_PH3

8. ETAPA 5 – Studium mikrostruktury a vyhodnocení výsledků

Vnitřní sktruktura zkušebních těles byla zaznamenána pomocí rentgenového tomografu. Z každého měření bylo vygenerováno video složené z 300 snímků, přičemž snímané roviny byly od sebe vzdáleny cca 0,3 mm. Vzorčky byly prozařovány kolmo na podélnou osu zkušebních těles.

8.1 Mikrostruktura podlahového potěru

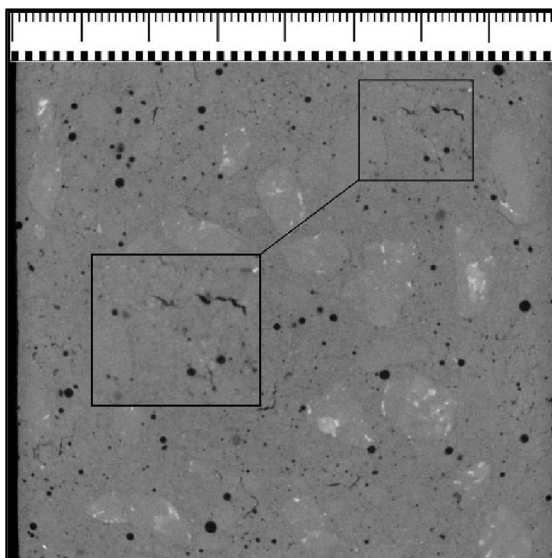
Všechna vybraná zkušební tělesa pro studium vnitřní mikrostruktury byla minimálně 28 dní stará.



Obr. 22 Tomografický snímek struktury zkušebního tělesa REF_PH3

Při pohledu na snímek vnitřní struktury zkušebního tělesa referenční receptury REF_PH3 (Obr. 22) je možné spatřit celou řadu trhlin různých tvarů a velikostí, přičemž se nacházely nahodile v celém objemu zkušebního tělesa. Část trhlin, jako v případě zvýrazněné trhliny na Obr. 22, byla krátká a výrazná. Dle jejich charakteru je předpoklad, že se jednalo o trhliny vzniklé při hutnění. Špatnou zpracovatelnost čerstvého potěru potvrzuje i poměrně velké množství makropórů nacházejících se ve struktuře referenčního potěru.

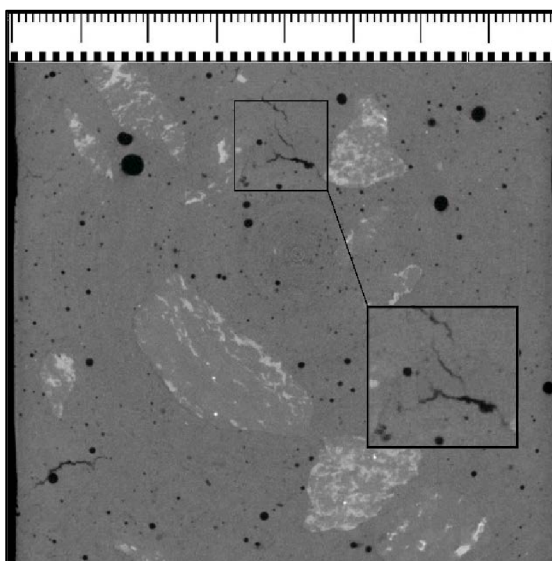
Dále se v celém objemu zkušebních těles referenční receptury nacházelo velké množství malých všesměrných trhlinek připomínajících pavučinu. Vznik těchto trhlinek je pravděpodobně možné přičíst smršťování zapříčiněnému rychlým vývinem hydratačních teplot. Tlak vzniklý při rychlém odpařování vody z celého objemu betonu zapříčinil potrhání mikrostruktury zkušebního tělesa.



Obr. 23 Tomografický snímek struktury zkušebního tělesa 40 % ETU 348_PH3

Na Obr. 23 je tomografický snímek struktury zkušebního tělesa receptury 40 % ETU 348_PH3. Z obrázku je zjevné, že částečná náhrada cementu popílkem měla jen malý vliv na vnitřní strukturu potěru. Tomografické skenování materiálu prokázalo, že stále vznikaly velké trhliny způsobené horší zpracovatelností čerstvé hmoty obsahující vyšší dávku popílku. Se špatnou zpracovatelností souvisí i velké množství makropórů, které zůstaly ve struktuře potěru i přes intenzivní hutnění do forem pomocí vibračního stolu.

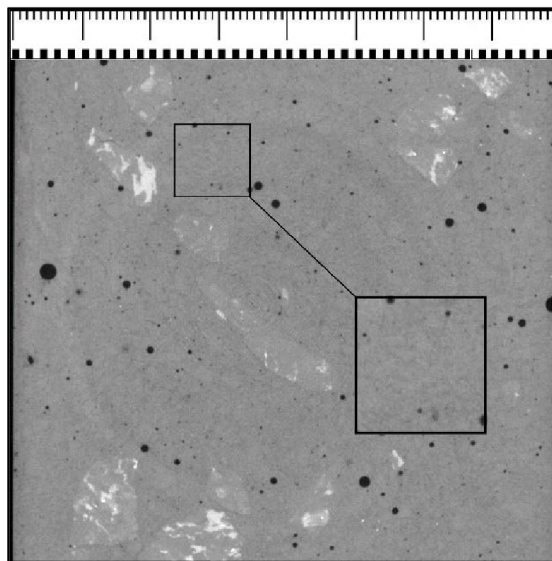
Dále se ve struktuře tělesa receptury 40 % ETU 348_PH3 nachází i poměrně velké množství malých všesměrných trhlinek, které již u Obr. 22 byly identifikovány jako trhlinky od smršťování. Přesto při vizuálním porovnání snímků referenčního tělesa a tělesa s popílkem zjevně smršťovacích trhlin při použití popílku ETU 348 ubylo.



Obr. 24 Tomografický snímek struktury zkušebního tělesa 40 % EOS 298_PH3

Z tomografického snímku zkušebního tělesa receptury 40 % EOS 298_PH3 je patrný přínos škváry, jako částečné náhrady cementu v potěru (Obr. 24). Vizuálním srovnáním se snímkem referenční receptury (Obr. 22) je prokazatelné, že při využití škváry jako částečné náhrady cementu se do značné míry eliminoval vývin smršťovacích trhlinek. V celém objemu zkušebního tělesa bylo pouze malé množství jemných všesměrných trhlinek.

Zároveň se jeví, že použitím škváry se zlepšila i zpracovatelnost čerstvého potěru a hutnost cementového kamene. Obsah makropórů je menší a snížilo se také množství velkým trhlin vzniklých při zpracování čerstvé hmoty.



Obr. 25 Tomografický snímek struktury zkušebního tělesa 40 % Sklo 300_PH3

Použitím mletého sodnokřemičitého skelného recyklátu jako částečné náhrady cementu byl potvrzen jeho pozitivní přínos, což potvrzuje snímek struktury zkušebního tělesa receptury 40 % Sklo 300_PH3 (Obr. 25). Zastoupení makropórů ve struktuře potěru se sklem bylo při srovnání snímků všech reprezentativních těles znatelně nejnižší. Zároveň se v celém objemu zkušebního tělesa receptury 40 % Sklo 300_PH3 jen zřídka objevovaly velké málo rozvětvené trhliny.

Z Obr. 25 je patrné, že 40 % mírou substituce cementu sklem mletým na měrný povrch 300 m²/kg byl velice výrazně eliminován vznik smršťovacích trhlinek.

8.2 Vyhodnocení výsledků diplomové práce

Vznik smršťovacích trhlinek může mít velice negativní dopad nejen na pevnosti podlahového potěru, ale také na jeho nasákavost, s čímž souvisí odolnost celého podlahového systému proti agresivním a chemickým vlivům.

V referenčním potěru REF_PH3 vzniklo velké množství smršťovacích trhlinek, což bylo prokázáno pomocí snímkování zkušebních těles tomografem. Potvrdila se tak obava, že vzhledem vysokým hydratačním teplotám vyvíjeným v raném stádiu zrání potěru PH3 dochází k narušení celistvosti cementového kamene. Dále bylo studiem vnitřní struktury zkušebních těles REF_PH3 zjištěno, že je cementový tmel v celém objemu narušen poměrně velkými trhlinami. Ze zkušeností nabytých při práci s potěrem PH3 byl dán původ těchto trhlín za vinu nedostatečné zpracovatelnosti čerstvé hmoty, případně špatného způsobu zpracovávání čerstvého potěru. Vzhledem k charakteristikám, jakými se čerstvý potěr PH3 vyznačoval bylo obtížné dosáhnout optimálního zhutnění do normových trojforem.

Problém se zpracovatelností čerstvého potěru se ještě prohloubil částečnou náhradou cementu popílkem ETU. Konzistence čerstvého potěru stanovená rozlitím na střešacím stolku nebyla dostatečně vypovídající o reálné zpracovatelnosti receptur potěru s popílkem. Při částečné náhradě cementu popílkem ETU v normové maltě se prokázala jeho větší spotřeba záměsové vody a sklon čerstvé malty k tixotropii. Zásluhou této vlastnosti hmot s popílkem ETU dosahoval potěr poměrně dobrého rozlití na střešacím stolku. Pro dosažení stejného rozlití, jaké měla referenční hmota (REF_PH3) bylo dokonce nutné snížit vodní součinitel. Problém se zpracovatelností potěru nastal, když zůstal chvíli v klidu a následně bylo velice obtížné jej dostatečně zhutnit do normových trojforem. Výsledkem byl vznik podobného množství trhlín ve struktuře zkušebních těles receptury 40 % ETU 348_PH3, jaké bylo zjištěno v referenčním potěru. V případě obou receptur o nedostatečném zhutnění vypovídal i velký podíl makropórů ve struktuře betonu.

Přínosem je, že použitím popílku ETU 298 jako částečné náhrady cementu v potěru PH3 bylo dosaženo vyšších pevností v tlaku než u referenční receptury REF_PH3 a zároveň byl prokázán i pozitivní vliv popílku na snížení množství smršťovacích trhlinek. Pevnost v tlaku v případě receptury 40 % ETU 298348_PH3 dosahovala vyšších než referenčních hodnot již po třech dnech zrání. Zároveň popílek má ze všech používaných druhotných surovin teoreticky největší potenciál k aktivnímu přínosu k pevnostem, a to vzhledem k jeho pucolanitě. Zjištěna byla zároveň vysoká pevnosti v tahu za ohybu, kterou vykazovala zkušební tělesa receptury 40 % ETU 348_PH3 během prvních sedmi dní zrání. V tomto období je pro podlahový potěr pevnost v tahu

za ohybu nejdůležitější. Během prvních dní zrání je potěr vystaven velkému vnitřnímu pnutí a navýšení jeho odolnosti v tahu může vést k vytvoření podlahové konstrukce s lepšími užitnými vlastnostmi a delší životností.

Pozitivní vliv na pevnosti v tahu za ohybu nejen v raném, ale také pozdějším stádiu zrání potěru měly receptury s částečnou náhradou cementu škvárou EOS 298. Studium vnitřní mikrostruktury zkušebních těles receptury 40 % EOS 298_PH3 bylo zjištěno, že příčinou byl vliv škváry EOS na omezení vývinu smršťovacích trhlinek. Vliv škváry na pevnosti v tlaku nebyl tak výrazný jako v případě popílku či skla. Důvodem je zřejmě nedostatečná schopnost škváry EOS aktivně přispívat k pevnostem.

Nejnižších pevností při využití druhotných surovin jako částečné náhrady cementu v normové maltě bylo dosaženo použitím mletého skla. Je známo, že dostatečně jemně mleté sodno-vápenaté sklo je velice reaktivní za vzniku pucolánových reakcí. V případě využití skelného prášku v normových maltách však zřejmě nebylo dosaženo podmínek, ve kterých sklo reaguje. Na druhou stranu byl prokázán pozitivní vliv mletého skla na reologické vlastnosti normové malty, jak při jeho využití jako částečné náhrady cementu, tak jako aditiva.

Při použití mletého skla jako částečné náhrady cementu v potěru PH3 bylo dosaženo velice dobrých krátkodobých i dlouhodobých pevností v tlaku i tahu za ohybu. Důvodem může být velice specifické složení potěru PH3, kdy vývin pevností kompozitu s mletým sklem mohly podpořit obsažené superplastifikační přísady nebo celá řada aditiv. Studium mikrostruktury těles receptury 40 % Sklo 300_PH3 byl prokázán značný přínos mletého skla jako suroviny do podlahového potěru. Potvrdil se předpoklad, že sklo zklidní hydratační procesy. Dle snímků vnitřní struktury potěru nevznikaly téměř žádné smršťovací trhlinky. Zároveň se ve zkušebních tělesech podstatně snížilo množství větších trhlin vzniklých při zpracování čerstvého potěru. Tím byly potvrzeny výsledky všech etap, z kterých vyplývalo, že použitím mletého skla pro substituci cementu, či jako aditiva je možné zlepšit zpracovatelnost čerstvého betonu.

Z celé řady receptur modifikovaného potěru PH3 byl výběr pro studium vnitřní struktury betonu zúžen na tři, s každou druhotnou surovinou jedna. Jelikož je z technologického a samozřejmě i ekonomického hlediska žádoucí minimalizovat čas mletí, a maximalizovat náhradu cementu, byly zvoleny receptury s vyšší mírou substituce cementu druhotnými surovinami předupravenými na měrný povrch $300 \pm 50 \text{ m}^2/\text{kg}$. Posouzením vlivu druhotných surovin na strukturu cementového kamene byla ukončena experimentální část této práce.

S ohledem na získané výsledky byla 40 % míra substituce cementu v podlahovém potěru PH3 za současného zachování či zlepšení fyzikálně mechanických vlastností vyhodnocena jako přínosná. Při použití v potěru se z pohledu vlivu na reologické vlastnosti čerstvé hmoty, vlivu na pevnosti i vnitřní strukturu jevílo využití mletého obalového recyklátu jako nejvýhodnější.

Jako optimální byla vyhodnocena 40 % míra substituce cementu v podlahovém potěru PH3 a jako nejlepší substituent bylo zvoleno obalové sklo upravené mletím na měrný povrch $300 \text{ m}^2/\text{kg}$. Tato jemnost mletí je dostačující pro eliminaci vzniku AKR a zároveň má využití skelného recyklátu velký potenciál zapříčiněný jeho značnou reaktivností.

VII. ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo ověření možnosti náhrady silikátového pojiva různými druhy druhotných surovin ve vysokopevnostním podlahovém potěru na cementové bázi. Byl sledován vliv druhotných surovin na vývoj fyzikálně mechanických vlastností a struktury výsledného kompozitu.

Nejprve byly vybrány a charakterizovány vstupní suroviny po fyzikálně-mechanické a chemické stránce. Byl proveden výběr tří druhotných surovin, z nichž každá byla upravena na specifický měrný povrch mletím v kulovém mlýně. Záměrem bylo ověřit vliv jemnosti mletí druhotných surovin. V případě vysokoteplotního popílku bylo úmyslem posoudit také vliv úpravy popílku s vyšším měrným povrchem.

Dílčím cílem práce bylo zobecnění vlivu druhotných surovin na vlastnosti normové malty. V první řadě byly druhotné suroviny použity jako částečná náhrada cementu a dalším krokem bylo jejich použití jako aditiva do normové malty. V této části byl prokázán rozdílný přínos jednotlivých druhotných surovin k reologickým vlastnostem čerstvé malty i pevnostním charakteristikám. Zároveň byl potvrzen vliv jemnosti mletí, nejvíce u mletého skla.

V následující etapě bylo cílem ověření vlivu částečné náhrady cementu druhotnými surovinami na vlastnosti podlahového potěru a jejich vývoj v čase. V oblasti vlivu jemnosti mletí druhotných surovin na parametry vysokopevnostního podlahového potěru přinesla práce zajímavé výsledky. Bylo zjištěno, že pro zvýšení pevností potěru je dostačující využití surovin upravených na nižší měrný povrch pohybující se kolem $300 \text{ m}^2/\text{kg}$.

Posledním cílem této práce bylo studium vlivu druhotných surovin na vnitřní strukturu podlahového potěru. Díky snímkování zkušebních vzorků tomografem byl potvrzen předpoklad, že působením vysokých hydratačních teplot potěru došlo k porušení mikrostruktury cementového kamene a vzniku velkého množství smršťovacích trhlinek. Z toho důvodu byly vybrány tři receptury podlahového potěru modifikované vyšší mírou substituce cementu druhotnými surovinami, u kterých byl stanovením pevností prokázán pozitivní vliv na mechanické vlastnosti.

Studiem mikrostruktury potěru s částečnou mírou substituce cementu druhotnými surovinami byl prokázán pozitivní vliv všech alternativních surovin. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při vyšší míře substituce cementu mletým sodno-vápenatým sklem. V případě této receptury bylo dosaženo vysokých raných i dlouhodobých pevností v tahu za ohybu i tlaku. Zároveň využitím skelného recyklátu mletého na měrný povrch $300 \text{ m}^2/\text{kg}$ byla velmi pozitivně ovlivněna mikrostruktura potěru.

Budoucí výzkum by se mohl zaměřit na studium použitelnosti dalších typů skelných recyklátů. Vzhledem k tomu, že zásoby vyřazeného skelného recyklátu jsou v ČR omezené, alternativou je využití vysokoteplotního popílku, případně může být zajímavá kombinace obou druhotných surovin, čímž může dojít ke skloubení jejich pozitivního vlivu na parametry podlahového potěru.

Seznam použité literatury

- [1] FIGALA, Petr. *Studium možnosti zvýšení odolnosti průmyslových podlah s využitím druhotných surovin*. Brno, 2016. *Bakalářská práce*. VUT Brno – fakulta stavební. Vedoucí práce Rostislav Drochytka.
- [2] AÏTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005. *Betonové stavitelství*. ISBN 80-867-6939-9.
- [3] HELA, Rudolf. *Technologie betonu: Modul M01* [online]. Brno, 2005 [cit. 2018-01-08].
- [4] ČSN EN 74 4505. *Podlahy: Společná ustanovení*. Praha: ČNI, 2012.
- [5] HELA, Rudolf. *Betonové průmyslové podlahy*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost (ČBS) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2006. *Betonové stavitelství*. ISBN 80-867-6973-9.
- [6] RADĚJOVÁ, Lucie. *Vývoj nových průmyslových podlah s využitím druhotných surovin* [online]. Brno, 2013 [cit. 2018-01-07]. *Disertační práce*. VUT Brno. Vedoucí práce Prof. Ing. Rostislav Drochytka CSc.
- [7] SVOBODA, Pavel a Josef DOLEŽAL. *Průmyslové podlahy a podlahy v objektech pozemních staveb*. Bratislava: Jaga, 2007. ISBN 978-808-0760-540.
- [8] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. *Učebnice (VUTIUM)*. ISBN 80-214-1647-5.
- [9] WEI, Zhenhua, Bu WANG, Gabriel FALZONE, et al. *Clinkering-free cementation by fly ash carbonation*. Elsevier [online]. 2017, 11 [cit. 2017-12-18]. DOI: 10.1016/j.jcou.2017.11.005. ISBN 10.1016/j.jcou.2017.11.005. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212982017305954>
- [10] DE SCHUTTER, Geert. *Samozhutnitelný beton*. Praha: ČBS, Česká betonářská společnost ČSSI, 2008. ISBN 978-808-7158-128.
- [11] MEDALA, Marta, Christophe LABBEZ, Isabelle POCHARD a André NONAT. *Ettringite surface chemistry: Interplay of electrostatic and ion specificity*. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2011, 354(2), 765-770. DOI: 10.1016/j.jcis.2010.11.031. ISSN 00219797.
- [12] ŠČUČKA, Jiří a Petr MARTINEC. *Stavební hmoty 1: Beton* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2017-12-16]. Dostupné z: http://www.stavebniinzenyrstvi.cz/wp-content/uploads/2014/07/Scucka_Martinec-SHI-Betony.pdf. Skripta. FAST VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA.
- [13] KUNC, Michal. *Latexem modifikované cementové kompozity*. Brno, 2013. *Disertační práce*. VUT – FAKULTA CHEMICKÁ. Vedoucí práce Prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.
- [14] ČSN EN 14647. *Hlinitanový cement: Složení, specifikace a kritéria shody*. Praha: ČNI, 2006.
- [15] HLAVÁČ, Jan. *Základy technologie silikátů*. 2. uprav.vyd. Praha: SNTL, 1981, 516 s.

- [16] HELA, Rudolf. *Příměsí do betonu. Beton TSK* [online]. 2015, 2015(2), 10 [cit. 2017-12-16]. DOI: 2015-2-04. Dostupné z: <http://www.betonks.cz/sites/default/files/2015-2-04.pdf>
- [17] *Politika druhotných surovin České republiky schválená vládou ČR dne 15.9.2014* [online]. MPO, 2015 [cit. 2018-01-07]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/dokument153352.html>
- [18] ZOU, Jingjing, Chunbin GUO, Yinshan JIANG, Cundi WEI a Fangfei LI. *Structure, morphology and mechanism research on synthesizing xonotlite fiber from acid-extracting residues of coal fly ash and carbide slag*. Elsevier [online]. 2016, 8 [cit. 2017-12-18]. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2016.01.050. ISBN 10.1016/j.matchemphys.2016.01.050. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0254058416300505>
- [19] GOLEWSKI, Grzegorz Ludwik. *Improvement of fracture toughness of green concrete as a result of addition of coal fly ash. Characterization of fly ash microstructure*. Elsevier [online]. 2017, 12 [cit. 2017-12-18]. DOI: 10.1016/j.matchar.2017.11.008. ISBN 10.1016/j.matchar.2017.11.008. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1044580317315905>
- [20] BENEZET J.C., ADAMIEC P., BENHASSAINE A. *Relation between silico-aluminous fly ash and its coal of origin*. In: *Particology*, 2008, Vol. 6, Issue 2, p. 85–92.
- [21] OHAREK, Miroslav. *Odlučovače popílku* [online]. s. 5 [cit. 2017-12-16]. Dostupné z: <http://www.isstechn.cz/objekty/vy-32--inovace-d-2-09.pdf>
- [22] ČSN EN 14227-4. *Směsi stmelené hydraulickými pojivy – Specifikace: Popílky pro směsi stmelené hydraulickými pojivy*. Praha: ČNI, 2013.
- [23] ČSN EN 197-1. *Cement: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. 2. Praha: ČNI, 2012.
- [24] MASSAZA, F. *Pozzolana and Pozzolanic Cements*. In *LEA's Chemistry of cement and concrete. fourth edition*, ed. P. C. HEWLETT, 1998
- [25] NARAYANAN, N a K RAMAMURTHY. *Microstructural investigations on aerated concrete*. *Cement and Concrete Research*. 2000, 30(3), 457-464. DOI: 10.1016/S0008-8846(00)00199-X. ISSN 00088846.
- [26] SAHA, Ashish Kumer. *Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete*. *CIEnvE* [online]. 2017 [cit. 2017-12-18]. DOI: 10.1016/j.serj.2017.09.001. ISBN 10.1016/j.serj.2017.09.001. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2468203917301334>
- [27] BOEL, V. *Microstructure of Self-compacting Concrete in Relation with Gas Permeability and Durability Aspects*. *Doctoral thesis (in Dutch) Ghent University*, 2006
- [28] WANG, Xiao-Yong a Ki-Bong PARK. *Analysis of compressive strength development of concrete containing high volume fly ash*. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.099. ISBN 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.099.
- [29] ZHANG, M. H. *Microstructure, Crack Propagation and Mechanical Properties of Cement Pastes Containing High Volumes of Fly Ashes*. *Cement and Concrete Research*. 6, 1995, pp. 1165-1175

- [30] Atis, CD. High-volume fly ash concrete with high strength and low drying shrinkage. *J Mater Civ Eng* 2003; 15:153e6
- [31] Chindaprasirt P, Jaturapitakkul C, Sinsiri T. Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cement Concr Compos* 2005; 27:425e8
- [32] SUJJAVANICH, S., P. SUWANVITAYA, D. CHAYSUWAN a G. HENESS. Synergistic effect of metakaolin and fly ash on properties of concrete. Elsevier [online]. 2017 [cit. 2017-12-18]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.072. ISBN 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.072. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006181731663X>
- [33] FAN, Wei-Jie, Xiao-Yong WANG a Ki-Bong PARK. Evaluation of the Chemical and Mechanical Properties of Hardening High-Calcium Fly Ash Blended Concrete. *OA Materials*[online]. 2015 [cit. 2017-12-18]. DOI: 10.3390/ma8095282. ISBN 10.3390/ma8095282. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/8/9/5282/>
- [34] DROCHYTKA, Rostislav a Pavla MATULOVÁ. Lehké stavební látky: Modul M01 [online]. 2006. Brno [cit. 2017-12-16].
- [35] SMARZEWSKI, Piotr a Danuta BARNAT-HUNEK. Mechanical and durability related properties of high performance concrete made with coal cinder and waste foundry sand. *Construction and Building Materials* [online]. 2016, 121, 9-17 [cit. 2018-01-07]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.148. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061816308911>
- [36] SHI, C., ZHENG, K. A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*. 2007, vol. 52, s. 234-247.
- [37] LEE, Hyeonggi, Asad HANIF, Muhammad USMAN, Jongsung SIM a Hongseob OH. Performance evaluation of concrete incorporating glass powder and glass sludge wastes as supplementary cementing material. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2018, 170, 683-693 [cit. 2018-01-07]. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.09.133. ISSN 09596526. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652617320139>
- [38] ZHENG, Keren. Pozzolanic reaction of glass powder and its role in controlling alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Composites*[online]. 2016, 67, 30-38 [cit. 2018-01-07]. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.12.008. ISSN 09589465. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946515300640>
- [39] PERTOLD, Zdeněk, Šárka ŠACHLOVÁ, Aneta ŠŤASTNÁ a Vlastimil BÍLEK. Alkalicko-křemičitá reakce v České republice a možnosti její eliminace. *Beton TKS* [online]. 2014, 2014(2), 8 [cit. 2017-12-16]. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2014-2-34_0.pdf
- [40] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. *Betonové stavitelství*. ISBN 978-808-7093-757.
- [41] BREITENBÜCHER, Rolf. Alkalicko-křemičitá reakce: Důsledky pro cementobetonové kryty. *Strasse + Autobahn* [online]. 2006, 2006(4), 205–209 [cit. 2018-01-07].
- [42] JOHNSON, Robert a Medhat H. SHEHATA. The efficacy of accelerated test methods to evaluate Alkali Silica Reactivity of Recycled Concrete Aggregates [online]. [cit. 2018-01-

- 07]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.155. ISBN 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.155. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061816302148>
- [43] *Alkalicko křemičitá reakce – ASR [online].* Brno, 2017 [cit. 2018-01-07]. Dostupné z: web.cvut.cz/ki/research/alkrea/Postup%20urceni%20produktu.doc
- [44] L'HÔPITAL, E., B. LOTHENBACH, K. SCRIVENER a D.A. KULIK. *Alkali uptake in calcium alumina silicate hydrate (C-A-S-H).* *Cement and Concrete Research [online].* 2016, 85, 122-136 [cit. 2018-01-07]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.03.009. ISSN 00088846. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884616303088>
- [45] AFSHINNIA, Kaveh a Prasada Rao RANGARAJU. *Influence of fineness of ground recycled glass on mitigation of alkali-silica reaction in mortars.* *Construction and Building Materials [online].* 2015, 81, 257-267 [cit. 2018-01-07]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.041. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815001889>
- [46] ČSN EN 196-1. *Metody zkoušení cementu: Stanovení pevnosti.* Praha: ČNI, 2015.

Seznam použitých obrázků

| | | |
|---------|--|----|
| Obr. 1 | Hydraulické a pucolánové látky v potrojném diagramu C-S-A(-F). | 20 |
| Obr. 2 | Mikroskopický projev AKR..... | 31 |
| Obr. 3 | Souhrnné schéma metodiky práce | 34 |
| Obr. 4 | Schéma Charakterizace a předúprava vstupních surovin | 35 |
| Obr. 5 | Schéma Substitute cementu druhotnými surovinami v normové maltě | 36 |
| Obr. 6 | Schéma Příměs druhotných surovin v normové maltě..... | 37 |
| Obr. 7 | Schéma Substitute cementu druhotnými surovinami v podlahovém potěru | 38 |
| Obr. 8 | Schéma Studium struktury a vyhodnocení výsledků | 39 |
| Obr. 9 | Filtrování jednotlivých surovin během zkoušky nasákavosti..... | 41 |
| Obr. 10 | Model omílacího bubnu s virtuálním materiálem | 41 |
| Obr. 11 | Popílek ETU 01 (surový, mletý, mikroskopický snímek mletého) | 47 |
| Obr. 12 | Škvára (surová, mletá, mikroskopický snímek mleté)..... | 49 |
| Obr. 13 | Drcené obalové sklo (surové, mleté, mikroskopický snímek mletého) | 51 |
| Obr. 14 | Zkouška rozlitím u směsi REF a receptury 40 % ETU 530..... | 56 |
| Obr. 15 | Zkouška rozlitím u receptury 40 % EOS 530 a 40 % Sklo 541 | 56 |
| Obr. 16 | Zkouška rozlitím u receptury 40 % ETU 450 a 40 % ETU 02 | 57 |
| Obr. 17 | Zkouška rozlitím u receptur 10 % EOS 530 a 10 % Sklo 541..... | 73 |
| Obr. 18 | Konzistence REF_PH3 a 40 % ETU 348 s předepsaným a optimálním „w“ | 82 |
| Obr. 19 | Rozdílná konzistence receptury 20 % ETU 450 s optimálním a vysokým „w“ | 82 |
| Obr. 20 | Zkouška rozlitím u receptury REF_PH3 a 40 % ETU 530 | 83 |
| Obr. 21 | Kamenivo vzniklé při počátku hydratačních procesů potěru PH3..... | 84 |
| Obr. 22 | Tomografický snímek struktury zkušebního tělesa REF_PH3 | 94 |
| Obr. 23 | Tomografický snímek struktury zkušebního tělesa 40 % ETU 348_PH3 | 95 |
| Obr. 24 | Tomografický snímek struktury zkušebního tělesa 40 % EOS 298_PH3 | 95 |
| Obr. 25 | Tomografický snímek struktury zkušebního tělesa 40 % Sklo 300_PH3..... | 96 |

Seznam použitých grafů

| | | |
|---------|--|----|
| Graf 1 | Distribuce velikosti částic popílku ETU 01 a ETU 02 a cementu CEM I 42,5 R.... | 48 |
| Graf 2 | Křivka zrnitosti mletého popílku ETU 01 a ETU 02 a cementu CEM I 42,5 R..... | 48 |
| Graf 3 | Distribuce velikosti částic mleté škváry Oslavany a cementu CEM I 42,5 R..... | 50 |
| Graf 4 | Křivka zrnitosti mleté škváry Oslavany a cementu CEM I 42,5 R..... | 50 |
| Graf 5 | Distribuce velikosti částic mletého obalového skla a cementu CEM I 42,5 R..... | 52 |
| Graf 6 | Křivka zrnitosti mletého obalového skla a cementu CEM I 42,5 R..... | 52 |
| Graf 7 | Nasákavost druhotných surovin v závislosti na jemnosti mletí | 53 |
| Graf 8 | Vliv jemnosti mletí druhotných surovin na rozlití na střešacím stolku | 55 |
| Graf 17 | Vliv jemnosti mletí druhotných surovin na objemovou hmotnost čerstvé malty | 59 |
| Graf 18 | Vliv jemnosti mletí druhotných surovin na objemovou hmotnost ztvrdlé malty | 60 |
| Graf 9 | Pevnost v tlaku po 3 dnech zrání..... | 61 |
| Graf 10 | Pevnost v tlaku po 7 dnech zrání..... | 62 |
| Graf 11 | Pevnost v tlaku po 28 dnech zrání..... | 62 |
| Graf 12 | Pevnost v tlaku po 90 dnech zrání..... | 64 |
| Graf 13 | Pevnost v tahu za ohybu po 3 dnech zrání..... | 65 |
| Graf 14 | Pevnost v tahu za ohybu po 7 dnech zrání | 66 |

| | | |
|---------|---|----|
| Graf 15 | <i>Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech zrání</i> | 66 |
| Graf 16 | <i>Pevnost v tahu za ohybu po 90 dnech zrání</i> | 67 |
| Graf 19 | <i>Vliv jemnosti mletí druhotných surovin na rozliti na střešacím stolku</i> | 72 |
| Graf 20 | <i>Vliv jemnosti mletí druhotných surovin na objemovou hmotnost čerstvé malty</i> | 74 |
| Graf 21 | <i>Vliv jemnosti mletí druhotných surovin na objemovou hmotnost ztvrdlé malty.....</i> | 75 |
| Graf 22 | <i>Pevnost v tlaku po 7 dnech zrání.....</i> | 76 |
| Graf 23 | <i>Pevnost v tlaku po 28 dnech zrání.....</i> | 76 |
| Graf 24 | <i>Pevnost v tahu za ohybu po 7 dnech zrání</i> | 77 |
| Graf 25 | <i>Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech zrání</i> | 78 |
| Graf 26 | <i>Vliv jemnosti mletí druhotných surovin na vodní součinitel podlahového potěru ..</i> | 83 |
| Graf 27 | <i>Vliv jemnosti mletí druhotných surovin na objemovou hmotnost čerstvého potěru</i> | 85 |
| Graf 28 | <i>Vliv jemnosti mletí druhotných surovin na objemovou hmotnost ztvrdlého potěru</i> | 85 |
| Graf 29 | <i>Pevnost v tlaku po 3 dnech zrání.....</i> | 86 |
| Graf 30 | <i>Pevnost v tlaku po 7 dnech zrání.....</i> | 87 |
| Graf 31 | <i>Pevnost v tlaku po 28 dnech zrání.....</i> | 88 |
| Graf 32 | <i>Pevnost v tahu za ohybu po 3 dnech zrání</i> | 89 |
| Graf 33 | <i>Pevnost v tahu za ohybu po 7 dnech zrání</i> | 90 |
| Graf 34 | <i>Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech zrání</i> | 90 |

Seznam použitých tabulek

| | | |
|---------|---|----|
| Tab. 1 | <i>Hlavní složky portlandského cementu.....</i> | 15 |
| Tab. 2 | <i>ČSN EN 14 647 – Hlavní parametry hlinitanových cementů.....</i> | 17 |
| Tab. 3 | <i>Metodika výroby zkušebních těles</i> | 43 |
| Tab. 4 | <i>Složení suché směsi na vysokopevnostní podlahový potěr dodané výrobcem.....</i> | 45 |
| Tab. 5 | <i>Druhotné suroviny, vstupní fyzikální charakteristika a měrných povrch po mletí..</i> | 45 |
| Tab. 6 | <i>Fyzikální charakteristiky popílku elektrárny Tušimice</i> | 46 |
| Tab. 7 | <i>Chemické složení popílku z elektrárny Tušimice.....</i> | 46 |
| Tab. 8 | <i>Fyzikální parametry mletého Popílku ETU 01.....</i> | 47 |
| Tab. 9 | <i>Chemické složení škváry z haldy v Oslavanech</i> | 49 |
| Tab. 10 | <i>Fyzikální parametry mleté škváry EOS.....</i> | 49 |
| Tab. 11 | <i>Chemické složení obalového skla.....</i> | 51 |
| Tab. 12 | <i>Fyzikální parametry mletého odpadního Sklo.....</i> | 51 |
| Tab. 13 | <i>Seznam použitých receptur, jejich značení a míra substituce cementu.....</i> | 54 |
| Tab. 14 | <i>Stanovené doby počátku tuhnutí a tvrdnutí.....</i> | 58 |
| Tab. 15 | <i>Seznam použitých receptur, jejich značení a míra přidané příměsi.....</i> | 71 |
| Tab. 16 | <i>Seznam použitých receptur, jejich značení a míra substituce cementu.....</i> | 80 |

Seznam použitých zkratk

| | | |
|----------------|-------|---|
| HSC | ..... | Vysokopevnostní beton (High strenght concrete) |
| C2S | ..... | Dikalciium silikát (Belit) |
| C3S | ..... | Trikalciium silikát (Alit) |
| C3A | ..... | Trikalciium aluminát |
| C4AF | ..... | Tetrakalciium aluminoforit (Celit) |
| CSH (I/II) | ..... | Kalciium-silikátový gel |
| CH | ..... | Uhličitan vápenatý |
| CA | ..... | Kalciium aluminát |
| AH3 | ..... | Gibbsit |
| C3AH6 | ..... | Hydratační produkt hlinitanového cementu |
| C2AH8 | ..... | Hydratační produkt hlinitanového cementu |
| CAH10 | ..... | Hydratační produkt hlinitanového cementu |
| UAC | ..... | Uranylacetát |
| AKR | ..... | Alkalicko-křemičitá reakce |
| RTG | ..... | Rentgenové záření |
| ETU 01(02, 03) | ..... | Elektrárenský popílek z 1. (2., 3.) elektroodlučovače |
| EOS | ..... | Elektrárenská škvára Oslavany |
| PH3 | ..... | Výrobní označení podlahového potěru |