



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

VÝVOJ CHEMICKY ODOLNÉ STRÍKANÉ SMĚSI

DEVELOPMENT OF CHEMICALLY RESISTANT SPRAYED MIXTURE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Radek Hermann

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**prof. Ing. ROSTISLAV DROCHYTKA, CSc.,
MBA**

BRNO 2019



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. Radek Hermann
Název	Vývoj chemicky odolné stříkané směsi
Vedoucí práce	prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Datum zadání	31. 3. 2018
Datum odevzdání	11. 1. 2019

V Brně dne 31. 3. 2018

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

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- MELBYE, Tom. Stříkaný beton.: MBT International Underground Construction Group,. 2001. 127 s.
- HILAR, Matouš. Stříkaný beton v podzemním stavitelství. Praha: Český tunelářský komitét ITA-AITES, 2008. Dokumenty českého tunelářského komitétu ITA-AITES. ISBN 978-80-254-1262-6.
- BRUTHANS, Zdeněk. Technologický predpis pre mokrý torkret vusokret. Bratislava: Výskumný ústav inžinierskych stavieb, 1980
- Shotcrete Magazine – A quarterly publication of American Shotcrete Association
- Jürgen Höfler, Jürg Schlumpf: Shotcrete in Tunnel constructions
- ACI American Concrete Institute: Shotcrete – A Compilation of research papers
- Bascetin, A., Adiguzel, D. & Tuylu, S. 2017, "The study of utility of tailings for shotcrete production", SME Annual Conference and Expo 2017: Creating Value in a Cyclical Environment, pp. 627.
- Wang, J., Niu, D., Ma, R. & Zhang, Y. 2016, "Investigation of sulfate attack resistance of shotcrete under dry-wet cycles", Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition, vol. 31, no. 6, pp. 1329-1335.
- ČSN EN 14487-1 (732431) A Stříkaný beton. Část 1, Definice, specifikace a shoda = Sprayed concrete. Part 1, Definitions, specifications and conformity. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- ČSN EN 14487-2 (732431) A Stříkaný beton. Část 2, Provádění = Sprayed concrete. Part 2, Execution. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- Výzkumné zprávy a protokoly ústavu THD, příspěvky ze sborníků konferencí, odborné články, časopisy, normy.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Cílem diplomové práce je chemicky odolná stříkaná směs s vysokým podílem druhotných surovin při zachování nebo zvýšení užitečných vlastností výsledné hmoty. Druhotné suroviny budou substituovat nejen pojivovou složku, ale také část plniva.

1. Teoretická část bude věnována současnému stavu problematiky stříkaných směsí pro expozici v silně agresivním prostředí.
2. Na základě dostupné literatury bude popsána problematika působení chemických vlivů na cementovou matici a zhodnoceny možnosti zvýšení odolnosti kompozicí celé směsi.
3. V experimentální části budou nejprve analyzovány vhodné primární a sekundární složky následně vyvíjené hmoty.
4. Dále bude pozornost zaměřena na ověření vlivu substituce pojivové složky stříkané směsi na její výsledné parametry s případnou náhradou druhotnými surovinami.
5. Současně bude řešena také otázka substituce plnivové složky směsi a kombinace obou typů náhrad s případnou náhradou druhotnými surovinami
6. Kromě laboratorních metod budou optimální varianty ověřeny také formou reálné aplikace nástřikem.
7. V závěru bude provedeno souhrnné zhodnocení dosažených výsledků a vybrána finální hmota.

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 uchování 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

Odpady z výroby, pro které je nalezeno přímé využití do výroby jiné, se stávají druhotnými surovinami. Na tuto problematiku je zaměřena v ČR i ve světě celá řada institucí. Tato práce se zabývá problematikou stříkaných směsí na silikátové bázi a zkoumá možnosti využití druhotných surovin a odpadů z výroby jako částečné náhrady pojiva a plniva v těchto hmotách. Cílem práce je optimalizace složení přísad v receptuře komerčně vyráběné stříkané směsi a ověření vlivu míry substituce pojiva či plniva druhotnými surovinami na její fyzikálně-mechanické vlastnosti při zachování, či zlepšení těchto vlastností v nejvyšší možné míře náhrady pojiva a plniva. Z výsledků práce vyplývá, že vhodnou optimalizací přísad je možno dosáhnout výrazného zlepšení fyzikálně-mechanických vlastností hmoty a dále z výsledků plyne, že při substituci 100 % jemného kameniva v kombinaci se substitucí 30 % pojiva je možno dosáhnout zachování, či zvýšení fyzikálně-mechanických vlastností po 28 dnech zrání a výrazného zvýšení těchto vlastností po 90 dnech zrání. S výsledky této práce se také pojí možnost snížení ekonomické náročnosti produkce stříkané hmoty, především díky využití druhotných surovin.

KLÍČOVÁ SLOVA

Stříkaná směs, optimalizace, druhotná surovina, substituce, cement, vysokoteplotní popílek, obalové sklo, škvára, slévárenský písek, chemická odolnost, torkret

ABSTRACT

Production wastes for which a direct use in another production is found become secondary raw materials. There are several institutions in Czech Republic and in the world, which are currently dealing with the issue. This thesis deals with the issue of cementitious spray concrete mixtures and deals with the possibilities of using secondary raw materials and waste from production as partial replacement of binder and filler in these mixtures. The aim of this theses is to optimize the composition of additives in the recipe of the commercially produced pray mixture and to verify the influence of the degree of substitution of binder or filler by secondary raw materials on its physical-mechanical properties. The aim is to maintain or increase these properties while substituting the binder and filler as much as possible. After the evaluation of results, it is possible to say, by suitable optimization of the additives it is possible to achieve a significant improvement of the physical-mechanical properties of the mass and furthermore, from the results of this thesis follows, that by substitution of 100% fine filler in combination with substitution of 30% binder it is possible to maintain or increase the physical-mechanical properties after 28 days of curing and to significantly increase these properties after 90 days of curing. The results of this thesis are also related to the reduction of economic impact on production of the spray mixture, mainly due to the use of secondary raw materials.

KEYWORDS

Sprayed mixture, optimization, secondary raw material, substitution, cement, high temperature fly ash, packing glass, cinder, foundry sand, chemical resistance, gunite

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. HERMANN, Radek. Vývoj chemicky odolné stříkané směsi. Brno, 2019. 125 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 11.1.2019

Bc. Radek Hermann

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Vývoj chemicky odolné stříkané směsi* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 11. 1. 2019

Bc. Radek Hermann
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat především prof. Ing. Rostislavu Drochytzkovi, CSc., MBA, jakožto vedoucímu mé diplomové práce, za jeho odborné rady a udávání směru této práci. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Vítu Černému, Ph.D. a Ing. Petru Figalovi za jejich spolupráci, věcné připomínky, rady a čas strávený se mnou při vyhotovování této diplomové práce. Velmi bych chtěl také poděkovat prof. RNDr. Ing. Stanislavovi Šťastníkovvi, CSc., Ph.D. za zapůjčení měřicích zařízení. Nemohu se svým díkem opomenout ani Ing. Šárku Keprdovou, Ph.D. za její asistenci a ochotu při mém výzkumu ve výzkumném centru AdMaS a rád bych také vzdal velký dík paní Blance Bártové a panu Petrovi Boháčovi, za jejich vstřícný přístup a pomoc při výrobě a zkoušení vyrobených vzorků.

Diplomová práce byla vytvořena s využitím infrastruktury Centra AdMaS a díky finanční podpoře ze státního rozpočtu prostřednictvím Ministerstva průmyslu a obchodu v projektu č. FV20149 "Ucelený systém pro sanaci chemicky atakovaných a namáhaných stavebních konstrukcí".

OBSAH

ÚVOD	14
TEORETICKÁ ČÁST	15
1 ANORGANICKÁ POJIVA.....	15
1.1 Vzdušná pojiva	15
1.2 Hydraulická pojiva	15
2 BETONY A MALTY	15
2.1 Cement	16
2.2 Kamenivo	17
2.3 Příměsi.....	18
2.4 Přísady.....	20
2.4.1 Plastifikační přísady	21
2.4.2 Přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí.....	22
2.4.2.1 Alkalické urychlovače.....	24
2.4.2.2 Bez-alkalické urychlovače	24
2.4.3 Krystalizační přísady	25
2.5 Výztuž.....	26
2.5.1 Ocelová vlákna.....	27
2.5.2 Syntetická vlákna.....	28
3 STŘÍKANÉ SMĚSI	29
3.1 Problematika stříkaných směsí.....	29
3.2 Porovnávací (nulový) beton.....	29
3.3 Spad	30
3.4 Požadavky na stříkané směsi	30
3.5 Typy stříkaných směsí	31
3.5.1 Mokrý způsob	31
3.5.2 Suchý způsob.....	32
3.6 Zkoušení stříkaných směsí	33
3.6.1 Pevnost v tlaku mladého stříkaného betonu pomocí penetrační jehly.....	33
3.6.2 Pevnost v tlaku mladého stříkaného betonu pomocí zarážení hřebu.....	34
3.6.3 Pevnost v tlaku stříkaného betonu.....	34
3.6.4 Přilnavost / Přídržnost.....	35
3.6.5 Vodonepropustnost.....	35

3.6.6	Mrazuvzdornost	35
3.6.7	Odolnost proti chemické agresivitě.....	36
4	CHEMICKÁ ODOLNOST	36
4.1	Chemické působení na cementovou matici	37
4.1.1	Koroze chloridovými ionty	37
4.1.2	Uhličitanová koroze - karbonatace.....	38
4.1.3	Síranová koroze.....	38
4.1.4	Hladová voda	38
4.1.5	Degradace krystalizací solí.....	38
4.1.6	Mikrobiologická degradace	39
4.2	Chemický vliv odpadních látek.....	39
4.3	Zkoušení chemické odolnosti	42
5	ODPADNÍ SYSTÉMY	42
5.1	Definice odpadních vod	43
5.2	Typy stokových soustav	44
	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	46
	CÍL PRÁCE	46
	METODIKA PRÁCE	47
6	METODY ZKOUŠENÍ.....	54
6.1	Zkoušky prováděné na použitých surovinách	54
6.2	Úpravy použitých surovin	55
6.3	Výroba a uložení zkušebních vzorků.....	56
6.4	Zkoušky prováděné na zkušebních vzorcích	59
7	ETAPA I. – EXPOZIČNÍ PROSTŘEDÍ A VÝBĚR DRUHOTNÝCH SUROVIN.....	62
7.1	Výběr druhotných surovin	62
8	ETAPA II. – VOLBA VHODNÝCH SUROVIN, NÁVRH ZKUŠEBNÍCH RECEPTUR .	64
8.1	Vstupní suroviny – referenční	65
8.2	Vstupní suroviny – druhotné.....	65
8.3	Optimalizace křivek druhotných plniv	71
8.4	Návrh zkušebních receptur	74
8.5	Označení receptur	75
8.6	Zkušební receptury.....	75
9	ETAPA III. – VÝROBA TĚLES MÍCHÁNÍM – OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ.....	77
9.1	Vliv množství přísad na vlastnosti směsi	77
9.2	Shrnutí první části III. etapy.....	82

9.3	Substituce pojiva a plniva optimalizované receptury.....	83
9.4	Shrnutí druhé části III. etapy	99
10	ETAPA IV. – VÝROBA TĚLES STŘÍKÁNÍM, OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ.....	102
	SHRnutí A DISKUZE VÝLEDKŮ	110
	ZÁVĚR.....	114
11	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	115
12	SEZNAM OBRÁZKŮ	122
13	SEZNAM TABULEK	125

ÚVOD

V současné době roste výraznou měrou zájem institucí a společností o výzkum na poli odpadů a druhotných surovin produkovaných v různých výrobních odvětvích. Tento trend je dán mimo jiné uvědomováním si lidstva své pozice a snahou snížit ekologickou zátěž výroby například stavebních hmot na životní prostředí. Jednou z možností, jak tohoto docílit, je snížení spotřeby cementu ve stavebních hmotách, avšak bez snížení jejich kvality, či jiných, především mechanických vlastností.

Možnosti náhrady pojiva či plniva ve stavebních hmotách sahají do minulosti, kdy se začaly vyrábět a prodávat směsné cementy. Snahou současných výrobců stavebních hmot je však nevyužívat komerčně dostupných směsných cementů, ale vytvářet si směsné cementy, které budou jejich dané stavební hmotě na míru a díky kterým budou moci zachovat, či dosáhnout lepších vlastností vyráběných hmot. Možnosti uplatnění nekonvenčních surovin hledají samotní výrobci hmot, kteří hledají náhradu za přírodní suroviny, zároveň však také producenti odpadů, kterým by využití odpadů snížilo náklady na jejich skladování, či recyklaci.

TEORETICKÁ ČÁST

1 ANORGANICKÁ POJIVA

Jsou to většinou práškovité látky, které jsou schopny po smíchání s vodou spojit hrubší zrnité materiály do kompaktního celku. [1] Nejtypičtějším zástupcem je portlandský cement, který po smíchání s vodou vytváří cementovou kaši, která tuhne a tvrdne a po 28 dnech nabývá předepsaných pevností. Při smíchání například portlandského cementu kromě vody také s plnivem, kterým může být například kamenivo, či křemičitý písek, vzniká takzvaná betonová směs, která po zatvrdnutí vytvoří pevnou a odolnou matici, která se již obecně nazývá beton.

1.1 Vzdušná pojiva

Vzdušná pojiva, či vzdušné maltoviny se vyznačují tím, že po smíchání s vodou tuhnou a tvrdnou, ale pouze na vzduchu. Při dlouhodobějším vystavení vysoké vlhkosti, či vodě, dochází ke snižování jejich pevnosti, případně jejich úplnému rozpadu. [2] Mezi vzdušná pojiva patří především veškerá sádrová pojiva, tj. pojiva obsahující jako hlavní pojivovou složku některou z forem síranu vápenatého, dále hořečnatá (Sorelova) pojiva a také vzdušné vápno.

1.2 Hydraulická pojiva

Hydraulická pojiva, či hydraulické maltoviny se vyznačují tím, že po smíchání s vodou stejně jako vzdušná pojiva tuhnou a tvrdnou, na rozdíl od vzdušných pojiv, ovšem nabývají pevností jak na vzduchu, tak i pod vodou. [2] Aby bylo zajištěno dostatečné množství vody pro hydrataci všech zrn, je dokonce vhodné a předepsané normou ČSN EN 12390-2, ukládat odformované vzorky do vlhkého prostředí, nejlépe do vodní lázně. Pouze v takovém prostředí dojde v ideálním případě k nabytí vždy srovnatelných pevností.

2 BETONY A MALTY

Betony a malty jsou směsi, které vznikají smícháním cementu, či jiných, nejčastěji hydraulických pojiv s plnivem a vodou za vzniku tvárné a plastické hmoty, která zaplní definovaný prostor a tvar, například bednění a po zatvrdnutí vytvoří kompaktní a pevný celek. Velkou a podstatnou roli hrají v dnešních betonech

a maltách také přísady, což jsou chemické látky, které jsou schopny různým způsobem ovlivňovat vlastnosti betonů a malt jak v čerstvém, tak i v ztvrdlém stavu.

Hlavním rozdílem mezi betonem a maltou je ve frakci použitého plniva (kameniva). V případě, že je použita pouze frakce 0–4 mm, jedná se o maltu. V případě, že je použita frakce větší, jedná se již o beton.

2.1 Cement

Cement je stále ještě hlavní pojivovou složkou většiny betonovým a maltových směsí. Dle ČSN EN 197-1 hydraulické pojivo, tj. jemně mletý anorganický materiál, které po smíchání s vodou tvoří pastu, která tuhne, tvrdne a nabývá pevností na základě hydratačních procesů a reakcí i pod vodou. [3]

Před příchodem cementu se využívaly většinou hašená vápna či hydraulická vápna, což je, zjednodušeně řečeno, cement bez C_3S . Jelikož hydraulická vápna se vyráběla výpalem pod $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ a C_3S , jeden z hlavních slínekových minerálů a nositel pevnosti cementů vzniká až v tavenině při teplotě nad $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dalším speciálním cementem, který se hojně využíval v 19. století byl románský cement, ten se vyznačuje okrovou barvou a nejčastěji se využíval k povrchové úpravě fasád.

Cement, který je dle Evropské normy označován jako CEM I-V je schopen, pokud je smíchán s kamenivem a vodou vytvořit betony či malty, které mají dostatečnou dobu zpracovatelnosti a po daných časových úsecích nabývají definovaných pevností. Tyto betony a malty, z cementu vytvořené, jsou dlouhodobě objemově stálé.

Cement jako takový, se skládá z několika složek. Hlavní složkou, která tvoří cement v podobě, jakou ji známe dnes, je portlandský slínek v kombinaci se sloučeninami síranu vápenatého, které v cementu působí jako regulátor/zpomalovač tuhnutí (bez těchto sloučenin by cement po smíchání s vodou zatuhl během několika sekund až minut). Cement může obsahovat také příměsi upravující některé jeho vlastnosti. Mezi tyto příměsi patří například vysokopecní struska, popílek, vápenec, či křemičitý úlet. Množství těchto surovin ovlivňuje různé vlastnosti výsledné ztvrdlé hmoty jako například pevnost, rychlost vývinu hydratačního tepla atd. Na základě poměru těchto složek vzhledem k portlandskému slínku se cementy rozdělují na různé druhy. [4]

V současnosti se vyrábí a používá na 5 druhů cementu. Tyto druhy se od sebe liší v závislosti na množství jednotlivých vstupních složek, ze kterých je výsledný cement tvořen. Cementy se označují dle ČSN EN 197-1 velkými písmeny CEM a každý druh je označován římskou číslicí i až V. V případě tedy, že cement obsahuje kromě portlandského slínku ještě další složky, je k cementu přidáno ještě označení zástupným písmenem označující druh dané složky: portlandský slínek (K), vysokopecní struska (S), popílek křemičitý (V), popílek vápenatý (W), kalcinovaná břidlice (T), vápenec (L, LL). křemičitý úlet (D), pucolány přírodní (P), pucolány kalcinované (Q) [3].

Množství jednotlivých složek je udáváno evropskou normou ČSN EN 197-1, ve které jsou všechny druhy cementů a jejich složení popsány v přehledné tabulce.

Z výše uvedeného tedy plyne, že například cement označený jako CEM II/B-S obsahuje dle ČSN EN 197-1 tab. 1, 65-79 % portlandského slínku, 21-35 % vysokopecní strusky a 0-5 % doplňujících složek. [3, 4]

2.2 Kamenivo

Beton či malty lze ke stavebním účelům použít právě díky obsaženému kamenivu, cement sám o sobě by nebyl vhodný pro většinu využití. Obecně je kamenivo nejčastěji přírodní materiál, který je využit pro výrobu betonů či malt ve své přírodní podobě, kromě operací, které jejich využití předchází, jako je například drcení, propírání vodou a roztřídění podle frakcí.

Kamenivo zastupuje v betonech či maltách na 70 až 80 % celkového objemu, dá se tedy předpokládat, že fyzikálně-mechanické vlastnosti kameniva významným způsobem ovlivňují fyzikálně-mechanické vlastnosti výsledného betonu, či malty. Právě kamenivo dodává betonům a maltám většinu jejich objemové stálosti, smrštění při hydrataci betonů a malt je díky kamenivu pouze 10-15 % vzhledem k samotné cementové pastě. [5, 6]

V dnešní době se řeší ve velké míře nakládání s odpady, a proto se již několik let, či desetiletí začínají využívat částečně místo kameniva recykláty, například recyklované kamenivo po demolcích, či stavební odpad. Problémy ovšem nastávají u těchto materiálů především při srovnání jejich nasákavosti s kamenem přírodním. Odpadní materiály mají nasákavost většinou několikanásobně vyšší.

Kamenivo se rozděluje dle několika kritérií. Dle objemové hmotnosti, původu, vzniku a velikosti zrn.

2.3 Příměsi

Do betonů či malt se používá především jako hlavní pojivová složka portlandský cement. Výroba cementu ovšem velkou měrou zatěžuje ekologické prostředí díky velké spotřebě energie při jeho výrobě a tím je cement také velice ekonomicky nákladný. Začaly se proto vyrábět směsné cementy s využitím příměsí za účelem snížení ceny, ale také za účelem možnosti upravit vlastnosti cementu jako takového. Díky příměsím lze například upravit výsledné pevnosti betonu, či snížit, nebo zpomalit vývin hydratačního tepla v betonu.

Dle ČSN EN 206+A1 se příměsi dělí na příměsi typu I – téměř inertní a na příměsi typu II – pucolánová nebo latentně hydraulická. [7]

Příměsi typu I jsou látky inertní, tedy takové, které žádným, či velmi malým způsobem ovlivňují vlastnosti betonů a malt a jsou při hydratačních procesech téměř netečné. Mezi příměsi typu I patří především jemné částice kameniva – filler, či pigmenty, tj. látky, které mají barvicí schopnost a využívají se především pro probarvování betonu či malt pro estetické účely. [3]

Příměsi typu II jsou látky takové, které začnou po smíchání s vodou a vhodným budičem vytvářet hydratační produkty podobné hydratačním produktům hydraulických pojiv. Mezi tyto příměsi patří především pucolány a latentně hydraulické látky. [3]

Pucolány, jsou přírodní látky křemičité, křemičito-hlinité, či kombinací obou. Pucolány po smíchání s vodou samy netuhnou ani netvrdnou avšak, jsou-li vhodně a jemně semlety, reagují v přítomnosti vody a hydroxidu vápenatého (Ca(OH)_2) za vzniku sloučenin křemičitanů či hlinitanů vápenatých, které jsou nositeli pevnosti. Tyto sloučeniny jsou podobné těm, které vznikají při tvrdnutí hydraulických látek (např. cementů). Pucolány musí obsahovat minimálně 25 % oxidu křemičitého (SiO_2) a dále obsahují oxid hlinitý (Al_2O_3), menší množství oxidu železnatého (Fe_2O_3) a další oxidy. Mezi pucolány patří dle ČSN EN 197-1 např. přírodní kalcinované pucolány, což jsou látky vulkanického původu, hlíny, břidlice nebo sedimentární horniny aktivované tepelnou úpravou, které vyhovují výše uvedenému. Dále mezi pucolány patří popílek a křemičitý úlet. Popílek je materiál, který je získáván elektrostatickým,

či mechanickým odlučováním prachových částic z kouřových plynů většinou z tepelných elektráren, kde se využívá práškového uhlí. Křemičitý úlet vzniká jako odpad určitých hutních provozů. Obsahuje velké množství amorfního SiO_2 a vyznačuje se obrovským měrným povrchem. [3, 4]

Latentně hydraulické látky jsou takové, které stejně jako pucolány po smíchání s vodou netuhnou ani netvrdnou, ale po přidání určitého budiče, např. oxidu vápenatého (CaO) začnou vykazovat hydraulické vlastnosti. [3]

Mezi příměsi typu II patří například granulovaná vysokopecní struska, ta vzniká v hutním průmyslu při výrobě železa tavením železné rudy ve vysokých pecích. Struska má díky svým výborným latentně hydraulickým vlastnostem stále větší podíl na trhu s pojivy.

Většina příměsí, které se přidávají do cementu, mají v první řadě snížit ekologický dopad na životní prostředí a dále také s tím spojenou ekonomickou náročnost výroby cementu. V případě vhodné kombinace portlandského cementu s příměsemi ovšem dochází ke zlepšení celkových vlastností portlandského cementu jako takového ať co se fyzikálně-mechanických vlastností týče, či například i chemické odolnosti cementové matrice jako takové.

Vysokoteplotní popílek

Jedná se o nespalitelný zbytek vznikající v tepelných elektrárnách při spalování práškového uhlí za teplot 1200-1700 °C [66] obsahující dle normy ČSN EN 450-1 +A1 minimálně 45 % amorfního SiO_2 [67]. Popílký z vysokoteplotního spalování představují v dnešní době až 70 % veškerých vedlejších energetických produktů. Složením se podobají přírodním pucolánům, které v kombinaci s cementem napomáhají tvorbě CSH gelů. Měrná hmotnost popílků dosahuje rozmezí 2100-2600 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ [66]. Popílký mají vliv především na dlouhodobé fyzikálně-mechanické vlastnosti, které výrazně zlepšují a napomáhají uzavřít strukturu cementové matrice. Díky tomuto jevu se také v čase zlepšuje například chemická odolnost.

Odpadní obalové sklo

Jedná se o sklo, které je dále nezpracovatelné ve sklářské výrobě. Díky svému složení a vysokému obsahu SiO_2 vykazuje vysokou pucolánovou aktivitu, která podporuje v kombinaci s cementem tvorbu CSH gelů v cementové matrici. Studie Keren Zheng uvádějí, že pokud je velikost skelného zrna menší než 75 μm , vykazuje materiál dostatečnou pucolánovou aktivitu. S využitím mletého skla a obecně skla v

betonu však vyvstává problém s alkalicko-křemičitou reakcí (ASR), což je reakce, kdy v cementové matrici díky reakci alkálií (cement) a amorfních křemičitanů (sklo) vznikají v průběhu času novotvary o větším objemu, které mohou vést až ke statickému porušení celé konstrukce. Gerry Lee ve své práci dokázal, že pokud je sklo pomleto na vyšší měrný povrch a střední velikost částic je nižší než 300 μm k ASR již nedochází [66, 68, 69].

Škvára

Při spalování uhlí, hořlavých břidlic či jiných tuhých paliv, na roštích a v topeništích, vzniká tento částečně natavený tuhý anorganický zbytek. Materiál obsahuje velké množství minerálních zbytků původních paliv. Do betonů a směsí je škvára vhodná, je však nutno brát zřetel na její nehomogenní vlastnosti, které výrazným způsobem ovlivňují její jakost. Škvára by měla dle legislativy obsahovat maximálně 10 % spalitelných látek a pro použití v betonu se předpokládá vysoký obsah amorfního SiO_2 [66, 70].

Slévárenský písek pojený vodním sklem

Tento materiál je odpadním produktem z výroby oceli. Jedná se o zbytkový materiál z forem po odbednění železných výrobků. Zpětné využití tohoto písku do výroby je možné a písek se využívá několikrát. Po několika použitích dochází ke stárnutí směsi díky řadě tepelných a chemických procesů či vnosu nečistot dochází časem ke vzniku odpadu. Slévárenské odpadní písky tvoří cca 2 % odpadů v ČR a 70 % celkového slévárenského odpadu [71]. Tento materiál se skládá převážně z velmi čistého křemičitého písku s obsahem 80–85 % SiO_2 , a menšího množství vodního skla. Odpadního písku s vodním sklem se vyprodukuje ročně v ČR přes 30 000 tun [72].

2.4 Přísady

Beton, jako stavební materiál, nemá vždy dokonalé vlastnosti a dokonalou použitelnost v každém prostředí a za každé situace a je potřeba jeho vlastnosti upravovat. Zlepšení celkových vlastností lze dosáhnout především vhodným návrhem složení pro danou aplikaci, či právě použitím přísad, které jsou schopny dále upravovat vlastnosti betonů a malt v čerstvém stavu a tyto se projeví také na vlastnostech ve stavu ztvrdlém.

V současné době se již téměř nevyrábějí betony, ve kterých by nebyla obsažena alespoň jedna přísada ovlivňující některou vlastnost betonu. Dokonce se uvádí, že více než 85 % betonů v současné době vyrobených, což potvrzují studie využití přísad do betonu, obsahuje alespoň některou z přísad. [9]

Dle ČSN EN 934-2+A1 jsou přísady materiálem, který se přidává během míchání betonu v množství ne větším než 5 hmotnostních procent z obsahu cementu a který umožňuje úpravu vlastností směsi v čerstvém i ztvrdlém stavu. [8]

Přísady jako takové, jsou nejčastěji uměle vyrobené chemické látky, které určitým způsobem ovlivňují chování hmoty betonu či malty a ve většině případů se dávkuje v rozmezí 0,1 – 2,0 % z množství pojiva. Ovšem již v takto nízkých dávkách ovlivňují chování betonu zásadním způsobem. Přísady mohou ovlivňovat zpracovatelnost, či zrychlovat nebo zpomalovat proces tuhnutí a tvrdnutí.

Přísady, které se v praxi běžně používají jsou detailně popsány evropskou normou ČSN EN 934-2+A1. [8]

Výčet většiny běžně používaných přísad je následující: přísada urychlující tuhnutí, přísada urychlující tvrdnutí, přísada zpomalující tuhnutí, provzdušňovací přísada, stabilizační přísada, těsnící přísada, přísada upravující viskozitu, vodoredukující plastifikační přísada, silně vodoredukující/super plastifikační přísada [8].

Dále jsou popsány některé přísady, které se využívají při provádění stříkaných směsí.

2.4.1 Plastifikační přísady

Problémem při výrobě betonů a malt je velice delikátní hranice, kdy je dosaženo ideálního poměru mezi množstvím záměsové vody a množstvím použitého pojiva. Tento poměr je označován jako vodní součinitel. Při výrobě běžných betonů se pohybuje v rozmezí 0,40-0,60. Jakákoli nadbytečná voda, která není využita pro ovlhčení zrn pojiva a plniva výrazným způsobem ovlivňuje pevnost výsledného betonu. V roce 1949 publikoval americký chemik Treval Clifford Powers práci, ve které tvrdí, že teoretický minimální vodní součinitel pro ovlhčení všech zrn cementu je 0,26. Dosáhnout vhodné zpracovatelnosti při takto nízkém vodním součiniteli je v praxi zcela nemožné, jelikož je při tomto vodním součiniteli směs sypká a nelze provést dokonalé zhutnění a zaplnění struktury. Tuto skutečnost lze

částečně ošetřit vibrolisováním, kdy se za velkého tlaku a vibrace vytlačuje přebytečný vzduch ze struktury betonu [4, 11].

Důvodem, proč je nutno použít většího vodního součinitele, než tzv. teoretického vodního součinitele, je z velké části problém se shlukováním zrn cementu. Toto shlukování je způsobeno elektrostatickými jevy na povrchích cementových zrn, kdy jsou zrna cementu při jeho výrobě staticky nabitá a mají tendenci se shlukovat. Díky těmto shlukům, ve kterých je záměsová voda uzavřena se směs jeví jako málo vlhká a svádí k dalšímu přidávání záměsové vody, což ovšem bohužel vede k dalšímu snižování pevnosti ztvrdlého betonu [12].

Použitím plastifikačních přísad lze dramaticky snížit množství záměsové vody při zachování zpracovatelnosti a tím dosáhnout vyšších pevností. Dle ČSN EN 934 se plastifikační přísady dělí dle jejich schopnosti redukovat množství záměsové vody při zachování stejných reologických vlastností. Základní rozdělení je na plastifikační, superplastifikační a v dnešní době se již začínají objevovat také tzv. hyperplastifikační přísady [8].

Plastifikační přísady jsou takové, které dokáží redukovat množství záměsové vody o více než 5 % a superplastifikační přísady jsou takové, které dokáží redukovat množství záměsové vody o více než 12 % [8].

Superplastifikační přísady jsou velmi efektivní již při malých dávkách a jejich vodoredukující účinek s množstvím dávky roste. Jedná se většinou o anorganické sloučeniny, které jsou přímo vyráběny za účelem použití v betonu. Jejich cena je znatelně vyšší [10].

2.4.2 Přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí

Přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí jsou využívány pro zkrácení času kdy dochází k iniciaci hydratačního procesu betonů a malt a dochází k jejich ztuhnutí. Dle ČSN EN 934-2 se přísady dělí na přísady urychlující tuhnutí a na přísady urychlující tvrdnutí. Tyto dva děje ovšem od sebe nejde žádnou přesnou hranicí oddělit, proto jsou zde uvedeny dohromady [8].

Své využití našly tyto přísady především při výrobě tunelů, či při zpevňování svahů. Při použití účinné přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí lze aplikovat stříkaný beton či maltu i na svislé povrchy v několikacentimetrové vrstvě najednou bez ztráty přilnavosti a odpadávání čerstvé směsi dolů.

Mezi anorganické chemické sloučeniny, které působí jako urychlovače tuhnutí a tvrdnutí betonu patří celá řada chloridů, fluoridů, uhličitánů, křemičitanů, dusičnanů atd. Mezi organické patří například triethanolamin, diethanolamin, močovina, glyoxal a mravenčan vápenatý.

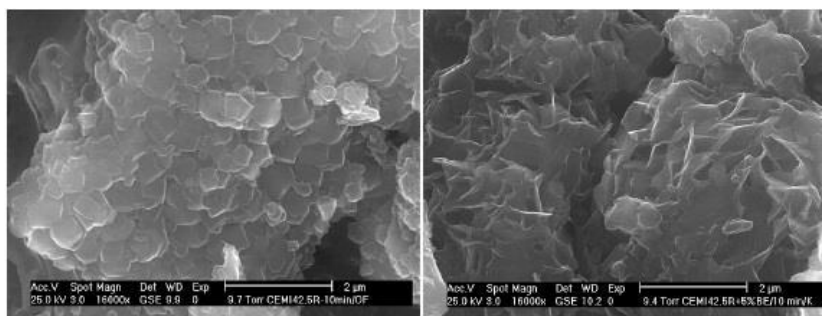
Nejúčinnější a nejvíce ekonomicky výhodnou sloučeninou pro využití v betonu a maltách je chlorid vápenatý ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), který urychluje hydrataci slínkového minerálu allitu (C_3S). Chlorid vápenatý také reaguje s C_3A v cementu, kdy významným způsobem urychluje reakci slínkového minerálu C_3A se síranem vápenatým (CaSO_4), který se využívá jako zpomalovač tuhnutí při výrobě cementu, za vzniku ettringitu [13].

Dále je také dokázáno, že použití 2 % $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ z hmotnosti cementu snižuje čas zatuhnutí ze 3 hodin na 1 hodinu a zdvojnásobuje jednodenní tlakové pevnosti [14]. Konečné pevnosti betonů a malt však mohou být díky použití urychlovacích přísad nižší než u referenční směsi.

Veškeré přísady obsahující chloridy však působí velice nepříznivě a korozivně na výztuž obsaženou v betonu, proto se začaly k těmto přísadám hledat alternativy. Velké množství přísad urychlujících tuhnutí a tvrdnutí obsahuje v dnešní době jako náhradu chloridu vápenatého mravenčan vápenatý ($\text{Ca}(\text{HCOO})_2$) jakožto urychlující složku. Při stejné koncentraci chloridu vápenatého a mravenčanu vápenatého bylo zjištěno, že se při použití mravenčanu tvoří mnohem větší množství ettringitu. To může mít za následek větších počátečních pevností betonů a malt [13]. Urychlující přísady neobsahující chloridy však bohužel nedosahují takové účinnosti jako v případě CaCl_2 a také jejich využití je výrazněji ekonomicky náročnější.

Při využití urychlujících přísad pro stříkané směsi je kritériem pro ty moderní počátek tuhnutí za méně než 300 sekund a konec tuhnutí za méně než 600 sekund. Pro starší přísady, jako je například CaCl_2 to bylo 60 a 240 sekund.

Na obrázku č. 1 je vidět jak přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí betonu ovlivňují vývoj hydratačních produktů. Lze pozorovat, že po přidavku přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí je C-A-H fáze po stejné době od zamíchání mnohem více strukturovaná.



Obr. 1 Ettringit 10 min. od zamíchání v běžném cementu bez urychlující přísady a CAH fáze po 10 min. hydratace v cementu s 5 % alkalického urychlovače $\text{NaAl}(\text{OH})_4$ [29]

2.4.2.1 Alkalické urychlovače

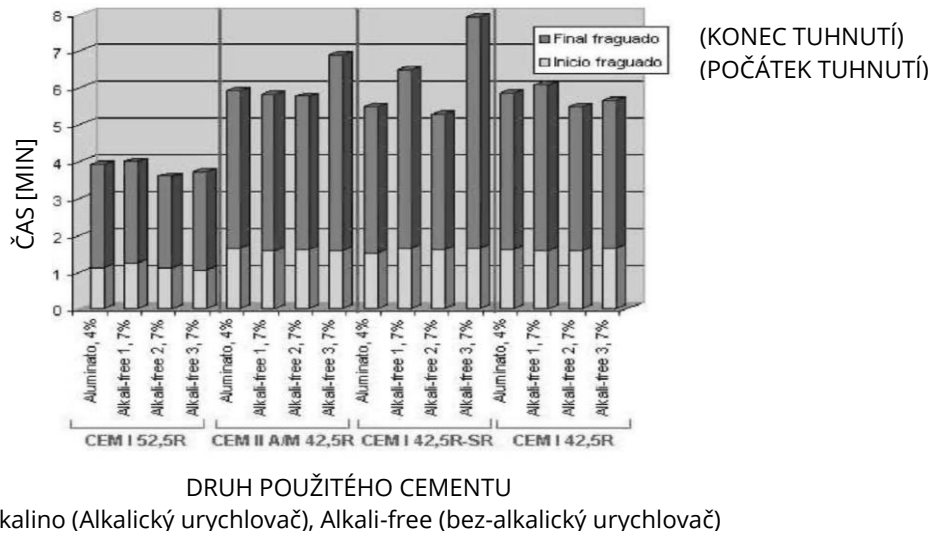
Jedná se o přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí betonu na bázi alkali-aluminátů. Tyto přísady poskytují dokonalou funkčnost a výrazné urychlení hydratačního procesu a byly by optimální pro jakékoliv použití, kdyby neměly vedlejší účinky na beton a okolí. Alkalické urychlovače podporují korozi konstrukce a jsou nebezpečné pro životní prostředí ale také pro operátory stříkacích strojů. Všechny vedlejší účinky vychází z chemické podstaty těchto přísad. Alkalické přísady jsou stabilní v rozmezí pH 13–14, díky tomu jsou silně zásadité a žíravé či leptavé [31]. Díky svému zásaditému charakteru je velké množství případů, kdy došlo k negativnímu dopadu na životní prostředí a na operátory, jako například popálení kůže, poškození sliznic, problémy s dýcháním či nevratné poškození zraku.

Alkalické urychlovače způsobují pokles pevností po 28 dnech o 20-30 % v porovnání s neurychlenou referenční hmotou, snížení tvorby anhydritových bází díky vysoké zásaditosti přísady a následné zpomalení a snížení množství vytvořených CSH gelů. Zároveň se zvyšuje nebezpečí vzniku alkalicko-křemičité reakce díky velkému množství alkálií v přísadě.

2.4.2.2 Bez-alkalické urychlovače

Bez-alkalické, jinak také „alkali-free“ přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí betonu mají stabilní pH v rozmezí 3-4, díky tomu odpadá problém s negativním dopadem na životní prostředí, popáleninami a dalšími problémy, které se vyskytovaly u operátorů stříkacích strojů. Problémem ovšem je, že aby bez-alkalické urychlovače dosáhly stejných účinků jako alkalické, je jich potřeba přidat relativně velké množství, a to přibližně v rozmezí 1,5-1,9násobku dávky alkalických

urychlovačů, dle vodního součinitele v dané směsi. Na obrázku č. 2 lze vidět, že při použití 4 % alkalického urychlovače (hmotnostně z množství cementu) je potřeba použít alespoň 1,75násobek, v tomto případě 7 % bez-alkalického urychlovače (hmotnostně z množství cementu) pro dosažení stejného výsledku [31].



Obr. 2 Vliv množství alkalického a bez-alkalického urychlovače na počátek a konec tuhnutí cementové pasty [31]

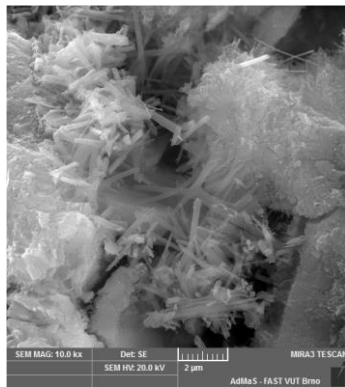
2.4.3 Krystalizační přísady

Tyto přísady patří mezi nejmladší využívané přísady do betonů a malt vůbec. Jedná se o speciální směsi, které mají velmi často stejný základ. Tím je velmi jemně mletý portlandský cement, jemný křemičitý písek a chemické látky, které zajišťují vznik krystalizačních zárodků a tvorbu nových krystalů, které zaplňují kapiláry a mikrotrhlínky ve struktuře betonů a malt [15]. Tyto novotvary by neměly při své krystalizaci vytvářet příliš velký krystalizační tlak, aby nedošlo k překročení pevnosti betonu v prostém tahu, čímž by začalo docházet k porušení betonu jako je tomu například při tvorbě sekundárního ettringitu a následné degradaci betonu. Existují také nátěry, kdy krystalicky aktivní látky prorůstají povrchem betonu a zacelují otevřený pórový systém již ztvrdlého betonu [16]. Vznikající krystaly jsou tvořeny především uhličitánem vápenatým (CaCO_3) [20]. Krystalizační přísady by měly mít pozitivní vliv na vodotěsnost, nasákavost, kapilární absorpci a odolnost betonu vůči chemickým látkám.

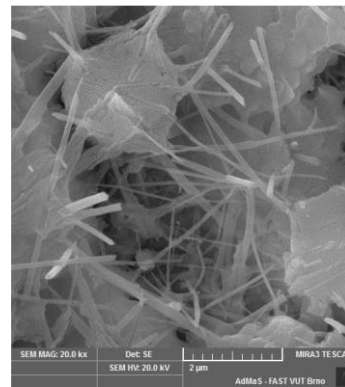
Tyto přísady jsou relativně nové a nejsou ještě uvedeny v době tvorby této diplomové práce v ČSN EN 934.

Ve využití krystalizačních přísad je velký potenciál, problémem ovšem je, že názory a výsledky prací zabývající se jejich problematikou se různí. Na jedné straně jsou naprostí zastánci této technologie, kteří podporují svá tvrzení studiemi, které dokazují příznivé účinky těchto přísad. Na straně druhé jsou však odpůrci, kteří svá tvrzení podporují studiemi, které nedokazují buď žádné, či minimální zlepšení výsledných vlastností betonu při využití krystalizačních přísad a při srovnání ekonomické náročnosti těchto přísad se raději přiklánějí k preciznějšímu návrhu receptury betonu či malty než ke zvyšování odolnosti jiným způsobem [17, 18, 19].

Výzkum ukázal, že užitím druhotné krystalizace dochází k tvorbě a vývoji nových krystalů, které přispívají velkou měrou ke zvýšení pevnosti a hutnosti ošetřené konstrukce viz. obr. č. 3 a obr. č. 4 snímky z elektronového mikroskopu [30].



Obr. 3 Vzorek s přídavkem CA uložen ve vodě po 90 dnech od zamíchání (zvětšení 20 000x) [30]



Obr. 4 Vzorek s přídavkem CA uložen ve vodě po 180 dnech od zamíchání (zvětšení 20 000x) [30]

2.5 Výztuž

Pro vyztužování stříkaných betonů a malt se využívá syntetických, skleněných, či ocelových vláken. Vlákná se často rozdělují na mikro a makro v závislosti na jejich průměru. Pokud má vlákno průměr menší než 300 μm , jedná o mikro vlákno a pokud dosahuje průměru většího než 300 μm , jedná se o makro vlákno.

Mikro vlákna se využívají především pro snížení objemových změn v raných fázích hydratace, ale jsou vhodná také pro zvýšení odolnosti proti zmrazování, abrazi a pro zlepšení rázové houževnatosti. Často se využívají také pro zvýšení požární odolnosti betonových konstrukcí. Tato vlákna nemají statickou funkci a patří mezi ně především vlákna syntetická. Typické dávkování se pohybuje mezi 1–3 kg/m^3 [21].

Makro vlákna jsou většinou uvažována jako vlákna se statickou funkcí. Jelikož, díky svým především vysokým tahovým pevnostem, zlepšují fyzikálně-mechanické vlastnosti ztvrdlého betonu. Mezi tato vlákna patří především ocelová vlákna, která se standardně dávkuje v množství 20-60 kg/m³ a také vlákna syntetická s dávkováním 4-10 kg/m³ [21].

2.5.1 Ocelová vlákna

Pro vyztužování betonu rozptýlenou výztuží se ve velké míře používají vlákna ocelová. Těchto vláken se využívá především pro potlačení tzv. křehkého lomu betonu. Křehkým lomem se vyznačují většinou velmi pevné materiály, kdy při zatěžování konstantně se zvyšující silou tyto materiály dané napětí přenáší až do chvíle, kdy je překročena jejich mez pevnosti a dochází k okamžité ztrátě únosnosti celého prvku. Při využití drátků nedochází, podobně jako u železobetonu k okamžité ztrátě únosnosti, ale po překročení meze pevnosti dochází k „zachycení“ napětí výztuží a nedochází k okamžitému zhroucení prvku. Existuje nepřeberné množství velikostí a tvarů, ale nejčastěji se využívají vlákna o průměru/tloušťce 0,4-1,3 mm a délce 25-60 mm. Oproti syntetickým vláknům mají ocelová vlákna vysokou pevnost v tahu a může se tedy při návrhu betonové konstrukce částečně počítat s jejich statickou funkcí. Ocelová vlákna bývají často různě zahnutá či mývají na koncích háčky atd. pro lepší soudržnost s betonovou matricí.

Klíčovými vlastnostmi, které bývají sledovány při návrhu konstrukce s rozptýlenou výztuží z ocelových vláken jsou: soudržnost s betonovou matricí (rovné, zahnuté, s ploškami na konci, háčky atd.), délka a průměr vlákna (poměr stran), dávkování (kg/m³), množství vláken – počet kusů na 1 kg vláken, pevnost v prostém tahu [21].

Rozptýlená ocelová vlákna mají pozitivní vliv na odolnost betonu proti abrazi, proti únavovým trhlinám, pozitivně ovlivňují také odolnost proti CHRL, rázovou houževnatost a odolnost v prostém tahu [22]. Typy vláken jsou vyobrazeny na obrázku č. 5.



Obr. 5 Typy ocelových vláken používaných v betonu [21]

2.5.2 Syntetická vlákna

Vlákna syntetická/umělá mají ve většině případů svou tloušťku v řádech mikronů, neboť tloušťka vlákna jako takového, hraje obrovskou roli v účinku na smršťování betonu a tvorbu trhlin. Obecně lze říci, že vlákna s větším průřezem mohou mít vliv spíše na statické funkce betonu, kdežto vlákna s menším průřezem budou mít vliv na omezení tvorby trhlin v prvních fázích zrání betonu. Výše uvedené však záleží především také na modulu pružnosti daného materiálu.

Uvažuje se, že mikro vlákna (s průřezem menším, než 0,05 mm) mohou zvýšit pevnost betonu díky překlenutí mikrotrhlinek, kdežto makro vlákna (s tloušťkou větší, než 0,5 mm) pomáhají zvyšovat pevnost díky překlenutí větších trhlin. [21]

Mezi syntetická vlákna patří například vlákna polypropylenová, která již při dávce 0,9 kg na 1 m³ výrazně zlepšují vlastnosti čerstvého betonu, a především zvyšují odolnost proti segregaci a zlepšují například i jeho čerpatelnost [21]. Během raných fází zrání snižují riziko plastického sedání a tvorby smršťovacích trhlin. Ve ztvrdlém betonu nemají díky svému nízkému modulu pružnosti prakticky žádný vliv na fyzikálně-mechanické vlastnosti betonu, nicméně se ukázalo, že zvyšují rázovou houževnatost, odolnost proti abrazi, mrazuvzdornost a odolnost proti CHRL. Nejvíce však zvyšují odolnost proti vysokým teplotám, resp. ohni. Při zvýšení teplot dochází k vytavení vláken a vytvoření pórové struktury v betonu v místech, kde se vlákna nacházela a tato pórová struktura vytváří prostor pro expanzi plynů, především unikající vodní páry ze žářem namáhané konstrukce.

3 STŘÍKANÉ SMĚSI

Jsou to takové směsi, které jsou ukládány do bednění, či na konstrukci pod tlakem pomocí pneumatické hubice, či pistole pod vysokým tlakem. Směsi se chovají podobně jako běžný beton, ale vyžadují oproti klasickému betonu jiné složení a tím se vyznačují poněkud jinými vlastnostmi než běžný beton. Stříkané směsi se skládají většinou z vody, cementu, kameniva a různých přísad. V angličtině je stříkaný beton označován jako „gunned concrete“, „shotcrete“, kdežto jemnozrnnější hmoty, tj. malty jsou označovány jako „gunité“ [23].

3.1 Problematika stříkaných směsí

Při návrhu stříkaných směsí se dbá, aby se dala stříkaná směs dopravit k ústí stříkací hubice, či pistole s co nejmenším úsilím, dále aby stříkaná měla stříkaná směs co nejmenší spad, držela na stříkaných plochách a byla schopna unést svou vlastní váhu, a aby byla schopna udržet si pevnosti a odolnost během své doby použitelnosti a pro účel a prostředí, pro který byla navržena.

Stříkané směsi obsahují většinou vyšší vodní součinitel (poměr množství cementu k množství záměsové vody) aby se dala směs velice jednoduše pumpovat a stříkat. Většina směsí obsahuje přebytek frakce jemného kameniva pro zajištění dokonalé čerpatelnosti a dále se ve stříkaných směsích využívá přísad urychlující tuhnutí a tvrdnutí pro rychlejší nárůst počátečních pevností a celkové urychlení hydratačního procesu. Plastifikátory a další běžně používané přísady se zde používají v ještě větší míře, než u běžných betonů a malt. Z příměsí, se často využívá například mikrosilika pro zlepšení adhezních vlastností a zvýšení hutnosti. [24]

3.2 Porovnávací (nulový) beton

Při návrhu a tvorbě receptury pro stříkané směsi se provádí kromě testování samotné finální stříkané směsi, také nástřik takzvaného nulového betonu.

Při mokrému způsobu stříkání se jedná o nástřik betonové směsi o stejném složení jako budoucí stříkaný beton ovšem bez urychlovače tuhnutí a tvrdnutí betonu do formy 500 x 500 x 150 mm. Při suchém způsobu je směs nástřikána s obvykle dávkovaným množstvím záměsové vody.

Pevnost po 28 dnech slouží jako porovnávací pevnost při použití přísad urychlujících tuhnutí a tvrdnutí betonu, které se dodávají přímo v trysce. Dále je tato zkouška brána jako průkazní o správném složení porovnávacího betonu, zejména pokud bude směs dodávána betonárnou na místo pomocí např. auto domíchávače [26].

Pevnost po 28 dnech musí dosáhnout požadované pevnostní třídy zvýšené o pokles v důsledku použití přísad urychlujících tuhnutí a tvrdnutí betonu. Stříkané betony, které se aplikují ze suché předvyrobené směsi nelze s nulovým betonem srovnávat bez urychlující přísady.

3.3 Spad

Při aplikaci stříkaných směsí nelze vždy zaručit, že na konstrukci ulpí 100 % stříkané hmoty. Rozdíl mezi hmotou která „spadne“ na zem a která se udrží na konstrukci se vyjádří jako procentuální poměr hmotností těchto dvou hodnot a udává se v procentech. Množství spadu je ovlivněno celou řadou faktorů, především vzdáleností ústí trysky od samotné konstrukce, úhlem, pod kterým se nástřik provádí, rychlostí, kterou stříkaná směs opouští hlavici trysky, či samotné složení směsi jako takové.

3.4 Požadavky na stříkané směsi

Vlastnosti a následně také požadavky se stanovují dle návrhu, typu použití, konstrukce a také kritérií, které má daná směs splňovat. Pro každý typ stříkaného betonu či malty je rozdílný požadavek na dobu tuhnutí, počáteční pevnosti, hutnost, vodotěsnost, mrazuvzdornost atd.

Dle funkce se stříkaný beton dělí na:

- SB I – Stříkaný beton bez konstrukční (statické) funkce,
- SB II – Stříkaný beton s konstrukční (statickou) funkcí,
- SB III – Stříkaný beton se zvláštní konstrukční (statickou) funkcí [25].

Stříkaný beton se dělí stejně jako klasický beton dle tříd pevností, a to na SB 15, SB 20, SB 25 a SB 30 s tím, že číslo uvedené za zkratkou „SB“ uvádí průměrnou hodnotu krychelné pevnosti v tlaku v $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ po 28 dnech [25].

Na rozdíl od běžného betonu se u stříkaných směsí provádí ještě zkoušky mladého stříkaného betonu, do 24 hodin po nástřiku. Dle rychlosti nárůstu pevností se mladý beton dělí do kategorií J1 až J3 [25].

Více o požadavcích na stříkané směsi viz. ČSN EN 206 +A1 a více o zkouškách prováděných na stříkaných směsích viz. kapitola 3.4 Zkoušení stříkaných směsí.

3.5 Typy stříkaných směsí

Od počátku vývoje stříkaných směsí vyvstávala otázka, jak směs dopravovat a ukládat na povrch konstrukce. V dnešní době se využívá dvou základních způsobů, a to mokrého a suchého. V případě mokré metody se využívá předpřipravené směsi, která se doveze například z betonárny pomocí autodomíchače. a v případě metody suché, se suchá směs dopravuje hydraulicky k ústí stříkací pistole a až zde se mísí se záměsovou vodou a přísadami.

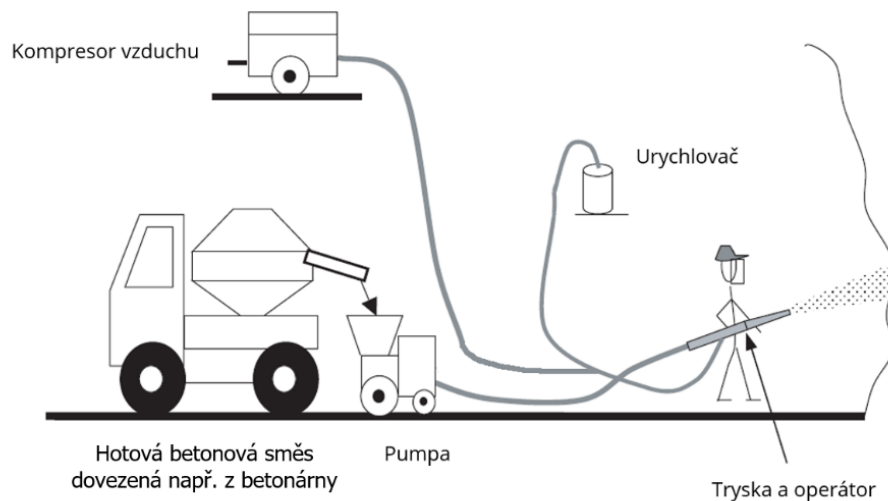
3.5.1 Mokrý způsob

Nejjednodušeji se dá tato metoda popsat principiálně podobně jako když se čerpá obyčejný beton, ale místo velkého a širokého ústí potrubí je na konci umístěná tenčí tryska.

Čerstvá betonová směs se čerpá pomocí upravených čerpadel na beton, kdy je kladen důraz na nízké pulzování (rázy), které doprovází čerpání betonu například při využití pístových čerpadel [25]. Tato metoda je metodou hydraulickou. Druhou možností je čerpání pneumaticky, to znamená, že je směs čerstvého betonu či malty dopravována pomocí proudu vzduchu. V obou případech je před stříkací tryskou čerstvá směs mísená s přísadou urychlující tuhnutí a tvrdnutí betonu.

Výhodou mokrého způsobu nástřiku je jednoduchost celého systému a možnost dovézt již hotovou čerstvou směs na místo. Mokrého způsobu nelze ovšem většinou využít při velkých aplikacích v místech příliš vzdálených od betonárny.

Schéma mokrého způsobu stříkání viz. obr. č. 6.



Obr. 6 Schéma mokrého způsobu stříkání [21]

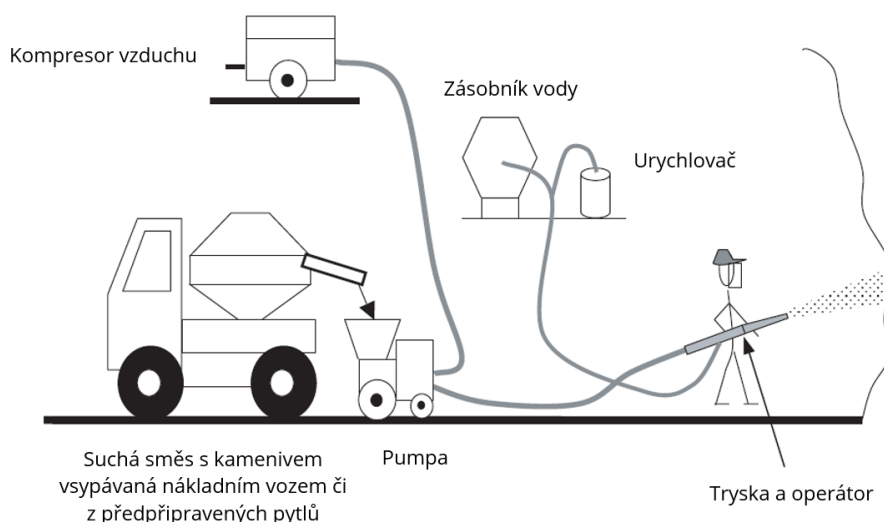
3.5.2 Suchý způsob

Při suchém způsobu nástřiku je suchá směs pneumaticky čili proudem vzduchu unášena hadicí až do stříkacího stroje k trysce. Až v trysce je suchá směs mísená se záměsovou vodou a přísadou urychlující tuhnutí a tvrdnutí betonu. Tato přísada může být také obsažena již ve formě sušiny v suché směsi [26].

Díky kontinuálnímu dávkování vody ale také přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí betonu je velmi složité dodržovat přesný vodní součinitel, resp. kontrolovat a zajistit, že bude vodní součinitel přesně dodržen, jelikož množství vody, se kterou je suchá směs mísená lze ovládat přímo na místě obsluhou stroje [25].

Výhodou suchého způsobu stříkání je, že lze práci přerušovat a směs díky tomu, že je uchována bez vlastní vlhkosti v suchém stavu nehydratuje a směs se nijak neznehodnocuje. Nevýhodou ovšem je velká prašnost a větší množství spadu.

Schéma suchého způsobu stříkání viz. obr. č. 7.



Obr. 7 Schéma suchého způsobu stříkání [21]

3.6 Zkoušení stříkaných směsí

Pro zaručení kvality stříkaného betonu a malt je nutno provádět zkoušky fyzikálně-mechanických vlastností podobně jako u běžného betonu. Některé zkoušky se provádějí in-situ, například zkouška pevnosti v tlaku mladého betonu penetrační jehlou. Většina zkoušek je však prováděna laboratorně na vzorcích, které jsou vyřezány ze zkušebního bloku, který je proveden nástřikem do bednění předepsaných rozměrů.

Nejdůležitější hodnotou, která je sledována při provádění stříkaných betonů je vývoj pevností v prvních hodinách od nástřiku. Ta se zjišťuje dle následující tabulky.

Tab. 1 Metody zkoušení pevnosti v tlaku mladého stříkaného betonu dle ČSN EN 14488 - 2 [26]

Třída pevnosti [N·mm ⁻²]	Stáří betonu	Metoda
0 - 1	0 - 3 hod.	Metoda 1 - Penetrační jehla
1 - 8	3 - 24 hod.	Metoda 2 - Zarážení hřebu (bílé náboje)
8 - 16		Metoda 2 - Zarážení hřebu (zelené a žluté náboje)
5 - 100	1 - 28 dní	Metoda 3 - Zkoušení pevnosti na jádrových vývrtech

3.6.1 Pevnost v tlaku mladého stříkaného betonu pomocí penetrační jehly

Principem této zkoušky je zarážení (zatlačování) zkušební penetrační jehly stanovených rozměrů do povrchu stříkaného betonu či malty do hloubky 15±2 mm. Odečítá se odpor proti pronikání jehly a následně se dle kalibračních křivek zjišťuje

pevnost v tlaku mladého stříkaného betonu. Velkou výhodou této metody je její jednoduchost a možnost použití přímo na stavbě, podobně však jako při měření pevnosti na ztvrdlém betonu pomocí Schmidtova tvrdoměru má hodnota bez správné kalibrace pouze informativní charakter, který je ovlivněn celou řadou faktorů. Nejvíce tuto hodnotu ovlivňuje přítomnost větších zrn kameniva pod povrchem případně přítomnost dutin pod povrchem betonu. Tato metoda má také lehce subjektivní charakter a pokud je tato zkouška prováděna větším počtem pracovníků, může vést k rozdílným výsledkům.

3.6.2 Pevnost v tlaku mladého stříkaného betonu pomocí zarážení hřebu

Do mladého stříkaného betonu jsou zaráženy hřeby pomocí nábojek naplněných střelným prachem. Dle stáří a pevnosti mladého stříkaného se využívají různé kombinace délek hřebů a síly nábojek. Po zaražení hřebu je odečtena hloubka průniku a na hřeb se připevní odtrhoměr pomocí kterého se hřeb vytáhne a odečte se síla potřebná k jeho vytažení. Na základě kalibračních vztahů v poměru hloubky zaražení a potřebné síly k vytažení se stanoví pevnost v tlaku mladého stříkaného betonu.

3.6.3 Pevnost v tlaku stříkaného betonu

Při aplikaci stříkaného betonu jsou prováděna zkušební tělesa dle ČSN EN 14488 - 1. Jednou z možností je provedení nástřiku desky do připraveného bednění o rozměru 500x500x150 mm, při strojní aplikaci pak 1000x1000x200 mm. Tloušťka desky by neměla být menší než 100 mm, ale záleží na zkouškách, které budou prováděny. Druhou možností je nástřik do forem, po zatuhnutí směsi odformování a uložení vzorků do prostředí shodného s prostředím, ve kterém se nachází konstrukce stříkaného betonu [26].

Z nastříkaných desek jsou následně provedeny výřezy či vývrty a na nich jsou již pevnosti v tlaku stanovovány na klasickém laboratorním lisu. Většinou se provádí vývrty o průměru 100 mm a délce 100 mm díky jednoduchému porovnání s krychelnou pevností. Minimální pevnost pro provádění vývrtů je $5 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, při nižších pevnostech může dojít k poškození vyvrtávaného vzorku [26].

Na stříkaném betonu lze také provádět další tvrdoměrné nedestruktivní zkoušky, které se používají u obyčejného betonu, například stanovování pevnosti Schmidovým tvrdoměrem nebo ultrazvukovou impulzní metodou.

3.6.4 Přilnavost / Přídržnost

U některých aplikací bývá stanoven požadavek na přídržnost, zásady pro používání stříkaného betonu od Českého tunelářského komitétu uvádí tabulku minimálních hodnot přídržností pro vazbu konstrukční a nekonstrukční, viz. následující tabulka.

Tab. 2 Minimální požadavky na přilnavost dle ČTuK [26]

Typ vazby	Minimální přilnavost k betonu v N·mm ⁻²	Minimální přilnavost k hornině v N·mm ⁻²
NEKONSTRUKČNÍ	0,5	0,1
KONSTRUKČNÍ	1,0	0,5

3.6.5 Vodonepropustnost

Dle ČSN EN 206+A1 se nestanovuje vodonepropustnost, ale tzv. odolnost vůči průsaku vody. Zkouška se provádí na pevném a vyzrálém jádrovém vývrtnu ze stříkané směsi a pro její stanovení je potřeba vyvrtat vzorky o průměru 150 mm a výšce min. 120 mm. Samotná zkouška a její vyhodnocení probíhá v souladu s ČSN EN 12390-8 (dříve ČSN ISO 7031), z níž vyplývá, že maximální hloubka průsaku (hodnota penetrace) musí činit pro vodotěsný stříkaný beton 50 mm. Druhou možností je stanovení vodotěsnosti jako propustnost působením vody. Stříkaná směs je považována za vodotěsnou, jestliže propustnost vody je nižší než 10⁻¹² m·s⁻¹ [7, 26, 27].

3.6.6 Mrazuvzdornost

Dle ČSN EN 206+A1 jsou kvalifikovány třídy betonu, který je zatěžován mrazem XF1 – XF4. Dle expozičního prostředí, kterému bude stříkaná směs vystavena se stanoví zkouška mrazuvzdornosti v souladu s ČSN 73 1322. Pro stanovení mrazuvzdornosti je potřeba provést jádrové vývrty o průměru 100 mm a výšce min. 200 mm [7, 28].

3.6.7 Odolnost proti chemické agresivitě

Čím má směs lepší vodonepropustnost, tím se dá předpokládat, že se bude zlepšovat i její chemická odolnost. Pokud na vzorky působí chemické prostředí, je vhodné zpřísnit požadavek na průsak tlakovou vodou, a to z 50 mm na 30 mm [26]. Dále je vhodné použít speciálních cementů, jako např. síranovzdorného cementu a případně i speciálních přísad. Dále je vhodné omezení použití např. vápencových či dolomitických kameniv a použití striktně kyselinovzdorného kameniva, např. křemičitého. Při slabém působení kyselin je možné použít vápencových či dolomitických kameniv, které slabou kyselinu neutralizují a dochází k vyluhování těchto kameniv, s tímto se však musí počítat při stanovení životnosti konstrukce jako takové.

Zlepšení chemické odolnosti lze dosáhnout také především snížením vodního součinitele, případně využitím příměsí jako například popílku, mikrosilika, metakaolínu či strusky. V případě železobetonových konstrukcí lze zlepšit odolnost výztuže například zvýšením krycí vrstvy výztuže, použitím inhibitorů koroze, ochranou povrchu nátěry, obklady, či použitím nerezové výztuže.

4 CHEMICKÁ ODOLNOST

Z podstaty věci se dá předpokládat, že beton a směsi betonu podobné, které obsahují cementovou matici, nejsou samy o sobě chemicky odolné a že se cementová kaše jakožto silně zásaditá látka bude v přítomnosti kyselin neutralizovat, rozpadat, či utvářet vedlejší produkty o větším objemu a tím bude docházet k rozrušování cementové matrice jako celku. Pokud jsme schopni vyrobit naprosto vodotěsný beton, nemají se chemické látky jak do samotné cementové matrice dostat. Budou jí samozřejmě vyluhovat, či rozpouštět na povrchu, ale největší snížení odolnosti mají na svědomí kapiláry. Při dokonale hutné matici, případně při využití přísad, které podporují sekundární krystalizaci, dochází k zaplnění kapilárního systému a znemožnění průniku agresivních látek hlouběji do konstrukce. Pokud je potřeba zaručit dokonalou těsnost povrchu a matrice jako takové, je vhodné provést kromě zkoušky stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou také stanovení odolnosti vůči prostupu plynů.

4.1 Chemické působení na cementovou matici

Kyseliny nejčastěji působící na beton jsou kyseliny, které se přirozeně nacházejí v podzemní a dešťové vodě. Jsou to kyselina uhličitá, huminové kyseliny a kyselina sírová. První dvě jsou středně agresivní a jejich pH neklesá pod 3,5, pH kyseliny sírové však může klesnout až pod 2,0. Podobně agresivní látky lze najít v různých výrobních procesech [32].

Primárním účinkem kyselin je rozpouštění cementové matrice, což sice beton jako takový oslabuje, ale na rozdíl od síranové koroze nevede k objemovým změnám.

Ve směsi s křemičitým, žulovým či čedičovým kamenivem dojde při napadení povrchu k vymytí cementové matrice a k odhalení kameniva. V případě směsi s vápencovým či dolomitickým kamenivem může dojít k rozpouštění cementové matrice ale zároveň i kameniva a chemický útok za sebou zanechá relativně hladký povrch. Rychlost chemické reakce závisí na rychlosti a množství proudící tekutiny, kvalitě betonu jako takového a typu cementu a kameniva. V případě reakce huminovými kyselinami vznikají především nerozpustné sloučeniny, které zabraňují další degradaci [32].

4.1.1 Koroze chloridovými ionty

Chloridové ionty jsou běžně se vyskytujícími se ve velkém množství prostředí, nejčastěji ještě v kombinaci se sodíkem, za vzniku NaCl – kuchyňské soli. Ze studií vyplývá, že v přítomnosti chloridových iontů dochází ke zpomalení síranové koroze, tato skutečnost vychází ze studie v brakických vodách, kde se nachází 12 000 - 17 000 mg·l⁻¹ chloridů. Chloridy jako takové nemají na korozi obyčejného betonu zásadní vliv, snad kromě vysrážení soli na povrchu betonu. Nicméně, pokud mohou chloridy volně pronikat do cementové/betonové matrice a dostanou se k výztuži, dochází k porušení pasivace výztuže betonem a k relativně rychlé korozi výztuže za vzniku expanzních tlaků. Výsledkem chemických pochodů jsou objemové změny projevující se odprýskáváním krycí vrstvy betonu a tvorbou trhlin na povrchu [32].

4.1.2 Uhličitanová koroze - karbonatace

Oxid uhličitý (CO_2), resp. kyselina uhličitá (H_2CO_3) reaguje s cementovou pastou či kterýmkoliv vápenatým kamenivem. Následně probíhají následující děje. Část zreaguje s vápenatými ionty za vzniku di-hydrogenuhlíčitanu vápenatého ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$), další část oxidu uhličitého zůstává rozpuštěná a pomáhá stabilizovat vznikající di-hydrogenuhlíčitan vápenatý. Zbylá část má potenciál zaútočit na cementovou matici. Tato malá zbytková část bývá nazývána agresivním oxidem uhličitým [32]. Karbonatace jako taková je obrovským problémem především u železobetonových konstrukcí, jelikož reakce portlanditu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ s CO_2 probíhá za vzniku CaCO_3 a vody. To vede k dlouhodobému snižování pH, následné ztrátě pasivity výztuže betonem a její korozi. Výztuž přestává být betonem pasivována, když pH celku klesne pod 9,6.

4.1.3 Síranová koroze

Síranová koroze je pojem, který popisuje sérii chemických reakcí, které probíhají mezi síranovými ionty a složkami cementové matrice za přítomnosti síranů a vlhkosti. Nejagresivnější a nejčastější reakcí mezi sírany a cementovou maticí je v kapalné, či plynné formě, útoky pevnou formou síranů nejsou časté [33]. Síranová koroze je blíže popsána v další části dokumentu.

4.1.4 Hladová voda

Útok měkkou, či hladovou vodou, což jsou vody chudé na minerály a rozpuštěné ionty, je nebezpečný zvláště při vysoké rychlosti proudění takovéto vody po povrchu konstrukce. Díky vysokému rozdílu koncentrací ve vodě a v cementové matici dochází k vyluhování a rozpouštění cementové matrice. Povrchy betonu, které jsou zkarbonatované jsou hladovými a měkkými vodami méně ovlivněny.

4.1.5 Degradace krystalizací solí

Podobně jako je tomu při chemickém útoku, také rozpuštěné soli mohou vést k degradaci cementové matrice díky krystalizačním procesům a s nimi spojeným krystalizačním tlakům, které následně rozrušují matici zevnitř. Často se lze s tímto

problémem setkat u relativně vodopropustných, pórovitých, či méně hutných betonů, pokud je některá jejich část omývána, ostříkována, či ponořena do solného roztoku a druhá část zase vystavena vzduchu. Zde dochází k odpařování vody v pórech a k zaplňování těchto pórů solemi, které jsou v těchto roztocích přítomny. Následně dochází k zaplňování pórů solemi a může docházet dokonce ke zlepšování fyzikálně-mechanických vlastností, jelikož se zlepšuje hutnost celé matrice. Když však dojde k zaplnění pórové struktury, začne následná krystalizace solí v pórech vyvolávat napětí, které může být větší, než je tahová pevnost dané matrice a dochází k tvorbě mikro a následně také makro trhlinek. Nakonec ke ztrátě únosnosti celé konstrukce. V případě, že dochází ke krystalizaci za zvýšených teplot, mohou vznikat bezvodé soli, kdy následná vlhkost může vést k ještě větším objemovým změnám. Ku příkladu bezvodý síran sodný (Na_2SO_4), čili sodná sůl kyseliny sírové může v případě reakce s vodou vytvořit minerál zvaný mirabilit ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$), jehož objem je o 300 % větší, než v případě bezvodé soli a tato reakce může vést k velkým a při změnách vlhkosti cyklickým změnám napětí [32].

4.1.6 Mikrobiologická degradace

Aktivita mikroorganismů může vést až ke změně chemického prostředí, které následně způsobuje chemickou korozi cementové matrice. Nejrozšířenějším a nejznámějším problémem bakteriálního původu je degradace betonu ve stokách a čističkách odpadních vod způsobená bakteriemi živícími se sírany ze stok, které následně produkují kyselinu sírovou [34]. Bližší popis chemických procesů je uveden v následujícím odstavci.

4.2 Chemický vliv odpadních látek

Problémy s korozi betonových odpadních systémů jsou známy od počátku minulého století [55, 56]. V některých případech je omezena doba použití betonových stok na méně než 10 let [55]. Největší vliv na snižování doby použitelnosti má v kanalizacích vysoká koncentrace H_2S (sulfan/dříve sirovodík). Krom korozi vlastností má tvorba sulfanu i další dopady. Jedná se o tzv. nervový plyn – váže se na červené krvinky a poškozuje mozkové buňky a dalším problémem je jeho specifický zápach, který se může z kanalizací uvolňovat [57].

Sulfan vzniká rozkladem organických látek ve splaškách anaerobními bakteriemi nacházejícími se v kanalizačním systému. Rozklad betonu má ovšem také pozitivní vliv, a to na kvalitu ovzduší uvnitř kanalizačního systému. Koroze betonu probíhá za neutralizace okolního sulfanu a přispívá tak k odstranění zápachu a odstraňuje zdravotně-bezpečnostní problémy při revizích či opravách kanalizací.

Vznik sulfanu

V kanalizacích vzniká sulfan – plyn ve splaškách díky bakteriím, které se zde přirozeně nacházejí. Jedná se o proces, který probíhá bez přístupu kyslíku či dusíku, tedy o proces anaerobní a je příkládán největší měrou bakteriím rodu *Desulfovibrio* a *Desulfobulbus* [58]. Bakterie se nacházejí především v usazeninách na dně stok, kde se množí a vyvíjejí. Jelikož se jedná o anaerobní proces, dochází k němu pouze u gravitačních stokových systémů a pouze ideálně za teplot v rozmezí 15–20 °C za pomalého proudění okolní tekutiny ($<0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), kdy nedochází k čeření a vstupu kyslíku do tekutiny [59].

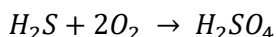
Pokud existuje v tekutině dostatečné množství kyslíku, dochází k chemickým a biologickým procesům, které oxidují sulfan např. na kyselinu sírovou a pokud je přítomné dostatečné množství dusíku, dochází také k přeměně sulfanu, tentokrát však pouze biologickou cestou [61]. Ke snižování obsahu sulfanu dochází také pomocí kovů. Odpadní vody obsahují určité menší množství kovů, jako např. hliník, zinek, železo, které za přístupu kyslíku vytváří se sulfanem sloučeniny a úspěšně ho z odpadních vod odstraňují [61].

Sulfan vznikající v tekutině se následně uvolňuje do okolního prostředí, k tomu dochází v největší míře při rychlém proudění a dalším vlivům, které způsobují čeření hladiny. Například časté záhyby odpadů, výškové změny atd., v takovýchto částech odpadů může vznikat vyšší riziko koroze.

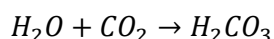
Reakce sulfanu s betonem

U betonu, který se nachází v prostředí s vyšší koncentrací sulfanu, či jiných agresivních plynných látek dochází zpravidla k jeho postupné neutralizaci. Čerstvý beton může dosahovat hodnot v rozmezí pH 11-13, přičemž kyselé plyny dosahují pH <6 . Plynný sulfan na klenbě stok oxiduje dvěma způsoby, chemicky, či biologicky. V obou případech se jedná o aerobní proces, kdy jsou k bezkyslíkatému sulfanu

(H₂S) připojeny dvě molekuly kyslíku (O₂) za vzniku kyseliny sírové (H₂SO₄) dle následující rovnice.



Celý proces se dá rozdělit do několika fází. Dokud je pH betonu vysoce alkalické, dochází pouze k chemickému vzniku kyseliny sírové [56], jelikož bakterie nejsou schopny na takto zásaditém povrchu přežít. V této fázi tedy dochází ke snižování pH betonu pomocí jakýchkoliv kyselých okolních plynů ať už se jedná o plynné CO₂, či o plynné H₂S. Na povrchu betonu dochází k tvorbě tenkého filmu kyselin. Díky vysoké vlhkosti v tomto prostředí dochází ke vzniku například kyseliny uhličitě (H₂CO₃) procesem dle následující rovnice. Tato fáze snižování pH betonu je tedy čistě abiotická.

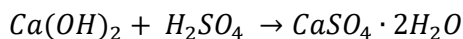


Ve chvíli, kdy pH povrchu betonu klesne pod hranici pH 8-9 začíná docházet také ke vzniku kyseliny sírové biologickými procesy aerobními bakteriemi, které jsou již schopny za této alkality povrchu beton kultivovat [56, 62]. Na povrchu vznikají také různé houby, které vytváří různé další kyseliny jako např. kyselinu octovou, či šťavelovou [63].

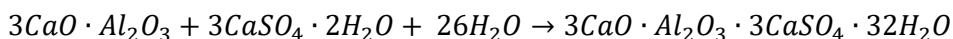
V poslední fázi, kdy je pH povrchu betonu nižší než 2, dochází k vývinu bakterií rodu *Acidithiobacillus thiooxidans* a k ještě výraznějšímu napadení betonové matrice [64].

Reakce síranů a siřičitanů na povrchu betonu probíhá nejčastěji reakcí portlanditu (Ca(OH)₂) a dalších minerálů za vzniku minerálů jiných, s většinou většími objemy, či menšími pevnostmi. Vznik některých minerálů je popsán následujícími rovnicemi.

Vznik sádrovce (CaSO₄·2H₂O).



Vznik ettringitu (Ca₆Al₂(SO₄)₃(OH)₁₂·26(H₂O)).



Vznik těchto minerálů doprovází výrazné objemové změny, jelikož nově vznikající sloučeniny obsahují velké množství především molekul vody, které v původních sloučeninách obsaženy nebyly. Například při vzniku sádrovce dochází

ke zvětšení objemu na 124 % původního objemu minerálu a při vzniku ettringitu dokonce na 227 % původního objemu [65]. Tyto objemové změny doprovází vznik trhlin a vnitřních poruch, které vedou ke snížení celkové integrity betonové matrice, a ještě větší možnosti propagace plynů, kyselin a biotických složek do struktury, čímž dochází k ještě většímu urychlení koroze.

4.3 Zkoušení chemické odolnosti

V dnešní době bohužel zatím neexistuje žádný normový postup pro stanovování chemické odolnosti. „Chemická odolnost“ se stanovuje pomocí postupů v souladu s:

- ČSN 73 1326 - Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek,
- ČSN EN 13198 - Stanovení odolnosti proti zmrazování/rozmrazování s rozmrazovací solí,
- Následující 3 zkoušky jsou pro dlažební kostky, bloky a obrubníky. ČSN EN 1338, ČSN EN 1339, ČSN EN 1340,
- ČSN 73 1322 - Stanovení mrazuvzdornosti betonu.

Existují metodiky, pomocí kterých lze chemickou odolnost betonu stanovit, a to nejčastěji částečným ponořením exponované plochy betonu do roztoku slabých kyselin. Zkoušky jsou časově náročné a bývají prováděny dlouhodobě v časovém rozmezí 90–360 dnů. Výsledky zkoušek jsou následně vyjádřeny jako úbytek hmotnosti vzorku vůči jeho celkové hmotnosti v procentech a jako úbytek pevností vzorků vzhledem k referenčním vzorkům. Často se stanovuje také pH a změna pH po průřezu vzorků. Stejně tak se provádí i snímkování na elektronovém mikroskopu a RTG analýza pro zaznamenání mineralogických změn uvnitř cementové matrice.

5 ODPADNÍ SYSTÉMY

Jelikož by měla být hmota, která bude vytvořena v rámci této diplomové práce použita také v prostředí odpadních stok, je v této části práce provedena stručná definice odpadních vod, stokových soustav a konstrukcí stokových systémů.

5.1 Definice odpadních vod

Odpadní vody jsou vody jakýmkoliv způsobem použité. Jedná se o vody z domácností, zdravotních zařízení, obcí, závodů, či jiných zařízení, kterým byla po použití změněna některá vlastnost, především složení. Především se jedná o vody, které mohou určitým způsobem ohrozit či omezit jakost povrchových nebo podzemních vod. Odpadní vody lze rozdělit následujícím způsobem.

Splaškové

Vody vznikající v domácnostech, či zdravotnických, průmyslových a zemědělských závodech. Kvalita těchto vod je většinou neměnná a obsahuje organické znečištění v různých formách. Tyto vody obsahují převážně bílkoviny (40-60 %), cukry (25-50 %), tuky a oleje (<10 %). Vyskytuje se také určité množství pesticid, povrchově aktivních látek, fenolů a jiných organických sloučenin. Anorganické složky (minerály atd.) jsou dány složením vstupní pitné vody [50].

Průmyslové

Vody vznikající při výrobních procesech jako vody technologické, či chladicí. Svou kvalitou jsou velmi proměnlivé, ale pokud neohrožují kvalitu odpadních vod mohou být odváděny společně s vodami splaškovými. Většina dnešních závodů má vlastní čističky vod, které odpadní vodu předčišťují a ta může být následně vyčištěna konvenčními způsoby [53].

Dešťové

Vody mající původ v dešťových srážkách či tání ledu. Při menších nebo naopak velmi vydatných deštích mohou obsahovat velké množství znečišťujících látek, které mohou mít negativní vliv na jejich kvalitu.

Městské

Vody obsahující směs dešťové, splaškové a průmyslové vody. Jejich množství s denní dobou kolísá. Minimum je v nočních hodinách, maximum nastává mezi v odpoledních a večerních hodinách. Průměrná spotřeba vody se udává v dnešní době na cca 100-120 l pitné vody na jednoho obyvatele za den [52].

Infekční

Vody obsahující velké množství organických, bakteriálních, choroboplodných či jiných látek, které by mohly způsobovat infekce, či epidemie. Jejich likvidace probíhá většinou přímo u zařízení takovéto vody vypouštějící jejich sterilizací.

Podzemní

V současné době nejkvalitnější zdroj pitné vody. V rámci kanalizací jsou to vody nechtěné, které se do kanalizace dostávají nejčastěji průsaky do kanalizace nevhodným či nekvalitním provedením kanalizační stoky.

5.2 Typy stokových soustav

Existuje několik soustav, které odvádějí odpadní vody do recipientu (rybníků, vodních nádrží, přehrad), liší se především způsobem, jakým jsou nimi odpadní vody odváděny.

Jednotná soustava stok

Jednotnou soustavou je taková soustava, ve které je jedním kanalizačním tělesem dopravováno více druhů odpadních vod. Společně se tedy směšují vody splaškové i vody dešťové. Takováto soustava sestává z velkých profilů potrubí především kvůli přívalovým deštům, zároveň soustava obsahuje tzv. odlehčovací komory, do kterých za přílišného průtoku odpadní voda přepadává buď do recipientu, či do dešťových nádrží. Nejběžnější způsob dopravy odpadních vod je gravitační. Tato soustava musí být vždy zatrubněná [49].

Oddílná soustava stok

V oddělené soustavě je vytvořen systém odvodu jak splaškové, tak dešťové vody odděleně.

Splašková oddílná soustava stok

Do této soustavy jsou napojeny především sanitární zařízení, včetně kuchyňských a dalších zařízení. Oproti jednotné soustavě mohou mít relativně malé profily díky relativně malým průtokům. Odpadní vody z této soustavy jsou odváděny přímo na čističku odpadních vod (ČOV), takže nehrozí znečištění recipientu fekáliemi, také nehrozí zpětně zatopení zařízení, jelikož je tato kanalizace kompletně oddělena od kanalizací dešťových. Tato soustava musí být vždy zatrubněná. Doprava odpadních vod může být gravitační, přečerpávací, tlaková, či podtlaková [50].

Dešťová oddílná soustava stok

Oproti předchozím soustavám nemusí být dešťová soustava zatrubnění a mohou ji tvořit i povrchové žlaby. Soustava je uložena mnohem mělčeji, než soustavy předešlé a jsou do ní napojeny například vpusti z komunikací. Dešťová kanalizace je výhradně gravitační. Nevýhodou je, že při krátkých deštích dojde ke spláchnutí nečistot, například i pohonných hmot atd. a dojde ke znečištění recipientu [51].

Modifikovaná soustava stok

Tato soustava odstraňuje částečně nevýhody systémů předchozích. Je kombinací obou výše uvedených. Principiálně, obsahuje tento systém dva druhy odvodu odpadních vod. Splašková kanalizace je uložena hlouběji než kanalizace dešťová. Při krátkých deštích dojde k zaplavení pouze dna dešťové kanalizace a voda se dostává do kanalizace splaškové. Při větších deštích, již dochází k přeplavení dna a voda odchází vyšší částí dešťové kanalizace přímo do recipientu. Takto zůstává recipient čistý i při krátkých deštích [49].

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Následující část práce se věnuje experimentální části diplomové práce a jejím jednotlivým etapám, které byly vytvořeny jako osnova této části a jejich grafické znázornění je provedeno níže v dokumentu na obrázku č. 8.

CÍL PRÁCE

Cílem práce je vývoj a ověření vlastností chemicky odolné stříkané směsi, která by byla vhodná pro různá agresivní prostředí. Těmi jsou například stoky, či žlaby v chemicky zatížených prostředích.

Práce zahrnuje několik dílčích cílů. Prvním z nich je ověření možnosti úpravy receptury referenční komerčně prodávané stříkané směsi, u které je zkoumán vliv skladby a množství přísad na celkové fyzikálně mechanické vlastnosti.

Dalším z cílů je studium vlivu substituce části pojiva, plniva, či jejich kombinace na vlastnosti čerstvé a ztvrdlé vyvíjené hmoty.

Následujícím dílčím cílem je vytvoření dvou receptur obsahujících optimalizovanou skladbu přísad a zároveň určitou míru substituce pojiva a plniva. Záměrem je vytvořit hmotu, která bude vyrobena dle receptury, v jejímž složení bude provedena kombinace substituce pojiv a plniv s příznivými vlivy na celkové fyzikálně-mechanické vlastnosti vyvíjené hmoty po 28 dnech zrání.

Posledním z cílů je provedení ověření takto vytvořených hmot reálným nástřikem metodou suchého stříkání a uložení takto vytvořených vzorků do směsí kyselin pro ověření dlouhodobých chemických odolností.

METODIKA PRÁCE

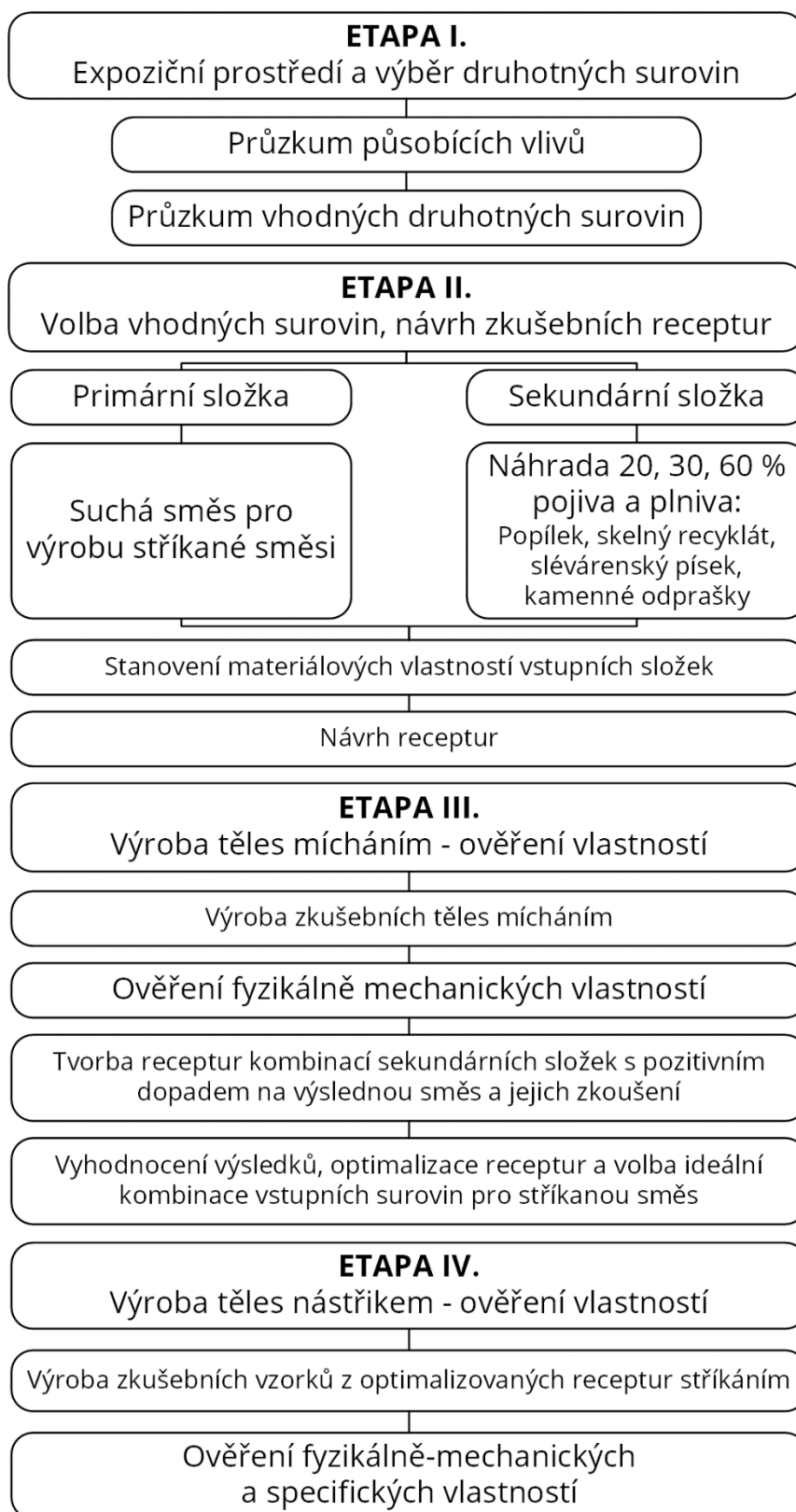
Experimentální/Praktická část práce je rozdělena do čtyř etap. První etapa zohledňuje poznatky nabyté v teoretické části této práce expoziční prostředí, kterému bude výsledná směs vystavena, zkoumá působící vlivy a charakterizuje expoziční prostředí jako takové. Z první etapy vyplývá směřování výběru surovin a skladba receptur v etapě druhé.

Druhá etapa se zabývá volbou a charakterizací vstupních surovin. Dále je řešena volba vhodných druhotných surovin, které jsou použity jako substituce pojiva a plniva, zaobírá se také jejich předúpravou a dále zahrnuje návrh zkušebních receptur.

Třetí etapa se věnuje výrobě zkušebních těles v laboratorním prostředí mícháním. Je využito návrhu z předchozí etapy, kdy je zkoumán vliv a vhodnost přísad a dále také druhotných surovin na vlastnosti ztvrdlé směsi. Do této etapy je zahrnuto zkoušení fyzikálně-mechanických vlastností navržených receptur a ověření vlivu jednotlivých substitučních složek v různé míře na tyto vlastnosti. Stejně tak je ověřen vliv kombinací výše uvedených složek na vlastnosti výsledné směsi. Výsledkem této etapy jsou dvě hmoty vyrobené dle receptur s nejpříznivějším dopadem na celkové fyzikálně-mechanické vlastnosti hmoty, které následně vstupují do další etapy.

Čtvrtá etapa ověřuje navržené receptury a poznatky z předchozích etap nástřikem do zkušebních forem. Jsou prováděny zkoušky fyzikálně-mechanických vlastností zkoušky chemické odolnosti.

Schéma metodiky je shrnuto na obrázku č. 8.



Obr. 8 Schéma metodiky práce

Etapa I. – Expoziční prostředí

V rámci první etapy je provedena charakteristika expozičního prostředí, kterému by měla výsledná hmota odolávat. Jsou popsány vlivy, které mohou na hmotu působit v daných expozičních prostředích a jsou zohledněny výsledky průzkumu současných stavů kanalizací v ČR.

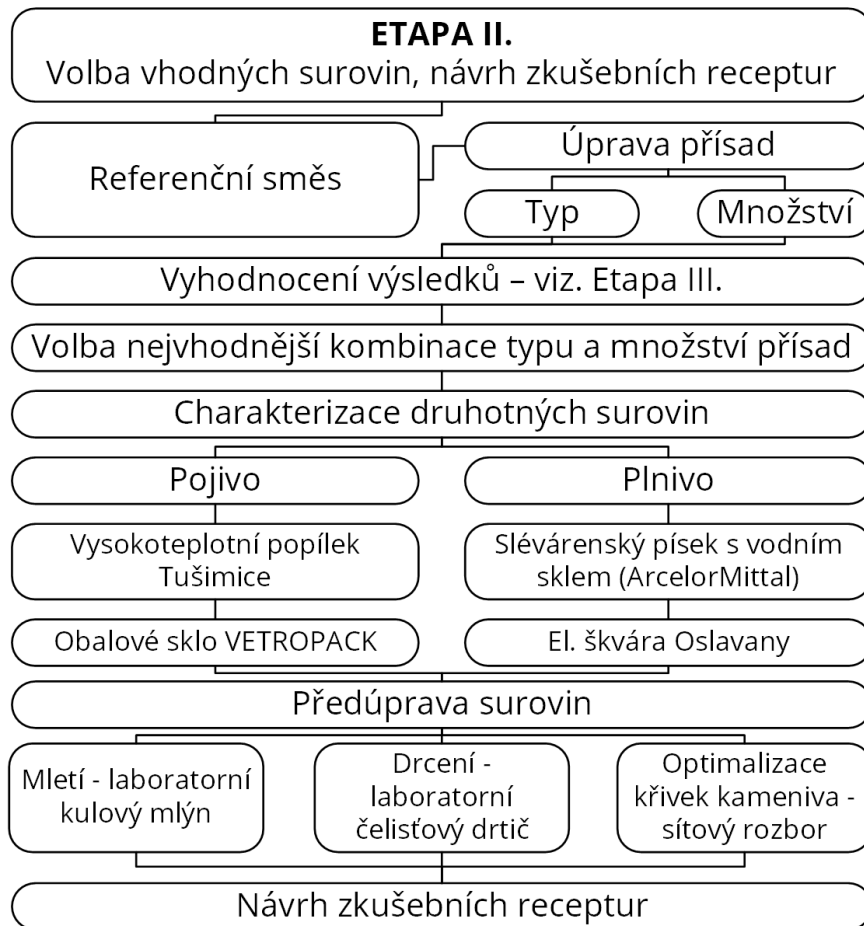
Etapa II. – Volba vhodných surovin, návrh zkušebních receptur

V rámci druhé etapy je provedena charakterizace a selekce vhodných surovin pro návrh receptury stříkané směsi. Jsou stanovena chemická a mineralogická složení daných surovin a je proveden jejich výběr na základě fyzikálních charakteristik. V první části této etapy je provedena optimalizace referenční receptury vhodnou úpravou použitých přísad, jejich typu a dávkování a dále jsou prozkoumány možnosti substituce pojivových a plnivových složek směsi.

Jako substituce pojiv a plniv směsi se uvažuje především využití druhotných surovin, konkrétně je uvažována náhrada cementu (pojiva), vysokoteplotním popílkem z tepelné elektrárny Tušimice (ETU) a dále jemně mletým odpadním obalovým sklem z výroby VETROPACK. Pro substituci plniva, dvoufrakčního kameniva 0-4 mm se uvažuje využití odpadního písku spojeného vodním sklem z výroby železa ze slévárny ArcelorMittal jakožto jemnější složky kameniva a dále jako náhrada hrubší složky kameniva je uvažována odpadní haldovaná elektrárenská škvára ze složiště Oslavany. Jelikož se jedná o dvoufrakční kamenivo, je snaha o co nejuvěrnější a nejpresnější dodržení křivek kameniva v obou frakcích.

Tato etapa se částečně prolíná s etapou následující, kdy je nejprve odzkoušena část optimalizace referenční receptury a po získání výsledků je nejvhodnější receptura dále optimalizována právě substitucí pojiva a plniva. Míra substituce jednotlivých složek je rozvedena blíže v další části dokumentu.

Schéma této etapy je znázorněno na obrázku č. 9.



Obr. 9 Schéma II. Etapy

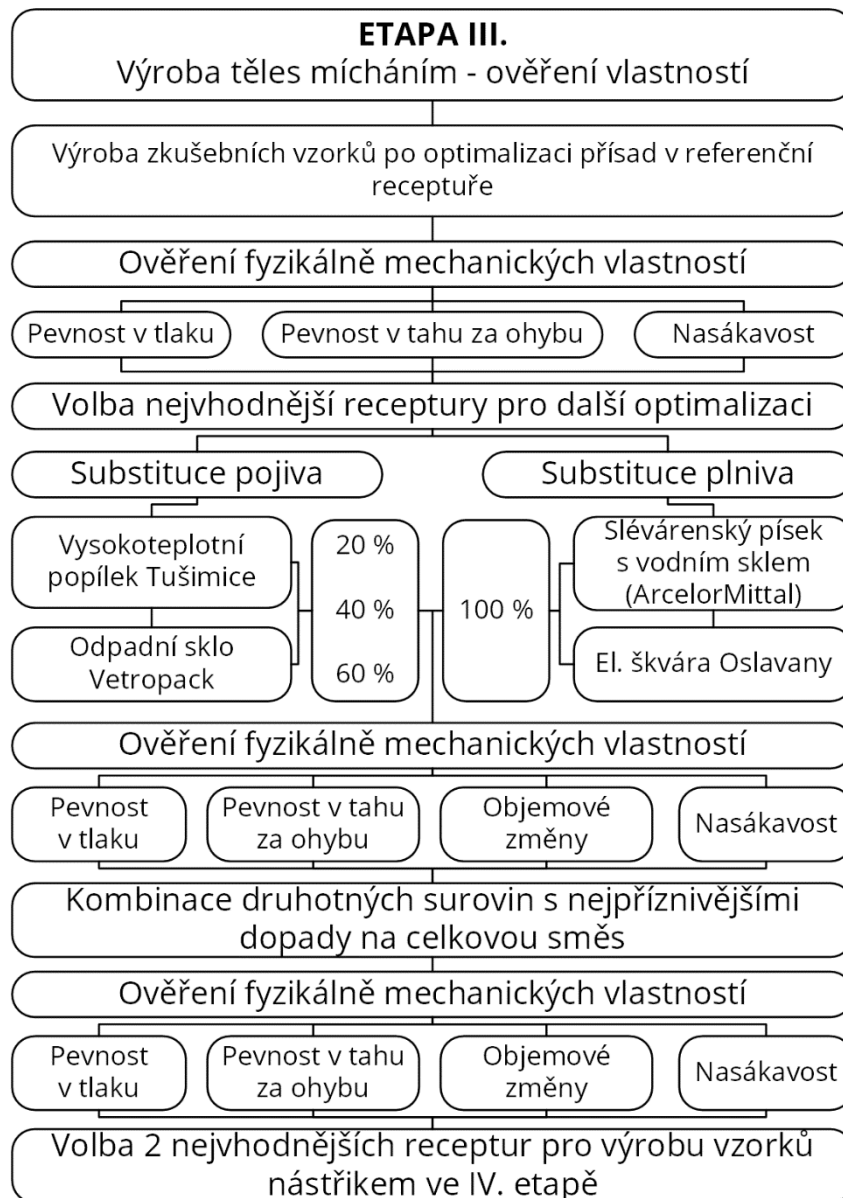
Etapa III. - Výroba těles mícháním - ověření vlastností

Cílem této etapy je ze zvolených receptur vytvořit zkušební vzorky v laboratoři – mícháním. V rámci tvorby zkušebních vzorků je také cílem této etapy stanovení vhodného vodního součinitele, který je určován tak, aby byla zachována zpracovatelnost čerstvé směsi ve srovnání s recepturou referenční. Tato etapa se částečně kryje s etapou předchozí, a to konkrétně s její první částí, kdy byly po zvolení nejvhodnější kombinace typu a množství přísad ověřeny vlastnosti vytvořených receptur. Vlastnosti a výběr nejvhodnější kombinace a typu přísad jsou stanoveny na základě fyzikálně-mechanických vlastností po 28 dnech zrání. Konkrétní zkoušky a kritéria jsou uvedeny dále v dokumentu.

Druhá část této etapy je provedena opět v součinnosti s etapou II. a to při tvorbě a ověření vlastností receptur, které jsou tvořeny substitucí pojiva a plniva referenční receptury. Konkrétně je v etapě ověřována substituce až 60 % pojiva a 100 % plniva.

Výsledkem této etapy jsou dvě receptury, které dosahují srovnatelných, či příznivějších fyzikálně-mechanických vlastností než receptura referenční. Receptury, které vyplývají z výsledků této etapy jako vhodné, vstupují následně do etapy IV. Jejich vlastnosti jsou ověřeny nástřikem odbornou firmou do zkušebních beden.

Schéma III. etapy je znázorněno na obrázku č. 10.



Obr. 10 Schéma III. etapy

Etapa IV. – Výroba těles nástřikem – ověření vlastností

Cílem IV. etapy je provedení nástřiku finálních optimalizovaných receptur odbornou firmou a ověření vlastností směsí takto aplikovaných. Do etapy vstupují dvě směsi vyrobené dle optimalizovaných receptur z etap předchozích.

V této etapě je provedeno zajištění a předúprava dostatečného množství surovin pro provedení nástřiku odbornou firmou, dále jsou v této etapě vyráběny zkušební formy a následně je prováděna homogenizace všech složek a jsou vyrobeny dvě suché směsi připravené pro výrobu zkušebních vzorků.

Následně je v této etapě řešen nástřik odbornou firmou do zkušebních beden, ze kterých je v rámci etapy řešena výroba zkušebních vzorků pomocí vývrtů, či výřezů.

Ve IV. etapě je dále řešeno ověření fyzikálně-mechanických vlastností těchto směsí provedených nástřikem vzhledem ke směsím připravovaných v rámci III. etapy mícháním. Vlastnosti jsou stanovovány po 7, 28, 90 a 180 dnech zrání. Stanovávána je především pevnost v tlaku, nasákavost ve všech výše uvedených časových intervalech a také je stanovován modul pružnosti a odolnost proti tlakové vodě po 28 dnech zrání.

V poslední části této etapy je řešena chemická odolnost vyrobených směsí dle aktuálně zpracovaných metodik.

Schéma IV. etapy je znázorněno na obrázku č. 11.



Obr. 11 Schéma IV. etapy

6 METODY ZKOUŠENÍ

V následujících odstavcích je popsána metody zkoušení, což zahrnuje zkoušky prováděné na vstupních surovinách, mechanické úpravy, které byly prováděny v rámci experimentální části této práce. Dále je popsán způsob výroby a uložení zkušebních vzorků. Nakonec jsou popsány zkoušky prováděné na samotných zkušebních vzorcích.

6.1 Zkoušky prováděné na použitých surovinách

Bylo použito několik základních zkoušek vlastností a složení vstupních surovin, pro možnost provedení jejich bližšího popisu.

Granulometrie a síťový rozbor

U druhotných surovin použitých jako substituce plniva byl proveden síťový rozbor v souladu s ČSN EN 933-1 na normové sadě sít. Pomocí této sady sít byly následně také vyselektovány jednotlivé frakce plniva, aby byla co nejméně kopírována referenční křivka kameniva jednotlivých plniv [35].

U druhotných surovin použitých jako substituce pojiva byla stanovena zrnitost metodou laserové difrakční analýzy v souladu s ISO 13320:2009 zařízením Malvern Mastersizer 2000. Princip metody spočívá v kontinuálním průtoku měřených částic, na které dopadá svazek laserových paprsků, který se difraktuje (ohýbá) a dopadá na pozadí, kde tvoří difrakční obraz, ze kterého se následně pomocí Fourierovy transformace převede informace na distribuční křivku. Metoda je schopna pracovat s malým množstvím zkoumané látky a operuje v rozmezí velikostí částic 0-2000 μm [36, 37, 38].

Chemické složení

Jako jedna ze základních zkoušek, bylo provedeno stanovení chemického složení všech substitučních pojiv a plniv.

Měrná hmotnost

U všech použitých substitučních surovin byla stanovována měrná hmotnost. Pro stanovení bylo využito pyknometru AccuPyc II 1340 Pycnometer. Tato pyknometrická metoda využívá pro stanovování měrných hmotností inertních plynů,

jako např. hélia, či dusíku. Tato metoda je mnohem přesnější než dřívější metoda využívající vody jakožto měřicího média.

Nasákavost

Nasákavost byla stanovována u všech použitých substitučních surovin. Určité množství suroviny bylo ponořeno do destilované vody na 24 hodin a následně přefiltrováno přes filtrační papír. Nasákavost byla stanovena rozdílem hmotností suché a vodou nasáklé suroviny.

Měrný povrch

U druhotných surovin, které byly použity jako substituce pojiva byl stanovován měrný povrch v souladu s ČSN EN 196-6 pomocí Blainova přístroje. Pro určení měrných povrchů surovin byl použit přístroj ZEB/PC-Blaine Star. Metoda zkoušení vychází ze vztahu, pro jehož výpočet je třeba znát měrnou hmotnost zkoumané látky a přístrojem je měřen čas průchodu předem definovaného objemu vzduchu předem definovaným množstvím zkoumané látky [39].

6.2 Úpravy použitých surovin

V rámci předúpravy surovin využitých jako substituce plniva či pojiva, bylo použito několik základních laboratorních metod. Tyto metody vedly k úpravě křivek zrnitosti, jemnosti mletí daných surovin, či k dostatečnému rozmístění všech složek tvořících dané receptury.

Drcení surovin

Substituční suroviny byly upravovány drcením a mletím. Drceny byly příliš velké kusy, či suroviny v nedostatečné jemnosti pro přímé použití či mletí. Pro drcení bylo využito čelistového drtiče BB 200 (Retsch). Tento čelistový drtič drtí materiál pomocí dvou čelistí, z nichž jedna se pohybuje pomocí excentricky uložené hřídele a druhá je statická. Čelistový drtič tohoto typu dokáže pojmout materiál o maximální rozměru 90 mm a je schopen drtit na jemnost cca 2-5 mm.

Mletí surovin

Suroviny, které byly používány jako substituce pojiva byly upravovány nejprve drcením a následně mletím. Mletí bylo prováděno v laboratorním kulovém mlýně OM-20 (BRIO Hranice). Tento typ mlýnu je omezen maximální velikostí vstupní suroviny 4 mm, proto bylo využito u většiny surovin předdrcení výše uvedeným čelistovým drtičem.

Mletí surovin v tomto typu mlýna probíhá pomocí různě velkých ocelových koulí, které o sebe omílají mletou surovinu. Otáčky mlýna byly nastaveny vždy na 49 ot./min. a jemnost mletí byla ověřována pomocí výše uvedeného Blainova přístroje vždy po určitém časovém intervalu.

Homogenizace surovin

Pro výrobu většího množství zkušebních suchých směsí bylo využito laboratorního vertikálního homogenizátoru (planetového mísiče) HV50 (Pharmix) o objemu 50 litrů. Tento typ přístroje je použitelný pro širokou škálu odvětví. Otáčky a další parametry přístroje jsou pevně dány. Do přístroje byly vždy nasypány všechny vstupní suroviny, odvážené na celkovou hmotnost cca 80 kg a každá hmota byla homogenizována 40-60 minut pro zaručení dokonalého rozmísení všech složek. Homogenizátor tohoto typu obsahuje ve spodní části výsypku, kterou lze zhomogenizovanou suchou směs jednoduše a rychle přesypat do libovolných obalů.

6.3 Výroba a uložení zkušebních vzorků

V následujících odstavcích je proveden popis výroby a uložení zkušebních vzorků, které byly vyráběny v rámci III. a IV. etapy.

Výroba a uložení vzorků vyráběných mícháním

Zkušební vzorky vyráběné v rámci III. etapy – mícháním, byly prováděny v souladu s ČSN EN 196-1, pouze doba míchání byla prodloužena na 240 s, aby došlo k dokonalému rozmíchání díky použití práškové plastifikační přísady ve směsi. Dávkování bylo prováděno po jednotlivých složkách směsi. Nejprve byla dávkována záměsová voda, následně hrubé a jemné kamenivo, dále pojivové složky, a nakonec byly přidávány přísady. Po zamíchání byla ověřena zpracovatelnost hmoty na střešacím stolku. Hmota byla následně přesunuta

do zkušebních polypropylenových obalů pro zkoušku objemových změn kontinuálním hydrostatickým vážením a do zkušebních forem o rozměrech 3x 160x40x40 mm v souladu s ČSN EN 196-1 [47]. Každá zkušební forma byla následně zhutněna na laboratorním vibračním stolku s nastavitelnou frekvencí vibrace. Pro všechny zkušební vzorky vyráběné v rámci této práce byla použita stejná frekvence a doba hutnění. Z každé hmoty byly vytvořeny 4 zkušební formy, celkově tedy 12 zkušebních těles, pro stanovení fyzikálně-mechanických vlastností po 2, 7, 28 a 90 dnech zrání.

Po naplnění forem, byla každá forma překryta neprodyšnou fólií pro zamezení odparu záměsové vody. Po nejméně 24 hodinách bylo provedeno odformování, popis a následně uložení vzorků do vodního prostředí ve zrací kádi, kde byly vzorky ponechány za konstantní teploty.

Výroba a uložení vzorků vyráběných nástřikem

V rámci IV. etapy byly zkušební vzorky vyráběny odbornou firmou „in situ“ metodou suchého nástřiku do předem vyrobených zkušebních forem. Zkušební hmoty potřebné pro nástřik (250 kg jedné záměsi), byly vyrobeny pomocí laboratorního homogenizátoru a umístěny do neprodyšných 50 litrových nádob. Pro výrobu vzorků bylo využito předem vyrobených zkušebních forem. Formy byly vyrobeny v souladu s ČSN EN 14488-1 [48]. Jedná se o zkušební bedny z nenasákavého materiálu o rozměrech 500x500x150 mm viz. následující obr. č. 12. Pro další zkoušení byly použity také plastové bedny o rozměrech 800x600x220 mm.



Obr. 12 Bedna pro zkoušení stříkaného betonu

Hmoty a zkušební bedny byly následně převezeny na stavenišť odborné firmy v Praze, kde byly zkušební bedny jeřábem přemístěny do 12 m hlubokého výkopu (pro omezení prašnosti v okolí) a odborným pracovníkem provádějící firmy byl proveden nástřik (viz. obr. č. 13). Celkově byl proveden nástřik třech směsí, referenční a dvou optimalizovaných. Při nástřiku nebylo využito přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí betonu, pro možnost ověření vlivu provedení a srovnání způsobu aplikace zkušebních vzorků.



Obr. 13 Odborný pracovník provádějící nástřik směsí

Po provedení nástřiku byly zkušební bedny umístěny do vozidla a zakryty neprodyšnými fóliemi a následně ponechány 150 minut v klidu pro dokonalé zatuhnutí směsi. Poté byly směsi převezeny zpět do výzkumného centra AdMaS, kde byly směsi ponechány v klidu po dobu 24 hodin. Následně bylo provedeno odformování a uložení vzorků do zracích kádí. Z určité části zkušebních desek byly zhotoveny zkušební vývrty o průměru 50 mm, pro stanovování pevností v tlaku, dále byly provedeny zkušební vývrty o průměru 100 mm pro stanovení odolnosti proti tlakové vodě. Ze zbytku zkušebních vzorků byly provedeny výřezy o rozměrech 160x40x40 mm pro zkoušky chemické odolnosti na laboratorní pile. Na následujících fotografiích (obr. č. 14 a č. 15) je zobrazena zkušební forma po provedení nástřiku zkušební hmoty a provádění zkušebních vývrťů.



Obr. 14 Zkušební forma s provedeným nástřikem zkušební hmoty



Obr. 15 Provádění jádrových vývrtů

6.4 Zkoušky prováděné na zkušebních vzorcích

Na zkušebních vzorcích, ať už v čerstvém, či ztvrdlém stavu bylo prováděno několik zkušebních metod, které jsou popsány v následujících odstavcích. Jedná se o běžné laboratorní metody, které vedou k popisu vlastností čerstvých a ztvrdlých směsí.

Stanovení zpracovatelnosti pomocí střešovacího stolku

V rámci optimalizace receptur bylo cílem zachovat zpracovatelnost čerstvé směsi. Tohoto bylo docíleno vhodnou úpravou množství záměsové vody a zpracovatelnost (konzistence) byla stanovována pomocí střešovacího stolku, který se využívá pro stanovování konzistence čerstvé malty dle ČSN EN 1015-3. Bylo využito normového komolého kuželu o výšce $60 \pm 0,5$ mm, vnitřním průměru $100 \pm 0,5$ mm ve spodní části a $70 \pm 0,5$ mm v části horní [40].

Stanovení počátku a doby tuhnutí

Zkouška byla prováděna v souladu s ČSN EN 196-3 pomocí automatického měřicího Vicatova přístroje Vicamatic 2. Počátek tuhnutí a tvrdnutí byl stanovován u všech zkoušených hmot s cílem výrazně nezměnit jeho hodnoty [41].

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu byla zkoušena v souladu s ČSN EN 12390-5. Zkouška byla prováděna na zkušebních vzorcích o rozměrech 160x40x40 mm. Zkouška pevnosti v tahu za ohybu byla stanovována pomocí tříbodového ohybu s rozpětím podpor 100 mm. Z kritické síly, která byla vyvozena při porušení vzorku a dimenzí vzorku bylo spočítáno u každého vzorku tahové napětí, které bylo potřebné k porušení vzorku [42].

Stanovení pevnosti v tlaku

Pevnost v tlaku byla stanovena v souladu s na zlomcích v souladu s ČSN EN 12390-4 na zlomcích vzniklých po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu tříbodovým ohybem. Jako kritické napětí bylo považováno napětí, při kterém došlo k porušení vzorku [43].

Objemová hmotnost v čerstvém stavu

Objemová hmotnost v čerstvém stavu byla stanovena v souladu s ČSN EN 12350-6. Objemová hmotnost byla stanovována z rozdílu hmotností prázdné a plné zkušební formy o známých rozměrech [44].

Objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu

Objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu byla stanovena v souladu s ČSN EN 12390-7. Objemová hmotnost byla stanovena z rozměrů a hmotností zkušebních těles naměřených před zkouškami pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku pomocí zkušebních vah o přesnosti 0,001 kg a posuvného měřítka o přesnosti 0,01 mm [45].

Sledování objemových změn metodou kontinuálního hydrostatického vážení

Pro sledování objemových změn čerstvé tuhnoucí a tvrdnoucí směsi bylo využito metody kontinuálního hydrostatického vážení. Pro tuto zkoušku byl vytvořen speciální program pro kontinuální odčítání hodnot ze zkušebních vah zn. RADWAG.

Pro zkoušku bylo využito 3 vah, pod kterými byly zavěšeny zkušební vzorky umístěné do vodonepropustných zkušebních polypropylenových zatavených vyvakuovaných obalů, aby bylo zamezeno chyby měření nadnášením vzorků vzduchem, či znehodnocení měřených vzorků okolní kapalinou. Ihned po zamíchání vzorku byla jeho část (500-800 g) umístěna do polypropylénového rukávce, který byl následně pomocí vakuové svářečky fólií neprodyšně uzavřen a vzorek byl pomocí laboratorní váhy zvážen za sucha a následně byl vzorek zavěšen na spodní závěs laboratorní váhy a byl kompletně ponořen pod vodu.

Na vahách, které byly umístěny v klimatizované místnosti o konstantní teplotě 21 °C a relativní vlhkosti 55 % probíhala několikátýdenní kalibrace a byl stanoven tzv. součinitel odparu, který eliminoval chybu měření při odpařování vody ze zkušební kádě. Měření každého vzorku probíhalo v závislosti na průběhu jeho smršťování 48-72 hodin do ustálení měřených hodnot.

Korektnost měření objemových změn touto metodou byla ověřena pomocí smršťovacího kužele, který je vyroben dle amerického standardu ASTM C827/C827M-16. Zkouška spočívá v umístění terčíku na povrch zkoušeného vzorku čerstvé malty, nad kterou je umístěný laser snímající vzdálenost povrchu od čočky laseru. Tvar kužele je vytvořen tak, že při smršťování, či expanzi vzorku dochází délkovým změnám celého vzorku takovým způsobem, že změna vzdálenosti mezi laserem a povrchem vzorku přímo odpovídá reálným délkovým změnám vzorku v jednotkách mm/m [46].

7 ETAPA I. – EXPOZIČNÍ PROSTŘEDÍ A VÝBĚR DRUHOTNÝCH SUROVIN

Prvním krokem pro navrhování směsi byl průzkum prostředí a vlivů, které mohou působit na výslednou směs, ten je proveden v teoretické části této práce. Z výsledků této etapy se odvíjí etapy následující. Byl proveden průzkum v oblasti kanalizací a stok, jakožto hlavního expozičního prostředí, ve kterém by měl být výsledný materiál použit. V České republice se v roce 2017 nacházelo téměř 50 000 km kanalizačních stok. Stoky se v České republice vyrábějí, či v minulosti vyráběly převážně zděné, či betonové s různými vložkami. V dnešní době se nejčastěji při výstavbě setkáváme s betonovými kanalizačními tělesy, jež mají spodní polovinu průřezu vyskládanou čedičovými dlaždicemi, které mají velmi vysokou odolnost vůči působícím vlivům a abrazi.

V této etapě je zkoumána možnost substituce pojiva a plniva druhotnými surovinami. V následujících odstavcích je řešena volba vhodných substitučních pojiv a plniv z druhotných surovin, které byly v rámci řešení práce dostupné.

7.1 Výběr druhotných surovin

V rámci práce bylo využito běžně dostupných druhotných surovin a odpadů z výroby, které jsou dále použitelné bez náročných technologických předúprav. Nenáročnou technologickou předúpravou bylo předpokládáno využití běžně dostupných laboratorních zařízení, sada normových sít, čelistový drtič, kulový mlýn.

Suroviny pro substituci pojiva byly voleny především dle svého chemického složení s ohledem na pucolánové či latentně hydraulické vlastnosti. Byl také kladen důraz na znečištění organickými, či jinými látkami, které by mohly nepříznivě ovlivňovat chemickou odolnost výsledné hmoty.

Výběr potencionálně vhodných surovin byl proveden z širokého souboru druhotných surovin od celé řady producentů, mezi něž patří například ArcelorMittal Ostrava a.s., Třinecké železárny – MORAVIA STEEL a.s., ČEZ a.s. či VETROPACK MORAVIA GLASS a.s.

Výčet druhotných surovin, ze kterých byl následně proveden výběr je znázorněn v následující Tab. 3.

Tab. 3 Výčet dostupných druhotných surovin

Producent	Druhotná surovina	Pojivo/Plnivo
Arcelormittal	Slévárenský písek s vodním sklem	Plnivo
	Šamot – valounky	Plnivo
	Vyzdívka–silica	Plnivo
Třinecké železářny	Slévárenský písek s bentonitem	Plnivo
	Slévárenský písek s vodním sklem	Plnivo
VETROPACK	Skelný recyklát	Pojivo
Prefa Brno	Škvára–složičtě Oslavany	Pojivo/Plnivo
ČEZ	El. popílek vysokoteplotní-Tušimice	Pojivo
	El. popílek fluidní-Ledvice	Pojivo
	Struska–složičtě Mělník	Pojivo/Plnivo

Dle chemického složení a granulometrie výše uvedených surovin bylo zvoleno, které druhotné suroviny budou použity jako substituce pojiva, či plniva. Chemické složení všech surovin z Tab. 3, ze kterých byla prováděna selekce je uvedeno v následující Tab. 4

Tab. 4 Chemické složení vybraných druhotných surovin

Producent	Surovina	Zastoupení v hm %											
		Cl	P	SiO ₂	SO ₃	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O
Arcelormittal	Sl. písek- v. sklo	54	<0,05	82,7	0,1	<0,1	1,5	0,3	2,6	0,5	0,53	0,04	0,23
	Šamot	<40	<0,05	63,8	0,1	<0,1	23,2	1,2	1,7	0,9	0,33	0,02	0,25
	Vyzdívka	<40	<0,05	56,1	0,2	<0,1	32,4	0,4	2,4	1,1	0,26	0,01	0,12
Třinecké železářny	Sl. písek- bent.	110	<0,05	86,5	0,1	<0,1	4,2	0,4	1,7	0,5	0,49	0,02	0,34
	Sl. písek- v. sklo	<40	<0,05	60,6	0,1	<0,1	0,9	0,4	5,0	0,3	17,60	0,19	0,69
VETROPACK	Skelný recyklát	-	-	71,0	-	-	1,7	10,4	0,7	0,3	2,3	-	13,0
Prefa Brno	Škvára- sl. Osl.	-	-	51,0	1,1	0,34	22,4	4,3	0,9	3,3	1,7	-	1,77
ČEZ	El. pop.- Tuš.	<40	<0,05	55,6	0,4	<0,1	26,4	1,5	5,9	1,9	1,05	0,06	0,29
	El. pop.- Ledvice	-	-	32,1	6,7	-	27,9	21,2	7,0	0,9	0,38	-	0,47
	Struska- sl. Mě.	<40	<0,05	45,2	0,1	<0,1	28,2	1,8	8,0	1,3	1,07	0,05	0,27

Jako substituent pojiva byl vybrán vysokoteplotní popílek Tušimice díky vysokému obsahu SiO₂ a nízkým obsahům SO₃ a CaO. Jako druhý substituent pojiva byl vzhledem k vysokému obsahu SiO₂ vybrán skelný recyklát od VETROPACK. U obou substitučních pojiv se dají předpokládat velmi dobré pucolánové vlastnosti a kladný vliv na dlouhodobé fyzikálně-mechanické vlastnosti.

Jako první náhrada plniva byl zvolen slévárenský písek s vodním sklem z produkce Arcelormittal, který obsahoval ve srovnání se slévárenským pískem z produkce Třineckých železáren více SiO_2 a méně chloridů. Jako druhý substituent plniva byla zvolena škvára ze složiště z bývalé elektrárny Oslavany především díky vysokému obsahu SiO_2 a skutečnosti, že tato škvára nemá v současné době žádné jiné využití. Šamotové valounky a vyzdívka Arcelormittal nebyly využity především z důvodu nevhodného tvarového indexu po úpravě granulometrie čelistovým drtičem.

Bližší popis vybraných surovin, včetně granulometrií je uveden v následující etapě v tomto dokumentu.

8 ETAPA II. – VOLBA VHODNÝCH SUROVIN, NÁVRH ZKUŠEBNÍCH RECEPTUR

V rámci etapy I. byl sestaven soubor vhodných surovin pro návrh výsledné směsi. Jako referenční hmota byla zvolena vhodná komerční směs určená pro aplikaci nástřikem, která nevykazuje chemickou odolnost.

V první kroku byl vytvořen soubor čtyř surovinových variant, ve kterých byla provedena modifikace přísad. V dalším kroku byly sestaveny rozhodující parametry pro výběr vhodné receptury a v následující etapě III. byla vybrána receptura s nejpříznivějšími dopady na celkové vlastnosti hmoty. Tato receptura byla následně dále modifikována druhotnými surovinami.

Byly vybrány dvě druhotné suroviny jakožto substituce pojiva a dvě druhotné suroviny pro použití jako substituce plniva. V případě pojiva se jednalo o vysokoteplotní elektrárenský popílek z druhého elektroodlučovače (elektrofiltru) tepelné elektrárny Tušimice a o odpadní jemně mleté obalové sklo z výroby VETROPACK. V případě plniva bylo nahrazováno dvoufrakční kamenivo. Jemnější frakce byla nahrazována odpadním pískem pojeným vodním sklem ze slévárny ArcelorMittal a hrubší frakce byla nahrazována škvárou ze složiště u bývalé tepelné elektrárny Oslavany.

U druhotných surovin bylo stanovováno chemické složení, měrná hmotnost a nasákavost. U substitucí pojiva byla také stanovována jemnost mletí s cílem dosáhnout stejného měrného povrchu jako u původní pojivové složky. U substitucí

plniva byl dále stanovován síťový rozbor a byly vybrány frakce tak, aby byla distribuční křivka kameniva co nejpodobnější původní křivce kameniva.

8.1 Vstupní suroviny – referenční

Pro potřeby této diplomové práce bylo využito komerční stříkané směsi, která byla dodána společností Betosan s.r.o., která byla v rámci této práce následně modifikována přísadami a druhotnými surovinami. Suchá směs referenční byla dodána pytlovaná v původním papírovém obalu s polyetylenovou vložkou. Pro provádění modifikací na hmotě byly současně dodány jednotlivé složky receptury odděleně v neprodyšných obalech. Přibližná referenční receptura je uvedena v následující Tab. 5. Přesná receptura není z autorských důvodů výrobce v této práci uvedena.

Tab. 5 Složení referenční receptury suché směsi dodané výrobcem

Složka	Hmotností podíl ve směsi (%)
Portlandský cement CEM i 42,5 R	17-25
Křemenný písek 0-0,5 mm	13-18
Křemenný písek 0,5-4 mm	38-45
Mletý živec	4-9
Mletý vápenec	10-17
Směs přísad	1-1,9

8.2 Vstupní suroviny – druhotné

Pro optimalizaci složení referenční směsi byly použity 4 druhotné suroviny. Dvě suroviny nahrazující pojivo (popílek, sklo) a dvě suroviny nahrazující plnivo (slévárenský písek, škvára).

U všech druhotných surovin bylo před jejich použitím stanoveno chemické složení. U surovin použitých jako substitute pojiva byl upraven měrný povrch mletím na hodnotu srovnatelnou s měrným povrchem použitého cementu, konkrétně portlandského cementu CEM 42,5 R ($390 \pm 50 \text{ m}^2/\text{kg}$). Suroviny použité jako substitute plniva byly upraveny pomocí čelistového drtiče a následně z nich byly, s ohledem na křivky zrnitosti původních plniv, odděleny frakce vhodné pro použití.

V Tab. 6 je uvedena zrnitost druhotných surovin použitých jako substituce pojiv po úpravě mletím.

Tab. 6 Zrnitost jednotlivých substitučních pojiv

Druhotné suroviny	Zastoupení v hm %		
	<0,01 mm	0,01-0,063 mm	>0,063 mm
Vysokoteplotní popílek	28,84	63,35	7,87
Skelný recyklát	30,71	53,12	16,18

Vysokoteplotní popílek

Tepelná elektrárna Tušimice využívá jako palivo hnědé uhlí a kouřové plyny odcházející z kotlů čistí pomocí třech elektroodlučovačů. Z každého elektroodlučovače lze získat popílek s různým měrným povrchem a měrnou hmotností. První odlučovač zachytává popílek s nejmenším měrným povrchem a měrnou hmotností, a naopak třetí odlučovač zachytává nejjemnější popílek o nejvyšším měrném povrchu a měrné hmotnosti. Měrné povrchy daných popílků se liší v rozmezí cca 260-640 m²/kg a měrné hmotnosti se liší v rozmezí cca 2100-2450 kg/m³. V rámci této práce je využito popílku z druhého elektroodlučovače o měrné hmotnosti cca 400 m²/kg, který již nebylo potřeba upravovat mletím. Použitý popílek splňuje platnou normu ČSN EN 450-1 +A1. Jeho chemické složení je uvedeno v následující Tab. č. 7 a fyzikální charakteristiky jsou popsány v Tab. č. 8. Fotografie popílku je přiložena na obr. č. 16. Granulometrie použitého popílku je znázorněna na obr. č. 18 a č. 19.

Tab. 7 Chemické složení popílku Tušimice

Zastoupení v hm %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
50,00	26,4	5,9	0,4	1,5	1,05	1,9	0,29	0,1

Tab. 8 Fyzikální charakteristiky popílku Tušimice

Sypná hmotnost volně sypaná	Sypná hmotnost setřesená [kg/m ³]	Měrná hmotnost [g/cm ³]	Měrný povrch [cm ² /g]
850	1185	2.41	4000



Obr. 16 Elektrárenský popílek - Tušimice

Odpadní obalové sklo

V následující Tab. č. 9 je popsáno chemické složení použitého odpadního skla z výroby VETROPACK a v Tab. č. 10 jsou pak popsány základní fyzikální charakteristiky mletého odpadního skla. Vzhled jemně mletého odpadního skla po úpravě mletím je znázorněn na obrázku č. 17. Granulometrie je znázorněna na obr. č. 18 a č. 19.

Tab. 9 Chemické složení odpadního skla VETROPACK

Zastoupení v hm %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
71,0	1,70	0,7	-	10,4	2,3	0,3	13,0	-

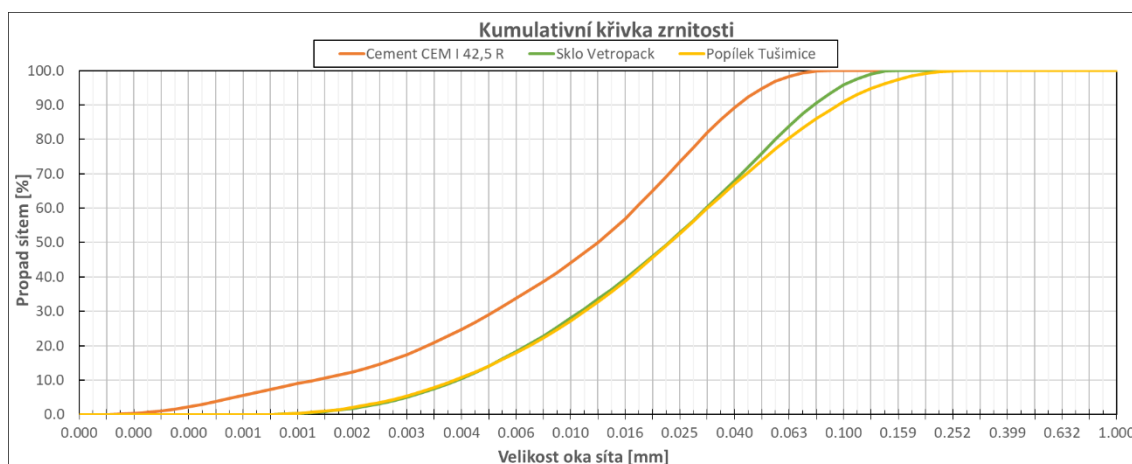
Tab. 10 Fyzikální charakteristiky odpadního skla VETROPACK

Měrná hmotnost [g/cm ³]	Měrný povrch [cm ² /g]
2,56	4000

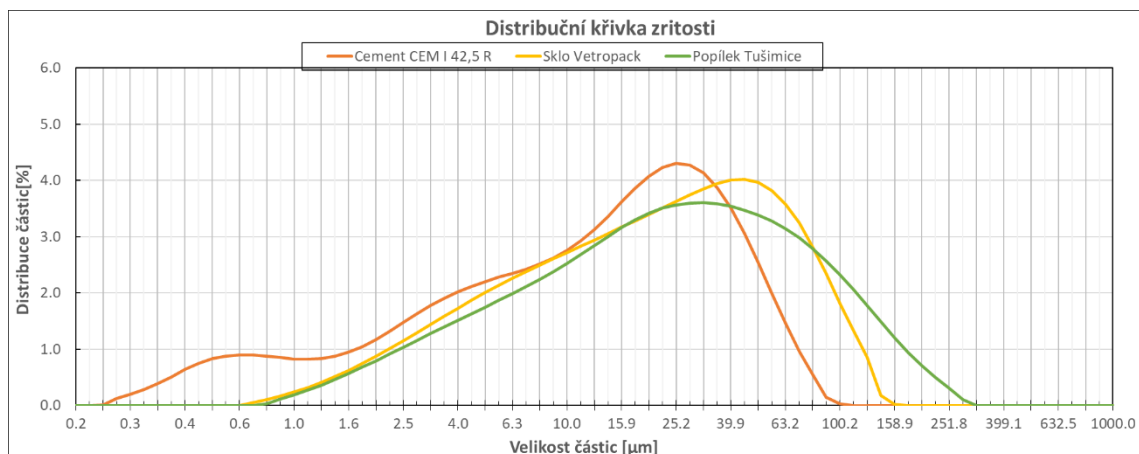


Obr. 17 Jemně mleté obalové sklo – VETROPACK

Na následujících obrázcích (obr. č. 18 a obr. č. 19) jsou vykresleny křivky zrnitosti. Pro lepší představu jsou vykresleny kumulativní, ale také distribuční křivky zrnitosti. Pro srovnání jsou v obou grafech uvedeny substituční pojiva i referenční pojivo – cement 42,5 R. Přestože dosahoval měrný povrch všech pojiv stejných hodnot, z grafů vyplývají rozdíly mezi jednotlivými surovinami. Odpadní sklo a popílek mají počátek zrnitosti v „hrubší“ části obou grafů a jejich střední velikost částic je tedy vyšší.



Obr. 18 Kumulativní křivka zrnitosti cement, sklo, popílek



Obr. 19 Distribuční křivka zrnitosti cement, sklo, popílek

Škvára ze složiště

V této práci bylo využito škváry ze složiště bývalé tepelné elektrárny Oslavany. V době fungování elektrárny probíhalo skládkování škváry na složišti a nachází se jí zde dodnes stále velké množství. V následující Tab. č. 11 je uvedeno chemické složení škváry ze složiště Oslavany a v Tab. č. 12 jsou uvedeny její základní fyzikální charakteristiky. Na obrázku č. 20 je zobrazena použitá škvára po selekci vhodné frakce pomocí laboratorních sít. Granulometrie je znázorněna dále v dokumentu na obr. č. 24.

Tab. 11 Chemické složení škváry ze složiště Oslavany

Zastoupení v hm %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
51,00	22,44	0,86	1,11	4,37	1,70	3,32	1,77	0,34

Tab. 12 Fyzikální charakteristiky škváry ze složiště Oslavany

Měrná hmotnost [g/cm ³]	Měrný povrch [cm ² /g]
2,61	280



Obr. 20 Elektrárenská škvára – Oslavany

Slévárenský písek s vodním sklem

Měrná hmotnost slévárenského písku využitého v této práci je podobná jako u čistého křemičitého písku v rozmezí $2500\text{--}2650\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Písek s vodním sklem je vhodný svou zrnitostí, kdy se používá jako přesívaný síty o průměru otvorů 0,5 mm, vlivem obsahu vodního skla však vytváří i bez vnějších vlivů shluky až 16 mm velké.

V Tab. č. 13 je uvedeno chemické složení použitého písku s vodním sklem ze slévárny ArcelorMittal a v Tab. č. 14 jsou uvedeny fyzikální charakteristiky.

Na obrázcích (Obr č. 17, 18) je použitý odpadní slévárenský písek. Na obr. č. 17 je písek ve formě v jaké je dodáván, zobrazený valoun má délku 25 cm. Na obr. č. 18 je již slévárenský písek po úpravě čelistovým drtičem a po selekci vhodné frakce pomocí laboratorních sít.

Tab. 13 Chemické složení slévárenského písku s vodním sklem

Zastoupení v hm %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
83,00	1,51	2,63	0,10	0,30	0,529	0,45	0,23	<0,10

Tab. 14 Fyzikální charakteristiky slévárenského písku s vodním sklem

Sypná hmotnost volně sypaná	Sypná hmotnost setřesená [kg/m ³]	Měrná hmotnost [g/cm ³]	Měrný povrch [cm ² /g]
1130	1490	2,86	360



Obr. 21 Slévárenský písek před úpravou



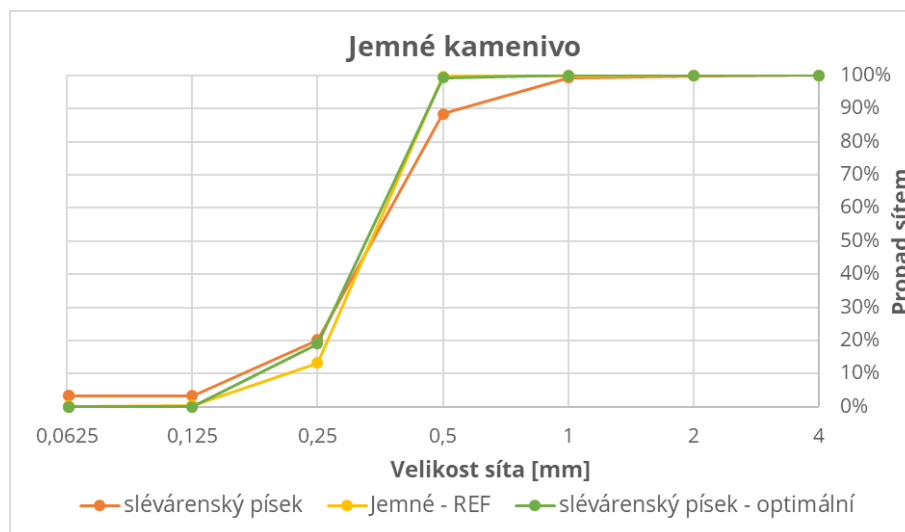
Obr. 22 Slévárenský písek po úpravě drcením

8.3 Optimalizace křivek druhotných plniv

V rámci práce bylo nahrazováno dvoufrakční kamenivo o spojitě křivé zrnitosti. Jemnější frakce kameniva (0,125-0,5 mm) byla nahrazována slévárenským pískem s vodním sklem a hrubší frakce kameniva (0,5-4,0 mm) byla nahrazována elektrárenskou škvárou ze složiště. V obou případech byly materiály upravovány

tak, aby byly jejich křivky zrnitosti co nejpodobnější křivkám referenčním za co nejmenší energetické náročnosti (drcení, mletí, sušení).

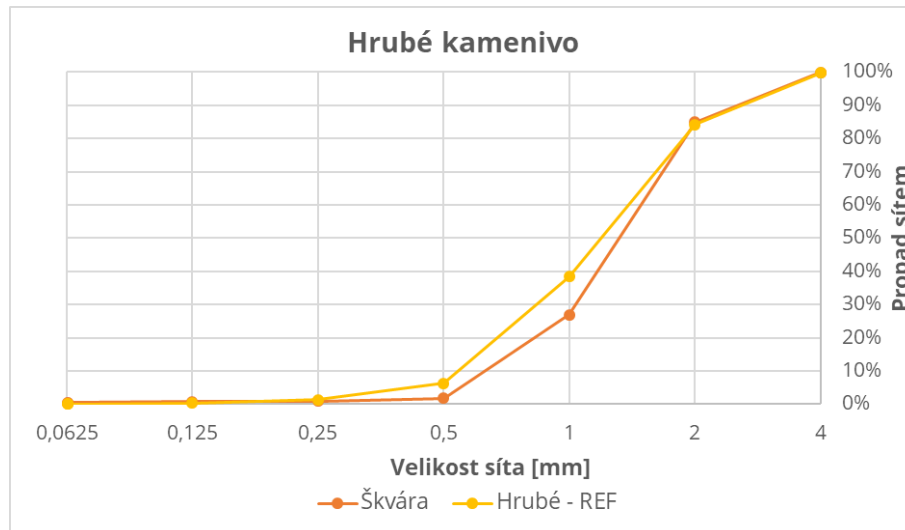
Slévárenský písek byl upravován pomocí laboratorního čelistového drtiče. Velikost částic písku byla sice menší než 2 mm, ale díky vodnímu sklu vytvářel valouny o velikosti i několika centimetrů. Elektrárenská škvára měla vyhovující velikost částic, byla proto pouze oddělena vhodná frakce pomocí sady laboratorních sít. Na následujícím obrázku č. 19 je vykreslena kumulační křivka jemného kameniva. Kamenivo *jemné - REF* je kamenivo referenční dodané výrobcem, dále je znázorněna křivka *slévárenský písek*, což je křivka slévárenského písku podrceného pomocí čelistového drtiče bez úprav a křivka *slévárenský písek - optimální* je křivka znázorňující již vyselektované frakce kameniva. Z grafu vyplývá, že kamenivo referenční a následně také optimalizované obsahuje velice úzkou frakci 0,125-0,5 mm a po provedení výběru daných frakcí vyplývá, že substituční kamenivo obsahuje o několik málo procent více jemných částí z frakce 0,125-0,25 mm, což lze považovat za téměř zanedbatelný rozdíl.



Obr. 23 Kumulační křivka jemného kameniva

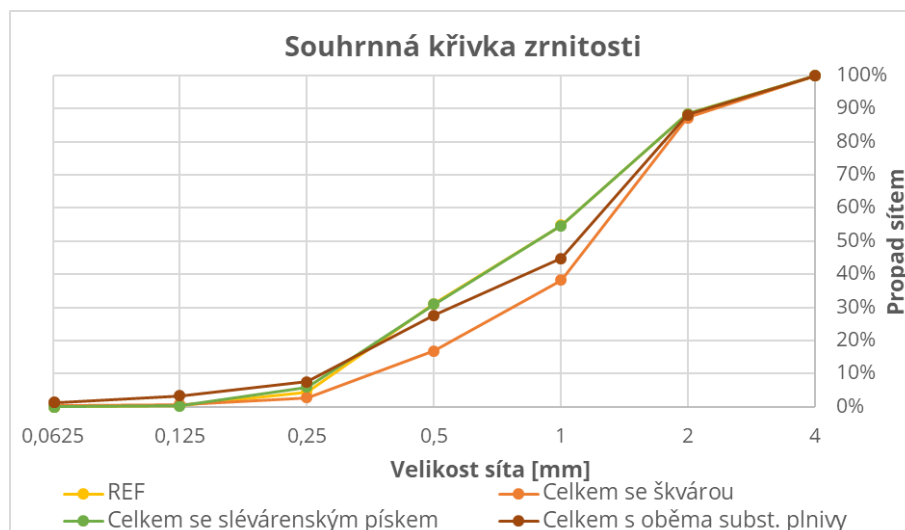
Na obrázku č. 24 je znázorněna kumulační křivka hrubého kameniva. Křivka s názvem *Hrubé - REF* vykresluje zrnitost kameniva referenčního a křivka *Škvára* vykresluje zrnitost kameniva substitučního čili elektrárenské škváry. Škvára měla ideální velikost zrn pro téměř okamžité použití, byla pouze pomocí sady laboratorních sít odstraněna příliš jemná a příliš velká zrna. Z grafu vyplývá, že kamenivo referenční obsahovalo větší množství některých jemných podílů než kamenivo substituční. Kamenivo referenční se skládá z frakce 0,25-4 mm, kdežto

substituční škvárové kamenivo obsahovalo menší množství frakce 0,25-0,5 mm, dále také menší množství frakce 0,5-1 mm a poté výrazně větší množství frakce 1-2 mm. Byla zkoušena předúprava pomocí čelistového drtiče ovšem s velmi proměnlivými výsledky, proto bylo nakonec zvoleno škvárové kamenivo bez úpravy drcením.



Obr. 24 Kumulační křivka hrubého kameniva

Pro lepší představu, jak byla změněna celková křivka zrnitosti kameniva ve směsi byl proveden ještě následující souhrnný graf, který je zobrazen na obrázku č. 25. Z grafu je patrné, jakým způsobem ovlivnilo dané kamenivo či jejich kombinace výslednou křivku. Na první pohled je patrné, že křivka *REF* zastupující souhrnnou křivku kameniva referenčního se kryje skoro celou svou délkou s křivkou *Celkem se slévárenským pískem*. Dá se tedy předpokládat, že za stejných vlastností kameniva by se měla celá hmota chovat stejně, či lépe než hmota referenční. Při použití pouze škváry, či kombinace škváry se slévárenským pískem, tj. křivka *Celkem se škvárou*, či *Celkem s oběma subst. plnivý* je z grafu patrné, že celková křivka zrnitosti je posunuta směrem dolů, což znamená, že kamenivo obsahuje menší množství jemnějších podílů, a naopak větší množství podílů zrn v hrubších frakcích.



Obr. 25 Souhrnná křivka zrnitosti kameniv

8.4 Návrh zkušebních receptur

Pro návrh zkušebních receptur bylo využito receptury referenční, která byla následně modifikována v první řadě pomocí úpravy množství a složení přísad. Z autorských důvodů nejsou v této práci uváděna množství použitých přísad, ale bylo využito především polypropylénových vláken, plastifikačních přísad a přísad podporujících druhotnou krystalizaci.

V rámci III. etapy je provedeno vyhodnocení výše uvedených modifikací a z těchto upravených receptur byla následně vybrána jedna s nejpozitivnějšími dopady na celkové fyzikálně-mechanické vlastnosti výsledné hmoty. Pro výběr a rozhodování bylo využito stanovení některých fyzikálně-mechanických vlastností. Rozhodujícími parametry byla co nejvyšší pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu a dosažení snížení nasákavosti.

Následně byla hmota, která dosáhla nejpozitivnějších vlastností modifikována substitučními pojivy a plnivy. Celkově bylo vytvořeno na 20 receptur, kterými byl ověřen vliv jednotlivých substitučních materiálů. Náhrady pojiva byly zkušeny v množství 20, 40 a 60 % hmotnosti pojiva (cementu) a náhrady plniva ve 100% podílu. Po vyhodnocení výsledků byl proveden návrh dalších receptur kombinací substitučních materiálů s pozitivním dopadem na celkové vlastnosti hmoty.

8.5 Označení receptur

Receptury tvořené v první části etapy s označením *Bet* jsou receptury, u kterých byla prováděna modifikace přísad. Označení těchto receptur má charakter pouze pracovní.

Všechny ostatní receptury byly označeny s ohledem na použité suroviny. Každá receptura obsahuje číslo, které značí míru substituce pojiva či plniva danou surovinou.

Například označení receptury *V. sklo 100 + Sklo 20* značí, že bylo v receptuře nahrazeno 100 % jemného referenčního plniva slévárenským pískem s vodním sklem a 20 % referenčního pojiva jemně mletým odpadním sklem.

Receptury *Bet 0-3* byly odlišeny množstvím využitých přísad. Byla vytvořena kombinace přísad plastifikačních, odpěňovacích a přísad podporujících druhotnou krystalizaci. Množství se lišilo v poměru a celkové dávce přísad v rozmezí 3,5 - 5,3 % z hmotnosti cementu.

8.6 Zkušební receptury

V následující Tab. č. 15 jsou zobrazeny všechny receptury, které byly v rámci prvního návrhu vyrobeny.

Standardně byla prováděna záměs sestávající z 8 kg suché směsi, ke které bylo přidáváno (v závislosti na použité druhotné surovině) 1,09 kg záměsové vody.

Tab. 15 Seznam použitých receptur, označení a míra substituce pojiv a plniv

Označení receptury	Použitá druhotná surovina	Substituce pojiva [%]	Substituce plniva [%]	
			Jemné	Hrubé
Bet REF	-	0	0	0
Bet 0	-	0	0	0
Bet 1	-	0	0	0
Bet 2	-	0	0	0
Bet 3	-	0	0	0
Sklo 20	Odpadní sklo	20	0	0
Sklo 40		40	0	0
Sklo 60		60	0	0
Popel 20	Vysokotep. popílek	20	0	0
Popel 40		40	0	0
Popel 60		60	0	0
Slév.pís.100	Slévárenský písek	0	100	0
Škv. 100	Elektrárenská škvára	0	0	100
Škv. + Slév.pís.100	Slév. písek + El. škvára	0	100	100
Škv. + Slév.pís.100 + Pop 40	Sl.písek + El. škv. + popílek	40	100	100
Slév.pís.100 + Sklo 20	Slévárenský písek + odpadní sklo	20	100	0
Slév.pís.100 + Sklo 30		30	100	0
Slév.pís.100 + Pop 20	Slévárenský písek + popílek	20	100	0
Slév.pís.100 + Pop 30		30	100	0

V rámci zkoušení bylo stanovováno množství záměsové vody s ohledem na konzistenci čerstvé směsi. U většiny receptur bylo množství záměsové vody vyhovující, ale například u receptur obsahujících elektrárenskou škváru bylo nutno zvýšit množství záměsové vody v některých případech až o 9 %. Toto navýšení se dále projevilo na výsledných hodnotách a vlastnostech hmoty.

9 ETAPA III. – VÝROBA TĚLES MÍCHÁNÍM – OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ

V rámci III. etapy byly ověřeny fyzikálně-mechanické vlastnosti zkouškami na tělesech vyrobených dle receptur z Tab. č. 15 mícháním v laboratoři. V této etapě byly v první fázi ověřovány vlastnosti a vliv optimalizace skladby přísad na celkové fyzikálně-mechanické vlastnosti zkoušených hmot. Ve druhé fázi této etapy byly ověřovány vlastnosti zkušebních hmot, ze kterých byla vybrána jedna s optimalizovaným množstvím a typem přísad. Ta byla následně modifikována substitucí pojiva či plniva druhotnými surovinami. Druh a množství substitučních pojiv a plniv je uveden výše v Tab. č. 15.

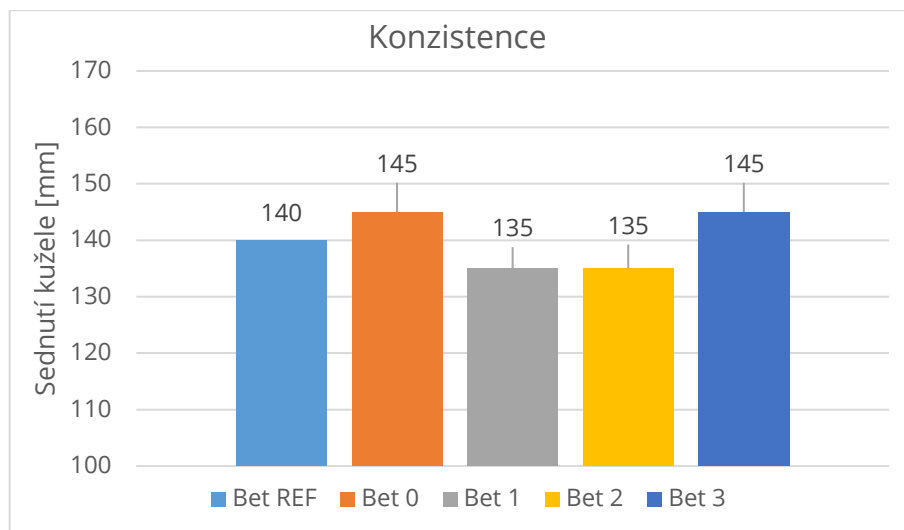
9.1 Vliv množství přísad na vlastnosti směsi

V rámci první části III. etapy byla ověřována optimalizace skladby přísad referenční receptury. Byly vytvořeny 4 základní receptury s označením *Bet 0-3*, které obsahovaly různé množství použitých přísad.

V následujících odstavcích je popsán a graficky zobrazen vliv těchto změn na celkové fyzikálně-mechanické vlastnosti čerstvé a ztvrdlé směsi.

Vliv množství přísad na konzistenci čerstvého směsi

Změna množství přísad se projevila na konzistenci hmot drobnými výkyvy směrem k plastičtější, či naopak méně plastické hmotě. Celkový vliv na změnu konzistence byl v rozmezí ± 5 mm při zkoušce sednutí na střešacím stolku. Tuto změnu lze považovat za zanedbatelnou. Výsledky jsou znázorněny v grafu na obrázku č. 26.

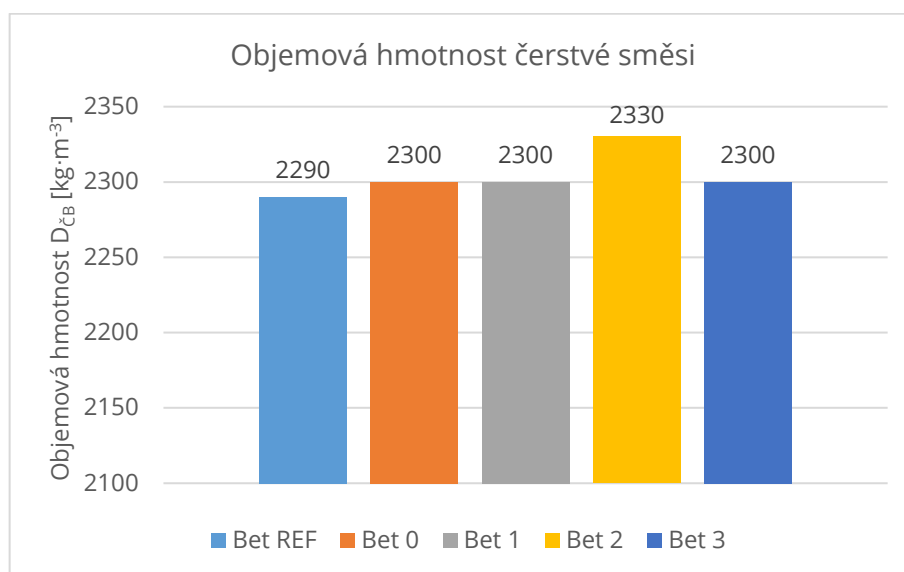


Obr. 26 Vliv množství přísad na konzistenci čerstvé směsi v hodnotách uvedených na obrázku

V případě použití množství záměsové vody předepsané výrobcem byla naměřena hodnota sednutí kužele na střešacím stolku 140 mm.

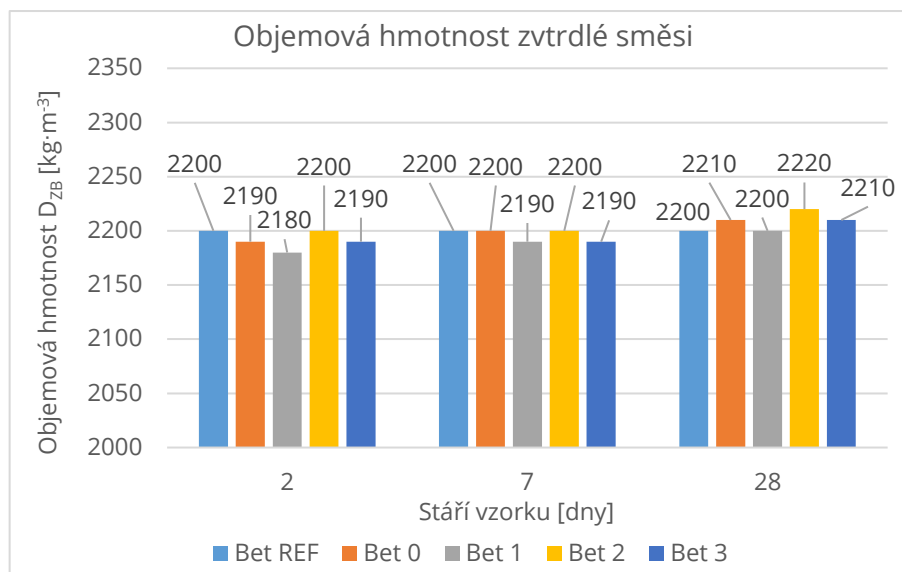
Vliv množství přísad na objemovou hmotnost

Vliv množství přísad se projevil u všech zkušebních těles vyrobených dle upravených receptur určitým nárůstem objemových hmotností v čerstvém, ale i ztvrdlém stavu. Z celkového ohledu jsou změny nepatrné, ale při zachování stejných časů míchání, stejného způsobu hutnění a stejného uložení všech vzorků lze vycházet i z takto drobných změn. Na obrázku č. 27 je graficky znázorněn vliv přísad na objemovou hmotnost čerstvého betonu.



Obr. 27 Vliv množství přísad na objemovou hmotnost čerstvé směsi v hodnotách uvedených na obrázku

Na následujícím obrázku č. 28 je vliv úpravy množství přísad o něco více patrný než v případě čerstvé směsi.

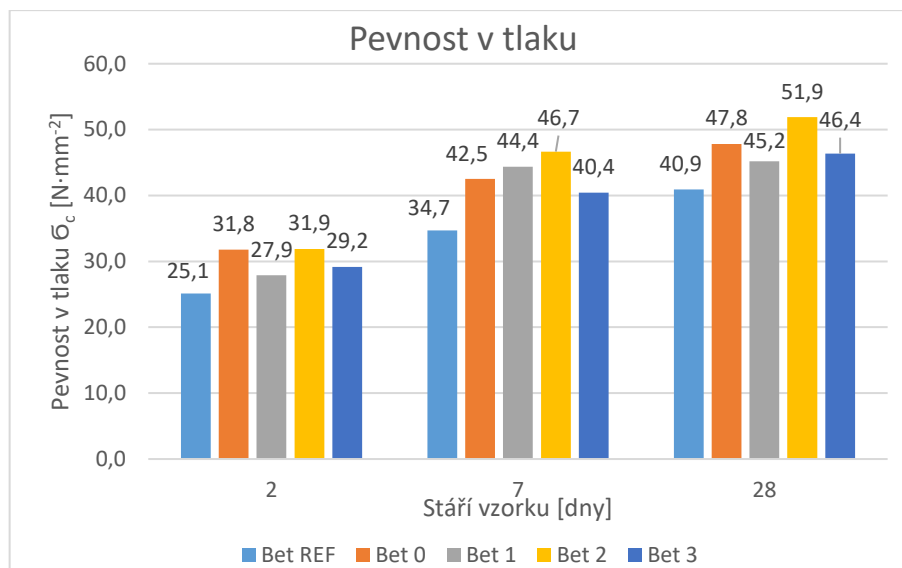


Obr. 28 Vliv množství přísad na objemovou hmotnost ztvrdlé směsi v hodnotách uvedených na obrázku

Z grafu lze vypočítat, jak se měnila objemová hmotnost ztvrdlé směsi v čase. U referenční hmoty nedochází s časem k žádným změnám. Referenční hmota dosahuje hodnot objemové hmotnosti ve ztvrdlém stavu $2200 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ v rámci celého zkoumaného časového období, kdežto objemové hmotnosti zbylých hmot s časem rostou. Z grafu také vyplývá, že ač nabývaly ostatní hmoty, kromě té referenční, na počátku zrání (po dvou dnech) nižších objemových hmotností, došlo s průběhem času k nárůstu. Po 28 dnech zrání došlo dokonce u téměř všech zkoušených hmot ke zvýšení hodnot objemových hmotností na hodnoty vyšší než referenční.

Vliv množství přísad na pevnost v tlaku

Nejpatrnější nárůst fyzikálně-mechanických vlastností úpravou množství přísad je možno pozorovat na následujícím obrázku č. 29 při změně pevností v tlaku během zkoumaného časového období.

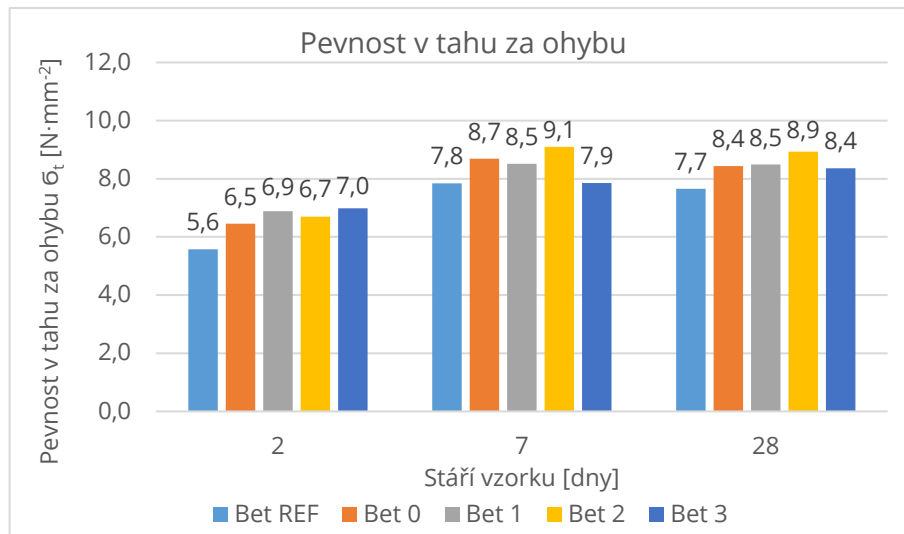


Obr. 29 Vliv množství přísad na pevnost v tlaku v hodnotách uvedených na obrázku

V rámci vyrobených hmot dle upravených receptur byl proveden výběr receptury s nejpozitivnějším dopadem na celkové vlastnosti čerstvé hmoty i hmoty ztvrdlé po 28 dnech zrání. V následujícím grafu lze pozorovat zásadní rozdíly v pevnostech. U všech zkušebních hmot Bet REF, Bet 0-3 je použita téměř totožná receptura. Množství dávkovaných pojiv, plniv a záměsové vody je stejné. Receptury se liší pouze množstvím použitých přísad. Z grafu je patrné, že již po dvou dnech zrání došlo ve hmotách k zásadním změnám a k nárůstu pevností v tlaku v některých případech až o 27 %. Tento trend byl zachován i během dalšího zrání hmoty. Po 28 dnech byl pozorován nárůst pevností v tlaku oproti referenční směsi o cca 26 %. Nejvyšších pevností dosahuje receptura *Bet 2*, která má i v dalších ohledech nejpozitivnější fyzikálně-mechanické vlastnosti.

Vliv množství přísad na pevnost v tahu za ohybu

Na následujícím obrázku č. 30 jsou znázorněny pevnosti v tahu za ohybu.

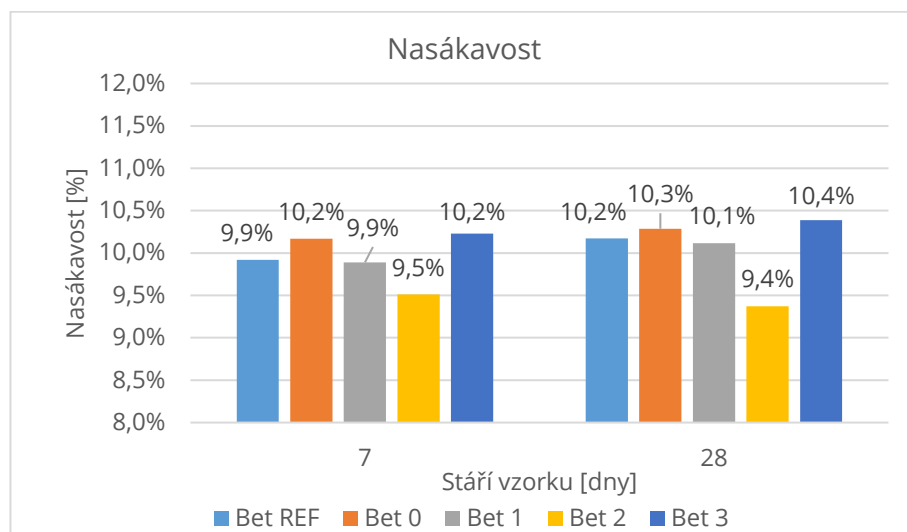


Obr. 30 Vliv a množství přísad na pevnost v tahu za ohybu v hodnotách uvedených na obrázku

Z grafu vyplývá, že se podobný trend jako u pevností v tlaku objevuje také v případě pevností v tahu za ohybu. Již po prvních dvou dnech zrání lze pozorovat nárůst hodnot o téměř 25 %. Po 28 dnech zrání je nárůst hodnot pevností v tahu za ohybu o cca 15 %. Nejpozitivnějších výsledků opět dosahovala receptura *Bet 2*.

Vliv množství přísad na nasákavost ztvrdlé směsi

Úpravou množství použitých přísad bylo dosaženo také pozitivních výsledků a vlivu na nasákavost ztvrdlé směsi. Na následujícím obrázku č. 31 jsou graficky vyjádřeny hodnoty nasákavosti po 7 a 28 dnech zrání.



Obr. 31 Vliv množství přísad na nasákavost ztvrdlé směsi v hodnotách uvedených na obrázku

Měření bylo prováděno po 7 a 28 dnech zrání. Na hmotě se projevilo u některých hmot určité zvýšení, či naopak snížení nasákavosti. Největšího snížení nasákavosti dosáhla po 7 i 28 dnech hmota vyrobená dle receptury *Bet 2*.

9.2 Shrnutí první části III. etapy

V rámci první části III. etapy byla ověřována skladba přísad referenční směsi. V rámci návrhů receptur z II. etapy došlo k vytvoření čtyř receptur, které obsahují optimalizované množství použitých přísad. Ve výše uvedených odstavcích je rozepsán vliv těchto přísad na jednotlivé klíčové vlastnosti čerstvé a ztvrdlé směsi. U čerstvé směsi byl sledován vliv na objemovou hmotnost a konzistenci, při zachování stejného množství záměsové vody. U ztvrdlé směsi byl po 2, 7 a 28 dnech zrání sledován vliv na objemovou hmotnost, pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu a nasákavost. Konzistence nabývala u všech zkoušených hmot téměř stejných hodnot. Optimalizace skladby přísad se projevila zvýšením objemových hmotností čerstvých směsí o až $40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a u ztvrdlých směsí po 28 dnech o cca $20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, dá se tedy říct, že změna přísad měla na objemové hmotnosti čerstvých a ztvrdlých směsí zanedbatelný vliv. Úprava skladby přísad se však výrazně projevila na fyzikálně-mechanických vlastnostech ztvrdlých směsí. Došlo k nárůstům pevností v tlaku a v tahu za ohybu ve všech zkoušených časových intervalech (2, 7 a 28 dní zrání) a ke snížení nasákavosti po 7 a 28 dnech zrání. U pevností je pozorovatelný nárůst po 28 dnech zrání, kdy došlo u hmoty vyrobené dle receptury *Bet 2* ke zvýšení pevností v tlaku z hodnoty $40,9 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ na $51,9 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, což odpovídá nárůstu o cca 27 % oproti referenční hmotě. U pevností v tahu za ohybu byl pozorován podobný trend a u hmoty vyrobené dle receptury *Bet 2* došlo po 28 dnech zrání k nárůstu pevnosti v tahu za ohybu z hodnoty $7,7 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ na $8,9 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. Tato změna odpovídá nárůstu pevností o cca 15 % oproti hmotě referenční. Úpravou skladby surovin došlo také ke snížení nasákavosti oproti hmotě referenční, a to z hodnoty 10,17 % po 28 dnech zrání na hodnotu 9,37 %.

Na základě výše uvedeného byla vybrána jako optimální, hmota vyrobená dle receptury *Bet 2*. Tato hmota dosahovala ve všech klíčových zkoumaných bodech nejpozitivnějších výsledků na celkové fyzikálně-mechanické vlastnosti zkoušených hmot. Hmota vyrobená dle receptury *Bet 2* byla následně modifikována pomocí druhotných surovin v druhé části III. etapy.

9.3 Substituce pojiva a plniva optimalizované receptury

Druhá část III. etapy se zabývala ověřením fyzikálně-mechanických vlastností receptur vytvořených v rámci II. etapy opět pomocí míchání hmot v laboratoři. Do této etapy vstupuje jako hlavní hmota vytvořená dle optimalizované receptury *Bet 2*, ve které byla upravena skladba použitých přísad. Z této receptury bylo následně v rámci II. etapy vytvořeno několik dalších zkušebních receptur, ve kterých byla substituována pojivová, či plnivová složka. V rámci této etapy byl nejprve ověřován vliv jednotlivých substitučních pojiv a plniv na celkové fyzikálně-mechanické vlastnosti zkoumaných hmot po 2, 7, 28 a 90 dnech zrání a následně byla zkoumána a ověřována také možnost kombinace substituce plniva a pojiva a její vliv na celkové fyzikálně-mechanické vlastnosti také po 2, 7, 28 a 90 dnech zrání.

V této části III. etapy je ověřován vliv substituce pojiva s hodnotou 20, 40 a 60 % vysokoteplotního popílku z druhého elektroodlučovače tepelné elektrárny Tušimice a jemně mletého odpadního skla z výroby VETROPACK. Dále je ověřován vliv substituce plniva, a to vždy v množství 100% náhrady pomocí odpadního slévárenského písku ze slévárny ArcelorMittal a škváry ze složiště bývalé tepelné elektrárny Oslavany.

V rámci této části etapy byly ověřovány následující vlastnosti. Konzistence – vliv druhotných surovin na zpracovatelnost čerstvé směsi (cílem bylo zachovat zpracovatelnost za úpravy množství záměsové vody). Objemová hmotnost čerstvé a ztvrdlé směsi, pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu, nasákavost a objemové změny. Zkušební receptury jsou uvedeny v Tab. č. 15.

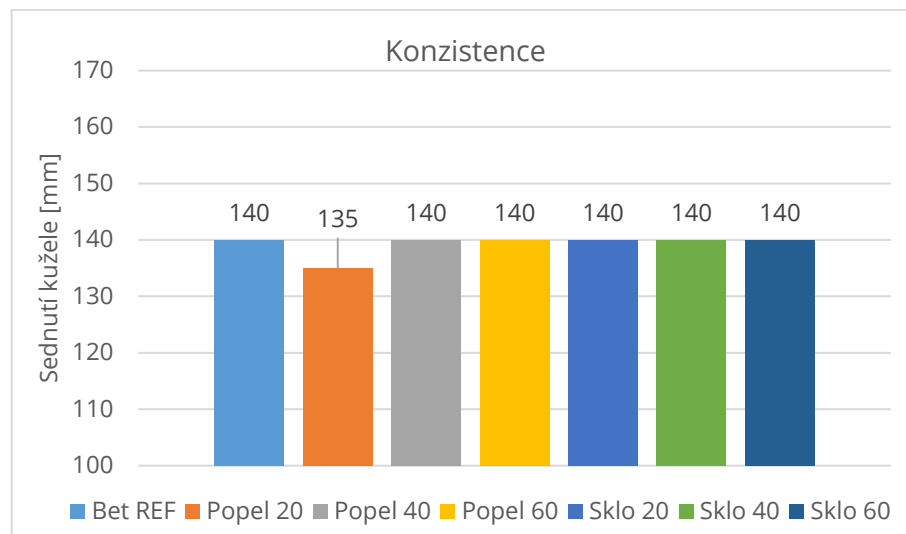
Cílem bylo vytvořit kombinaci pojiva a plniva s nejpozitivějšími dopady na celkové vlastnosti hmoty. Tyto vlastnosti byly splněny u hmot obsahujících 100% náhradu jemného plniva odpadním slévárenským pískem s vodním sklem a u hmot obsahujících 20% náhradu pojiva jemně mletým odpadním sklem či vysokoteplotním popílkem. Pro lepší představu o chování hmoty byly vytvořeny ještě další dvě receptury obsahující 100% náhradu jemného plniva pískem s vodním sklem a 30% náhradu pojiva jemně mletým odpadním sklem a vysokoteplotním popílkem. Pro srovnání byla vytvořena ještě jedna receptura obsahující 100% náhradu veškerého plniva – obsahující 100% náhradu hrubého plniva škvárou, 100% náhradu jemného plniva pískem s vodním sklem a 40% náhradu pojiva

vysokoteplotním popílkem. Tato receptura nedosahovala pozitivních výsledků a je v této práci uvedena čistě jako srovnávací, pro lepší představu o fungování hmoty.

V následujících několika odstavcích jsou popsány a vykresleny základní fyzikálně-mechanické vlastnosti, které byly sledovány na zkušebních hmotách.

Vliv substituce pojiv, plniv a jejich kombinace na konzistenci čerstvé směsi

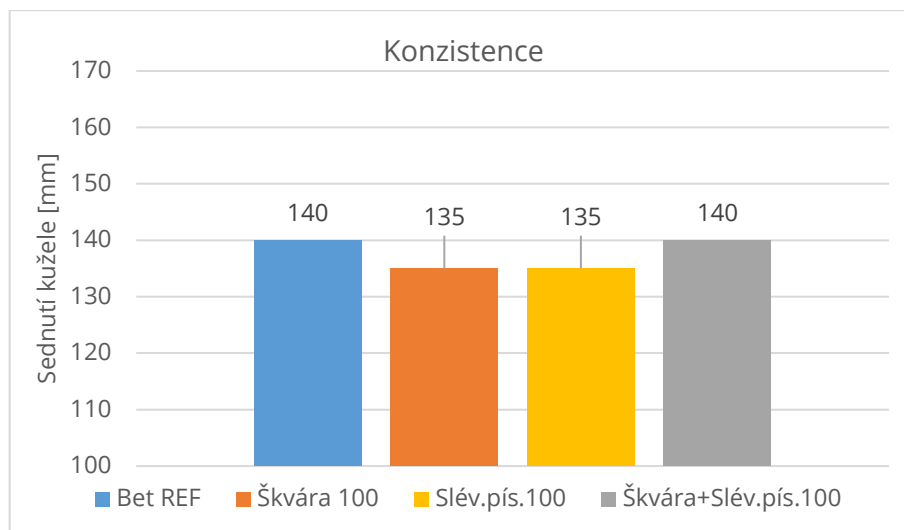
Substituce pojiva se projevila u některých receptur zásadní měrou. Na obrázku č. 32 jsou znázorněny hodnoty rozlité pomocí střešacího stolku.



Obr. 32 Konzistence čerstvých hmot se substitucí pojiva v hodnotách uvedených na obrázku

Z grafu vyplývá, že všechny hmoty dosahují takřka stejné konzistence v rozmezí ± 5 mm, což je možno brát jako zanedbatelný rozdíl. Ovšem při využití vysokoteplotního popílku z druhého odlučovače jako substitučního pojiva, bylo nutno při náhradě pojiva 40 % a 60 % doplnit do čerstvé směsi určité množství záměsové vody pro udržení zpracovatelnosti. Při náhradě 40 % bylo přidáno 2,8 % záměsové vody a při náhradě 60 % bylo nutno přidat 3,7 %. Všechny hmoty se chovaly velice podobně, na první pohled se ovšem směs s odpadním sklem leskla a vypadala, že se z ní odlučuje záměsová voda, k čemuž ovšem nedocházelo. Naopak směs s vysokoteplotním popílkem se projevila do jisté míry tixotropně.

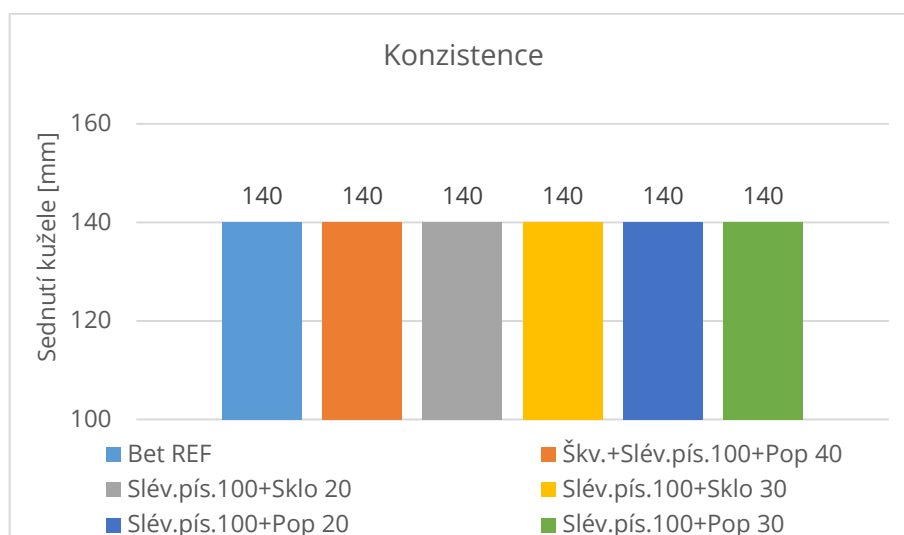
Na obrázku č. 33 jsou znázorněny konzistence v čerstvém stavu hmot, ve kterých bylo substituováno plnivo.



Obr. 33 Konzistence čerstvých hmot se substitucí plniva v hodnotách uvedených na obrázku

Při náhradě plniva odpadním slévárenským pískem s vodním sklem nedocházelo k téměř žádným změnám konzistence (viz. obr. č. 33) a nebylo nutno do směsi přidávat či ubírat záměsové vody. Při využití elektrárenské škváry ze složiště však bylo nutno přidat 6,5 % záměsové vody pro udržení zpracovatelnosti a v případě kombinací plniv bylo nutno přidat pro udržení zpracovatelnosti 7,4 % záměsové vody.

Na obrázku č. 34 jsou znázorněny konzistence hmot připravených dle receptur kombinujících substituci referenčního pojiva i plniva.

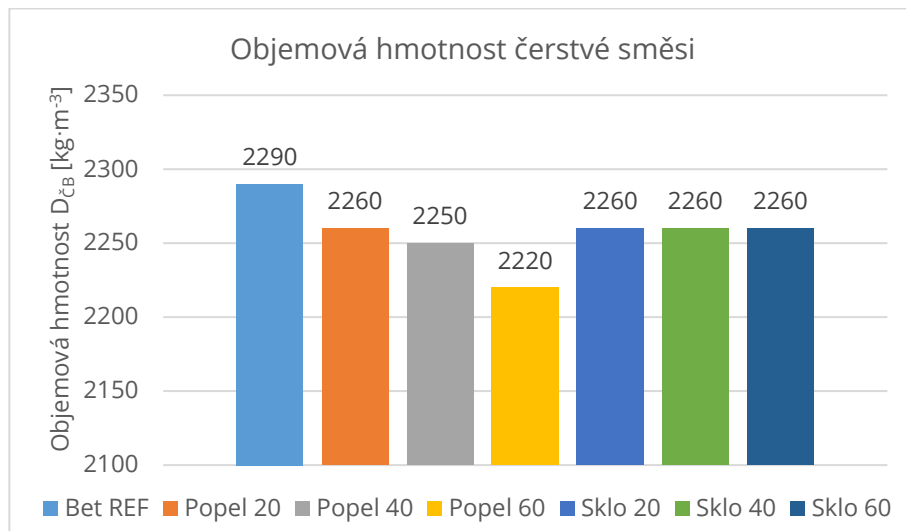


Obr. 34 Konzistence čerstvých hmot se substitucí pojiva i plniva v hodnotách uvedených na obrázku

Jak je již výše uvedeno, byla zvolena kombinace 20% a 30% substituce pojiva a 100% substituce jemného plniva. Ke směrším vyrobených tímto způsobem nebylo nutno přidávat záměsovou vodu a u hmoty obsahující 30% substituci pojiva odpadním sklem bylo dokonce nutno 1 % záměsové vody odebrat pro zachování zpracovatelnosti. U směsi vyrobené dle receptury obsahující kromě 100% náhrady plniva také 40 % vysokoteplotního popílku došlo ke kombinaci negativního vlivu jemně mletého popílku a škváry a bylo nutno přidat 11 % záměsové vody pro udržení zpracovatelnosti. Toto množství vody se následně projevilo negativně na dalších fyzikálně-mechanických vlastnostech.

Vliv substituce pojiv, plniv a jejich kombinace na objemovou hmotnost

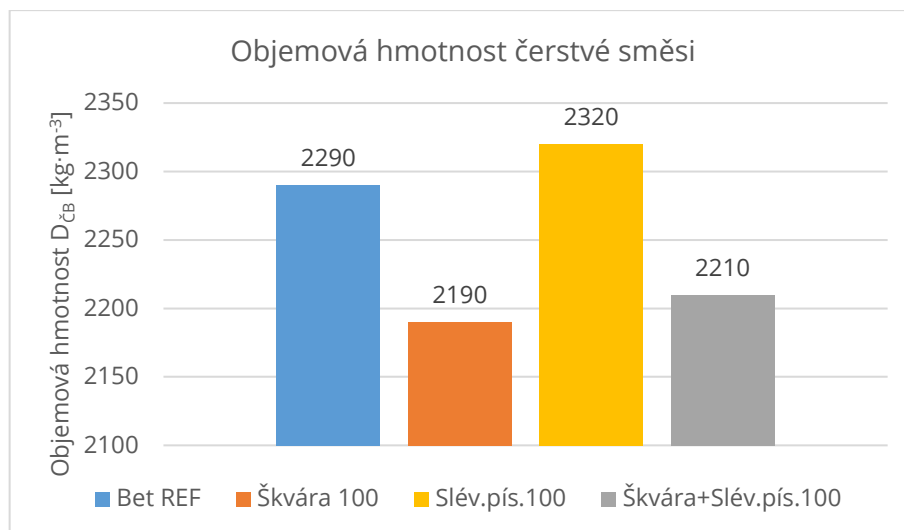
V grafu na obrázku č. 35 je znázorněn vliv substituce pojiva na objemovou hmotnost čerstvé směsi.



Obr. 35 Objemová hmotnost čerstvých hmot se substitucí pojiva v hodnotách uvedených na obrázku

Z grafu patrné, že jakákoliv náhrada pojiva vedla ke snížení objemové hmotnosti čerstvé směsi, tento jev byl částečně očekávaný především díky nižší měrné hmotnosti druhotných pojiv ve srovnání s pojivem referenčním. Dále je z grafu patrné, že s mírou substituce vysokoteplotního popílku klesá úměrně také objemová hmotnost. Naopak míra substituce pojiva pomocí jemně mletého odpadního skla nevede ke změnám objemové hmotnosti.

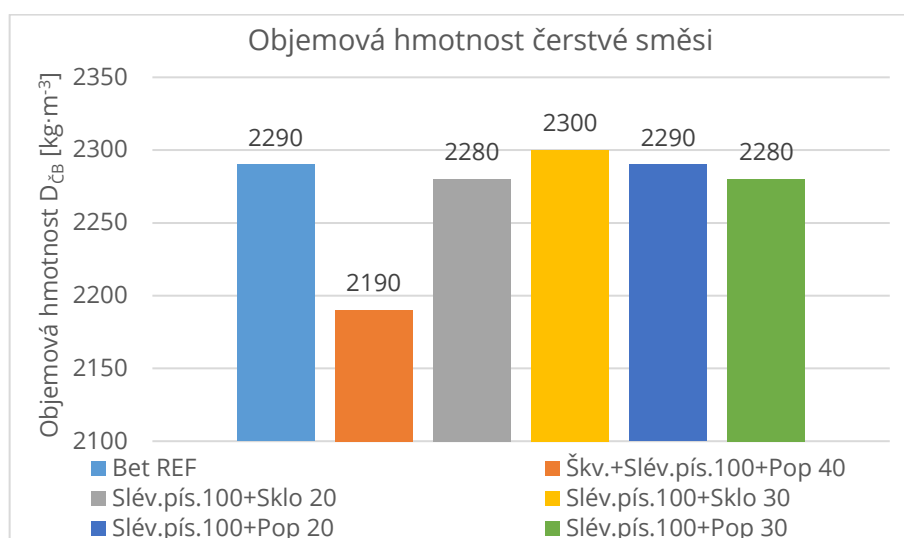
Na následujícím obrázku č. 36 jsou znázorněny objemové hmotnosti hmot u kterých bylo substituováno plnivo.



Obr. 36 Objemová hmotnost čerstvých hmot se substitucí plniva v hodnotách uvedených na obrázku

Z grafu vyplývá, že při použití elektrárenské škváry dochází k prudkému poklesu objemové hmotnosti, což může být dáno také určitým přídavkem záměsové vody, na druhou stranu při použití odpadního slévárenského písku dochází k určitému zvýšení objemové hmotnosti čerstvé směsi. Při využití kombinace výše uvedených plniv dochází k průniku obou hodnot, nicméně přídavkem záměsové vody není rozdíl hodnot objemové hmotnosti se škvárou či slévárenským pískem poloviční.

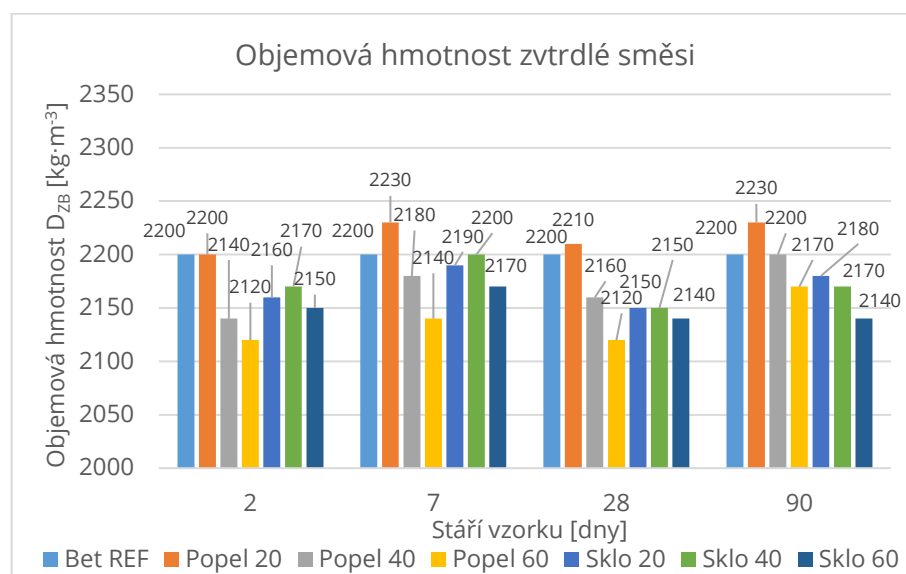
Na grafu vykresleném na obrázku č. 37 jsou znázorněny objemové hmotnosti hmot u kterých bylo substituováno pojiva i plnivo.



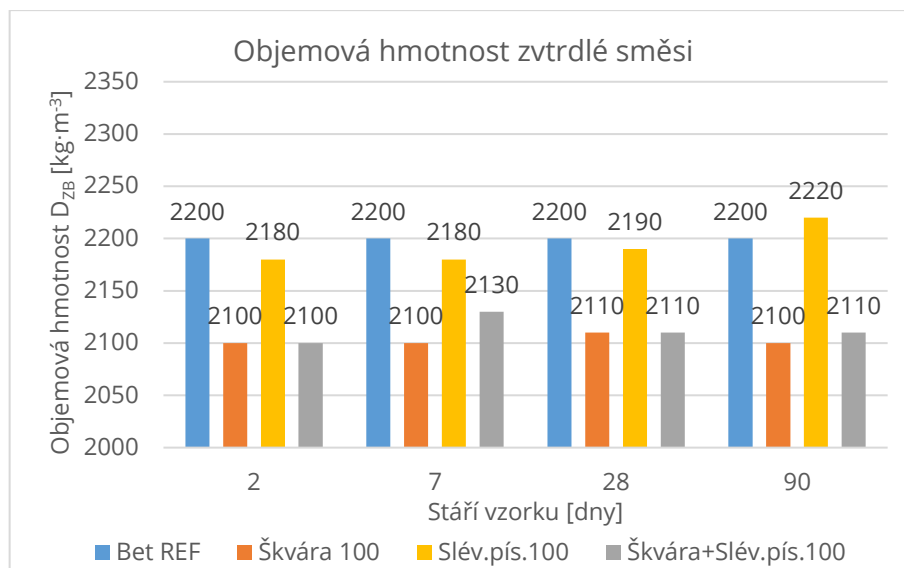
Obr. 37 Objemová hmotnost čerstvých hmot se substitucí pojiva i plniva v hodnotách uvedených na obrázku

Z grafu je patrné, že všechny hmoty, ať už v nich bylo substituováno pojivo vysokoteplotním popínkem, či odpadním jemně mletým sklem dosahují srovnatelných či vyšších objemových hmotností, než je tomu u hmoty referenční. Pouze hmota obsahující škváru, slévárenský písek s vodním sklem a 40% substituci pojiva vysokoteplotním popínkem dosahuje velice nízkých objemových hmotností v porovnání s ostatními hmotami, tyto hodnoty opět korespondují s vyšší dávkou záměsové vody a menší měrnou hmotností popínku.

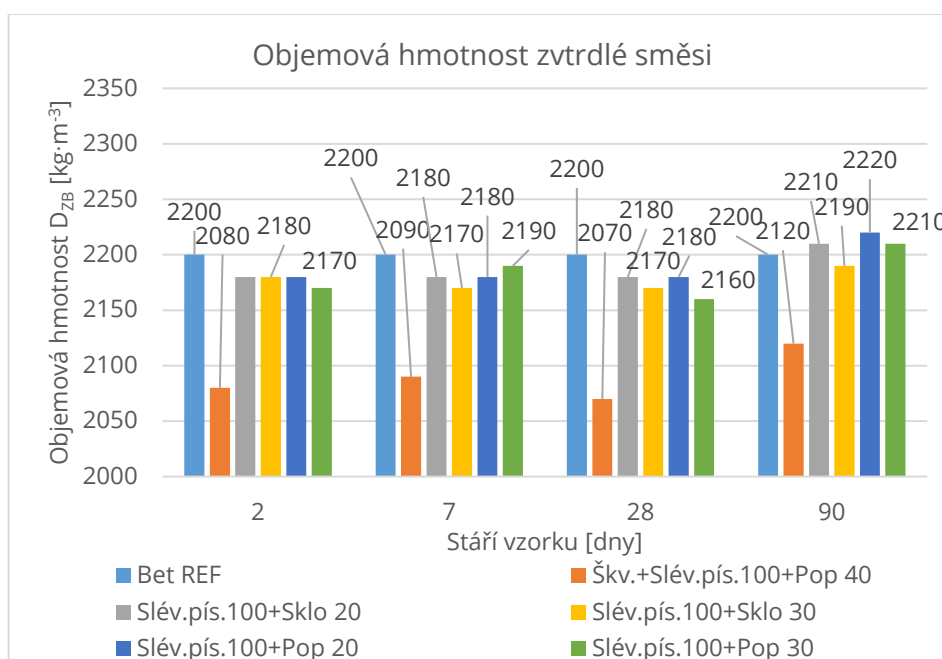
Hodnoty zobrazené na obrázcích č. 38, 39 a 40 vykreslují objemové hmotnosti ztvrdlých hmot se substitucí pojiva, plniva, či kombinace po 2, 7, 28 a 90 dnech zrání.



Obr. 38 Objemová hmotnost ztvrdlých hmot se substitucí pojiva v hodnotách uvedených na obrázku



Obr. 39 Objemová hmotnost ztvrdlých hmot se substitucí plniva v hodnotách uvedených na obrázku



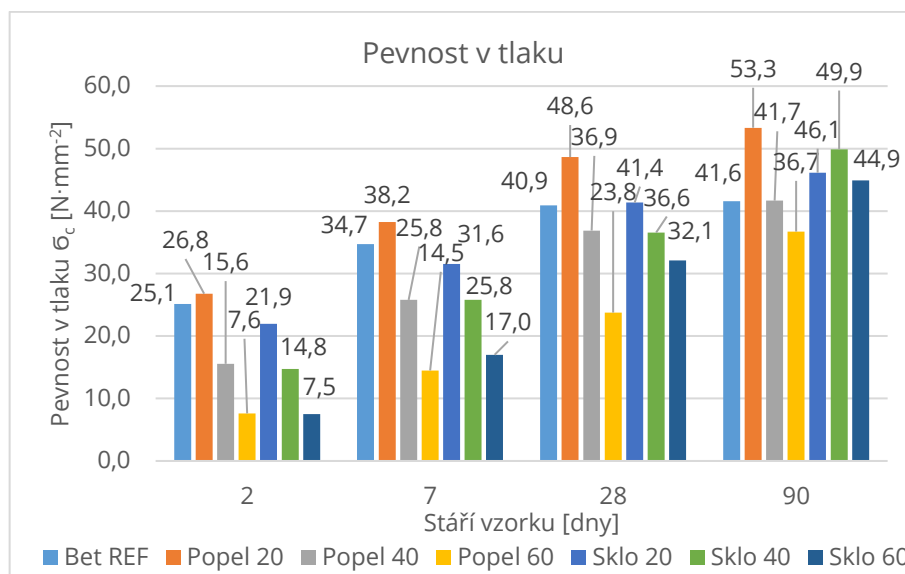
Obr. 40 Objemová hmotnost ztvrdlých hmot se substitucí pojiva i plniva v hodnotách uvedených na obrázku

Objemové hmotnosti všech hmot mají podobný trend jako v případě objemových hmotností v čerstvém stavu.

Vliv substituce pojiv, plniv a jejich kombinace na pevnost v tlaku a v tahu za ohybu

Substituce pojiva druhotnými surovinami měla velký dopad na pevnost v tlaku, jak je patrné na následujícím obrázku č. 41.

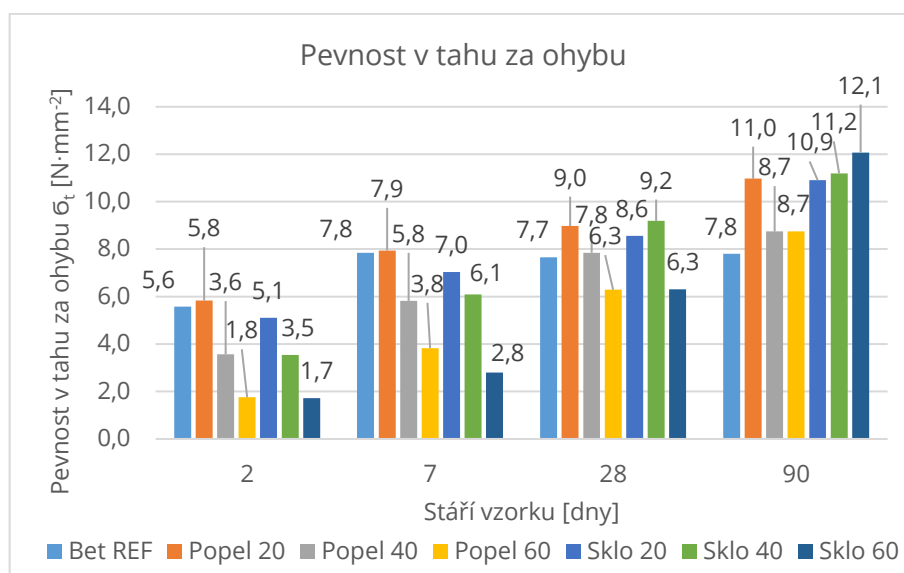
Pevnost v tahu za ohybu koresponduje s pevnostmi v tlaku, viz. obrázek č. 42.



Obr. 41 Pevnost v tlaku ztvrdlých směsí se substitucí pojiva v hodnotách uvedených na obrázku

Obecně se projevilo větší snížení pevností v tlaku při substituci pojiva jemně mletým odpadním sklem než vysokoteplotním popílkem, k této skutečnosti došlo především díky vyšší pucolánové aktivitě vysokoteplotního popílku. Hmoty dle receptury *Popel 20* dosahovala dokonce vyšších pevností již po dvou dnech zrání než receptura referenční. Z grafu na obrázku č. 41 je patrné, že náhradu pojiva z 20 %, 40 % či 60 % vysokoteplotním popílkem doprovází s každým krokem další 20% náhrady také propad pevností v tlaku po 28 dnech o přibližně 25 %. V případě jemně mletého skla je propad s každým krokem přibližně o 11 %. Z grafu je také patrné, že ač receptura s vysokoteplotním popílkem vede v nízkých dávkách v kombinaci s vhodnými přísadami ke zvýšení pevností oproti například jemně mletému sklu, dochází u receptur s vysokoteplotním popílkem k výrazně většímu poklesu pevností s přibývajícím mírou substituce. Tento trend lze pozorovat také u receptur s jemně mletým sklem, ale v podstatně menší míře. Rozdíl pevností v tlaku v případě substituce vysokoteplotním popílkem je mezi 20% a 60% náhradou po 28 dnech

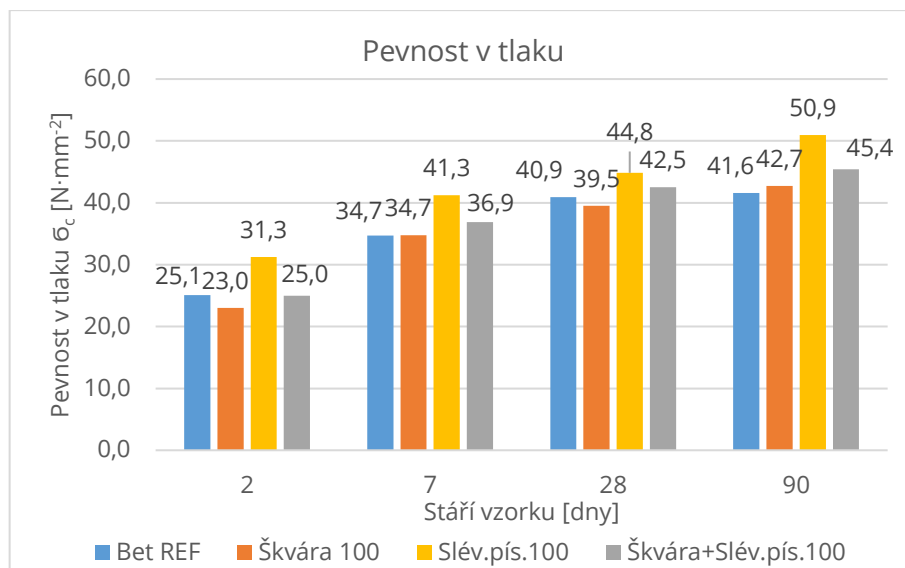
zrání $24,8 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, kdežto v případě jemně mletého skla je ve stejném případě rozdíl pouze $9,3 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, dá se tedy říct, že při nahrazování pojiva jemně mletým sklem je celý systém podstatně robustnější, než v případě substituce pojiva vysokoteplotním popílkem. Při srovnání pevností v tlaku po 28 dnech zrání nabývají vyšších pevností v tlaku receptury *Popel 20* a *Sklo 20*, po 90 dnech zrání nabývají vyšších hodnot všechny receptury, krom receptury *Popel 60*.



Obr. 42 Pevnost v tahu za ohybu ztvrdlých směsí se substitucí pojiva v hodnotách uvedených na obrázku

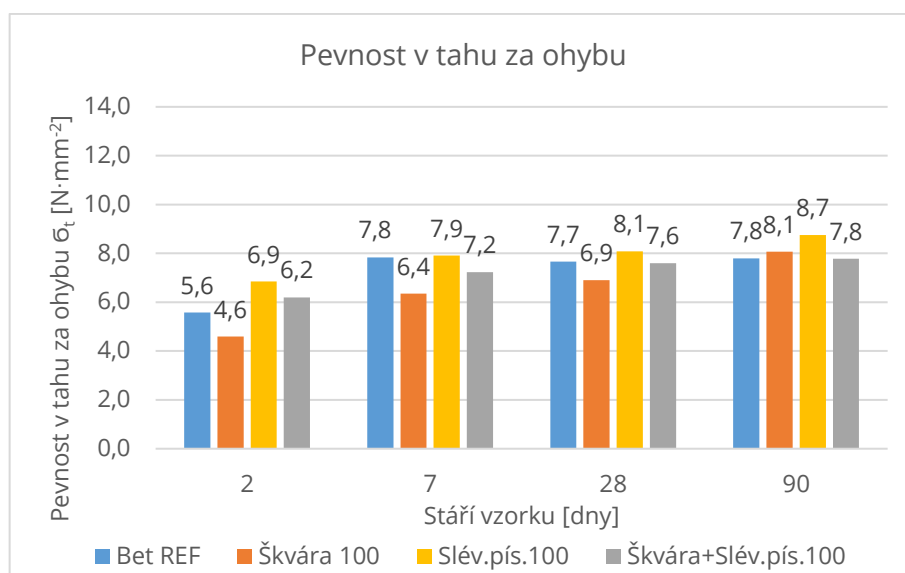
Až na jisté výjimky, kdy například u hmot s jemně mletým sklem dochází k opačnému trendu v případě pevností v tahu za ohybu než u jiných vlastností. V případě receptur *Sklo 20*, *40* a *60* dochází k růstu pevnosti v tahu za ohybu se zvyšující se mírou substituce pojiva. Toto chování je pozorovatelné po 28 a 90 dnech zrání. Hodnoty pevností v tahu za ohybu jsou znázorněny v grafu na obrázku č. 42. Po 28 dnech zrání dosahuje vyšší pevnosti v tahu za ohybu pouze receptura *Sklo 40*.

Pevnosti v tlaku při substituci plniva jsou zobrazeny v grafu na obrázku č. 43 a pevnosti v tahu za ohybu na obrázku č. 40.



Obr. 43 Pevnost v tlaku ztvrdlých směsí se substitucí plniva v hodnotách uvedených na obrázku

Při použití elektrárenské škváry jakožto substitute plniva došlo ke snížení, či zachování pevností v tlaku ve srovnání s hmotou referenční, naopak při využití slévárenského písku došlo k nárůstu pevností v tlaku po 28 dnech o takřka 10 %. V případě využití kombinace těchto plniv došlo k průniku vlastností a hmota dosahuje hodnot pevností v tlaku po 28 dnech srovnatelných, či nepatrně vyšších než v případě hmoty referenční.

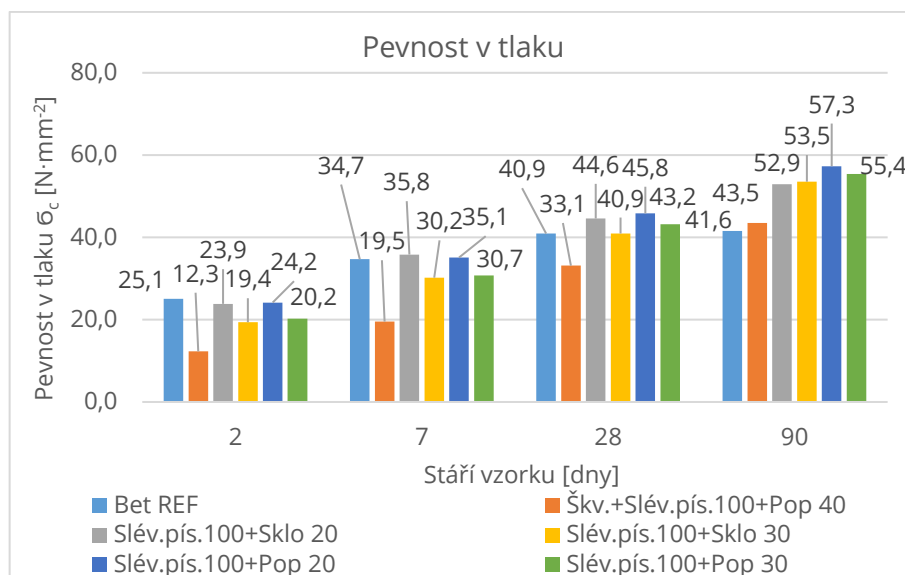


Obr. 44 Pevnost v tahu za ohybu ztvrdlých směsí se substitucí plniva v hodnotách uvedených na obrázku

Pevnosti v tahu za ohybu korespondují s trendem pozorovatelným u pevností v tlaku, pouze u pevností po 90 dnech je rozdíl hodnot utlumen, viz. obr. č. 44.

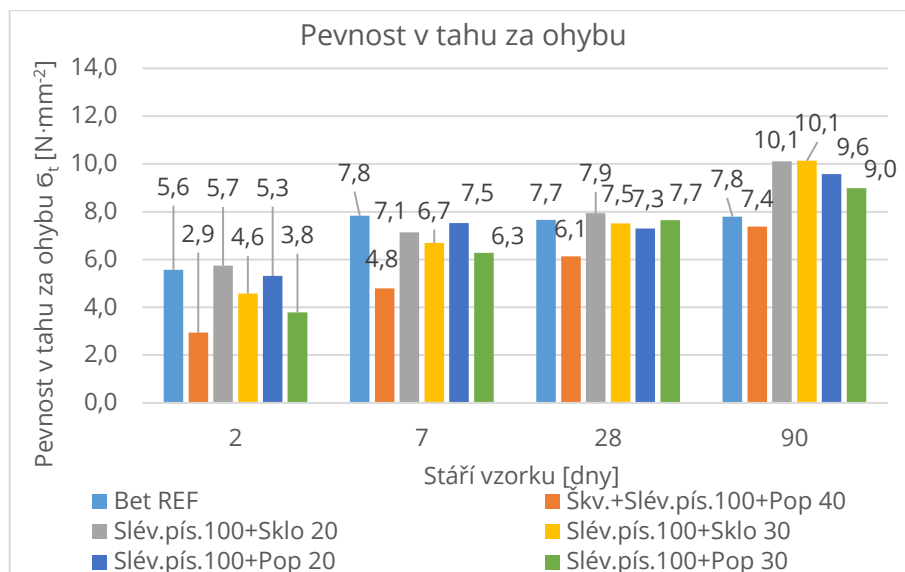
Pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech zrání jsou u receptury *Škvára 100* nižší než u receptury referenční, u zbylých dvou receptur, obsahujících slévárenský písek s vodním sklem, či kombinaci plniv dosahují srovnatelných, či vyšších hodnot.

V grafech na obrázcích č. 45 a č. 46 jsou znázorněny pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu hmot vyrobených dle receptur kombinujících substituci pojiva i plniva.



Obr. 45 Pevnost v tlaku ztvrdlých směsí se substitucí pojiva i plniva v hodnotách uvedených na obrázku

U hmot, které byly vytvořeny kombinací výše uvedených pojiv a plniv se potvrdila správnost návrhu receptur ve II. etapě. Z grafu na obrázku č. 45 lze vyčíst, že po 28 dnech zrání dosahují všechny hmoty vyrobené dle navržených receptur, srovnatelných či vyšších pevností v tlaku než receptura referenční. Obecně kladnějších výsledků dosahovaly hmoty, ve kterých byla provedena substituce pojiva vysokoteplotním popílkem. Po 90 dnech zrání lze pozorovat, že všechny receptury navržené ve II. etapě dosáhly vyšších pevností v tlaku. Receptura obsahující kombinaci obou plniv a 40% substituci pojiva vysokoteplotním popílkem dosáhla výrazně nižších pevností v tlaku, než receptura referenční. Avšak po 90 dnech zrání dosáhla i tato receptura vyšších pevností než receptura referenční. Tento jev s největší pravděpodobností souvisí s pucolánovou aktivitou popílků.

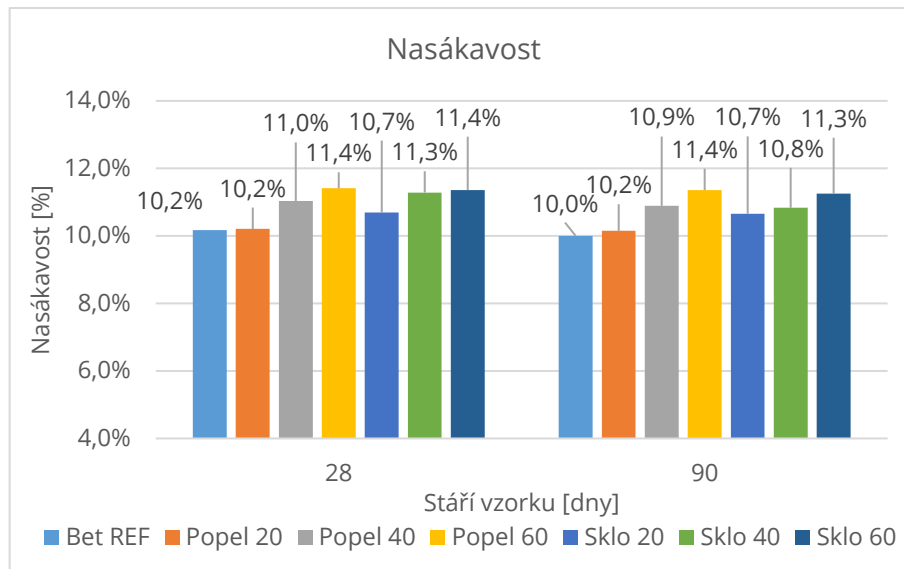


Obr. 46 Pevnost v tahu za ohybu ztvrdlých směsí se substitucí pojiva i plniva v hodnotách uvedených na obrázku

Pevnosti v tahu za ohybu opět korespondují s pevnostmi v tlaku, viz. graf na obrázku č. 46 a po 28 dnech zrání dosáhly všechny zkoumané receptury navržené optimalizací v rámci II. etapy srovnatelných, či vyšších pevností v tahu za ohybu, než receptura referenční. Z grafu opět vyplývá, že po 90 dnech zrání dosahují receptury obsahující jemně mleté obalové sklo vyšších pevností v tahu za ohybu než receptury obsahující elektrárenský popílek. Takovýto trend byl pozorován i u receptur obsahujících pouze jemně mleté sklo, bez kombinace s plnivem.

Vliv substituce pojiv, plniv a jejich kombinace na nasákavost ztvrdlé směsi

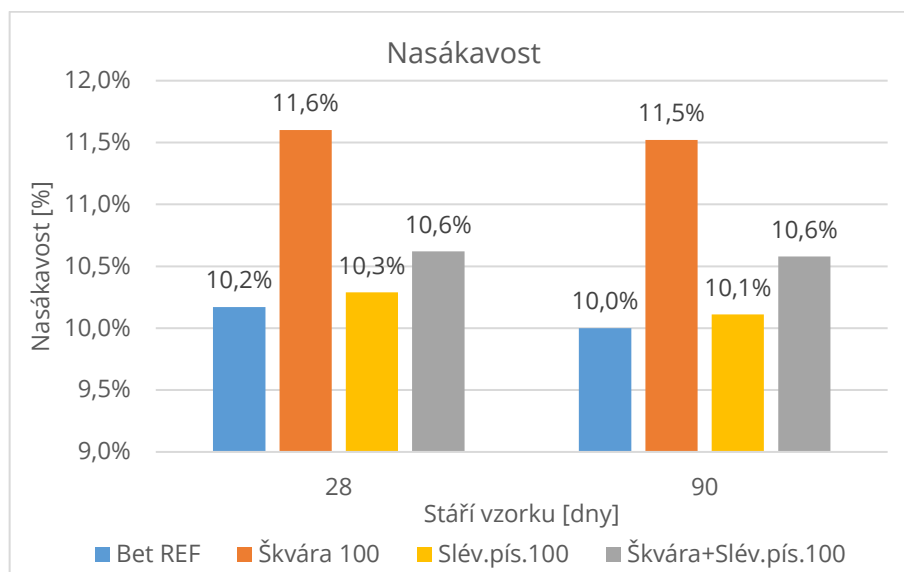
Nasákavosti hmot se substitucí pojivové složky jsou znázorněny v grafu na následujícím obrázku č. 47.



Obr. 47 Nasákavost ztvrdlých směsí se substitucí pojiva v hodnotách uvedených na obrázku

Úprava složení referenční hmoty vedla ve všech případech substituce pojivové složky ke zvýšení nasákavosti ztvrdlé směsi. Obecně lze říci, že substituce pojiva vysokoteplotním popílkem měla menší vliv na zvýšení nasákavosti než substituce pojiva jemně mletým sklem.

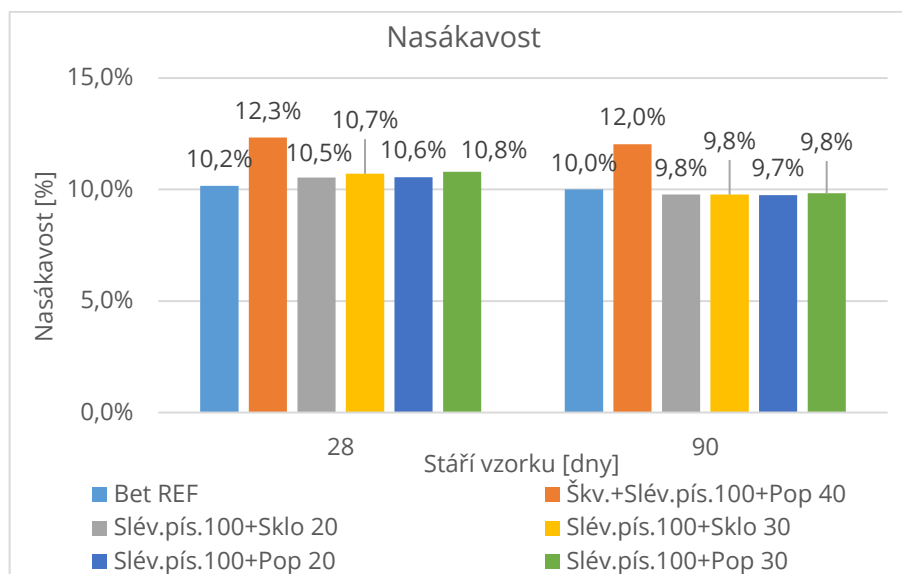
Na následujícím obrázku č. 48 je zobrazena nasákavost hmot se substitucí plniva.



Obr. 48 Nasákavost ztvrdlých směsí se substitucí plniva v hodnotách uvedených na obrázku

Trend nasákavosti v případě substituce plniva kopíruje trendy vlivů na výše uvedené fyzikálně-mechanické vlastnosti, kdy byl největší negativní dopad pozorován u receptury se škvárou, nejspíše především díky vysokému přídavku záměsové vody, naopak receptura obsahující slévárenský písek dosahovala srovnatelných hodnot jako receptura referenční.

Na následujícím obrázku č. 49 je znázorněna nasákavost hmot vyrobených dle optimalizovaných receptur se substitucí pojiva i plniva.



Obr. 49 Nasákavost ztvrdlých směsí se substitucí pojiva i plniva v hodnotách uvedených na obrázku

Z grafu plyne, že po 28 dnech zrání dosahovaly optimalizované receptury srovnatelných, či v menší míře negativnějších nasákavostí. Po 90 dnech zrání však všechny optimalizované receptury obsahující kombinaci plniva a pojiva v míře substituce pojiva 20 % a 30 % dosahují nižších hodnot nasákavostí než hmota referenční.

Vliv substituce pojiv, plniv a jejich kombinace na počátek a dobu tuhnutí čerstvé směsi

U všech zkušebních receptur byl sledován také vliv substitucí pojiva a plniva, případně jejich kombinací na počátky a doby tuhnutí čerstvé směsi. Všechny hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce č. 16.

Tab. 16 Počátky a doby tuhnutí vyrobených směsí

Označení receptury	Počátek tuhnutí [min]	Konec tuhnutí [min]	Doba tuhnutí [min]	Konec tuhnutí vzhledem k <i>Bet REF</i> [min]
Bet REF	110	197	87	0
Sklo 20	102	190	88	-7
Sklo 40	120	187	67	-10
Sklo 60	145	185	40	-12
Popel 20	100	195	95	-2
Popel 40	125	198	73	1
Popel 60	150	205	55	8
Slév.pís.100	107	170	63	-17
Škv. 100	115	163	48	-27
Škv. + Slév.pís.100	106	160	54	-24
Škv. + Slév.pís.100 + Pop 40	95	195	100	-2
Slév.pís.100 + Sklo 20	100	185	85	-12
Slév.pís.100 + Sklo 30	106	195	89	-2
Slév.pís.100 + Pop 20	95	180	85	-17
Slév.pís.100 + Pop 30	105	190	85	-7

V rámci práce byla zaznamenána doba počátku tuhnutí, konce tuhnutí a následně byla dopočítána doba tuhnutí. V tabulce je také uvedeno, jak se změnila s každou substitucí plniva či pojiva doba konce tuhnutí vzhledem k referenční hmotě.

Z tabulky vyplývá, že přidavkem jemně mletého odpadního skla dochází k oddálení počátku tuhnutí, ale k urychlení tvrdnutí celé směsi. Urychlení tvrdnutí se zvětšuje s mírou substituce pojiva.

Naopak přidavek elektrárenského popílku prodlužuje dobu počátku tuhnutí a zároveň oddaluje také konec tuhnutí.

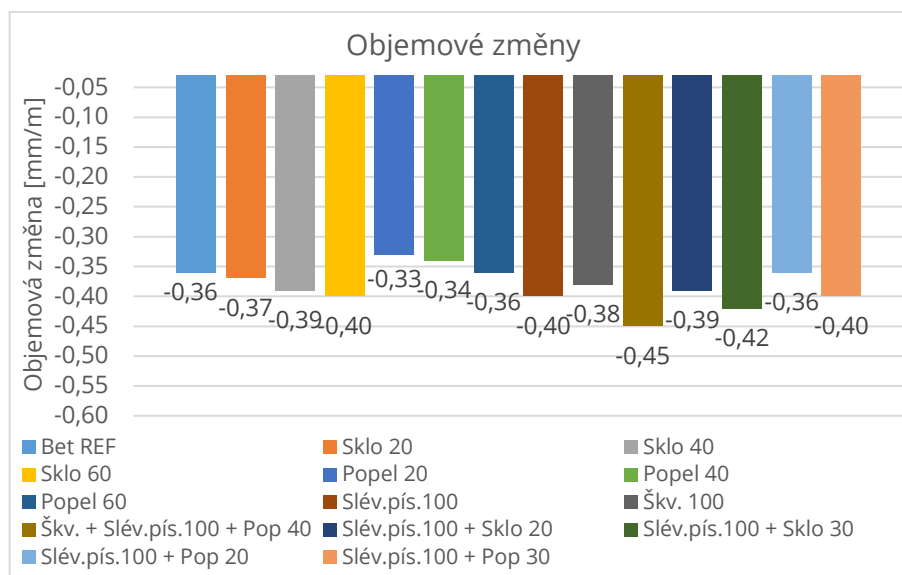
V případě použití odpadního slévárenského písku dochází k urychlení celého hydratačního procesu směsi, tento jev se projevuje na počátku, době a také konci tuhnutí.

Při použití elektrárenské škváry dochází k prodloužení počátku tuhnutí, ale zároveň ke zkrácení doby konce tuhnutí.

U kombinací pojiv a plniv docházelo s vyšší mírou substituce pojiva k prodloužení doby počátku i konce tuhnutí, ve všech případech však došlo v kombinaci se slévárenským pískem ke zkrácení doby tuhnutí.

Vliv substituce pojiv, plniv a jejich kombinace na objemové změny

Na následujícím obrázku č. 50 jsou uvedeny objemové změny zkoušených hmot, které byly stanovovány pomocí kontinuálního hydrostatického vážení.



Obr. 50 Objemové změny vyrobených směsí v hodnotách uvedených na obrázku

Z grafu vyplývá, že přidávkem jemně mletého skla do směsi došlo ke zvětšení smrštění směsi, stejně tomu bylo v případě vysokoteplotního popílku. Se zvětšující se mírou substituce se také úměrně zvětšovalo smrštění. Popílek však v menších dávkách substituce, konkrétně v případě substituce pojiva v množství 20 % a 40 % způsobil zmenšení objemových změn. Při substituci pojiva 60 % popílku došlo k vyrovnání objemových změn s recepturou referenční. Při substituci plniva pískem s vodním sklem došlo ke zvětšení smrštění oproti referenční směsi o 0,04 mm/m, v případě elektrárenské škváry jakožto plniva došlo ke zvětšení smrštění o 0,02 mm/m a při kombinaci těchto plniv došlo k součtu objemových změn na hodnotu 0,06 mm/m. Kombinace substituce pojiva i plniva vedla k součtu pozitivních či negativních vlivů na hmotu. Kombinovaná receptura s jemně mletým sklem dosahovala v případě substituce 20 % jemně mletým sklem hodnoty smrštění o 0,03 mm/m větší, než v případě hmoty referenční. Při substituci 30 % pojiva sklem dosahovala hmota hodnoty smrštění o 0,06 mm/m větší, než receptura *Bet REF*. Když byl použit do kombinované receptury popílek, došlo při míře substituce 20 %

k anulování kladných hodnot smrštění popílku a záporných hodnot slévárenského písku a výsledná hmota dosáhla stejných hodnot smrštění jako receptura *Bet REF*. Receptura s mírou substituce 30 % pojiva popílkem vykazovala o 0,04 mm/m větší smrštění než receptura referenční. Obecně lze říci, že přídavek jemně mletého skla či slévárenského písku má větší negativní vliv na celkové smrštění hmoty než vysokoteplotní popílek.

9.4 Shrnutí druhé části III. etapy

V rámci druhé části III. etapy byl ověřen vliv jednotlivých substitučních pojiv, plniv a jejich kombinací na fyzikálně-mechanické vlastnosti čerstvých i ztvrdlých hmot. Hmoty byly připravovány v této části III. etapy mícháním a byly vytvořeny modifikací receptury, ve které bylo v rámci první části této etapy optimalizováno množství použitých přísad. Cílem této etapy bylo vyrobit dle receptur navržených v rámci II. etapy zkušební vzorky, ověřit jejich vlastnosti a vybrat z těchto hmot dvě zkušební hmoty s příznivým vlivem na fyzikálně-mechanické vlastnosti vzhledem k hmotě vyrobené dle receptury referenční *Bet REF*. V rámci této etapy bylo z každé hmoty vyrobeno několik zkušebních vzorků. Byly vyráběny vzorky pro ověření počátku a doby tuhnutí, dále pro ověření objemových změn a z každé hmoty byly také vyrobeny 4 sady zkušebních vzorků o rozměrech 160x40x40 mm pro ověření objemových hmotností čerstvých a ztvrdlých směsí, pevností v tahu za ohybu, pevností v tlaku a nasákavosti.

V rámci této etapy byl nejprve ověřen vliv jednotlivých substitučních pojiv a plniv, případně jejich kombinací na výše uvedené vlastnosti. Dále byl proveden výběr nejvhodnější kombinace těchto materiálů, z čehož byly vytvořeny receptury kombinující substituci pojiv a plniv. Dle těchto receptur byly vyrobeny další zkušební tělesa, na kterých byly opět ověřeny fyzikálně-mechanické vlastnosti. Z těchto hmot byly vybrány dvě, které vstupují do IV. etapy a jejichž vlastnosti budou dále ověřeny nástřikem metodou suchého stříkání.

Přídavek vysokoteplotního popílku probíhal měrou 20 %, 40 % a 60 % z hmotnosti referenčního pojiva, portlandského cementu. Přídavek většího množství popílku vedl ke snižování zpracovatelnosti a nutnosti přidat záměsovou vodu v množství až 4,2 %. Popílek způsoboval, nejspíše také díky přídavku záměsové vody, snížení objemových hmotností směsí (o 30-70 kg·m⁻³). Naopak měl pozitivní

vliv, díky své pucolánové aktivitě, na dlouhodobé pevnosti v tlaku (při 20% substituci pojiva o $11,7 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, tj. o více než 28 %) i v tahu za ohybu především po 90 dnech zrání. Popílek ve směsi také částečně oddaloval počátek tuhnutí, tento jev se však neprojevil zásadní měrou na konci tuhnutí. Substitucí pojiva popílkem byly také při míře náhrady 20 % a 40 % sníženy objemové změny v počátečních fázích hydratace, byla však také do jisté míry zvýšena nasákavost hmoty.

Substituce pojiva jemně mletým sklem vedla k menšímu snížení objemových hmotností. Míra substituce však na další ovlivňování objemové hmotnosti neměla vliv v čerstvém ani ztvrdlém stavu. Jemně mleté sklo působilo v hmotě pozitivně na dlouhodobé pevnosti v tlaku a výraznou měrou způsobovalo již po 28 dnech zrání zvýšení pevností v tahu za ohybu. Jemně mleté sklo dále způsobovalo urychlení hydratačního procesu, to se projevilo zkrácením doby počátku tuhnutí, ale také konce tuhnutí (o 7-12 minut). S mírou substituce docházelo také ke zvětšení objemových změn a růstu nasákavosti.

Substituce plniva slévárenským pískem s vodním sklem měla pozitivní vliv na většinu zkoumaných fyzikálně-mechanických vlastností. Došlo ke zvýšení objemové hmotnosti v čerstvém stavu. Objemové hmotnosti ve stavu ztvrdlém zůstaly srovnatelné s hmotou referenční. U pevností v tlaku či v tahu za ohybu bylo možno pozorovat nárůst naměřených hodnot. Náhrada plniva slévárenským pískem vedla k urychlení hydratačního procesu a ke zkrácení doby konce tuhnutí (o 17 minut), toto je dáno s největší pravděpodobností díky obsahu vodního skla, které funguje jako urychlovač tuhnutí a tvrdnutí. Slévárenský písek měl také vliv na zvětšení objemových změn o $0,04 \text{ mm/m}$ a nepatrné zvýšení nasákavosti hmoty.

Použití elektrárenské škváry vedlo vzhledem k nutnosti zvýšení dávky záměsové vody k výraznému snížení všech fyzikálně-mechanických vlastností. Došlo ke snížení objemových hmotností v čerstvém i ztvrdlém stavu (o $100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) a ke snížení pevností v tlaku i v tahu za ohybu. Oproti ostatním použitým materiálům vedlo použití škváry ke zvýšení nasákavosti hmoty (o 1,6 %), menšímu zvýšení objemových změn a ke zkrácení doby zpracovatelnosti až o 27 minut. Škvára by sice neměla v žádném případě urychlovat tuhnutí, či tvrdnutí betonu, je však možné, že je tento jev způsoben vyšší nasákavostí škváry, která z čerstvé směsi odjímá záměsovou vodu a dojde dříve k „zatuhnutí“.

V případě kombinace plniv došlo u všech fyzikálně-mechanických vlastností k prolnutí pozitivních i negativních vlastností obou surovin a všechny hodnoty dosahují přibližně poloviny rozdílu hodnot směsí, ve kterých jsou použita jednotlivá plniva odděleně.

Na základě výše uvedeného bylo cílem vytvořit receptury, které by kombinovaly pozitivní vlastnosti všech zkoušených materiálů. Bylo proto vytvořeno pět zkušebních receptur, které kombinují substituci pojiva i plniva druhotnými surovinami. Byla navržena jedna receptura, která kombinuje substituci veškerého plniva slévárenským pískem a škvárou s vysokoteplotním popílkem. Díky negativním vlastnostem této škváry však nebylo s jejím použitím v dalších recepturách uvažováno a byly vytvořeny čtyři receptury obsahující 100% substituci jemného plniva slévárenským pískem s vodním sklem a 20 % a 30 % substituci pojiva vysokoteplotním popílkem a jemně mletým obalovým sklem.

Vlastnosti těchto čtyř receptur byly srovnatelné, či pozitivnější než v případě receptury referenční, viz. obrázky č. 34, 37, 40, 45, 46 a 49. Objemové hmotnosti v čerstvém stavu zůstaly vzhledem k referenční hmotě beze změn, ve stavu ztvrdlém došlo k menšímu poklesu objemových hmotností. Kombinace substituce pojiv a plniv vedla ke zvýšení pevností v tlaku i v tahu za ohybu a již po 28 dnech dosahovaly všechny hmoty srovnatelných, či vyšších hodnot pevností než hmota referenční. S dobou zrání se tento rozdíl dále zvětšoval po 90 dnech zrání hodnoty pevností výrazným způsobem převýšily hodnoty směsi referenční. Ke zvyšování pevností v čase došlo především díky pucolánovým vlastnostem použitých materiálů. Vliv kombinace plniv a pojiv na počátky a doby tuhnutí se projevil v případě receptur s vysokoteplotním popílkem téměř součtem hodnot konce tuhnutí. V případě použití jemně mletého skla došlo k opačnému jevu než v případě použití pouze jemně mletého skla, či pouze slévárenského písku. V případě využití pouze slévárenského písku došlo ke zkrácení času konce tuhnutí o 17 minut a v případě využití pouze jemně mletého skla došlo také ke zkrácení času (o 7-12 minut). Dalo by se tedy předpokládat, že kombinací dojde k součtu těchto hodnot. V případě těchto hmot však došlo ke zkrácení času konce tuhnutí pouze o 12 minut v případě náhrady 20 % pojiva a o 2 minuty v případě náhrady 30 % pojiva. Kombinace substituce pojiva a plniva vedla v případě receptur s vysokoteplotním popílkem k nepatrnému zvětšení objemových změn

(0-0,04 mm/m) a v případě receptur s jemně mletým sklem k o něco vyšším hodnotám smrštění (0,03-0,06 mm/m). Hodnoty nasákavostí těchto čtyř optimalizovaných hmot byly po 28 dnech zrání negativnější než v případě hmoty referenční. Po 90 dnech zrání však již všechny čtyři optimalizované receptury dosáhly nižších hodnot nasákavostí než ta referenční. Je to dáno především pucolánovou aktivitou použitých druhotných surovin

Po vyhodnocení všech poznatků nabytých v rámci II. a III. etapy byly vybrány dvě receptury, které budou následně ověřeny v etapě IV. stříkáním metodou suchého nástřiku odbornou firmou. V rámci IV. etapy budou zkoušeny receptury ve kterých byla provedena substituce jemného plniva slévárenským pískem s vodním sklem a substituce pojiva byla provedena v míře 30 % vysokoteplotním popílkem a jemně mletým obalovým sklem.

10 ETAPA IV. – VÝROBA TĚLES STŘÍKÁNÍM, OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ

Cílem této etapy bylo ověření vybraných optimálních variant nástřikem odbornou firmou. Pro nástřik byly vybrány dvě receptury, které dosahovaly srovnatelných, či pozitivnějších fyzikálně-mechanických vlastností po 28 dnech zrání než hmota referenční, za nejvyšší možné substituce pojiva a plniva. Tyto kritéria splnily hmoty připravené dle dvou receptur, viz. následující tabulka č. 17. Zároveň bylo využito ještě komerční pytlované směsi společnosti Betosan s.r.o. pro nástřik referenční hmoty. Celkově byl tedy v rámci IV. etapy proveden nástřik tří zkušebních hmot.

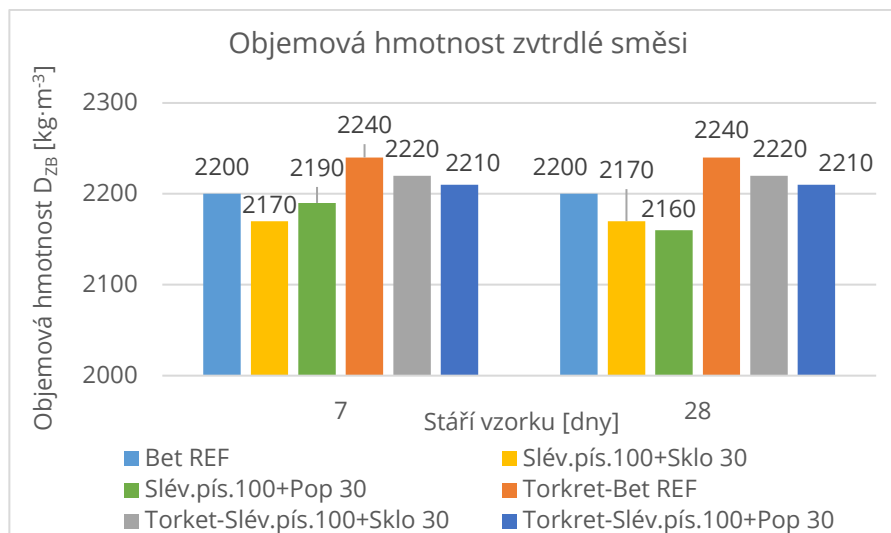
Tab. 17 Receptury využité ve IV. etapě

Označení receptury	Použitá druhotná surovina	Substituce pojiva [%]	Substituce plniva [%]	
			Jemné	Hrubé
V. sklo 100 + Sklo 30	Slévárenský písek + odpadní sklo	30	100	0
V. sklo 100 + Pop 30	Slévárenský písek + popílek	30	100	0

Fyzikálně mechanické vlastnosti stříkaných směsí

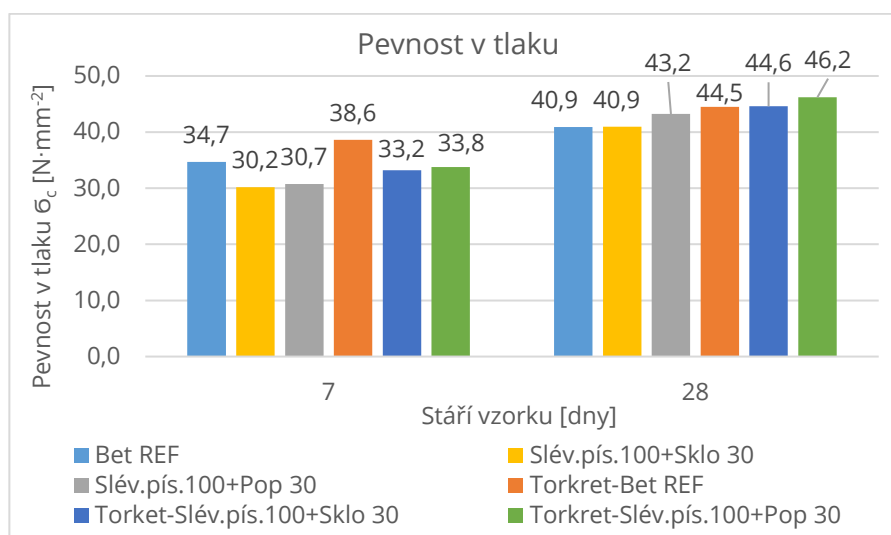
Pro ověření vlivu výroby vzorků pomocí stříkání metodou suchého nástřiku na fyzikálně-mechanické vlastnosti ztvrdlé směsi byla stanovena po 7 a 28 dnech zrání objemová hmotnost ztvrdlé směsi, pevnost v tlaku, nasákavost a průsak tlakovou vodou na vodotlačné stolici.

V následujících grafech na obrázcích č. 51, 52 a 53 jsou hodnoty naměřené u stříkaných směsí znázorněny v kontrastu s hodnotami naměřenými u směsí vyrobených v laboratoři mícháním. Hodnoty u směsí, které byly provedeny stříkáním mají před svým názvem uvedeno *Torkret*.



Obr. 51 Objemová hmotnost ztvrdlé stříkané směsi

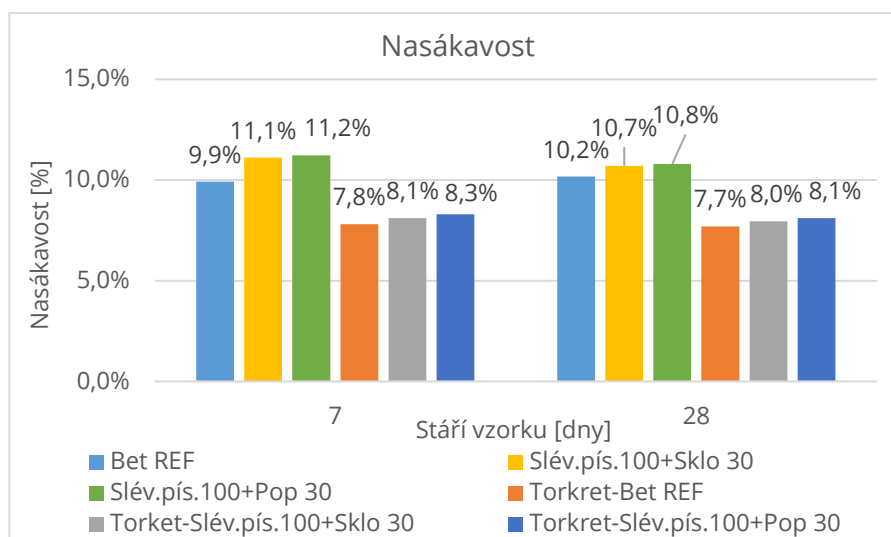
Z výše uvedeného grafu na obr. č. 51 vyplývá, že provedení hmoty stříkáním mělo pozitivní vliv na objemovou hmotnost ztvrdlé směsi ve všech třech případech. Z grafu vyplývá, že trend nižší objemové hmotnosti u receptur obsahujících 30% substituci pojiva byl zachován i v případě výroby vzorků stříkáním.



Obr. 52 Pevnost v tlaku stříkané směsi

V grafu na obr. č. 52 jsou vykresleny hodnoty pevností v tlaku zkoušených hmot po 7 a 28 dnech zrání. U všech hodnot směsí provedených stříkáním lze

pozorovat podobný trend, jaký byl pozorován při výrobě hmot mícháním, pevnosti jsou však v průměru o 8 % vyšší.



Obr. 53 Nasákavost stříkané směsi

V grafu na obr. č. 53 jsou znázorněny hodnoty nasákavostí vzorků vyrobených laboratorně v porovnání se vzorky vyrobenými pomocí stříkání. Z grafu vyplývá, že při nástřiku došlo k výraznému snížení nasákavosti, je to dáno nejspíše vysokou hutností, kterou dodává tlak stříkací pistole. V průměru došlo ke snížení nasákavosti u vzorků provedených stříkáním o 2,7 %, jedná se o snížení nasákavosti vzhledem k hodnotám až o 25 %.

Zkoušení chemické odolnosti

Chemická odolnost byla ověřována pomocí metodiky, kterou zpracovali M. Rovnaníková a M. Vyšvařil. Tato metodika byla publikována v časopise TZB-info v roce 2017 [73]. Pro zkoušení chemické odolnosti bylo využito výřezů o rozměrech 160x40x40 mm, které byly vyrobeny ze zkušebních hmot provedených nástřikem.

V souladu s metodikou byly namíchány a použity následující roztoky: roztok 0,5% kyseliny sírové (H_2SO_4), simulující biogenní síranovou korozi, 5% roztok síranu sodného (Na_2SO_4) a roztok simulující odpadní vodu. Chemické složení roztoku simulující odpadní vodu je uveden v následující tabulce č. 18.

Tab. 18 Chemické složení roztoku simulujícího odpadní vodu [74]

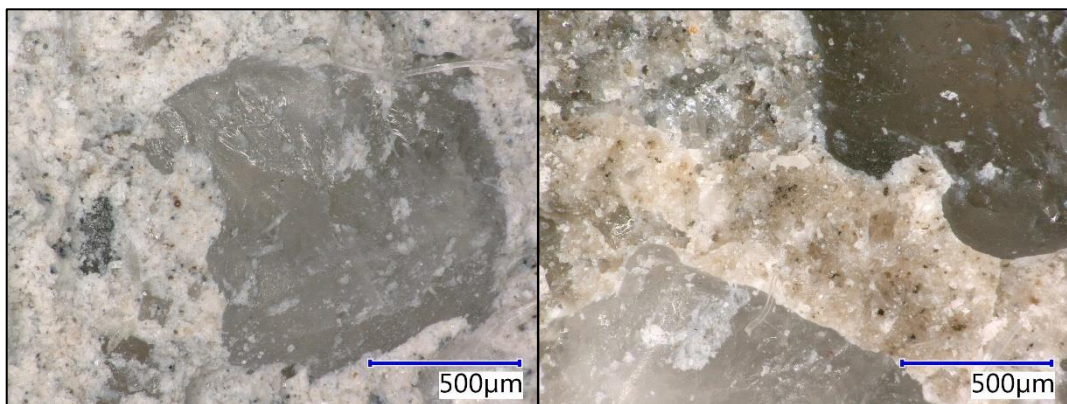
Sloučenina	kasein	$NaHCO_3$	močovina	NaCl	$CaCl_2$	$MgSO_4$
Koncentrace $c[g \cdot l^{-1}]$	1,9	5,3	4,6	1,1	0,53	0,17

Všechny zkušební vzorky budou ponechány v chemickém prostředí po dobu 12 měsíců. Každých sedm dní probíhá u vzorků v souladu s metodikou výměna korozních roztoků. Po skončení této zkušební doby budou na vzorcích stanoveny zbytkové pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu, dále bude stanoven obsah síranů v hmotě, bude provedeno snímkování elektronovým rastrovacím mikroskopem a provedeno srovnání pórovitosti před a po zkoušce.

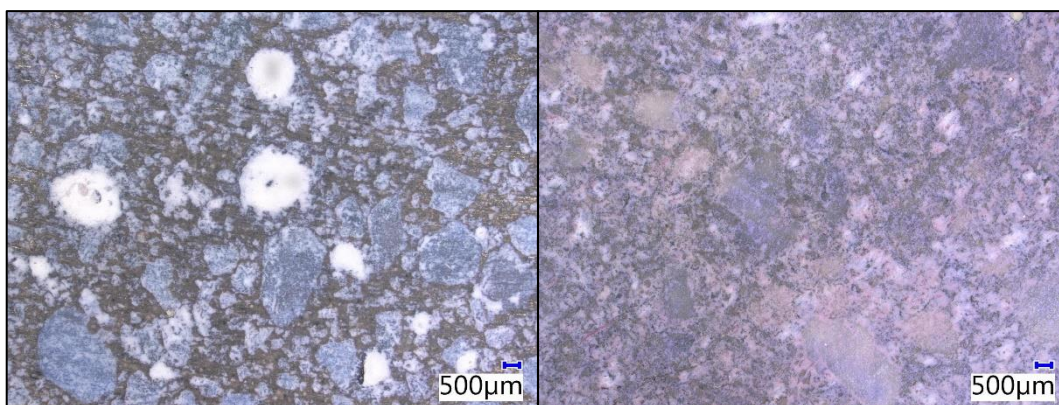
Po ukončení zkoušek bude provedeno vyhodnocení výsledků a v rámci aktuálně probíhajícího projektu bude proveden výběr hmoty s nejpříznivějšími vlastnostmi.

Studium vlivu provádění vzorků na strukturu cementového kompozitu pomocí optického mikroskopu

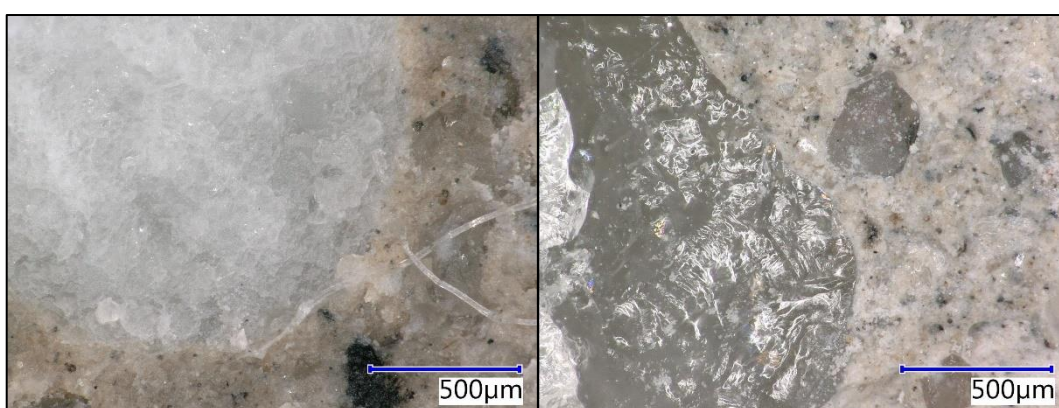
Pro srovnání vlivu nástřiku vzorků vzhledem k jejich přípravě v laboratoři mícháním bylo využito optického mikroskopu. Na následujících fotografiích (obr. č. 54, 56 a 57) lze pozorovat srovnání tranzitních zón kameniva pořízených na lomech vzorků po provedení zkoušky pevnosti v tlaku. Na fotografiích (obr. č. 55, 57 a 59) je zobrazeno porovnání pórové struktury na výřezech zkušebních vzorků.



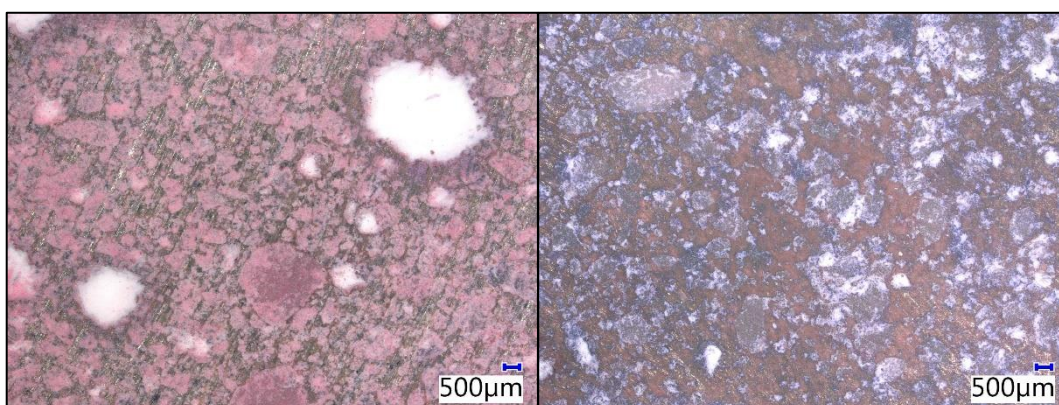
Obr. 54 Snímek lomu referenčního vzorku připraveného laboratorně mícháním (vlevo) a vzorku připraveného nástřikem (vpravo) při dvěstěšásobném zvětšení



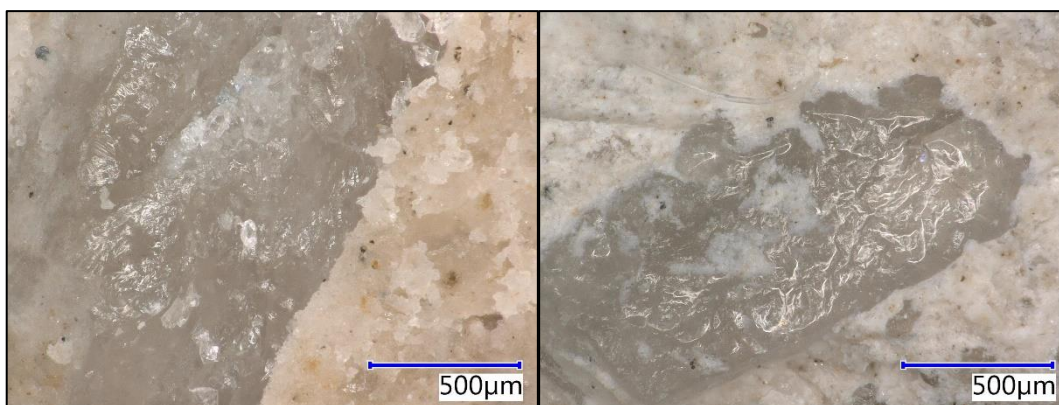
Obr. 55 Snímek lomu referenčního vzorku připraveného laboratorně mícháním (vlevo) a vzorku připraveného nástřikem (vpravo) při dacetinásobném zvětšení



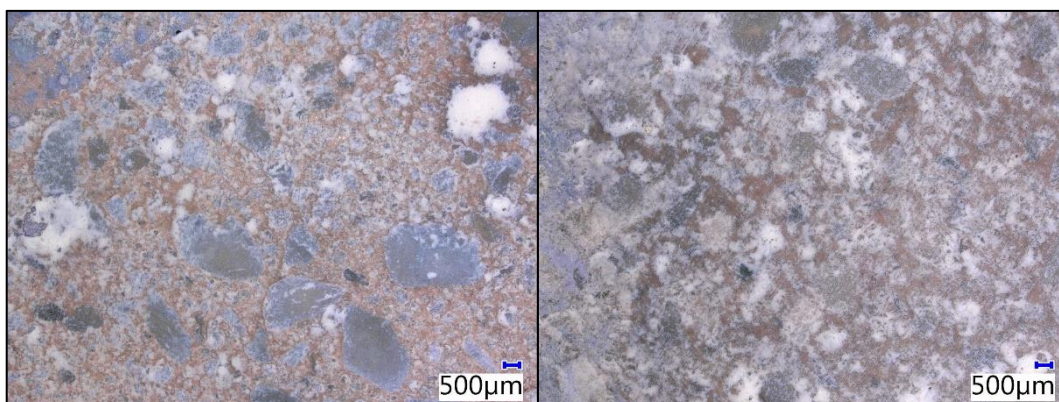
Obr. 56 Snímek lomu vzorku obsahujícího slévárenský písek a vysokoteplotní popílek připraveného laboratorně mícháním (vlevo) a vzorku připraveného nástřikem (vpravo) při dvěstěnásobném zvětšení



Obr. 57 Snímek lomu vzorku obsahujícího slévárenský písek a vysokoteplotní popílek připraveného laboratorně mícháním (vlevo) a vzorku připraveného nástřikem (vpravo) při dvacetinásobném zvětšení



Obr. 58 Snímek lomu vzorku obsahujícího slévárenský písek a jemně mleté obalové sklo připraveného laboratorně mícháním (vlevo) a vzorku připraveného nástřikem (vpravo) při dvěstěásobném zvětšení



Obr. 59 Snímek lomu vzorku obsahujícího slévárenský písek a jemně mleté obalové sklo připraveného laboratorně mícháním (vlevo) a vzorku připraveného nástřikem (vpravo) při dvacetinásobném zvětšení

U vzorků nelze z fotografií jasně prokázat výraznější vliv způsobu jejich provádění na strukturu v oblasti tranzitní zóny kameniva. Na snímcích všech vzorků lze pozorovat dokonale obalená zrna kameniva cementovou maticí bez viditelných trhlin či jiných nedokonalostí. Ze snímků však plyne velmi pozitivní vliv provedení nástřiku na pórovou strukturu vzorků. Tento vliv je jasně patrný na výše uvedených snímcích (č. 55, 57 a 59) kdy byl povrch řezů vzorků opatřen nátěrem inkoustem a póry byly zaplněny oxidem zinečnatým pro větší kontrast. Na snímcích lze pozorovat, že při výrobě vzorků laboratorně pomocí míchání došlo ke vzniku většího množství velkých pórů. Při provedení nástřikem došlo ke zmenšení množství vzniklých pórů a ke snížení jejich počtu. Tato skutečnost se také velmi pozitivně projevila na nasákavosti těchto vzorků.

Stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou

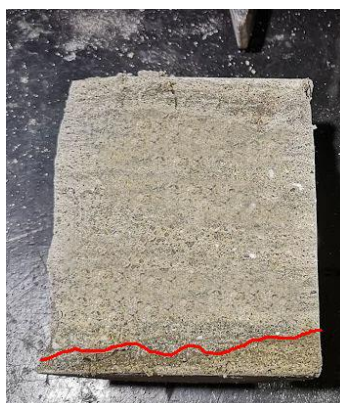
Pro ověření předpokladu chemické odolnosti bylo provedeno stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou v souladu s ČSN EN 12390-8. Na následujících fotografiích (obr. č. 60, 61 a 62) jsou zobrazeny vzorky po provedení zkoušky včetně zaznačení hloubky průsaku tlakové vody.



Obr. 60 Vzorek vývrtu z referenční hmoty po zkoušce stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou



Obr. 61 Vzorek vývrtu z hmoty obsahující slévárenský písek a jemně mleté obalové sklo po zkoušce stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou



Obr. 62 Vzorek vývrtu z hmoty obsahující slévárenský písek a vysokoteplotní popílek po zkoušce stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou

Hloubka průsaku u vzorků referenčních (obr. č. 60) dosáhla hodnoty 12 mm. V případě vzorků vyrobených dle receptury obsahující slévárenský písek a jemně mleté sklo (obr. č. 61) dosáhla hloubka průsaku hodnoty 19 mm a v případě hmoty vyrobené dle receptury obsahující slévárenský písek a vysokoteplotní popílek dosáhla hloubka průsaku po 72 hodinách hodnoty 18 mm.

Zkouška byla stanovována po 28 dnech zrání. Vzhledem k pucolánovým vlastnostem druhotných surovin lze předpokládat, že se bude hodnota hloubky průsaku tlakovou vodou s delší dobou zrání vzorku snižovat.

U všech vzorků bylo splněno kritérium předepsané dle normy ČSN EN 206+A1 z níž vyplývá, že maximální hloubka průsaku (hodnota penetrace) musí činit pro vodotěsný stříkaný beton 50 mm.

SHRNUTÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ

V rámci experimentální části této práce byl stanovován a ověřován vliv množství použitých přísad (především přísad podporujících druhotnou krystalizaci) na vlastnosti čerstvé a ztvrdlé jemnozrné směsi. Dále byl také ověřován vliv substituce části pojiva, části plniva a také jejich kombinací na tyto vlastnosti.

V první etapě byl proveden průzkum druhotných surovin vhodných pro navrhovanou hmotu vzhledem k expozičnímu prostředí, kterému má hmota během své životnosti odolávat. S využitím poznatků z teoretické části, chemického složení a granulometrie vzešlo z této etapy několik surovin, které byly v rámci práce dále využívány.

V rámci druhé etapy bylo provedeno zúžení výběru druhotných surovin, u nichž byla následně v rámci této etapy provedena úprava mletím či drcením. Dále byla v této etapě provedena optimalizace křivek kameniva s cílem dosáhnout co nejpodobnějších křivek zrnitosti jako v případě kameniva referenčního.

Třetí etapa byla rozdělena do dvou částí. V první části byly navrženy 4 receptury, jejichž složení vycházelo z receptury referenční a obsahovaly různé množství použitých přísad. Změna byla provedena především přidavkem přísad podporujících druhotnou krystalizaci v různém množství. Změna množství přísad neměla zásadní vliv na objemové hmotnosti směsi v čerstvém ani ztvrdlém stavu, projevila se však významně na fyzikálně-mechanických vlastnostech hmoty jako takové, především na pevnostech v tlaku a v tahu za ohybu. Nárůsty pevností byly pozorovány již po dvou dnech zrání a tento trend se projevil také u pevností po 28 dnech zrání. U receptury Bet 2 došlo k nárůstu pevnosti v tlaku po 28 dnech o $11 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, což odpovídá nárůstu o téměř 27 %. Množství přísad mělo také za následek snížení nasákavosti hmoty o 0,8 % po 28 dnech zrání.

V druhé části třetí etapy bylo využito výše uvedené receptury Bet 2 u níž byla následně nahrazována část pojiva v míře 20, 40 a 60 % a plniva v míře 100 %. Jakožto substituce pojiva bylo použito vysokoteplotního popílku Tušimice a jemně mletého odpadního obalového skla. Měrný povrch obou surovin byl upraven na hodnotu přibližně $400 \text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$.

Substituce cementu vysokoteplotním popílkem měla v menší míře negativní vliv na konzistenci čerstvé směsi, kdy bylo nutno zvýšit o 3-4 % množství záměsové vody pro udržení zpracovatelnosti. Se zvyšující se mírou substituce doházelo k postupně se snižující objemové hmotnosti čerstvé i ztvrdlé směsi. V případě

objemových hmotností po delších dobách zrání, především po 90 dnech se začaly projevovat pucolánové vlastnosti, kdy došlo k vyrovnání, či převýšení hodnot objemových hmotností směsi referenční. Vysokoteplotní popílek působil negativně na krátkodobé pevnosti v tlaku. Po 2, 7 a 28 dnech zrání dosahovala vyšších hodnot pevností v tlaku pouze receptura obsahující 20 % substituce cementu popílkem, ale po 90 dnech zrání se již projevíly pucolánové vlastnosti. Zároveň došlo k vyrovnání, či zvýšení hodnot pevnosti v tlaku ve srovnání s hmotou referenční také u receptury obsahující 40% substituci cementu. Nasákavost byla pozorována srovnatelná s referenční hmotou v případě substituce cementu 20 % popílkem, se zvyšující se měrou substituce docházelo ke zvýšení nasákavosti. Toto chování bylo nejspíše způsobeno nutností přídavku záměsové vody. Vysokoteplotní popílek neovlivňoval zásadně dobu tuhnutí směsi. Měl však nepříznivý vliv na objemové změny směsi, kdy došlo ke zvětšení hodnot smrštění. S vyšší měrou substituce cementu popílkem docházelo také k větším objemovým změnám.

Substituce cementu jemně mletým obalovým sklem vedla ke snížení objemových hmotností čerstvé i ztvrdlé směsi, neprojevoval se však vliv míry substituce. Obalové sklo působilo negativně na počáteční pevnosti ztvrdlé směsi a po 28 dnech zrání dosahovala srovnatelných, či vyšších hodnot pevností v tlaku pouze směs vyrobená dle receptury obsahující 20% míru substituce. Po 90 dnech zrání se však projevíly pucolánové vlastnosti této suroviny a již všechny receptury dosahovaly vyšších pevností než receptura referenční. V případě pevností v tahu za ohybu dokonce působilo sklo po 90 dnech zrání velmi pozitivně a docházelo zde s vyšší měrou substituce k dalšímu zvyšování pevností. Náhrada cementu obalovým sklem vedla dále ke zvýšení nasákavosti hmoty, ke zkrácení doby tuhnutí a ke snížení objemových změn směsi.

Obecně vedla substituce cementu druhotnými surovinami ke snížení především pevností v tlaku v ranných fázích hydratace, po 28 dnech zrání však již došlo k vyrovnání či převýšení hodnot pevností referenčních. S delší dobou hydratace se u všech substitučních pojiv začaly výraznou měrou projevovat pucolánové vlastnosti a došlo s delšími časovými intervaly zrání k navýšení pevností v tlaku a k postupnému snižování nasákavosti hmot.

Substituce plniva byla prováděna slévárenským pískem pojeným vodním sklem, který nahrazoval jemnou frakci kameniva (0,125-0,5 mm) a elektrárenskou škvárou nahrazující hrubou frakci kameniva (0,5-4 mm). Frakce obou kameniv byla

vytříděna pomocí sady laboratorních sít, případně upravena pomocí čelistového drtiče.

V případě využití slévárenského písku byl pozorován obecně pozitivní vliv na celkové fyzikálně-mechanické vlastnosti. Došlo ke zvýšení objemových hmotností čerstvé a ztvrdlé směsi, dále ke zvýšení pevností v tlaku i v tahu za ohybu a hmota dosahovala srovnatelných nasákavostí. Slévárenský písek měl za následek zkrácení doby tuhnutí o 17 minut a vedl k nepatrnému zvětšení objemových změn.

Substituce plniva elektrárenskou škvárou měla obecně negativní vliv na fyzikálně-mechanické vlastnosti směsi. Pro udržení zpracovatelnosti bylo nutno přidat až 6,5 % záměsově vody, což vedlo ke snížení objemových hmotností čerstvé i ztvrdlé směsi, k negativnímu ovlivnění pevností v tlaku ale i v tahu za ohybu a k výraznému zvýšení nasákavosti směsi. Přídavek škváry měl za následek výrazné zkrácení doby tuhnutí a vedl ke zvýšení objemových změn celé směsi. Pro další zkoušení kombinací plniv a pojiv již nebylo škváry vzhledem k negativním dopadům na fyzikálně-mechanické vlastnosti využito. Byla vytvořena pouze jedna receptura pro ověření vlivu kombinace složek.

Ve druhé části třetí etapy bylo po vyhodnocení výsledků vytvořeno 5 receptur kombinujících substituci pojiv a plniv.

Byla vytvořena jedna receptura obsahující substituci plniva v míře 100 % jemného i hrubého kameniva v kombinaci se 40% substitucí pojiva vysokoteplotním popílkem. Tato receptura dosahovala ve všech sledovaných vlastnostech negativních výsledků.

Dále byly vytvořeny celkem čtyři receptury substituující 100 % jemného kameniva slévárenským pískem. Ve dvou z nich byl zároveň nahrazen cement v míře 20 % a 30 % vysokoteplotním popílkem, a dvě kde byl nahrazen ve stejné míře jemně mletým obalovým sklem. U všech těchto 4 receptur došlo k prolnutí pozitivních a negativních vlastností výše uvedených hodnot. Objemové hmotnosti čerstvých a ztvrdlých směsí dosahovaly stejných, či vyšších hodnot než hmota referenční. U všech receptur došlo ke snížení počátečních pevností v tlaku i v tahu za ohybu, již po 7 dnech zrání však došlo k vyrovnání, či zvýšení těchto hodnot oproti hodnotám hmoty referenční. Po 90 dnech zrání došlo k ještě výraznějším rozdílům a všechny hmoty dosahovaly výrazně lepších hodnot pevností. Receptury dosahovaly po 28 dnech zrání zanedbatelně vyšších nasákavostí a po 90 dnech zrání dosahovaly nižších nasákavostí než hmota referenční. Srovnatelné byly také doby tuhnutí všech

směsí, došlo však k nepatrnému zkrácení těchto dob. V případě objemových změn vedla vyšší míra substituce ke zvětšení objemových změn vzhledem k objemovým změnám hmoty referenční.

Z výše uvedených čtyřech receptur byly vybrány dvě, a to receptura obsahující substituci jemného kameniva v míře 100 % slévárenským pískem v kombinaci s 30% substitucí cementu vysokoteplotním popílkem a druhá, ve které byl popílek nahrazen jemně mletým obalovým sklem. Z těchto hmot byly následně v rámci čtvrté etapy provedeny zkušební vzorky nástřikem metodou suchého stříkání.

Čtvrtá etapa se zabývala ověřením výše uvedených vybraných receptur výrobou vzorků pomocí stříkání. Na vyrobených vzorcích byly provedeny zkušební vývrty a výřezy na kterých byly následně ověřovány fyzikálně mechanické vlastnosti. Výroba vzorků stříkáním měla obecně pozitivní vliv na všechny zkoušené fyzikálně-mechanické vlastnosti. Vzorky vyrobené nástřikem dosahovaly vyšších objemových hmotností než hmoty laboratorně připravené řádově o 40-50 kg·m⁻³. Pevnosti v tlaku byly také vyšší, v průměru o 8 %. Došlo také ke snížení nasákavostí takto připravených hmot, a to v průměru o 2,7 %, což je však vzhledem k původním hodnotám snížení nasákavosti řádově o téměř 25 %. V rámci této etapy bylo také provedeno snímkování optickým mikroskopem lomů vzorků připravených laboratorně mícháním a vzorků připravených nástřikem. Vliv metody provádění vzorků na tranzitní zónu plniva nebyl prokázán. Byl však pozorován velmi pozitivní vliv u vzorků provedených stříkáním na jejich pórovou strukturu, kdy došlo k výraznému snížení velikosti a množství pórů.

V případě zkoušky stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou vyhověly všechny zkoušené vzorky kritériu předepsanému v ČSN EN 206+A1. V normě se uvádí jako kritická hodnota průsaku 50 mm. Všechny vzorky dosáhly hodnot nižších.

Výřezy vyrobené z nástřikaných vzorků byly následně uloženy do roztoků kyselin a roztoku simulujícího odpadní vodu, kde jsou uloženy po dobu 12 měsíců pro stanovení jejich dlouhodobé chemické odolnosti. Roztoky chemikálií jsou měněny každých 7 dní.

ZÁVĚR

Cílem práce byl vývoj a ověření vlastností chemicky odolné stříkané směsi. Experimentálně byl ověřen vliv množství a druhů používaných přísad na fyzikálně-mechanické vlastnosti stříkané směsi se zaměřením na pevnost v tlaku a nasákavost. Dále byla zjištěna možnost substituce části pojiva a plniva druhotnými surovinami. V poslední části diplomové práce bylo provedeno ověření vlastností navržených hmot pomocí reálné aplikace nástřikem a bylo provedeno uložení takto připravených vzorků do směsí kyselin pro stanovení dlouhodobých chemických odolností.

V práci bylo rovněž prokázáno, že vhodnou úpravou množství přísad podporujících druhotnou krystalizaci lze zlepšit fyzikálně-mechanické vlastnosti cementového kompozitu již v raných fázích hydratace. Po 2, 7 a 28 dnech zrání bylo dosaženo zvýšení pevností v tlaku v průměru o 27 %.

V další části této práce bylo jednoznačně experimentálně doloženo, že při úplné substituci plniva slévárenským pískem v kombinaci se 30% substitucí pojiva vysokoteplotním popílkem či jemně mletým obalovým sklem lze zachovat či zvýšit hodnoty fyzikálně-mechanických vlastností celého stříkaného cementového kompozitu. Byl prokázán také pozitivní vliv těchto druhotných surovin na jeho dlouhodobé mechanické vlastnosti. Po 90 dnech zrání bylo dosaženo zvýšení hodnot pevností v tlaku v případě hmoty obsahující vysokoteplotní popílek o 33 % a v případě hmoty obsahující jemně mleté obalové sklo o 29 %.

Při praktických zkouškách bylo zjištěno, že výroba vzorků nástřikem vede, oproti zhotovení vzorků hutněním, ke zvýšení objemových hmotností, pevností v tlaku, k nižší nasákavosti ztvrdlé směsi a ke snížení množství a velikosti pórů ve sktruktuře cementového kompozitu.

Výsledným výstupem této práce jsou dvě receptury pro výrobu stříkané směsi uvedené výše, z nichž bude po stanovení dlouhodobé chemické odolnosti vybrána v navazujícím výzkumu jedna finální receptura. Cíl diplomové práce byl splněn beze zbytku.

Budoucí výzkum může být zaměřen na kombinaci obou substitučních pojiv využitých v rámci této práce a k nalezení vhodné druhotné suroviny, která by mohla plně nahradit aktuálně využívané hrubé plnivo.

11 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KRATOCHVÍL, B., V. ŠVORČÍK a D. VOJTĚCH. Úvod do studia materiálů. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-708-0568-4.
- [2] ŠKVÁRA, F. *Technologie anorganických pojiv I.* Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1995. ISBN 80-708-0224-3.
- [3] ČSN EN 197-1 (72 2101). Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. 2. vyd. 2012.
- [4] BARTA, R. *Chemie a technologie cementu.* Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1961.
- [5] BARKSDALE, Richard D. *The Aggregate handbook.* Washington, D.C. (1415 Elliot Pl., N.W., Washington 20007): National Stone Association, c1991.
- [6] ALEXANDER, Mark G. a Sidney. MINDESS. *Aggregates in concrete.* New York, c2008. ISBN 04-152-5839-1.
- [7] ČSN EN 206+A1 (732403). Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. 2018.
- [8] ČSN EN 934-2 +A1. Příspěvy do betonu, malty a injektážní malty - Část 2: Příspěvy do betonu - Definice, požadavky, shoda, označování a značení štítkem. 2013.
- [9] DRANSFILED, J. *ICE manual of construction materials.* 1. London: Thomas Telford, 2009, s. 091-100. ISBN 0727740482.
- [10] SANTOS, H., M. PALACIOS a S. MARTÍNEZ-RAMÍREZ. Polycarboxylate superplasticiser admixtures: effect on hydration, microstructure and rheological behaviour in cement pastes. *Advances in Cement Research.* 2005, **17**(2), s. 77-89 [cit. 2017-02-27]. DOI: 10.1680/adcr.2005.17.2.77. ISSN 0951-7197.
- [11] BYE, G. EDITED BY PAUL LIVESEY a TECHNICAL EDITING BY LESLIE STRUBLE. *Portland cement.* 3rd ed. London: Institution of Civil Engineers Publishing, 2011. ISBN 07-277-3611-6.
- [12] HOUST, Y. F., P. BOWEN a. SIEBOLD. SOME BASIC ASPECTS OF THE INTERACTION BETWEEN CEMENT AND SUPERPLASTICIZERS. *Challenges of concrete construction: Innovations and Developments In Concrete Materials And Construction.* London: Thomas Telford, 2002, s. 225-234. ISBN 0727739107.

- [13] RAMACHANDRAN, V. S. *Concrete admixtures handbook: properties, science, and technology*. 2nd ed. Park Ridge, N.J., U.S.A.: Noyes Publications, c1995. ISBN 08-155-1373-9.
- [14] TAYLOR, H. F. W. *Cement chemistry*. 2nd ed. London: T. Telford, 1997. ISBN 07-277-2592-0.
- [15] PAZDERKA, Jiří. Vliv krystalizačních příměsí na pevnost betonu v tlaku. *Beton - Technologie, Konstrukce, Sanace*. ISSN 1213-3116, 2010, **2010**(3).
- [16] PAZDERKA, Jiří. Účinnost sanačních postupů založených na krystalizačních materiálech. *Beton - Technologie, Konstrukce, Sanace*. ISSN 1213-3116, 2009.
- [17] PAZDERKA, Jiří a Eva HÁJKOVÁ. The Speed of the Crystalline Admixture's Waterproofing Effect in Concrete. *Key Engineering Materials*. 2016, **722**, 108-112. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.722.108. ISSN 1662-9795. Dostupné také z: <http://www.scientific.net/KEM.722.108>
- [18] KROPÁČEK, Michal a Jiří ŠAFRATA. Vliv sekundární krystalizace na vlastnosti betonu. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. 2015, 15(2), 52-54. ISSN 1213-3116.
- [19] FERRARA, Liberato, Visar KRELANI a Maddalena CARSANA. a "fracture testing" based approach to assess crack healing of concrete with and without crystalline admixtures. *Construction and Building Materials*. 2014, **68**, 535-551. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.008. ISSN 09500618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061814007235>
- [20] EFREM, V a C SERBAN. Optimization of the composition of waterproof concrete using a genetic algorithm. "Ovidius" University Annals Constantza. Series Civil Engineering [online]. Constanta: Ovidius University of Constanta, 2015, 17(17), 83-88. ISSN 15845990
- [21] REPORT OF a CONCRETE SOCIETY WORKING GROUP. *Guidance for the design of steel-fibre-reinforced concrete*. Camberley: Concrete Society, 2007. ISBN 19-044-8232-5.
- [22] MORGAN, D R, N MCASKILL, B W RICHARDSON a R C ZELLERS. a COMPARATIVE EVALUATION OF PLAIN, POLYPROPYLENE FIBER, STEEL

- FIBER, AND WIRE MESH REINFORCED SHOTCRETES. *Transportation Research Record: International symposium on recent developments in concrete fiber composites*. Transportation Research Board, 1989, **1989**(1226), 78-87. ISSN 0361-1981.
- [23] THOMAS, Alun. *Sprayed concrete lined tunnels an introduction*. 1. New York: Taylor & Francis, 2009. ISBN 02-030-2899-6.
- [24] NORRIS, M. S. Setting the ground rules for wet-mix sprayed concrete. *Concrete*. 1999, **1999**(May), 16-20.
- [25] HILAR, Matouš. *Stříkaný beton v podzemním stavitelství*. Praha: Český tunelářský komitét ITA-AITES, 2008. Dokumenty českého tunelářského komitétu ITA-AITES. ISBN 978-802-5412-626.
- [26] PRACOVNÍ SKUPINA ČESKÉHO TUNELÁŘSKÉHO KOMITÉTU PRO STŘÍKANÝ BETON. Zásady pro používání stříkaného betonu. Praha: Český tunelářský komitét ITA/AITES [online], 2003. 32 p. [cit. 2018-12-05] Dostupné z http://www.ita-aites.cz/files/SB_zasady.pdf
- [27] ČSN EN 12390-8 (731302). Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou. 1. 2009.
- [28] ČSN 73 1322 (731322). Stanovení mrazuvzdornosti betonu. 1968.
- [29] XU, Q. *Effect of an alkaline shotcrete accelerator on cement properties*. 6. *Doktorantentagung an der Universitat Brno-Juniorstav. Brno, 04.-05.2.2004 (CD-ROM)*
- [30] ŽIŽKOVÁ, Nikol, Šárka KEPRDOVÁ a Rostislav DROCHYTKA. The Use of Secondary Crystallization in Cement-Based Composites. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2016, **12**(10), 1570-1573.
- [31] BORRALLERAS, P. NON-ALKALINE/ALKALI-FREE ACCELERATORS FOR GUNNED CONCRETE. *Innovations and Developments In Concrete Materials And Construction*. Thomas Telford Publishing, 2002, , 555-571. ISSN 0-7277-3910-7.
- [32] BRE CONSTRUCTION DIVISION. *Concrete in aggressive ground*. 3. ed. Garston, Watford: BRE, 2005. ISBN 18-608-1754-8.
- [33] SKALNY, Jan., J. MARCHAND a Ivan ODLER. *Sulfate attack on concrete*. New York: Spon Press, 2002. 10. ISBN 04-192-4550-2.

- [34] VAN MECHELEN, T a R POLDER. Biogenic sulphuric acid attack on concrete in sewer environments. *Proceedings of the international conference on the implications of groundchemistry and microbiology for construction*. Bristol, UK, 1997, , 511-524.
- [35] ČSN EN 933-1 (721193). Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor. 2012.
- [36] ISO 13320:2009. Particle size analysis - Laser diffraction methods. 2009.
- [37] Laser Diffraction (LD). In: *Malvern Panalytical* [online]. [cit. 2018-12-01]. Dostupné z: <https://www.malvernpanalytical.com/en/products/technology/light-scattering/laser-diffraction>
- [38] DOHNAL, Jiří a Hana BRUSOVÁ. *Moderní přístupy k farmaceutické analýze*. Praha: Farmaceutická fakulta Veterinární a farmaceutické univerzity Brno, 2010. ISBN 978-80-7305-085-6. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:8471aa50-4e1c-11e4-ab76-005056827e51>
- [39] ČSN EN 196-6. Metody zkoušení cementu - Část 6: Stanovení jemnosti mletí. 2010.
- [40] ČSN EN 1015-3. Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku). 2000.
- [41] ČSN EN 196-3. Metody zkoušení cementu - Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti. 2017.
- [42] ČSN EN 12390-5. Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. 2009.
- [43] ČSN EN 12390-4. Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 4: Pevnost v tlaku - Požadavky na zkušební lisy. 2001.
- [44] ČSN EN 12350-6. Zkoušení čerstvého betonu - Část 6: Objemová hmotnost. 2009.
- [45] ČSN EN 12390-7. Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. 2009.
- [46] Shrinkage-Cone. In: *Schleibinger* [online]. [cit. 2018-12-01]. Dostupné z: <http://www.schleibinger.com/cmsimple/en/?Shrinkage:Shrinkage-Cone>

- [47] ČSN EN 196-1. Metody zkoušení cementu - Část 1: Stanovení pevnosti. 2016.
- [48] ČSN EN 14488-1. Zkoušení stříkaného betonu - Část 1: Odběr vzorků čerstvého a ztvrdlého betonu. 2006.
- [49] HÁNKOVÁ, D. *Kanalizační stoky* [online]. s. 1-9 [cit. 2018-12-02]. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/www/hanekpav/K154/PDF/Stokovani.pdf>
- [50] ČESALOVÁ, Marcela. *Skriptum Technologie vody - Stokové sítě* [online]. [cit. 2018-12-02]. Dostupné z: <http://chemikalie.upol.cz/skripta/tv/5.doc>
- [51] *Výstavba kanalizace - Portál Ministerstva zemědělství* [online]. [cit. 2018-12-02]. Dostupné z: http://eagri.cz/public/web/file/36977/_3_vystavba_kanalizace.pdf
- [52] *Spotřeba vody - Pražské vody a kanalizace* [online]. [cit. 2018-12-02]. Dostupné z: <https://www.pvk.cz/vse-o-vode/pitna-voda/spotreba-vody/>
- [53] *Technické standardy pro kanalizační zařízení ve správě TS Hostivice* [online]. [cit. 2018-12-02]. Dostupné z: http://www.ts.hostivice.cz/wp-content/uploads/KANALIZACE_textova_cast.pdf
- [54] *Městské standardy - Pražské vodárny a kanalizace* [online]. [cit. 2018-12-02]. Dostupné z: <http://www.pvs.cz/pro-zakazniky/mestske-standardy/>
- [55] OLMSTED, F. H. a H. HAMLIN. Converting portions of the Los Angeles outfall sewer into a septic tank, *Engineering News*,. 1900, s. 317-318.
- [56] PARKER, C. D. Species of sulphur bacteria Associated with the Corrosion of Concrete. *Nature*. 1947, (159 (4039), 439-440. ISSN 1476-4687.
- [57] HWANG, Yongwoo, Tomonori MATSUO, Keisuke HANAKI a Noriyuki SUZUKI. Identification and quantification of sulfur and nitrogen containing odorous compounds in wastewater. *Water Research*. 1995, **29**(2), 711-718. DOI: 10.1016/0043-1354(94)00145-W. ISSN 00431354.
- [58] *DESIGN MANUAL: ODOR AND CORROSION CONTROL IN SANITARY SEWERAGE SYSTEMS AND TREATMENT PLANTS. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/625/1-85/018 (NTIS PB88184031)*
- [59] LENS, P a L. H. POL. *Environmental Technologies to Treat Sulfur Pollution*. London: IWA Publishing, 2000. ISBN 1900222094.

- [60] YANG, W., J. VOLLERTSEN a T. HVITVED-JACOBSEN. Anoxic sulfide oxidation in wastewater of sewer networks. *Water Science and Technology*. 2005, **52**(3), 191-199. DOI: 10.2166/wst.2005.0076. ISSN 0273-1223.
- [61] NIELSEN, A.H., T. HVITVED-JACOBSEN a J. VOLLERTSEN. Recent findings on sinks for sulfide in gravity sewer networks. *Water Science and Technology*. 2006, **54**(6-7), 127-134. DOI: 10.2166/wst.2006.578. ISSN 0273-1223.
- [62] OKABE, S., M. ODAGIRI, T. ITO a H. SATOH. Succession of Sulfur-Oxidizing Bacteria in the Microbial Community on Corroding Concrete in Sewer Systems. *Applied and Environmental Microbiology*. 2007, **73**(3), 971-980. DOI: 10.1128/AEM.02054-06. ISSN 0099-2240.
- [63] VALIX, Marjorie, Diyana ZAMRI, Hiro MINEYAMA, Wai Hung CHEUNG, Jeffrey SHI a Heri BUSTAMANTE. Microbiologically Induced Corrosion of Concrete and Protective Coatings in Gravity Sewers. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2012, **20**(3), 433-438. DOI: 10.1016/S1004-9541(11)60150-X. ISSN 10049541.
- [64] KELLY, D. P. a A. P. WOOD. Reclassification of some species of Thiobacillus to the newly designated genera Acidithiobacillus gen. nov., Halothiobacillus gen. nov. and Thermithiobacillus gen. nov. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SYSTEMATIC AND EVOLUTIONARY MICROBIOLOGY*. 2000, **50**(2), 511-516. DOI: 10.1099/00207713-50-2-511. ISSN 1466-5026.
- [65] PARANDE, A. K., P. L. RAMSAMY, S. ETHIRAJAN, C. R. K. RAO a N. PALANISAMY. Deterioration of reinforced concrete in sewer environments. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Municipal Engineer*. 2006, **159**(1), 11-20. DOI: 10.1680/muen.2006.159.1.11. ISSN 0965-0903.
- [66] SVOBODA, L. a kol. *Stavební hmoty. 3. vyd. elektronické Praha: Luboš Svoboda, 2013. 950 s. ISBN 978-80-260-4972-2*
- [67] ČSN EN 450-1. Popílek do betonu - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody. 2013.
- [68] 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 DOI: 10.1016/j.resconrec.2007.01.013.

- [69] LEE, H., HANIF, A., USMAN, M., SIM, J., OH, H., *Performance evaluation of concrete incorporating glass powder and glass sludge wastes as supplementary cementing material. Journal of Cleaner Production. 2018, 170, 683-693 DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.09.133.*
- [70] PYTLÍK, P., *Technologie betonu. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1647-5.*
- [71] JANOUŠEK, R. *Formovací směsi ze sléváren* [online]. [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: <https://odpady-online.cz/formovaci-smesi-ze-slevaren/>
- [72] BÍLEK, V. *Možnosti využití odpadních písků z výroby vodního skla ve stavebnictví* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická. 2013.
- [73] VYŠVAŘIL, M.; ROVNANÍKOVÁ, M. *Odolnost jemnozrnných betonů vůči síranové korozi v odpadních systémech. TZB-info, 2017, roč. 2017, č. 9, s. 1-7. ISSN: 1801-4399.*
- [74] M. Pell, H. Ljunggren, *Composition of the bacterial population in sand-filter columns receiving artificial waste-water, evaluated by soft independent modeling of class analogy (SIMCA), Wat. Res. 30 (1996) 2479–2487*

12 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Ettringit 10 min. od zamíchání v běžném cementu bez urychlující přísady a CAH fáze po 10 min. hydratace v cementu s 5 % alkalického urychlovače NaAl(OH) ₄ [29]	24
Obr. 2 Vliv množství alkalického a bez-alkalického urychlovače na počátek a konec tuhnutí cementové pasty [31].....	25
Obr. 3 Vzorek s přídávkem CA uložen ve vodě po 90 dnech od zamíchání (zvětšení 20 000x) [30]	26
Obr. 4 Vzorek s přídávkem CA uložen ve vodě po 180 dnech od zamíchání (zvětšení 20 000x) [30].....	26
Obr. 5 Typy ocelových vláken používaných v betonu [21].....	28
Obr. 6 Schéma mokrého způsobu stříkání [21]	32
Obr. 7 Schéma suchého způsobu stříkání [21].....	33
Obr. 8 Schéma metodiky práce	48
Obr. 9 Schéma II. Etapy	50
Obr. 10 Schéma III. etapy.....	51
Obr. 11 Schéma IV. etapy.....	53
Obr. 12 Bedna pro zkoušení stříkaného betonu.....	57
Obr. 13 Odborný pracovník provádějící nástřik směsi.....	58
Obr. 14 Zkušební forma s provedeným nástřikem zkušební hmoty	59
Obr. 15 Provádění jádrových vývrtů.....	59
Obr. 16 Elektrárenský popílek - Tušimice.....	67
Obr. 17 Jemně mleté obalové sklo – VETROPACK	68
Obr. 18 Kumulační křivka zrnitosti cement, sklo, popílek	68
Obr. 19 Distribuční křivka zrnitosti cement, sklo, popílek	69
Obr. 20 Elektrárenská škvára – Oslavany	70
Obr. 21 Slévárenský písek před úpravou	71
Obr. 22 Slévárenský písek po úpravě drcením.....	71
Obr. 23 Kumulační křivka jemného kameniva	72
Obr. 24 Kumulační křivka hrubého kameniva	73
Obr. 25 Souhrnná křivka zrnitosti kameniv	74
Obr. 26 Vliv množství přísad na konzistenci čerstvé směsi v hodnotách uvedených na obrázku	78
Obr. 27 Vliv množství přísad na objemovou hmotnost čerstvé směsi v hodnotách uvedených na obrázku.....	78
Obr. 28 Vliv množství přísad na objemovou hmotnost ztvrdlé směsi v hodnotách uvedených na obrázku.....	79
Obr. 29 Vliv množství přísad na pevnost v tlaku v hodnotách uvedených na obrázku	80
Obr. 30 Vliv a množství přísad na pevnost v tahu za ohybu v hodnotách uvedených na obrázku	81
Obr. 31 Vliv množství přísad na nasákavost ztvrdlé směsi v hodnotách uvedených na obrázku	81
Obr. 32 Konzistence čerstvých hmot se substitucí pojiva v hodnotách uvedených na obrázku	84

Obr. 33 Konzistence čerstvých hmot se substitucí plniva v hodnotách uvedených na obrázku	85
Obr. 34 Konzistence čerstvých hmot se substitucí pojiva i plniva v hodnotách uvedených na obrázku	85
Obr. 35 Objemová hmotnost čerstvých hmot se substitucí pojiva v hodnotách uvedených na obrázku	86
Obr. 36 Objemová hmotnost čerstvých hmot se substitucí plniva v hodnotách uvedených na obrázku	87
Obr. 37 Objemová hmotnost čerstvých hmot se substitucí pojiva i plniva v hodnotách uvedených na obrázku.....	87
Obr. 38 Objemová hmotnost ztvrdlých hmot se substitucí pojiva v hodnotách uvedených na obrázku	88
Obr. 39 Objemová hmotnost ztvrdlých hmot se substitucí plniva v hodnotách uvedených na obrázku	89
Obr. 40 Objemová hmotnost ztvrdlých hmot se substitucí pojiva i plniva v hodnotách uvedených na obrázku.....	89
Obr. 41 Pevnost v tlaku ztvrdlých směsí se substitucí pojiva v hodnotách uvedených na obrázku	90
Obr. 42 Pevnost v tahu za ohybu ztvrdlých směsí se substitucí pojiva v hodnotách uvedených na obrázku	91
Obr. 43 Pevnost v tlaku ztvrdlých směsí se substitucí plniva v hodnotách uvedených na obrázku	92
Obr. 44 Pevnost v tahu za ohybu ztvrdlých směsí se substitucí plniva v hodnotách uvedených na obrázku.....	92
Obr. 45 Pevnost v tlaku ztvrdlých směsí se substitucí pojiva i plniva v hodnotách uvedených na obrázku.....	93
Obr. 46 Pevnost v tahu za ohybu ztvrdlých směsí se substitucí pojiva i plniva v hodnotách uvedených na obrázku.....	94
Obr. 47 Nasákavost ztvrdlých směsí se substitucí pojiva v hodnotách uvedených na obrázku	95
Obr. 48 Nasákavost ztvrdlých směsí se substitucí plniva v hodnotách uvedených na obrázku	95
Obr. 49 Nasákavost ztvrdlých směsí se substitucí pojiva i plniva v hodnotách uvedených na obrázku.....	96
Obr. 50 Objemové změny vyrobených směsí v hodnotách uvedených na obrázku	98
Obr. 51 Objemová hmotnost ztvrdlé stříkané směsi	103
Obr. 52 Pevnost v tlaku stříkané směsi	103
Obr. 53 Nasákavost stříkané směsi.....	104
Obr. 54 Snímek lomu referenčního vzorku připraveného laboratorně mícháním (vlevo) a vzorku připraveného nástřikem (vpravo) při dvěstěásobném zvětšení	105
Obr. 55 Snímek lomu referenčního vzorku připraveného laboratorně mícháním (vlevo) a vzorku připraveného nástřikem (vpravo) při dacetinásobném zvětšení .	106
Obr. 56 Snímek lomu vzorku obsahujícího slévárenský písek a vysokoteplotní popílek připraveného laboratorně mícháním (vlevo) a vzorku připraveného nástřikem (vpravo) při dvěstěásobném zvětšení.....	106

Obr. 57 Snímek lomu vzorku obsahujícího slévárenský písek a vysokoteplotní popílek připraveného laboratorně mícháním (vlevo) a vzorku připraveného nástřikem (vpravo) při dvacetinásobném zvětšení.....	106
Obr. 58 Snímek lomu vzorku obsahujícího slévárenský písek a jemně mleté obalové sklo připraveného laboratorně mícháním (vlevo) a vzorku připraveného nástřikem (vpravo) při dvěstě násobném zvětšení.....	107
Obr. 59 Snímek lomu vzorku obsahujícího slévárenský písek a jemně mleté obalové sklo připraveného laboratorně mícháním (vlevo) a vzorku připraveného nástřikem (vpravo) při dvacetinásobném zvětšení.....	107
Obr. 60 Vzorek vývrtnu z referenční hmoty po zkoušce stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou.....	108
Obr. 61 Vzorek vývrtnu z hmoty obsahující slévárenský písek a jemně mleté obalové sklo po zkoušce stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou.....	108
Obr. 62 Vzorek vývrtnu z hmoty obsahující slévárenský písek a vysokoteplotní popílek po zkoušce stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou.....	108

13 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Metody zkoušení pevnosti v tlaku mladého stříkaného betonu dle ČSN EN 14488 – 2 [26]	33
Tab. 2 Minimální požadavky na přilnavost dle ČTuK [26]	35
Tab. 3 Výčet dostupných druhotných surovin	63
Tab. 4 Chemické složení vybraných druhotných surovin	63
Tab. 5 Složení referenční receptury suché směsi dodané výrobcem	65
Tab. 6 Zrnitost jednotlivých substitučních pojiv	66
Tab. 7 Chemické složení popílku Tušimice	66
Tab. 8 Fyzikální charakteristiky popílku Tušimice	67
Tab. 9 Chemické složení odpadního skla VETROPACK	67
Tab. 10 Fyzikální charakteristiky odpadního skla VETROPACK	67
Tab. 11 Chemické složení škváry ze složiště Oslavany	69
Tab. 12 Fyzikální charakteristiky škváry ze složiště Oslavany	69
Tab. 13 Chemické složení slévárenského písku s vodním sklem	70
Tab. 14 Fyzikální charakteristiky slévárenského písku s vodním sklem	71
Tab. 15 Seznam použitých receptur, označení a míra substituce pojiv a plniv	76
Tab. 16 Počátky a doby tuhnutí vyrobených směsí	97
Tab. 17 Receptury využití ve IV. etapě	102
Tab. 18 Chemické složení roztoku simulujícího odpadní vodu [74]	104