



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 NOVÝCH INJEKTÁŽNÍCH HMOT PRO
RUBOVOU INJEKTÁŽ KANALIZACÍ**

DEVELOPMENT OF NEW GROUTING MATERIALS FOR REVERSE GROUTING OF SEWERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Dolák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. ROSTISLAV DROCHYTKA, CSc.,
MBA, dr.h.c.

BRNO 2021



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. Martin Dolák
Název	Vývoj nových injektážních hmot pro rubovou injektáž kanalizací
Vedoucí práce	prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr.h.c.
Datum zadání	31. 3. 2020
Datum odevzdání	15. 1. 2021

V Brně dne 31. 3. 2020

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr.h.c.
Vedoucí ústavu

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

PODKLADY A LITERATURA

- P. Pytlík. Concrete technology. Ed. 2. Brno: VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1647-5.
- Zakládání: Zakládání staveb [online]. Praha: Zakládání staveb, 2016, XXVIII (3). ISSN 1212-1711.
- PIERRE-CLAUDE, Aitcin. Binders for durable and sustainable concrete. Velká Británie: Taylor and Francis, 2008.
- AITCIN, Pierre-Claude a český překlad Vlastimil Bílek, Josef Krátký, Ivan Smolík. Vysokohodnotný beton. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2005. ISBN 80-867-6939-9.
- SHA, Fei, Shucaí LI a Rentai LIU. Experimental study on performance of cement-based grouts admixed with fly ash, bentonite, superplasticizer and water glass.
- DIN 19573. Mortars for construction and rehabilitation of drains and sewers outside buildings. 2016.
- Výzkumné zprávy a protokoly ústavu THD, příspěvky ze sborníků konferencí, odborné články, časopisy, normy.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Rubová injektáž kanalizací představuje jednu z možností sanace tohoto typu konstrukcí. Použitím injektážní hmoty je možné zabránit nežádaným průsakům spodní vody do kanalizační sítě a zároveň případným průsakům odpadní vody do vnějšího prostředí. Cílem práce je navrhnout vysoce odolnou injektážní hmotu pro rubovou injektáž kanalizací s využitím druhotných surovin.

1. Z dostupných informačních zdrojů zpracujte rešerši poznatků, týkajících se problematiky kanalizačních stok a technologie rubové injektáže.
2. Na základě studia odborné literatury a normových postupů sestavte teoretické podklady pro hodnocení odolnosti hmot pro rubovou injektáž.
3. Sestavte soubor potenciálně vhodných druhotných surovin a posudte jejich využitelnost v injektážních materiálech.
4. Sestavte metodiku postupu experimentálního vývoje hmoty pro rubovou injektáž.
5. Vyberte a charakterizujte vhodné primární a druhotné suroviny pro experimentální činnost.
6. Navrhněte a experimentálně ověřte základní surovinové varianty injektážních směsí. Vyberte vhodnou směs pro ověření využitelnosti druhotných surovin.
7. Navrhněte a experimentálně ověřte surovinové varianty injektážních směsí s využitím druhotných surovin jako náhrady plnivové i pojivové složky.
8. Na základě vyhodnocení dosažených výsledků formulujte optimální složení hmoty pro rubovou injektáž, včetně orientačního ekonomického vyhodnocení.

Předpokládaný rozsah diplomové práce 60-80 stran, včetně tabulkové a grafické přílohy.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).

2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr.h.c.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou vývoje rubových injektážních směsí na silikátové bázi pro účely sanace kanalizačních stok. V rámci práce je taktéž zkoumána možnost substituce základních vstupních surovin surovinami druhotnými, a to jak náhrady plnivových složek, tak složek pojivových. Jako druhotné suroviny označujeme odpady z výrobního procesu, které po potřebné úpravě nacházejí uplatnění ve výrobě jiné. Vývoj a experimentální ověření funkčnosti vyvíjené injektážní hmoty bylo zaměřeno zejména na použití druhotných surovin v co nejvyšší míře při zachování nebo vylepšení fyzikálně mechanických vlastností. Na základě výsledků práce lze konstatovat, že při 100% míře náhrady plnivových složek v kombinaci s 20% náhradou pojiva je možné do značné míry zachovat vlastnosti hmoty nebo je dokonce optimalizovat. Výsledky diplomové práce zároveň poukazují na možnost snížení ekonomické i ekologické náročnosti produkce stavebních hmot.

KLÍČOVÁ SLOVA

Rubová injektáž, injektážní směs, druhotná surovina, substituce, silikáty, vysokoteplotní popílek, cement, slévárenské písky, kanalizace, stokový systém, chemická odolnost.

ABSTRACT

This thesis deals with the development of silicate based reverse grouts for the purpose of rehabilitation of sewers. The work also examines the possibility of substitution of basic input raw materials with secondary raw materials, meaning replacements of both filler components and binder components. As secondary raw materials, we refer to wastes from the production process which, after the necessary treatment, are used in another production. The development and experimental verification of the functionality of the developed grout was focused mainly on the use of secondary raw materials as much as possible, while maintaining or even improving its physical and mechanical properties. Based on the results of the work, it can be stated that with a 100% replacement rate of filler components in combination with 20% replacement rate of binder components, it is possible to largely maintain the properties of the material, or even optimize them. The results of the thesis also point to the possibility of reducing the economic and environmental demands of production of building materials.

KEYWORDS

Reverse grouting, grouting mixture, secondary raw material, substitution, silicates, high-temperature fly ash, cement, foundry sands, sewers, sewer system, chemical resistance.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Martin Dolák *Vývoj nových injektážních hmot pro rubovou injektáž kanalizací*. Brno, 2021. 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, dr.h.c.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Vývoj nových injektážních hmot pro rubovou injektáž kanalizací* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 14. 1. 2021

Bc. Martin Dolák
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Vývoj nových injektážních hmot pro rubovou injektáž kanalizací* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 14. 1. 2021

Bc. Martin Dolák
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval prof. Ing. Rostislavu Drochytkoví, CSc., MBA, dr.h.c, jakožto vedoucímu diplomové práce za jeho odborné rady a vedení. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Vítu Černému, Ph D. a Ing. Petru Figalovi za spolupráci, věcné připomínky a čas strávený při tvorbě této diplomové práce. Zároveň bych chtěl poděkovat paní Blance Bártové za vstřícnou pomoc při 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

I. Úvod	13
II. Teoretická část	14
1. Kanalizační stoky.....	14
1.1. Definice pojmů	14
1.2. Typy stokových soustav.....	15
1.2.1. Betonové stoky.....	15
1.2.2. Zděné stoky	16
1.3. Varianty řešení opravy kanalizace.....	17
1.4. Odpadní vody	18
1.4.1. Druhy odpadních vod	18
2. Chemická odolnost.....	20
1.1 Typy ochrany konstrukce stok proti korozi	20
2.1. Působení chemických látek na silikátové materiály.....	21
2.1.1. Koroze chloridovými ionty	21
2.1.2. Uhličitánová koroze.....	22
2.1.3. Působení hladové vody na silikátové látky.....	22
2.1.4. Degradace biologickým působením na silikátové látky	22
2.1.5. Síranová koroze	24
2.1.6. Působení kyselin.....	26
2.2. Vliv odpadních látek na silikáty	27
2.2.1. Síranová koroze kanalizačních stok.....	27
2.3. Zkoušení chemické odolnosti.....	29
3. Injektážní technologie	29
3.1. Rozdělení injektážních technologií.....	29
3.1.1. Dle technické normy ČSN EN 12 715 rozdělujeme injektážní směsi všeobecně na: ..	29
3.1.2. Rozdělení injektážních technologií dle místa použití:	30
3.1.3. Rozdělení injektážních technologií dle použitého injektovaného materiálu	30
3.1.4. Rozdělení injektážních směsí dle technologie provádění	31
3.1.5. Rozdělení injektážních systémů dle typu injektážní sanace	31
3.2. Rubová injektáž	32
3.2.1. Postup technologie rubové injektáže.....	32
3.3. Požadavky na vlastnosti injektážních směsí.....	32
3.3.1. Požadavky na parametry injektážních směsí dle DIN 19573.....	33

4. Druhotné suroviny	36
4.1. Popílky	36
4.1.1. Fluidní popílky	36
4.1.2. Vysokoteplotní popílky.....	37
4.1.3. Seznam producentů popílku	39
4.2. Uhlíková škvára.....	40
4.2.1. Použití vysokoteplotní uhlíkové škváry.....	40
4.3. Drcený skelný recyklát	41
4.3.1. Použití mletého skelného recyklátu	41
4.4. Slévárenské písky	42
4.4.1. Použití slévárenských písků.....	42
4.4.2. Bentonit.....	43
III. Cíl práce	45
IV. Experimentální část	45
1. Metodika experimentální části	45
1.1. Etapa I – Rozbor vstupních surovin.....	48
1.2. Etapa II – Návrh a výběr základních surovinových směsí.....	49
1.3. Etapa III – Výběr optimalizované receptury s využitím druhotných surovin	51
1.4. Etapa IV – Návrh a výběr optimální kombinovaně modifikované receptury	53
1.5. Metodika vytváření a ošetřování zkušebních vzorků.....	55
1.6. Metody zkoušení.....	56
1.6.1. Provádění zkoušky na vstupních substitučních surovinách	56
1.6.2. Úpravy použitých substitučních surovin	57
1.6.3. Ověřované vlastnosti hmoty v čerstvém stavu	57
1.6.4. Ověřované vlastnosti hmoty ve ztvrdlém stavu.....	58
2. Etapa I – Rozbor vstupních surovin	60
2.1. Analýza vstupních složek surovinové směsi.....	60
2.1.1. Vybrané primární vstupní suroviny.....	61
2.1.2. Analýza primárních surovin.....	61
2.1.3. Analýza druhotných surovin.....	64
2.2. Shrnutí Etapy I.....	70
3. Etapa II – Návrh a výběr vhodných základních surovinových směsí	71
3.1. Návrh základní receptury	71
3.2. Praktické zkoušení navržených receptur	72
3.2.1. Zkoušky prováděné v čerstvém stavu	72
3.2.2. Zkoušky prováděné ve ztvrdlém stavu.....	74

3.3. Shrnutí řešení Etapy II	78
4. Etapa III – Výběr optimalizované receptury s použitím druhotných surovin.....	79
4.1. Modifikace vybrané vhodné základní směsi druhotnými surovinami	79
4.1.1. Substituce pojiv vybrané optimální základní receptury	80
4.1.2. Shrnutí řešení a výběr optimální druhotné suroviny pro náhradu pojiva	85
4.1.3. Substituce plniva vybrané optimální základní receptury	86
4.1.4. Shrnutí řešení a výběr optimální druhotné suroviny pro náhradu plniva.....	91
5. Etapa IV – Návrh a výběr optimální kombinovaně modifikované receptury.....	93
5.1. Posouzení a porovnání vlastností vybraných receptur	93
5.2. Praktické zkoušení navržených receptur.....	95
5.2.1. Zkoušky prováděné v čerstvém stavu	95
5.2.2. Zkoušky prováděné ve ztvrdlém stavu	98
5.3. Shrnutí řešení a výběr optimální receptury pro další testování.....	104
5.4. Testování vybraných modifikovaných receptur	106
5.4.1. Zkoušky prováděné v čerstvém stavu	107
5.4.2. Zkoušky prováděné ve ztvrdlém stavu	112
5.5. Shrnutí řešení Etapy IV	116
V. Závěr.....	117

I. Úvod

Odpady ze stavebního průmyslu vzniklé z výroby nebo z demoličních prací stavebních děl zaujímají značný podíl celosvětového odpadového hospodářství. Proto je současný ekologický trend veden k co nejšetrnější výrobě, a to jak z hlediska požadavků na vstupní suroviny, tak na energetickou náročnost samotné výroby. Stále častějším se stává trend využívat tzv. druhotných surovin, které představují upravené, a tak znovu využitelné, odpadní látky.

Stokové systémy velké části měst v České republice byly vybudovány před několika dekádami, kdy byly požadavky a celková dimenze stokových sítí na zcela jiné úrovni. Současný stav stokových sítí na našem území je proto často v neuspokojivém stavu a je třeba tuto soustavu revitalizovat nebo nahradit stokovým systémem moderním. Celková modernizace však není vždy možná a z tohoto důvodu je třeba provádět i menší sanační úkony, které však nejsou nikterak jednoduché. Technologie rubové injektáže je tak mnohdy optimálním řešením sanace zejména v případech, kdy je vnější povrch konstrukce nedostupný. Takovými případy jsou typicky zejména podzemní stavby.

Objemy v současnosti prováděných sanačních prací kanalizačních stok jsou značné. V daném odvětví stavebního průmyslu je kladen důraz na použití špičkových materiálů. Zároveň se však i zde setkáváme s moderním přístupem a snahou volit co možná nejméně ekologicky náročné materiály.

II. Teoretická část

1. Kanalizační stoky

Kanalizační stokové systémy v ČR byly budovány napříč širokým historickým pásmem. Zejména z tohoto důvodu je velká část těchto systémů do značné míry poddimenzována, kdy splňovala tehdejší požadavky. Zároveň dochází k opotřebování konstrukčních prvků, zejména prvků přímo exponovaných odpadním látkám. V současné době je tak kladen požadavek na rozšiřování kanalizačních stok, ale taktéž dochází k častým rekonstrukcím a lokálním sanačním pracím.

1.1. Definice pojmů

V první řadě je důležité si vymezit základní pojmy týkající se kanalizací. Pro definici základních pojmů je využito vymezení dle zákona č. 274/2001 Sb., Zákon o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu:

- **Kanalizace** – jako kanalizaci považujeme provozně samostatný soubor staveb a zařízení zahrnující kanalizační stoky k odvádění odpadních vod a srážkových vod společně nebo odpadních vod samostatně a srážkových vod samostatně, kanalizační objekty, čistírny odpadních vod, jakož i stavby k čištění odpadních vod před jejich vypouštěním do kanalizace. Kanalizace je vodním dílem.
- **Kanalizační přípojka** – jako kanalizační přípojku považujeme samostatnou stavbu tvořenou úsekem potrubí od vyústění vnitřní kanalizace stavby nebo odvodnění pozemku k zaústění do stokové sítě. Kanalizační přípojka není vodním dílem.
- **Vnitřní kanalizace** – jako vnitřní kanalizaci rozumíme potrubí určené k odvádění odpadních vod, popřípadě i srážkových vod, z pozemku nebo stavby až k místu připojení na kanalizační přípojku. Vnitřní kanalizace není vodním dílem [1].

Další stěžejní pojmy jsou definovány ve Vyhlášce Ministerstva zemědělství – Vyhláška č. 428/2001 Sb., kterou provádí výše zmíněný zákon č. 274/2001 Sb. Tato vyhláška vymezuje tyto pojmy:

- **Kanalizační stoka** – jako kanalizační stoku rozumíme potrubí nebo jinou konstrukci k odvádění odpadních nebo povrchových vod vzniklých odtokem srážkových vod.
- **Stoková síť** – pod pojmem stoková síť rozumíme síť kanalizačních stok a souvisejících objektů odvádějící odpadní nebo srážkové vody přímo do čistíren odpadních vod nebo jiných zařízení na jejich zneškodnění včetně vypouštění nečištěných odpadních vod do vodního recipientu. Stoková síť se navrhuje jako gravitační, tlaková, podtlaková nebo jejich kombinace [2].

1.2. Typy stokových soustav

Stokové soustavy slouží k odvádění tekutých odpadů. Na základě způsobu odvodu tekutých odpadů rozlišujeme:

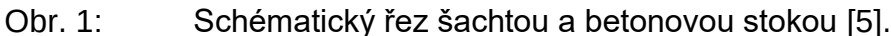
- **Jednotná stoková soustava** – jednotná stoková soustava dopravuje veškeré druhy odpadních vod společnou sítí do ČOV.
- **Oddílná stoková soustava** – oddílná stoková soustava dopravuje jednotlivé typy odpadních vod po samostatných trasách stokových sítí.
- **Modifikovaná stoková soustava** – modifikovanou stokovou soustavou je míněna kombinace dvou výše uvedených stokových soustav [3].

Pro potřebu diplomové práce byly vybrány pouze dva typy stokových soustav, rozlišené dle materiálu, ze kterého jsou vyhotoveny.

1.2.1. Betonové stoky

Betonové stoky tvoří v současné době v ČR většinu stokových sítí. Nejčastěji prováděný profil těchto stok jsou kruhový, který je z hlediska konstrukce nejjednodušší, snadno čistitelný s nejnižšími nároky na výrobu. Dále je běžně využíván tzv. vejčitý profil betonových stok, který disponuje nejvýhodnějšími hydraulickými a statickými vlastnostmi.

Z hlediska definice požadavků na třídu expozice betonových prvků stokových soustav jsou běžně prováděny z betonu pevností třídy C25/30 s třídou expozičního prostředí XC2 pro svislé konstrukce. Vodorovné konstrukce jsou



Pro zděné stoky je typický vejčitý profil o větších rozponech. Jako stavební prvky bývají z pravidla používány kanalizační cihly s předepsanými požadavky na jejich vlastnosti nebo to jsou keramické segmenty. Dále jsou často využívány

prvky zhotovené z čediče. Jedná se jak o zdící prvky, tak o vedlejší části kanalizací jako jsou žlaby, bočnice apod. Zdící malta musí taktéž splňovat požadavky na vlastnosti dle třídy prostředí.

Cihly používané pro zdění kanalizačních stok jsou vytvářeny ze speciálních hlín a jsou páleny při vysokých teplotách až 1100 °C až ke slinování. Jsou typické nízkou porozitou, vysokou objemovou hmotností, vysokým pevnostem a odolností vůči mechanické i chemické zátěži [6]. Základní materiálové složení je uvedeno v následující tabulce:

Tab. 1: Mechanické vlastnosti kanálových cihel [6].

Mechanické vlastnosti	Hodnoty
Nasákavost	4,5 %
Pevnost v tlaku za sucha	> 76 MPa
Pevnost v tlaku po nasáknutí	> 76 MPa
Objemová hmotnost	> 2100 kg·m ⁻³
Kyselinovzdornost	0,1 %
Mrazuvzdornost	> 100 cyklů

Zásady pro realizaci zděných stok:

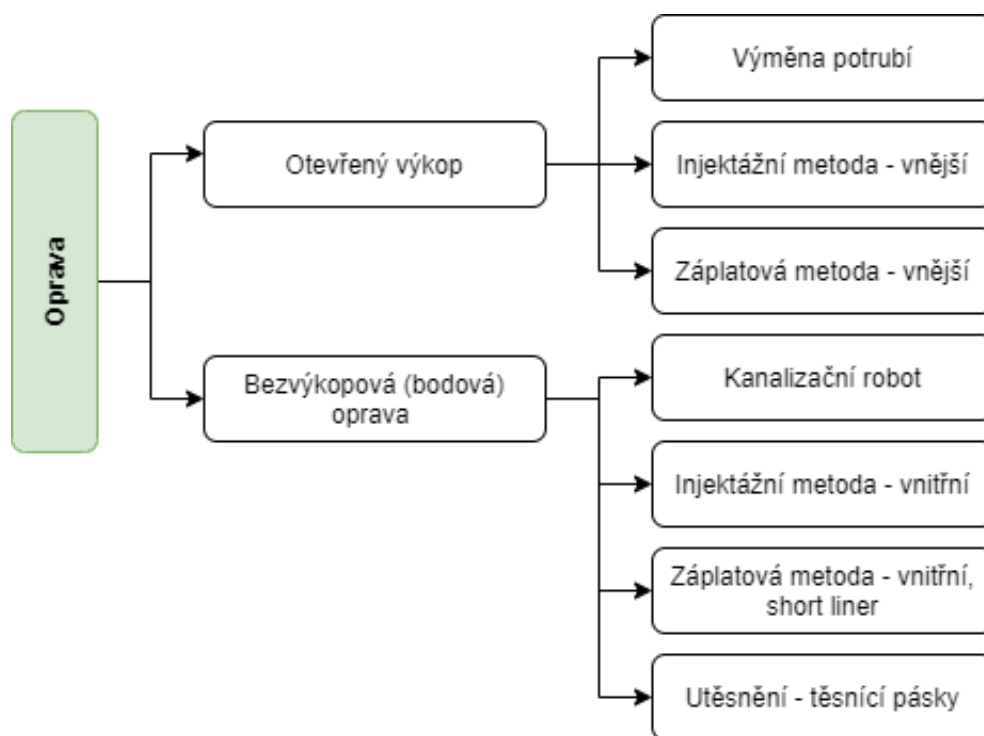
- Dolní polovina stoky musí být vždy vyplněna betonem třídy C 12/15, XC2. Minimální výška betonové konstrukce pode dnem až nad podkladní betonovou desku je 200 mm.
- Tloušťka spár cihelného zdiva musí být v rozmezí 7-9 mm. Při použití keramických dutinových tvarovek musí být v tloušťka 7-15 mm, při použití čedičových tvarovek je požadavek na minimální tloušťku 5 mm.
- Klenby musejí být sezděny z klínů a rovnoběžek, které jsou sestavovány tak, aby se nezvětšovala šířka ložných spár. Takto provedená klenba nevykazuje snížení pevnosti ve smyku [4].

1.3. Varianty řešení opravy kanalizace

V rámci technologických procesů oprav a renovace nedochází ke změně stávajících tras ani průřezu stok a v praxi je běžně možné zachovat omezený provoz potrubí. Výběr prováděné technologie pro odstranění poruch je závislý na mnoha aspektech jako je velikost profilu potrubí, světlé rozměry vstupních šachet, stáří

potrubí, statický stav potrubí, typ a rozsah poruch materiálu potrubí nebo na lokalitě, na níž se porucha daného systému nachází.

Termínem opravy potrubí se rozumí odstranění lokálních závad, jako jsou netěsnosti nebo deformace, které způsobují únik přepravovaného typu kanalizačního odpadu [3]. Používané metody oprav jsou uvedené v následujícím schématu:



Obr. 2: Schéma rozdělení metod oprav kanalizací.

1.4. Odpadní vody

V praxi se běžně injektážní hmoty na bázi silikátů nedostávají do přímého kontaktu s chemicky agresivními odpadními vodami. Je však třeba brát na zřetel možnost degradace primárního vnitřního povrchu stoky do takové míry, že se sanační injektážní hmota na bázi silikátů dostane do přímého styku s odpadními vodami.

1.4.1. Druhy odpadních vod

Na základě typu odváděné odpadní tekutiny rozlišujeme tyto typy odpadních vod:

Splaškové

Splaškové vody jsou odpadní vody, které vznikají v domácnostech, zdravotnických nebo průmyslových závodech. Kvalita splaškových vod je ve

většině případů v čase neměnná. Splaškové vody jsou znečištěny organickými látkami v různých formách, jako jsou tuky (převládající část), cukry a oleje. Zároveň je ve splaškových vodách možný výskyt pesticidů, fenolů a jiných organických látek. Přítomnost anorganických látek je podmíněna kvalitou vstupní pitné vody [8].

Průmyslové

Do skupiny průmyslových odpadních vod řadíme vody vypuštěné do veřejné kanalizace z průmyslových podniků. Průmyslové odpadní vody mohou být samotným průmyslovým podnikem předčištěné a zbavené toxických látek, pro provoz ČOV nebo samotné kanalizace. Předčištěné průmyslové odpadní vody pak mohou být vypouštěny samostatnou sítí nebo i společně se splaškovými vodami. Smíšené splaškové a průmyslové odpadní vody se nazývají „městske odpadní vody [8].

Městské

Jak již bylo zmíněno výše, městské odpadní vody jsou zpravidla smíšené splaškové a průmyslové odpadní vody. Je třeba brát zřetel na fakt, že hladina odpadních vod v takto smíšených sítích v rámci dne značně kolísá. Kolísání hladiny odpadních vod může mít dopad na degradaci konstrukce stokové sítě.

Dešťové

Dešťové odpadní vody pocházejí z dešťových srážek či tání sněhu a ledu. Kvalita takto vzniklých odpadních vod má vysoce kolísavý charakter. Střídání kvality dešťových vod má opět negativní vliv na degradaci kanalizačních sítí [8].

Infekční

Infekční vody obsahují velké množství organických, bakteriálních či jiných nebezpečných látek, které mohou způsobovat infekce, popř. epidemie. Tyto vody jsou sterilizovány před vstupem do kanalizace [8].

Podzemní

Podzemní vody jsou vody přirozeně se vyskytující pod zemským povrchem v pásnu nasycení ve styku s horninami. Podzemní vody jsou hlavním zdrojem pitné vody a do kanalizačního systému vnikají jen za nežádoucích okolností, jako jsou havárie, netěsnosti potrubí atd.

2. Chemická odolnost

V současné době jsou konstrukce na bázi silikátových materiálů stále častěji využívány pro nosné, chemicky namáhané objekty. Tyto konstrukce jsou namáhány kapalnými a plynými agresivními médii, působícími na cementový tmel. Toto působení lze eliminovat dvěma, respektive třemi způsoby. Nejprve primární ochranou konstrukce, tedy zamezením působení chemicky agresivního media, vhodným návrhem složení cementové matrice nebo zejména zajištěním vodotěsnosti konstrukčních prvků. Je třeba také zvážit možnost přítomnosti chemicky agresivních látek v plynném stavu a zajistit nepropustnost konstrukce pro plynná média.

Sekundární ochranou se rozumí provedení ochranného nátěrového systému.

1.1 Typy ochrany konstrukce stok proti korozi

Mezi opatření, která značně omezují tvorbu sulfidů jsou:

- Zvýšení rychlosti průtoku odpadních tekutin,
- snížení doby zdržení odpadní vody na stokové síti,
- dostatečné větrání stokových sítí,
- vhánění vzduchu či kyslíku do odpadních vod,
- přidávání chemických látek zamezujících vznik sulfidů [6].

Přidávanou látkou pro zamezení vzniku sulfidů ve stokových sítích je například chlorid železitý (FeCl_3). Reakcí chloridu železitého s odpadními vodami vzniká kal, který se snadno usazuje v potrubí a odstraňuje se v ČOV. Při používání chemických látek do stokových sítí je třeba posoudit možné negativní dopady na životní prostředí.

Větrání kanalizačních sítí je zajištěno pomocí kanalizačních přípojek. Ve výjimečných případech lze odvětrávání zajistit vybudováním větrací šachty [6].

Působením kyselého prostředí na beton, který je silně zásaditá látka dochází k neutralizaci betonu, jeho rozpadání nebo ke vzniku vedlejších

krystalických produktů o větším objemu, které mají za následek rozrušení cementové matrice vedoucí až k možnému kolapsu konstrukce.

2.1. Působení chemických látek na silikátové materiály

V současnosti často diskutovanými chemicky agresivními látkami v podzemních konstrukcích jsou zejména sírany a kyseliny. Tyto látky jsou běžně přirozeně obsaženy v zeminách nebo půdách kontaminovaných lidskou činností nebo v okolních podzemních vodách [7]. Dalšími méně častými typy chemicky agresivních činitelů může být také působení amonných iontů nebo fenolů, které jsou typické pro půdy kontaminované lidskou činností. Dalšími běžnými typy působení chemicky agresivních látek jsou působení oxidu uhličitého v tekoucí vodě, působení chloridových iontů (nebezpečné zejména pro vyztužené konstrukce) nebo působení slaných, či hladových vod.

Zásadním rozdílem mezi působením síranových iontů a kyselin jsou objemové změny, ke kterým dochází pouze vlivem síranové koroze. V případě působení kyselin dochází k naleptávání a rozpouštění exponovaného povrchu betonu [1].

2.1.1. Koroze chloridovými ionty

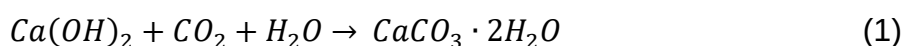
Chloridové ionty – Cl^- , se přirozeně nacházejí v zeminách a půdních vodách a často jsou doprovázeny se sodíkem a vytvářejí NaCl – chlorid sodný. Avšak množství chloridu sodného běžně se vyskytujícího v půdách je po chemické stránce neškodné. Ve vyšších koncentracích (například z mořské vody) mohou mít pozitivní účinky, zejména zpomalují degradační efekt síranové koroze betonu. Tento efekt byl zkoumán studiemi v brakických vodách s obsahem chloridů okolo $15\,000\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (v mořských vodách se běžně vyskytuje okolo $18\,000\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ chloridů).

Běžně však chloridové ionty nezpůsobují značný degradační efekt prostého betonu. Jedná se zejména o tvorbu výkvětů – vysrážení solí na povrchu betonu. Chloridové ionty jsou problematickým činitelem, pokud se jedná o vyztužený beton. Pakliže chloridové ionty vnikají do struktury betonu k výztuži, dochází k velice rychlé korozi, doprovázené objemovými změnami. Korozní produkty železa vyvíjejí expanzní tlak na okolní betonovou matrici vedoucí až k odprýsknutí povrchové (krycí) vrstvy betonu a obnažení výztuže [8].

2.1.2. Uhličitanová koroze

Oxid uhličitý rozpuštěný ve vodě reaguje jako kyselina uhličitá s cementovým tmelem betonu. Kyselina uhličitá může reagovat krom cementového kamene s jakýmkoli vápenatým kamenivem.

Při reakci kyseliny uhličité s betonem nejprve zreaguje část vápenatých iontů za vzniku dihydrogenuhlíčitanu vápenatého. Zbylá část vápenatých iontů zůstává uvolněná a částečně stabilizuje vzniklý dihydrogenuhlíčitan vápenatý. Zbylá nezreagovaná kyselina uhličitá má potenciál degradovat cementovou matici betonu. Tuto zbývající část kyseliny uhličité nazýváme agresivním oxidem uhličitým [9].



Uhličitanová koroze betonu – v praxi často nazývána karbonatace má zásadní vliv na vyztužené betonové dílce. Reakcí agresivního oxidu uhličitého s portlanditem – hydroxidem vápenatým dochází ke vzniku vápence. Vznik vápence doprovází snižování pH a objemové změny působící negativně na vnitřní strukturu betonu. Snižováním pH jinak zásaditého betonu přichází beton o schopnost přirozené pasivace výztuže. Tato schopnost je zcela ztracena v momentě, kdy dojde ke snížení pH na hodnotu 9,6.

2.1.3. Působení hladové vody na silikátové látky

Hladová, resp. měkká voda je voda, která obsahuje nízké koncentrace rozpuštěných volných iontů. Má schopnost degradovat betonové konstrukce, pakliže je ve velkém objemu a zároveň je tekoucí. Betony se zkarbonatovaným povrchem jsou méně náchylné k degradaci hladovou vodou [1].

Při degradaci povrchu betonu hladovou vodou dochází díky rozdílnému potenciálu betonu a tekoucí měkké vody k vylouhování a rozpouštění cementového kamene [8].

2.1.4. Degradace biologickým působením na silikátové látky

Biokoroze betonu má podobné účinky jako chemická koroze, avšak je odstartována působením biologických vlivů – živými organismy. Vlivem působení mikroorganismů na beton probíhají základní korozní procesy II. a III. typu:

- „II. typ – výměna iontů mezi betonem a agresivním médiem vzniklým v důsledku působení mikroorganismů. (Je výsledkem výměnné reakce mezi

vaznými rozpustnými součástmi cementového kamene a nevaznými solemi z agresivního roztoku. Rozpustnost minerálů je přímo úměrná aciditě prostředí – kyselé prostředí urychluje korozi. Při styku betonu s kyselinami, chloridy, dusičnany, hořečnatými a amonnými solemi, působí kyseliny organické slaběji nežli kyseliny anorganické) [9].“

- „III. typ – expanzivní tlaky způsobené růstem krystalů korozivních zplodin (je způsobena vodami, jejichž soli reagují s látkami obsaženými v cementu, následně vytvářejí krystaly a zvětšují svůj objem. Tím trhají zatvrdlý beton, který ztrácí svoji pevnost. Korozní zplodiny vyplňují póry a dutiny betonu, čímž se dočasně zvýší jeho pevnost. Při dalším růstu krystalů však již dochází k trhání betonu. Tento typ koroze je důsledkem zvýšené koncentrace síranů ve vodě. Podobně působí i dusičnany a chloridy) [9].“
- Průběh a rychlost biokoroze je závislý na mnoha vnitřních i vnějších faktorech, popřípadě jejich kombinacích. Dle [9] je průběh biokoroze závislý zejména na těchto faktorech:
- Porozita a pevnosti betonu – porozita a pevnost betonu zpravidla určují trvanlivost betonu. Dle práce [10] při zvýšení pevnosti v tahu za ohybu o cca 60 % vzrostla odolnost betonu vůči síranové korozi o 200 %.
- Typ a chemicko-mineralogické složení cementu – všeobecně uznávaný úzus, že cementy s nižším obsahem oxidu vápenatého v kombinaci s příměsí popílku, strusky apod. jsou více odolné.
- Vhodně použité příměsi zvyšují odolnost betonu vůči degradaci. Přídavek plastifikační přísady snižuje množství záměsové vody, a tak nepřímo zvyšuje nepropustnost povrchových vrstev betonu. Bitumenové emulze zaplňují volné póry struktury betonu a rovněž zvyšují nepropustnost betonu.
- Poměr agresivních látek – přítomnost vysokého obsahu chloridových iontů snižuje rychlost síranové koroze.
- Ochranná vrstva – při použití ochranné vrstvy a zamezení styku povrchu betonu s agresivním prostředím je biokoroze zcela zamezeno (při použití vhodných ochranných materiálů).

Rychlost biokoroze je zejména závislá na koncentraci agresivní látky, typu koroze a stupni poškození exponovaného materiálu [9].

2.1.4.1. Síranová koroze betonu způsobená mikroorganismy

Nejčastějším biologickým činitelem tohoto typu biokoroze jsou sírné bakterie. Jejich výskyt je podmíněn přítomností vody a sloučenin síry. V praxi se tak vyskytují téměř ve všech půdách a vodách.

Hlavními původci koroze betonu jsou bakterie rodu *Acidithiobacillus*. Bakterie rodu *Acidithiobacillus ferrooxidans* jsou schopny současné oxidace sírných i železnatých sloučenin.

Více o síranové korozi způsobené mikroorganismy v kapitole 2.2.

2.1.5. Síranová koroze

Zásadními činiteli způsobující síranovou korozi jsou síranové anionty – SO_4^{2-} . V různých koncentracích jsou síranové ionty transportovány z okolní vody do struktury betonu. Síranové anionty jsou běžně doprovázeny vápennými, hořečnatými nebo hlinitými kationty.

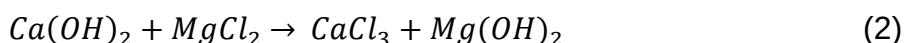
Při kontaktu porézního betonového prvku s nasycenou okolní zeminou dochází ke snadnému průniku síranových iontů do struktury betonu. Pakliže se jedná o kompaktní, hutný povrch betonu s nízkým vodním součinitelem je migrace síranových iontů značně omezena a zadržena v povrchové vrstvě.

Migrace síranových iontů v nenasyčené okolní zemině do betonové konstrukce způsobená difúzí je znatelně pomalejší, ale také je závislá na koncentraci síranových iontů.

Ve vysoce alkalických porézních látkách, jejichž alkalitu způsobují hydroxidy sodné, draselné a vápenaté, probíhá reakce se síranovými ionty za vzniku ettringitu ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot32\text{H}_2\text{O}$). Vznik ettringitu má destruktivní účinky. Jakmile je překročena pevnost betonu v tahu dochází k tvorbě prasklin, trhlin až k úplnému rozpadu betonu. Zejména z důvodu vyššího obsahu trikalciium aluminátu ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, dále jen C_3A) v portlandském cementu, je jeho využití v místech možné síranové koroze nemožné. Pro tento účel je v praxi běžně používán zejména portlandský směsný cement. Portlandský směsný cement obsahuje menší množství C_3A , a naopak vyšší množství dikalcium silikátu ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, dále jen C_2S), který je slínkovým minerálem zvyšujícím odolnost vůči síranům.

V betonu obsažený hydroxid vápenatý může v přítomnosti síranových iontů taktéž reagovat za vzniku gibbsitu ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Tento reakční produkt má vysoké pevnosti a vlivem expanze může značně přispívat k degradaci betonu.

Pokud jsou v okolním prostředí přítomny krom síranových iontů ionty hořečnaté, dochází po reakci s hydroxidem vápenatým ke vzniku brucitu. Jedná se o nízko rozpustnou látku, která může vysrážením z roztoku taktéž přispívat k degradaci betonu. Hořečnaté ionty mohou taktéž reagovat s kalcium silikát hydrát (dále jen CSH) gely, které tvoří základní pojivovou složku betonu.



Při „běžné“ formě degradace betonu síranovými ionty, má tato reakce probíhající v první fázi koroze za následek zvýšení pevnosti a tvrdosti povrchových vrstev betonu. Tento efekt je způsoben počátečním zaplněním volné porézní struktury betonu. Po zaplnění všech pórů ve struktuře v první fázi koroze dochází k vyvíjení tahového napětí na vnitřní strukturu betonu vznikem dalších novotvarů. K tvorbě trhlin v betonové matici dochází ve chvíli, kdy je pevnost betonu v tahu menší, nežli je vyvíjené napětí nových korozních zplodin. Takto vzniklé trhliny spolu s akumulovanými bílými krystalickými produkty jsou charakteristickými projevy degradace betonu síranovými ionty [7].

Vlivem síranové koroze může docházet taktéž ke vzniku thaumasitu. Pro vznik thaumasitu ($\text{Ca}_3\text{Si}(\text{CO}_3)(\text{SO}_4)(\text{OH})_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) musejí být splněny následující podmínky:

- Přítomnost síranů, obsažených zejména v okolních zeminách,
- přítomnost tekoucí vody,
- zdroj CSH gelů hydratovaných zejména cementů portlandského typu,
- přítomnost uhličitánů nebo hydrogenuhličitánů v okolních půdních vodách
- nízké teploty (nejvyšší reaktivita okolo 15 °C,
- vysoké pH – 10,5 a vyšší přítomné v nezkarbonatovaném povrchu betonu.

Od dostupnosti uhličitánových iontů jsou odvozeny reakční produkty, vzniklé sírany. Při teplotách nižších než 15 °C a za přítomnosti vody s vysokým pH dochází reakcí CSH gelů s uhličitany a sírany ke vzniku thaumasitu. V důsledku vzniku thaumasitu dochází k redukci cementové matrice betonu k až houbovitě nesoudržné hmotě. Jelikož degradace betonu vlivem vzniku

thaumasitu není závislá na množství kalcium aluminátů v cementové matici, mohou být napadnutelné i betony s obsahem portlandského směsného cementu. Výjimku tvoří betony obsahující cementy s příměsí vysokopecní strusky, které vykazují výbornou odolnost vůči tomuto typu koroze. Ochrana betonů vyrobených z jiného typu cementu je tak založená na nízké propustnosti povrchových vrstev betonu [7].

2.1.6. Působení kyselin

Betony jsou běžně napadány kyselinami obsaženými v podzemních či půdních vodách. Jsou to zejména kyselina uhličitá, huminové kyseliny nebo kyselina síranová či siřičitá. Huminové kyseliny a kyselina uhličitá nedosahují nižšího pH nežli 3,5, kdežto kyselina sírová je silně ionizační anorganická kyselina, která může mít pH 2 a méně. Další obdobné, silně ionizující kyseliny mohou obsaženy v zeminách, které jsou kontaminovány průmyslovou výrobou.

Při působení kyseliny na beton dochází k rozpouštění cementové matrice. Tento proces snižuje mechanické vlastnosti betonu, avšak není doprovázen výraznými objemovými změnami. Ettringit ani thaumasit nejsou stabilní v roztoku kyselin, a tak hlavním vzniklým minerálem je gibbsit [7].

V betonech, ve kterých jsou použita křemičitá kameniva, žula nebo čedič, dochází k naleptávání jejich povrchu a vzniku nechráněných agregátů. Při použití vápenců jako kameniva, dochází leptání struktury kameniva podobně rychle jako narušování cementové matrice a povrch betonu je tak hladší [7].

Obecně je tak míra odolnosti vůči kyselinám závislá na rychlosti pohybu agresivních vod vůči exponovanému povrchu betonu, na kvalitě betonu a použitých materiálech – cement, kamenivo. Netekoucí agresivní vody mají na beton minimální deformační efekt. Tekoucí, méně koncentrované kyseliny s pH okolo 5-6 mají značný efekt na degradaci povrchu betonu, ale tento jev bude probíhat pomalu, zvláště pokud se jedná o huminové kyseliny. V případě koroze betonu vlivem působení huminových kyselin dochází k tvorbě nerozpustných krystalických látek na jeho povrchu, které zabraňují vniku kyselin dále do struktury betonu [7].

2.2. Vliv odpadních látek na silikáty

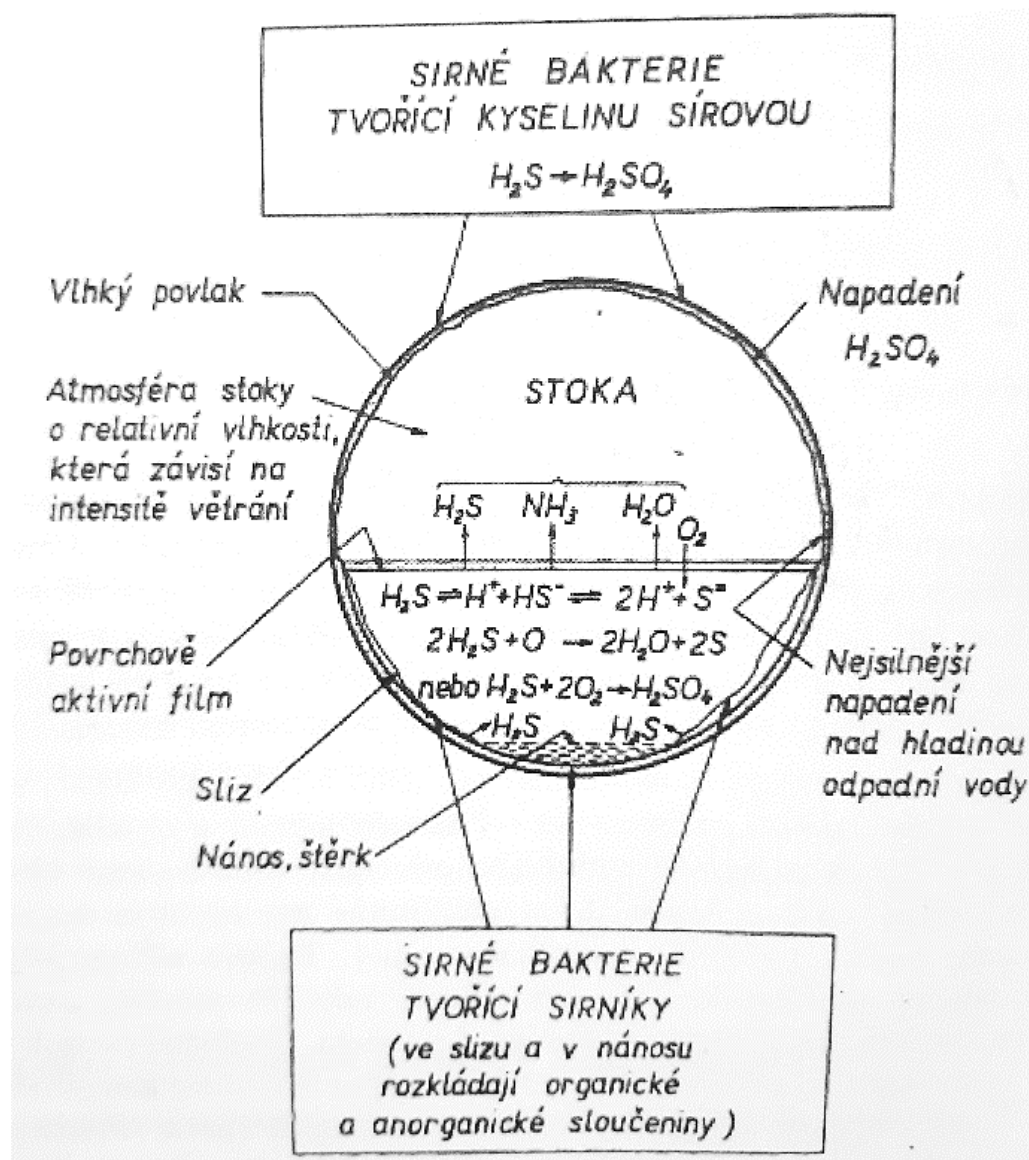
Problematika koroze betonových kanalizačních stok je řešena již od počátku 20. století. V extrémních případech expozice betonových prvků je návrhová doba použitelnosti menší nežli 10 let. Kritickým faktorem na dobu použitelnosti betonových rour stokového systému je koncentrace sulfanu – sirovodíku. Přítomnost sulfanu ve stokových sítích má však i vedlejší negativa. Jednak je to pro stokové systémy typický zápach a dalším negativem je fakt, že je sulfan nervový plyn. Sulfan tak znesnadňuje kontrolu stavu kanalizačních stok.

2.2.1. Síranová koroze kanalizačních stok

V kanalizačních stokách, kde mohou vznikat aerobní podmínky často dochází k síranové korozi betonu. V aerobních podmínkách dochází k bioredukci síranů bakteriemi na sulfan a dále k navazujícímu koloběhu síry. Během čerpení a poklesu pH sulfan téká do aerobního prostředí kanalizační stoky. Zde oxiduje na síru. Síra je dále oxidována acidofilními bakteriemi na kyselinu sírovou [9].

Vzhledem ke složitosti procesů probíhajících v kanalizačních stokách jsou níže uvedeny jednotlivé fáze tohoto cyklu a schéma koroze:

- 1) Vznik sulfanu ze sirných sloučenin,
- 2) uvolňování plynného sulfanu do atmosféry stoky z odpadních vod,
- 3) hromadění sulfanu na povrchu betonové konstrukce nad hladinou vody,
- 4) oxidace sulfanu na kyselinu sírovou,
- 5) koroze vnitřního povrchu betonové konstrukce stoky nad hladinou odpadních vod.



Obr. 3: Schéma síranové koroze ve stokovém systému [9].

Důležitým faktorem ovlivňujícím rychlost tvorby a působení kyseliny sírové je teplota. Při stejné koncentraci sulfanu v odpadních stokách za letních měsíců dochází téměř k trojnásobnému vytváření kyseliny sírové, nežli je tomu v zimním období.

Je ověřeno, že po pětileté expozici kanalizačního systému takovémuuto prostředí dochází k rozrušení betonu do hloubky až 30 mm [9].

2.3. Zkoušení chemické odolnosti

V současnosti v České republice neexistuje žádný normový postup zkoušení chemické odolnosti stavebních materiálů. Proto je stanovení chemické odolnosti často problematické a jedné se spíše o kombinaci normových postupů:

- **ČSN 73 1326** - Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek [11],
- **ČSN EN 13198** - Stanovení odolnosti proti zmrazování/rozmrazování s rozmrazovací solí [12],
- **ČSN 73 1322** - Stanovení mrazuvzdornosti betonu [13],
- Pro účel diplomové práce byla použita: **DIN 19753** - Draft on mortars for construction and rehabilitation sewer systém [14].

Základním principem stanovení chemické odolnosti stavebního materiálu je jeho ponoření nebo jeho částečné ponoření do chemicky agresivní látky o známé koncentraci a teplotě. Zkoušky jsou často časově velice náročné. Vyhodnocení zkoušek probíhá na základě úbytku materiálu, porovnání fyzikálně mechanických vlastností těles oproti referenčním vzorkům nebo kombinaci. Zpravidla bývá taktéž stanovováno pH v rámci průřezu zkoumaných vzorků, RTG analýza pro zjištění mineralogických změn [8].

3. Injektážní technologie

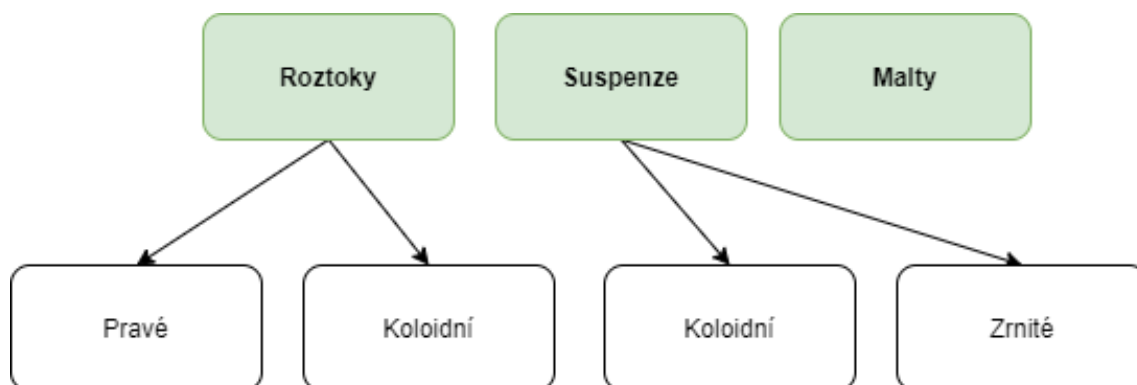
Cílem injektážních technologií je dosažení navýšení fyzikálně mechanických vlastností injektovaného materiálu, nejčastěji základové půdy. Na zřetel je třeba brát především zvýšení pevnosti v tlaku a snížení propustnosti injektovaného materiálu. Injektováním nesoudržných hornin je docíleno vyplnění nežádoucích pórů a dutin injektovanou směsí. Takto vzniklý kompozit se nazývá geopolymery [4].

3.1. Rozdělení injektážních technologií

3.1.1. Dle technické normy ČSN EN 12 715 rozdělujeme injektážní směsi všeobecně na:

- Zrnité nebo koloidní suspenze,
- pravé nebo koloidní roztoky,
- malty [15].

Rozdělení je přehledně zpracováno v následujícím schématu:



Obr. 4: Všeobecné rozdělení injekčních směsí [15].

3.1.2. Rozdělení injektážních technologií dle místa použití:

- **beton** – mechanicky únosné vyplnění trhlin a dutin, elastické vyplnění, vyplnění schopné nabobtnání,
- **zdivo** – hydroizolační funkce (uzavření a utěsnění trhlin a dutin),
- **podloží** – výplňová funkce, zvýšení statické únosnosti [4].

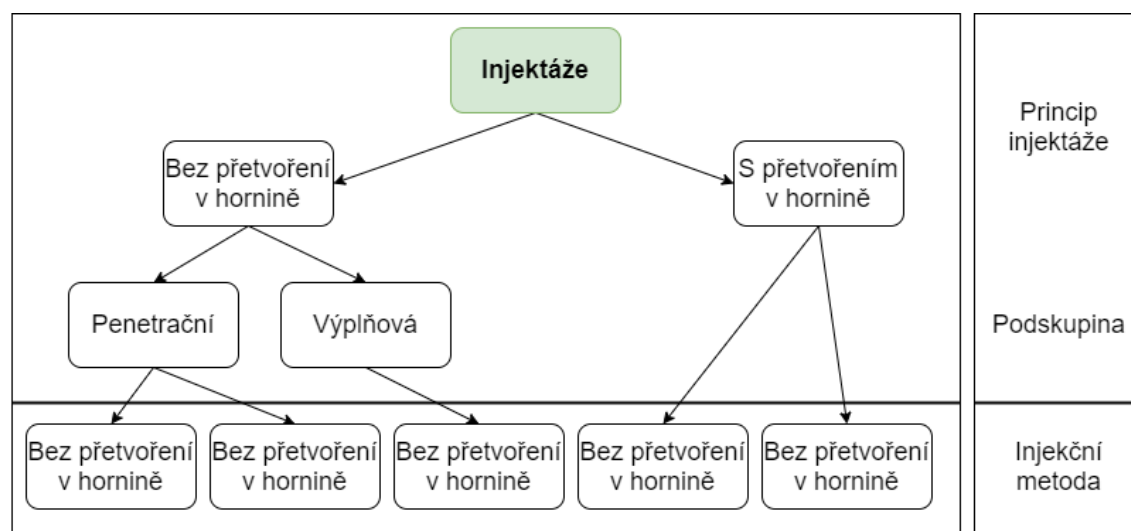
3.1.3. Rozdělení injektážních technologií dle použitého injektovaného materiálu

- Cementová injektážní směs,
- cementová injektážní směs s příměsí bentonitu,
- jílocementová injektážní směs,
- jílová suspenze,
- epoxidové pryskyřice,
- organické pryskyřice,
- polyestery,
- polyuretany,
- polyakrylátové hmoty,
- akrylátové injektážní hmoty,
- polyvinylacetátové směsi,
- organicko-minerální pojiva,
- vodní sklo [4].

3.1.4. Rozdělení injektážních směsí dle technologie provádění

- Tlakové injektáže,
- beztlakové injektáže
- podtlakové [4].

Dle [15] lze dané rozdělení definovat také dle principu a metody provádění injekčních prací. Toto rozdělení je znázorněno v následujícím schématu:



Obr. 5: Principy a metody injekčních prací [15].

3.1.5. Rozdělení injektážních systémů dle typu injektážní sanace

- Stabilizace jemnozrnných půd,
- injektování trhlin,
- injektování těsnících stěn,
- injektování těsnící clony ve zdivu,
- rubová injektáž (podzemní a dopravní konstrukce),
- zemní kotvení,
- injektování základových půd – trysková a jednosměrná injektáž [4].

3.2. Rubová injektáž

Technologie rubové injektáže je používána v případech, kdy je požadováno znovuobnovení vnějšího hydroizolačního systému a kdy není vnější stěna konstrukce přístupná (hloubka výkopu – neekonomické, okolní zástavba apod.) a hydroizolační systém nelze zhotovit standardním postupem tedy stěrkováním, nástřikem nebo nátěrem [16].

Rubová injektáž spadá do skupiny tlakových injektážních systémů, které využívají tzv. pakry. Injektáž je prováděna do oblasti mezi vnější okraj konstrukce a okolní podloží. Rubová injektáž tvoří stabilní zábranu proti vnikání okolní vlhkosti do konstrukce. Zároveň vyplňuje póry a dutiny okolního podloží, které tak konsoliduje. Pomocí rubové injektáže lze provádět lokální sanaci poškozeného hydroizolačního systému nebo vytvořit zcela nový plošný systém zabraňující vstupu vlhkosti do konstrukce [16].

3.2.1. Postup technologie rubové injektáže

Rubová injektáž je prováděna z interiérové strany konstrukce. Nejprve jsou provedeny vrty skrze konstrukci. Vrty jsou prováděny s požadovanými rozestupy po celé ploše sanovaného prvku. Pakry jsou injektovány od jedné strany stěny od zdola k horní hraně sanované plochy. Aby bylo docíleno požadovaného efektu, je nutné vícenásobné provedení plnění jednotlivých pakrů. Prvním a druhým plněním dosáhneme penetračního efektu rubové strany injektované konstrukce. Po každém plnění je nutné pakry propláchnout čistou vodou, aby byla zaručena jejich průchodnost po celou dobu provádění. Rubová injektáž je typicky prováděna ve třech až čtyřech plněních [16].

3.3. Požadavky na vlastnosti injektážních směsí

Při návrhu injektážní směsi je třeba brát zřetel na následující vlastnosti:

- Reologie směsi (zejména viskozita, koheze), doba tuhnutí, tvrdnutí a stabilita směsi,
- velikost zrn (odvislá od velikosti pórů a dutin injektovaného materiálu),
- pevnost,
- odolnost,
- toxicita.

3.3.1. Požadavky na parametry injektážních směsí dle DIN 19573

Dle DIN 19573 jsou požadavky na injektážní systémy zajišťující funkci zaplnění pórů, dutin a trhlin:

- Velikost maximálního zrna 1 mm,
- stabilita směsi po 3 hodinách od namíchání – 1 % počátečního rozsahu,
- pevnost v tlaku po 28 dnech – min. 5 MPa [17].

Dle DIN 19573 jsou požadavky na výplňové injektážní systémy:

- Cementové malty pro výplňové injektážní systémy nesmějí být v permanentním styku s odpadní vodou,
- zpracovatelnost delší než 45 minut,
- konzistence je popsána jako „plastická až měkká“,
- velikost maximálního zrna – 4 mm,
- pevnost v tlaku po 28 dnech – 30 MPa,
- odolnost proti síranové korozi (appendix C) - $\Delta\epsilon$ 0,8 mm/m [17].

Dle DIN 19573 jsou požadavky na injektážní systémy zajišťující funkci zaplnění pórů, dutin a trhlin a zamezení pohybu a konsolidaci zemin:

- Maximální velikost zrna – 0,5 mm,
- konzistence ověřená pomocí Marshova kužele po 5 a 10 minutách (požadavky dle DIN EN 14117),
- pevnost v tlaku po 28 dnech – 25 MPa,
- soudržnost povrchových vrstev (při tloušťce malty 5 mm) – f_h vyšší než 1 MPa [17].

Odolnost proti síranové korozi je shrnuta v následující tabulce:

Tab. 2: Hodnocení odolnosti vůči působení chemikálií dle DIN 19753 [17].

per DIN EN 1766:2000-03			
Odolnost proti chemické degradaci			
XWW1	$d_{t,ph4}$	$1,25 \text{ mm} < d_{t,ph4} < 1,5 \text{ mm}$	Appendix B
XWW2	$d_{t,ph4}$	$1,05 \text{ mm} < d_{t,ph4} \leq 1,25 \text{ mm}$	
XWW3	$d_{t,ph4}$	$d_{t,ph4} \leq 1,05 \text{ mm}$	
Odolnost proti sulfátům	$\Delta\epsilon$	$\leq 0,8 \text{ mm/m}$ Žádné viditelné praskání	Appendix C
Vodotěsnost	-	Vodotěsnost při tlaku 2 barů	DIN EN 14068
Slučitelnost s podzemní vodou ^a	-	-	DVGW W 347
^a Ochrana pitné vody			

Parametry charakterizující vlastnosti směsí:

Stěžejní parametry definující základní vlastnosti injekčních směsí jsou dle normy [15] rozděleny do dvou etap – před tuhnutím a po tuhnutí injekční směsi. Tyto parametry jsou přehledně sestaveny v následující tabulce:

Tab. 3: Parametry charakterizující vlastnosti injekčních směsí [15].

	Roztoky	Suspenze	Malty
Před tuhnutím	Doba tuhnutí, hustota, ph, povrchové napětí, doba zpracovatelnosti, doba potřebná k vytvoření povlaku, doba gelace, viskozita, koheze, tixotropie	Doba tuhnutí, hustota, ph, křivka zrnitosti, viskozita, soudržnost, mez tečení, tixotropie, stabilita, schopnost vázat vodu	Doba tuhnutí, hustota, ph, křivka zrnitosti, viskozita, zpracovatelnost, schopnost zadržet vodu
Po tuhnutí	Tvrdnutí, konečná pevnost, ph, tuhost, odolnost, smršťování, rozpínavost, pevnost ve smyku, synereze (roztoky na bázi křemičitanů)	Doba tvrdnutí, konečná pevnost, tuhost, odolnost, smršťování, rozpínavost, hustota, pevnost ve smyku	Doba tvrdnutí, konečná pevnost, tuhost, odolnost, smršťování, rozpínavost

Pro zhutňovací injektáž nebo pro plnění dutin větších objemů, velkých trhlin, otevřených puklin a dutin v zeminách jsou často používány zejména injektážní směsi spadající do skupiny malt. Jeden ze stěžejních požadavků na malty je

jejich stabilita a reologické vlastnosti, které jsou ověřovány vhodně zvoleným viskozimetrem (průtokoměrem). Pakliže jsou malty používány pro zhutňovací injektáž, musejí obsahovat minimálně 15 % jemných částic pod 0,1 mm [15].

V případě, kdy je používána injektážní cementová směs ve větších objemech, je třeba brát zřetel na lokální vývin hydratačních teplot a tlaků [15].

Výplňová injektáž může být v další fázi doplněna o tlakovou injektáž pro zajištění zaplnění zbývajících dutin [15].

3.3.1.1. Klakáž

Klakáž je v praxi používána pro:

- vyztužení a stabilizaci horniny,
- vyvolání řízeného zvedání objektů,
- dosažení vodotěsnosti vytvořením uzavřených sekcí v hornině.

Při provádění klakáže je třeba brát v potaz proces vzniku a šíření trhlin, který je vyvolán samotnou klakáží. Řídit tento proces a jeho rozsah je v praxi velice obtížné [15].

3.3.1.2. Zhutňovací injektáž

„Principem zhutňovací injektáže je vtlačování relativně tuhé (viskózní) zrnité injekční směsi do horniny s cílem posunu skeletu horniny nebo vzniku deformace. Injekční směs je většinou aplikována prostřednictvím injekčních trubek s otevřeným koncem. Používá se injekční směs takové konzistence, aby směs po injektáži zůstala jako homogenní těleso a aby nedošlo k pronikání směsi do skeletu horniny ani ke klakáži. Zhutňovací injektáž se nejčastěji používá pro **zhutnění a zvýšení ulehlosti kyprých zemin** a ke zvedání a podchycení objektů, které jsou postiženy sedáním [15].“

Konečná podoba sítě injekčních vrtů je v praxi často upravována během provádění sanačních prací na základě dosažených výsledků při kontrolních zkouškách provedených v první etapě injektáže [15].

4. Druhotné suroviny

Druhotné suroviny rozebírané v této práci byly vybrány optimalizačním výběrem bakalářské práce [4] na téma Návrh nových technologií rubové injektáže zděných kanalizačních stok. V bakalářské práci byl vytvořen katalog potenciálně vhodných druhotných surovin podrobený optimalizačnímu výběru.

4.1. Popílký

Popílký můžeme dělit dle různých kritérií. Typický rozdělením elektrárenských popílký je dělení na základě způsobu spalování. Na základě spalovacího procesu rozdělujeme tzv. vysokoteplotní popílek a fluidní popílek. Klasický způsob spalování, tedy starší typ, je vysokoteplotní, kdy se teplota spalování pohybuje v rozmezí 1400 až 1600 °C. Novější a efektivnější typ spalování je spalování ve fluidním kotli. Jedná se o spalování uhlí s přidavkem podrceného vápence za teplot v rozmezí 700 až 900 °C.

4.1.1. Fluidní popílký

Ke spalování ve fluidním kotli dochází tedy za nižších teplot. Uhlí je podrceno na velikost části přibližně 20 mm a ke spalování dochází společně s vápencem ve vznosu – tzv. fluidním loži. Fluidní lože vzniká vháněním vzduchu, který prochází vrstvou popela, vápence, popřípadě inertního písku. Díky tomuto typu spalování, kdy se palivo chová jako kapalina dojde k vyhoření převyšujícím 90 % [18]. Ve fluidním kotli dochází k reakci:



Vzniká tedy síran vápenatý, který je součástí popela. Fluidním spalováním je docíleno snížení množství vypouštěných oxidů dusíku a kouřové plyny obsahují do 3 % oxidů síry. Neposlední výhodou fluidního spalování je vysoká účinnost této technologie.

Při fluidním spalování vznikají dva vedlejší energetické produkty. Jedná se o ložový popel, který zůstává v prostoru ohniště a dále je to popílek oddělený z kouřových plynů pomocí odlučovačů – úletový popílek. I když vznikly tyto dva typy popílký stejným způsobem, jejich fyzikálně mechanické vlastnosti, vlastnosti mineralogické i chemické složení se značně liší [18].

4.1.1.1. Použití fluidních popílků

Vzhledem k vysokému obsahu amorfního CaO ve formě reaktivního měkce páleného vápna a obsahu SO₃ (možný vznik ettringitu) se fluidní popílký využívají v oblasti stavebnictví pro výrobu stabilizátorů, dříve při výrobě pórobetonu, umělých kameniv sbalkovaných za studena nebo pro solidifikaci odpadů. Dále se využívají pro výrobu pálených staviv, vytváření násypů v silničním stavitelství, pro výrobu hydraulických vápen a taktéž se začínají využívat jako jedna z přísad do cementu.

4.1.2. Vysokoteplotní popílký

Spalováním práškovitého paliva za vysokých teplot v rozmezí 1200–1700 °C vznikají vysokoteplotní popílký. Palivo je spalováno ve vzhledu a jedná se zejména o antracit, černé uhlí a taktéž hnědé uhlí. Vysokoteplotní popílký jsou nespalitelné zbytky, zachycené pomocí odlučovačů z kouřových plynů. Popílek je ve stavebnictví pro své pucolánové vlastnosti dobře využitelná druhotná surovina.

Fyzikálně mechanické a chemické vlastnosti popílků jsou značně ovlivňovány druhem paliva, teplotou spalování, technologií spalovacího procesu, jemnosti mletí paliva a způsob odlučování částic z kouřových plynů.

Popílek je tvořen amorfni i krystalickou fází. Amorfni fáze tvoří zejména látky podobné mullitu. Tato fáze je zásadní pro reaktivitu popílků. Krystalické fáze jsou ve většině případů tvořené β – křemenem.

Zrnka popílků jsou skelné kulovité částčky s dutinkou uvnitř – cenosféry. Pakliže vnitřní dutinka cenosféry obsahuje jinou částici, hovoříme o tzv. pleosféře. Dalšími možnými útvary tvořícími částice popílků mohou být ferrosféry nebo pyrosféry. Častým jevem částic popílků je jejich shlukování a následná tvorba aglomerátů [4].

Tab. 4: Chemické složení běžného popílku [4].

Chemické složení popílku	
CaO	5-15 %
SiO ₂	40-45 %
Al ₂ O ₃	15-30 %
Fe ₂ O ₃	5-18 %
SO ₄	<2,0 %

4.1.2.1. Použití vysokoteplotního popílku

Přídavek popílku do cementové směsi výrazně ovlivňuje vlastnosti čerstvé směsi i výsledné vlastnosti hmoty ve ztvrdlém stavu. Při správném dávkování popílku do cementových kompozitů, je zlepšena zpracovatelnost, čerpatelnost a odolnost vůči bleedingu čerstvé směsi. Ve ztvrdlém stavu zlepšuje kvalitu povrchu betonu, zvyšuje odolnost proti průsaku tlakové vody, a také zvyšuje výsledné pevnosti v tlaku.

Směs s přídavkem popílku hydratuje pomaleji nežli směs obsahující pouze cement jako pojivovou složku. Pucolánový charakter popílku má za následek zvyšování pevností po delší době zrání, nežli je to u betonu bez přídavku popílku. Během zrání taktéž dochází k menšímu smrštění ztvrdlé hmoty. Dle práce [20] je vlivem nahrazení 50 % cementu vysokoteplotním popílkem sníženo finální smrštění betonu o 30 %. Smršťovací trhliny jsou pro trvanlivost cementových kompozitů ve styku s vodou kritickým faktorem. Při náhradě 40 % cementu popílkem dojde ke zlepšení těsnících vlastností povrchu betonu o 6 až 11 %. Dalším zvýšením náhrady se těsnící vlastnosti opět zhoršují. Při použití 60 % byly dle práce [20] těsnící vlastnosti značně zhoršeny. Dle práce Wanga [21] použitím vysokoteplotního popílku se sníží propustnost povrchu betonu vůči chloridům. Při použití vysokoteplotního popílku však stále nelze zanedbávat ošetřování zrajícího betonu.

Doporučená míra nahrazení cementu popílkem je v rozmezí 15–40 %. Popílek vylepšuje reologické vlastnosti, ale zároveň snižuje stabilitu čerstvé směsi. Pro navýšení stability směsi je třeba přídavek jiné stabilizační přísady. Dle práce [24] jsou pevnosti betonu v tahu za ohybu obdobné, jako směsi bez náhrady cementu.

4.1.3. Seznam producentů popílku

V roce 2014 byla celková produkce VEP – vedlejších energetických produktů v ČR odhadována na 13,7 milionů tun. Produkce vysokoteplotního popílku byla v České republice 8 milionů tun, což je srovnatelný objem produkce se státy jako jsou Austrálie nebo Kanada [1].

V roce 2018 se celková roční produkce VEP v ČR pohybovala v rámci 14 milionů tun, přičemž fluidní popílek tvořil téměř 15 %, což odpovídá 1,5 milionu tun [23]. V Tab. 5: jsou uvedeni producenti vysokoteplotních a fluidních popílků.

Tab. 5: Seznam producentů popílku [4].

Provozovatel	Produkce	Pracoviště	Typ paliva	Typ popílku
Elektrárna Počerady	Elektrárna	Počerady	hnědé uhlí	Vysokoteplotní
Sev.en EC	Elektrárna	Chvaletice	hnědé uhlí	Vysokoteplotní
Elektrárna Dětmorovice	Elektrárna	Dětmorovice	černé uhlí	Vysokoteplotní
ČEZ	Elektrárna	Tušimice	hnědé uhlí	Vysokoteplotní
ČEZ	Elektrárna	Prunéřov	hnědé uhlí	Vysokoteplotní
Elektrárna Opatovice	Elektrárna	Opatovice	hnědé uhlí	Vysokoteplotní
Alpiq Generation	Elektrárna	Kladno-Dubská elektrárna	hnědé uhlí, černé uhlí	Vysokoteplotní
Tameh Czech	Elektrárna	Ostrava – Kunčice	černé uhlí	Vysokoteplotní
United energy	Elektrárna	Komořany	hnědé uhlí	Vysokoteplotní
ČEZ	Elektrárna	Mělník II	hnědé uhlí	Vysokoteplotní
ČEZ	Elektrárna	Ledvice	hnědé uhlí	Fluidní
ČEZ	Elektrárna	Tisová	hnědé uhlí	Vysokoteplotní
Veolia energie ČR	Elektrárna	Třebovice	černé uhlí	Vysokoteplotní
ČEZ	Elektrárna	Poříčí	hnědé uhlí	Fluidní
ČEZ	Elektrárna	Tisová II	hnědé uhlí	Vysokoteplotní
ČEZ	Elektrárna	Hodonín	hnědé uhlí	Fluidní
Sokolovská uhelná, právní nástupce	Teplárna	Vřesová	hnědé uhlí	Vysokoteplotní
Pražská teplárenská	Teplárna	Praha – Malešice	černé uhlí	Vysokoteplotní
Plzeňská teplárenská	Teplárna	Plzeň	hnědé uhlí	Vysokoteplotní
ČEZ	Teplárna	Mělník I	hnědé uhlí	Vysokoteplotní

4.2. Uhelná škvára

Vysokoteplotní uhelná škvára je nespalitelným zbytkem vzniklým v topeništích při vysokoteplotním spalování uhlí. Vysokoteplotní uhelná škvára je odpadní produkt, který se vyznačuje značnou nehomogenitou a možným obsahem většího množství škodlivin. Před použitím škváry do betonu je doporučeno ponechat materiál nahromaděný na haldách po dobu šesti měsíců. Ponechání škváry na haldách má velký vliv na použitelnost jako příměsi do betonu. Na haldách dochází k vyluhování rozpustných solí ze škváry, které by potenciálně mohly degradovat beton tvorbou výkvětů. Dále jsou vyluhovány a oxidovány sloučeniny síry. Doporučená sypná hmotnost škváry je v rozmezí 400-850 kg·m⁻³ při frakci do 16 mm [25].

Dvě třetiny amorfnní fáze vysokoteplotní uhelné škváry určují její použitelnost, která je dána obsahem oxidu vápenatého CaO, oxidu křemičitého – SiO₂ a oxidu hořečnatého MgO. Zbytek obsahu uhelné škváry je tvořen, oxidem hlinitým a menším množstvím dalších sloučenin. Dalšími důležitými faktory, které musí být zohledněny při použití uhelné škváry, jsou obsah síranů a zejména obsah sulfidů [26]. Maximální povolený obsah hořlavých látek v objemu uhelné škváry je 10 %.

Tab. 6: Přibližné složení některých vysokoteplotních škvár [4].

Chemické složení vysokoteplotní uhelné škváry	
CaO	26-45 %
SiO ₂	25-45 %
Al ₂ O ₃	4-15 %
Fe ₂ O ₃	<1,5 %
MgO	4-15 %
S ⁻	<3,0 %

4.2.1. Použití vysokoteplotní uhelné škváry

Použití vysokoteplotní uhelné škváry jako příměsi do cementových kompozitů způsobuje snížení počátečních pevností při nižších teplotách, vlivem snížení vývinu množství hydratačního tepla. Ve ztvrdlém stavu směsi zvyšuje poměr pevnosti v tahu za ohybu k pevnostem v prostém tlaku. Vynikající

vlastností uhelné škváry je zvýšení odolnosti směsi vůči chemicky agresivnímu prostředí. Zejména odolnosti vůči chloridům a sulfátům [27].

Dle článku [25] má pucolánový charakter škváry negativní vliv na krátkodobé pevnosti směsi v tlaku. Zároveň však zvyšuje dlouhodobé pevnosti a značně omezuje vznik smršťovacích trhlin. V dané práci byla zvolena míra nahrazení pojiva uhelnou škvárou na 20 a 40 %. Z hlediska dlouhodobých pevností se osvědčila náhrada 20 % z hmotnosti cementu. Testováním bylo taktéž potvrzeno snížení vzniku smršťovacích trhlin při náhradě 40 % cementu uhelnou škvárou o jemnosti mletí 300 m²/kg [25].

4.3. Drcený skelný recyklát

Sklo je amorfnní pevná látka, která vznikla ztuhnutím taveniny bez krystalizačních pochodů. Používané suroviny pro výrobu skla jsou odlišné dle požadovaných vlastností finálního produktu. Obecně jsou hlavními základními surovinami pro výrobu skla: křemičitý písek, voda, potaš (uhličitan draselný) a vápenec.

Skelný recyklát používaný v rámci této diplomové práce jako druhotná surovina je směs obalového a plochého skla. Jedná se o nejlevnější a nejrozšířenější typ skla, který vykazuje po technické stránce průměrné vlastnosti ve všech sledovaných vlastnostech. Typicky je tento typ skla používán pro výrobu lahví, plochého okenního skla nebo levného užitkového skla.

Tab. 7: Přibližné složení drceného skelného recyklátu [4].

Chemické složení plochého a obalového skla	
CaO	10-15 %
SiO ₂	70-75 %
Na ₂ CO ₃	10-15 %
Ostatní látky	0-5 %

4.3.1. Použití mletého skelného recyklátu

Ploché a obalové sklo je nejběžnějším vyráběným typem skla. Zejména z tohoto důvodu tvoří více jak dvě třetiny objemu veškerého skelného odpadu. Jemně mletý skelný recyklát vykazuje v cementové matici s obsahem portlanditu vysokou pucolánovou aktivitu. Pucolánový charakter je do značné míry ovlivněn velikostí částic. Ve článku [25] je zmíněna hodnota hranice velikosti částic na

75 μm . Při použití druhotné suroviny s vysokým obsahem amorfního SiO_2 je však třeba brát zřetel u cementových směsí na možnost vzniku alkalickokřemičité reakce, při níž dochází k objemovým změnám. Alkalicko-křemičitá reakce je nežádoucí zejména u konstrukcí, kterým vlivem objemových změn doprovázejících ASR hrozí tvorba defektů vedoucí až ke kolapsu konstrukce. Ve výplňových těsnících injektážích tato reakce není kritickým faktorem. Aby docházelo k alkalickokřemičité reakci je třeba ve směsi zdroj amorfního SiO_2 , volných alkálií a vody v kapalném stavu. Dle [25] je limitní velikost částic, při níž nedochází k alkalickokřemičité reakci 300 μm . Dále je zde proveden experiment, při němž je skelný recyklát používán jako náhrada pojivové složky silikátové matrice. Míra náhrady zde byla určena na 20 a 40 % a zároveň byla testována optimální zrnitost specifikována měrným povrchem částic. Z hlediska stanovených pevností po 28 dnech byla zvolena jako optimální 40% náhrada cementu skleným recyklátem o měrném povrchu 300 a 400 $\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$.

4.4. Slévárenské písky

Slévárenské písky jsou zrnité přírodní horniny světlého zabarvení, které se využívají ve slévárenském průmyslu za účelem výroby forem a jader odlévacích forem. Hlavními sledovanými parametry zajišťující použitelnost slévárenských písků jsou zejména žárovzdornost, pevnost a vhodná zrnitost. Pevnost je určena kvalitou a kvantitou vazné složky. Vhodná zrnitost je pak dána empiricky ověřenou křivkou zrnitosti. Přírodní slévárenské písky vykazují značně rozdílné základní parametry (většinou v závislosti na různých místech těžby). Tato značná nevýhoda přírodních slévárenských písků je v současnosti řešena náhradou křemennými písky synteticky míchanými s vhodným pojivem. Nejčastěji používané pojivo je bentonit. Ve slévárenské praxi se však můžeme potkat s křemennými písky pojenými furanovými pryskyřicemi nebo vodním sklem [28].

4.4.1. Použití slévárenských písků

Křemenné písky pojené bentonitem nebo vodním sklem po průchodu žárovým procesem ztrácí svoje původní vlastnosti a nelze je ve větší míře znovu použít. Ve slévárenství lze tento materiál pouze regenerovat, kdy dochází k odstranění zbytků pojiv a výsledný regenerovaný materiál je použit znovu jako ostřivo. Regenerovaný materiál však nedisponuje vlastnostmi původního

materiálu, proto je využíván minimálně. Křemenné písky pojené bentonitem jsou v praxi nejčastěji používány jako druhotná surovina ve stavebnictví jako plnivo, resp. náhrada jemnozrnných frakcí při výrobě malt a betonů. Doporučená míra náhrady jemnozrnných frakcí je v rozmezí 20–30 %. Zároveň je třeba brát zřetel na vyšší jemnost zrn slévárenských písků ve srovnání s běžně těženými písky [28].

Slévárenské písky obsahují zrna frakce menší než 4 μm a nacházejí uplatnění jako mikroplnivo, vyplňující prostor mezi hrubšími zrny cementu. Použitím takto jemné frakce je dosaženo vyšší vodonepropustnosti, a tak i ke zvýšení odolnosti vůči chemické korozi výsledného kompozitu [29].

4.5. Bentonit

Bentonit je sedimentační hornina vzniklá zvětráváním čediče. Vyznačuje se vysokým obsahem jílových minerálů, vynikajícími sorpčními vlastnostmi a vysokou schopností výměny kationtů. Obsah jílových minerálů – zejména montmorillonitické skupiny, má za následek výborné plastické vlastnosti a vysokou schopnost bobtnání (až 300 % svého původního objemu při kontaktu s vodou). Chemická a mineralogická složení bentonitů jsou závislá na místě ložiska těženého materiálu [4].

Rozlišujeme aktivované a neaktivované bentonity.

4.5.1. Neaktivované bentonity

Přírodní neaktivované bentonity jsou pro další využití pouze vysoušeny a dále zdobňovány mletím na potřebné jemnější frakce. V přírodě se setkáváme zejména s vápenohořečnatými neaktivovanými bentonity.

Ve stavebním průmyslu nachází bentonit využití při přípravě řídkých suspenzí používaných ve výrobním procesu litím (zejména keramické hmoty). Dále se využívá jako plastifikační přísada do malt a omítek [30].

4.5.2. Aktivované bentonity

Aktivované bentonity jsou vyráběny ze selektivně těžených hornin, které jsou dále homogenizovány, šetrně sušeny a následně mlety. Do přirozeně vlhkého těženého bentonitu je přidáván uhličitan sodný v hnětacích strojích.

Ve stavebnictví je bentonit využíván jako plastifikační přísada malt, betonů a keramických hmot, a také jako pufr pro zvýšení nepropustnosti sypkých zemin [1].

4.5.3. Použití bentonitu

Dle práce [32] je ideální množství přídavku bentonitu do čerstvé silikátové směsi v rozmezí 2-3 %. Bentonit je použit pro svoji schopnost do značné míry omezovat bleeding čerstvé a segregaci směsi. Bleeding a segregace kameniva čerstvé směsi jsou zejména u injektážních směsí často zkoumanými jevy. Dávka bentonitu pro účel výrazného snížení bleedingu je 2-10 %. Tato dávka však bleedingu zcela nezamezuje. Dávka 10-18 % zajišťuje čerstvou silikátovou směs proti bleedingu zcela. Tato dávka však již výrazně snižuje pevnosti v tahu za ohybu i pevnosti v tlaku. Je tak třeba brát zřetel na požadované vlastnosti. Při požadavku na zajištění stability čerstvé směsi a nižší pevnosti je tedy možná dávka vyšší až 20 %. Pakliže jsou požadavky na vyšší pevnosti, je trend dávkování bentonitu do čerstvé směsi opačný, kdy je zároveň pro efekt snížení bleedingu potřebné minimální množství 2 % bentonitu [32].

III. Cíl práce

Cílem práce je vývoj nových injektážních hmot pro rubovou injektáž kanalizačních stok. Práce má dále několik dílčích cílů.

Dílčím cílem je výběr a charakterizace potenciálně vhodných primárních surovin a jejich následná náhrada nebo modifikace druhotnými surovinami. Druhotné suroviny budou vybírány pro účel náhrady plniv a pojivových složek primárních surovin.

Dalším dílčím cílem je návrh a experimentální ověření surovinových variant injektážních směsí složených ze základních vstupních materiálů a návrh a experimentální ověření surovinové varianty s náhradou plnivé i pojivé složky druhotnými surovinami.

Stěžejním cílem je formulace optimálního složení navrhované hmoty pro účel rubové injektáže kanalizačních stok včetně orientačního ekonomického vyhodnocení.

IV. Experimentální část

V následující části dokumentu je řešena experimentální část diplomové práce, která je pro přehlednost řešena v jednotlivých etapách uvedených ve schématech níže.

1. Metodika experimentální části

Experimentální část práce je rozdělena do čtyř etap. První etapa je zaměřena na rozbor vstupních surovin. Soubor testovaných surovin bude sestaven na základě poznatků teoretické části práce. V první etapě jsou testovány primární i substituční suroviny. Cílem první etapy je výběr vhodných vstupních surovin pro návrh receptur.

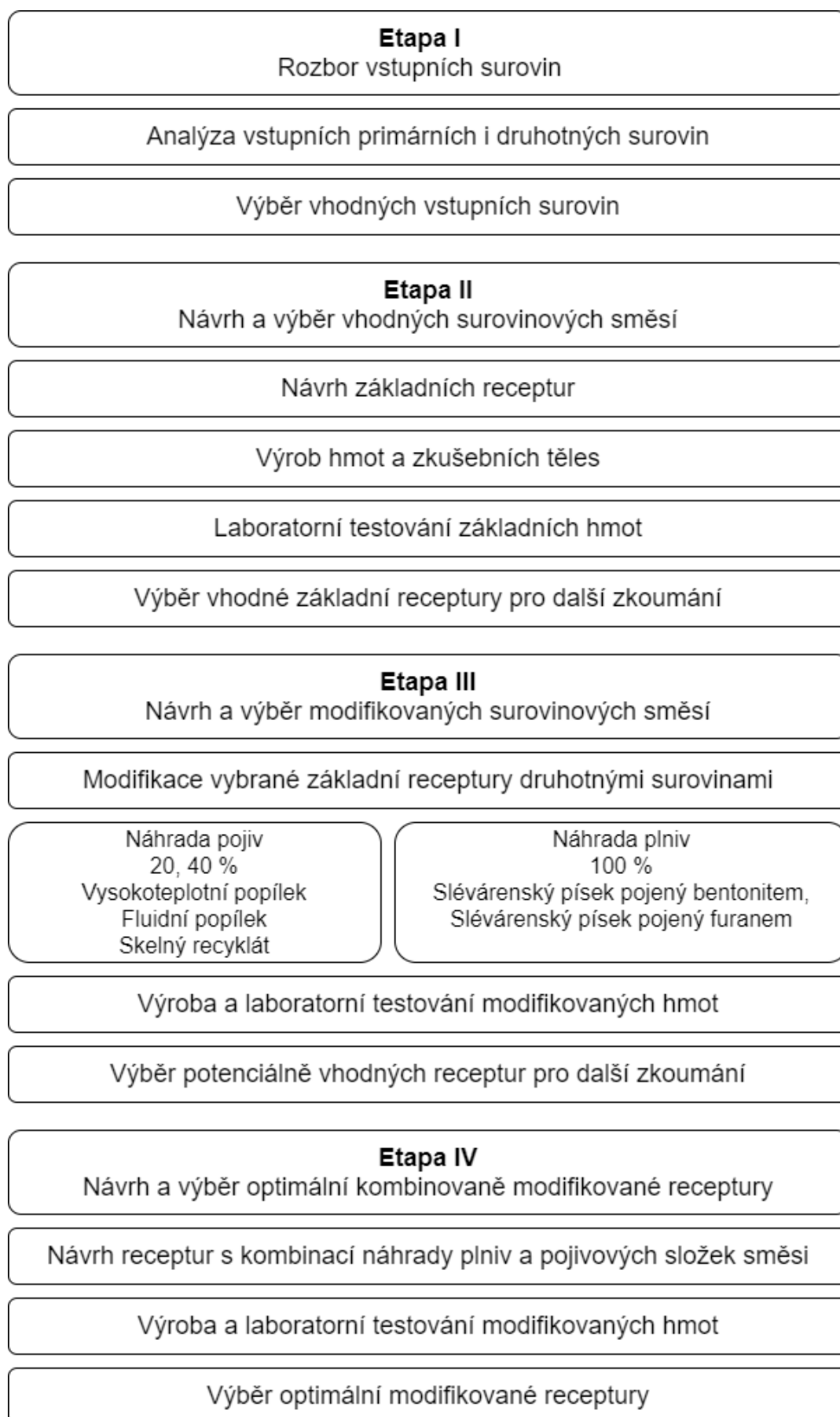
Druhá etapa se zabývá návrhem a výběrem vhodných surovinových směsí. Návrh receptur využívá surovin vybraných v první etapě. Z navržených receptur budou laboratorně vyrobeny hmoty a zkušební tělesa. Bude provedeno zkoumání fyzikálně mechanických vlastností vytvořených hmot a zkušebních vzorků. Cílem

druhé etapy je výběr optimální základní receptury, která bude v dalších fázích této práce modifikována.

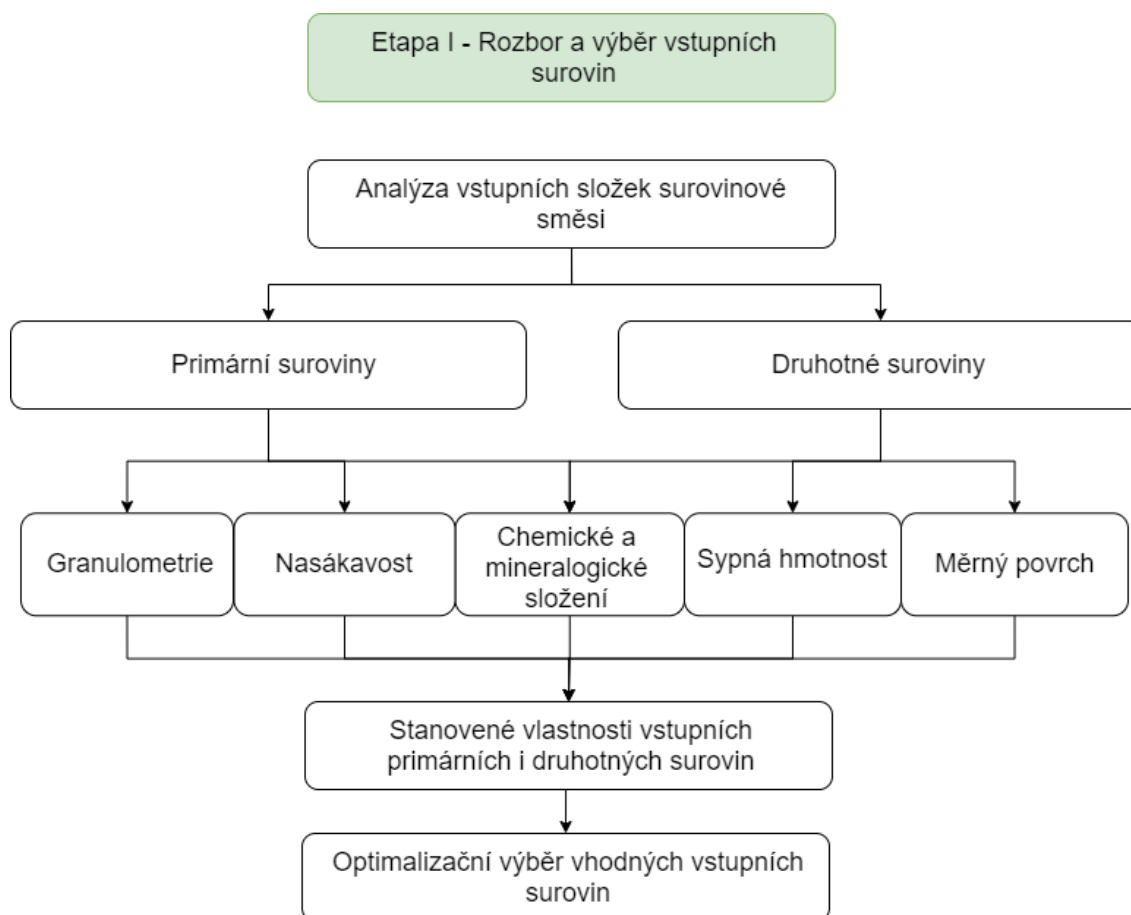
Třetí etapa se bude věnovat modifikaci vybrané základní receptury druhotnými surovinami. Budou nahrazována zvlášť plniva a zvlášť pojivové složky základní receptury. Míra nahrazení vstupních složek byla určena na základě teoretických poznatků. Dle navržených receptur budou laboratorně vytvořeny zkušební hmoty, na kterých budou stanoveny požadované vlastnosti. Na základě výsledků budou vybrány vhodné modifikované receptury pro další zkoumání.

Čtvrtá etapa se bude zabývat návrhem a výběrem kombinovaně modifikované receptury druhotnými surovinami. Proběhne návrh několika receptur s kombinací náhrad vstupních složek směsi. Vlastnosti vytvořených hmot budou laboratorně testovány. Soubor laboratorních zkoušek bude rozšířen. Na základě stanovených vlastností a vyhodnocených výsledků bude vybrána optimální modifikovaná receptura.

Schéma metodiky práce



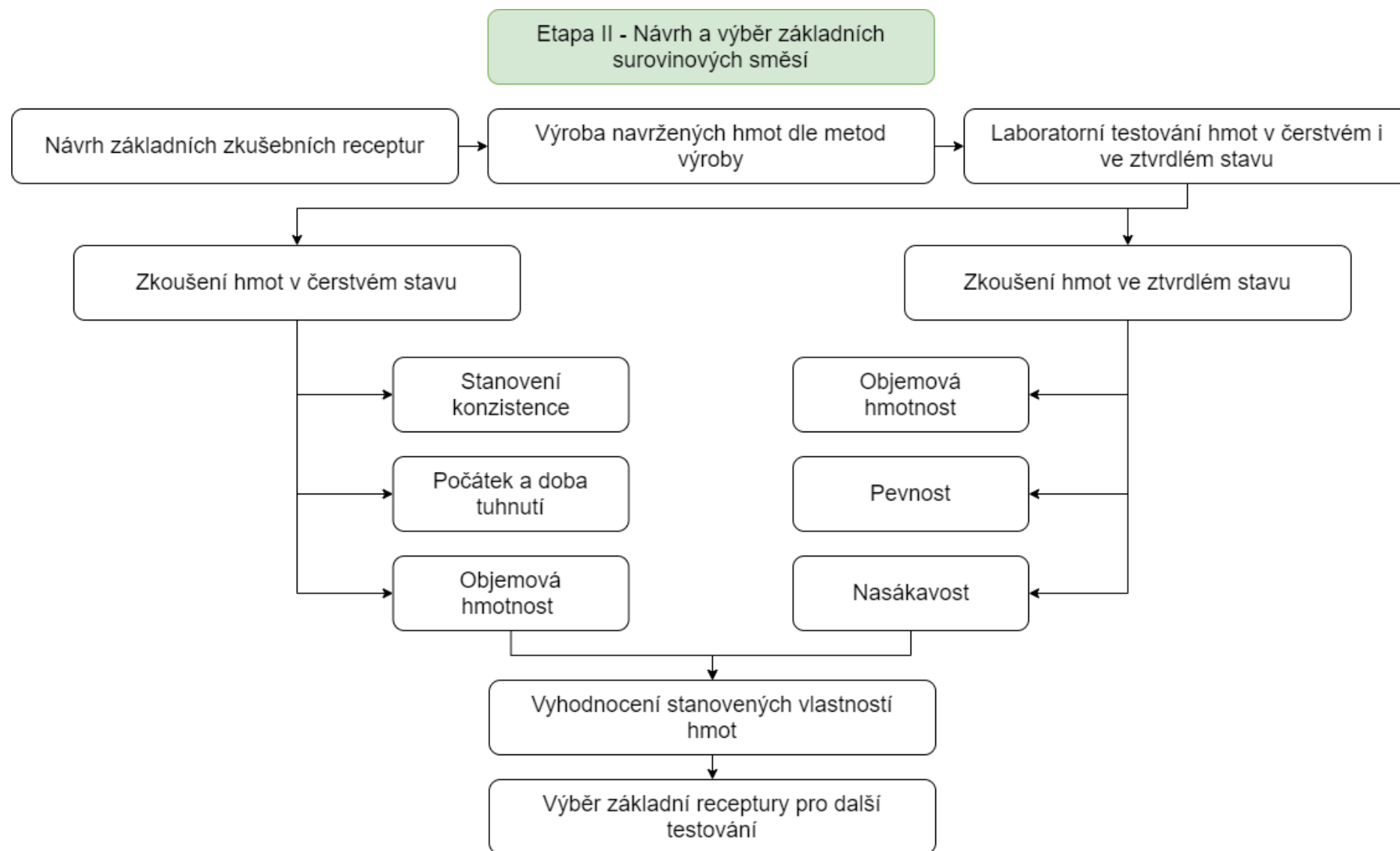
1.1. Etapa I – Rozbor vstupních surovin



Etapa I

V rámci Etapy I proběhne rozbor a na něj navazující výběr vhodných vstupních surovin pro návrh vyvíjené injektážní hmoty. V rámci této etapy budou zkoumány nejprve primární vstupní suroviny a současně proběhne analýza druhotných surovin. V rámci testování vstupních surovin bude stanovena zrnitost, nasákavost, chemické a mineralogické složení, sypná hmotnost (volně sypaná) a měrný povrch. Z provedených zkoumání bude sestaven soubor stanovených vlastností veškerých potenciálně vhodných vstupních surovin, na jehož základě proběhne optimalizační výběr vhodných vstupních surovin. Z vybraných vstupních surovin budou v rámci Etapy II navrhovány a sestavovány zkušební receptury.

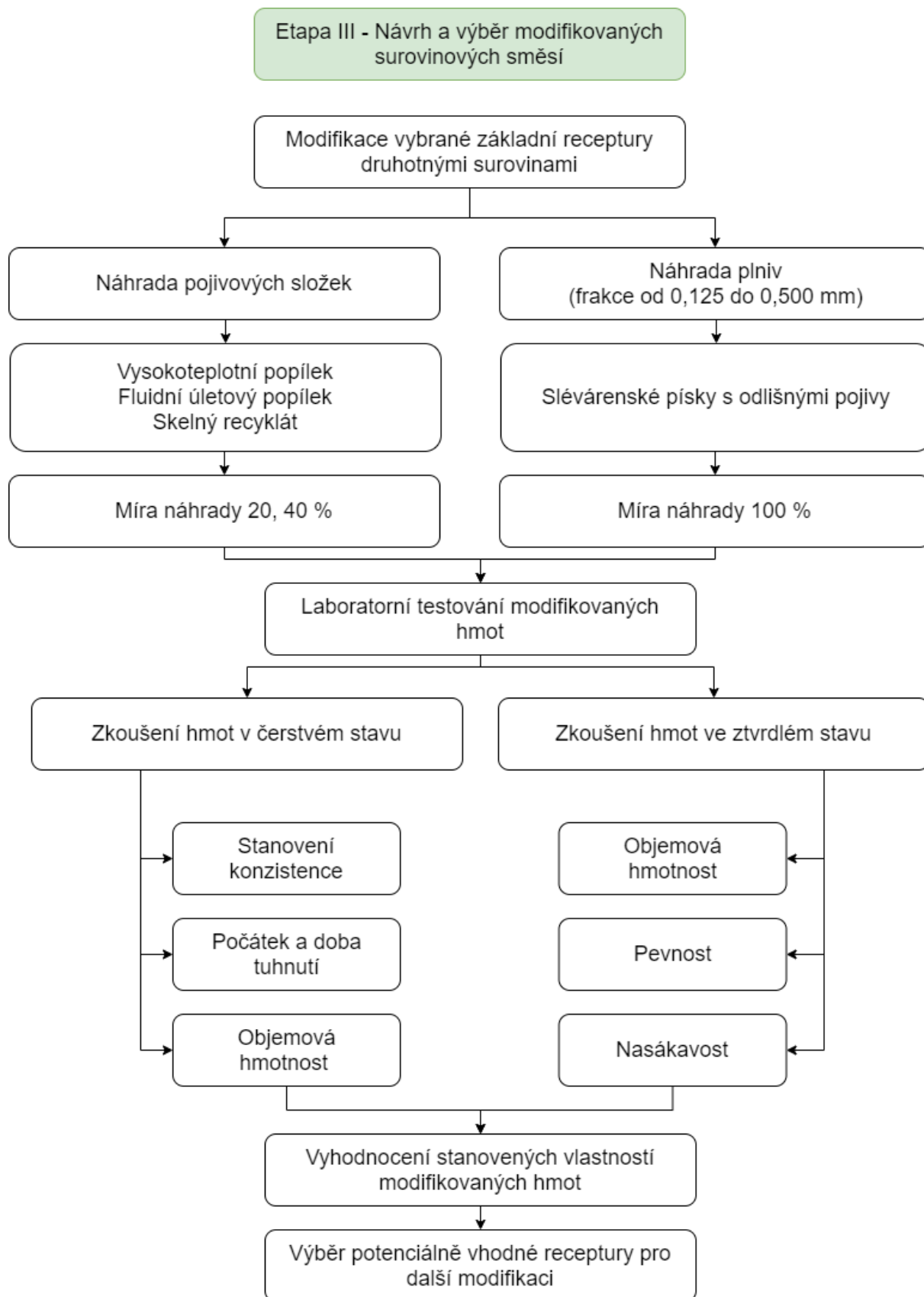
1.2. Etapa II – Návrh a výběr základních surovinových směsí



Etapa II

V rámci Etapy II budou navrhovány základní receptury, určené pro další zkoumání. Návrh receptur proběhne na základě získaných výsledků Etapy I. Dále bude navázáno na bakalářskou práci, v rámci které proběhl výběr optimálních receptur, sestavených z primárních surovin. Dle navržené metodiky výroby a uložení zkušebních těles proběhne zpracování čerstvých hmot. V souladu s metodikou zkoušení budou stanoveny dílčí parametry hmot v čerstvém i ve ztvrdlém stavu. Bude stanovována konzistence, počátek a doba tuhnutí a objemová hmotnost v čerstvém stavu. Ve ztvrdlém stavu bude na zkušebních tělesech stanovena objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu pevnost v tahu za ohybu a tlaku a nasákavost ztvrdlých hmot. Po provedení zkoumání budou stanovené vlastnosti hmot vyhodnoceny. Cílem Etapy II je výběr základní receptury, která bude v dalších fázích experimentální části práce modifikována druhotnými surovinami.

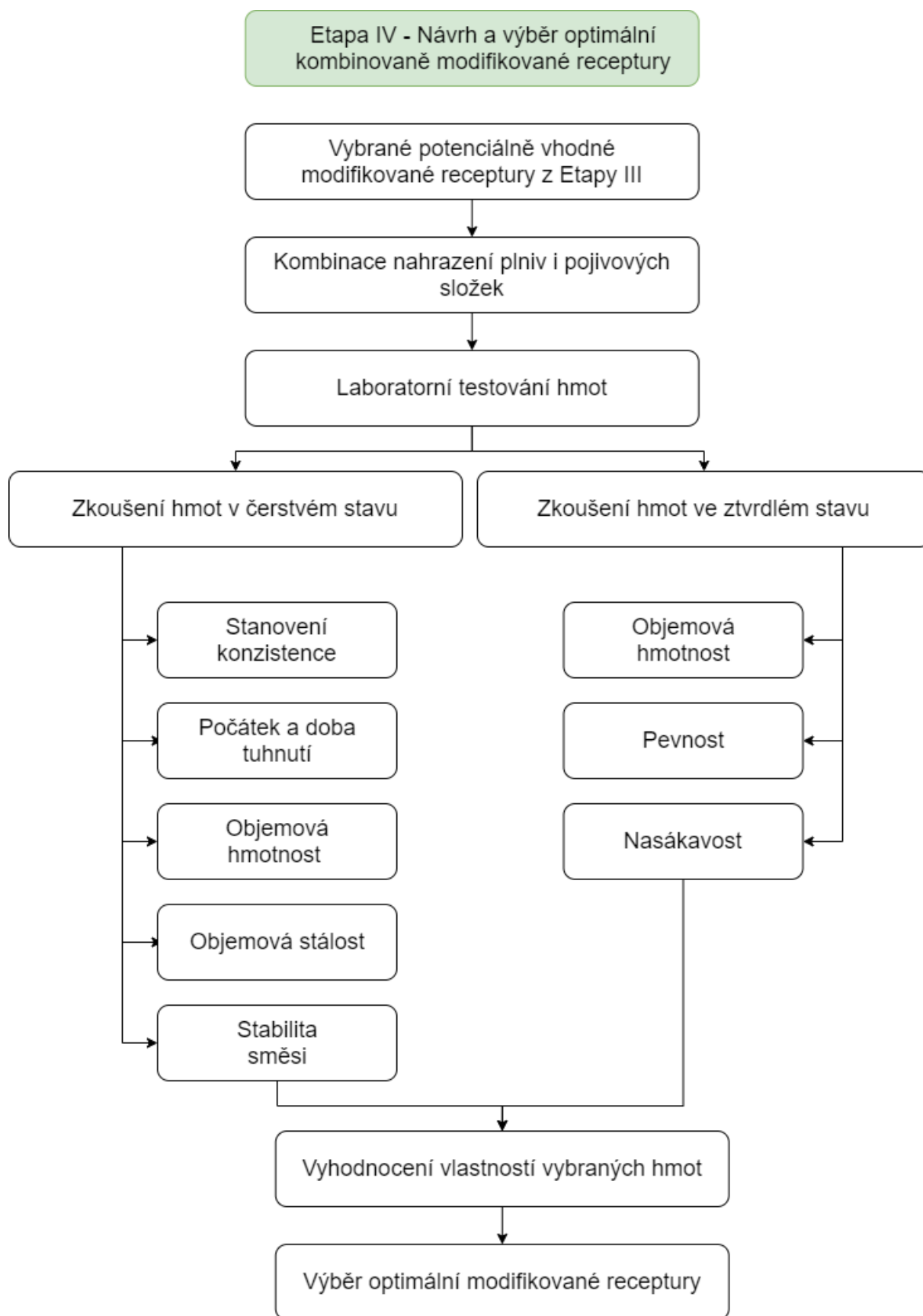
1.3. Etapa III – Výběr optimalizované receptury s využitím druhotných surovin



Etapu III

V předchozí etapě byla vybrána základní receptura. V rámci Etapy III bude vybraná základní receptura modifikována druhotnými surovinami. Nahrazením základních vstupních složek druhotnými surovinami nově vzniknou modifikované receptury. Na základě teoretických znalostí byla určena míra náhrady vstupních surovin nahrazujících pojivové složky na 20 a 40 %. Míra nahrazení plniv frakce 0,125 až 0,500 mm byla 100%. Z navržených receptur budou vytvořeny zkušební hmoty, které budou dále testovány v čerstvém i ve ztvrdlém stavu. V čerstvém stavu bude stanovena konzistence hmot, počátek a doba tuhnutí a objemová hmotnost. Ve ztvrdlém stavu byla stanovena objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku a nasákavost. Stanovené vlastnosti modifikovaných hmot budou vyhodnoceny. Na základě vyhodnocení stanovených vlastností budou vybrány potenciálně vhodné modifikované receptury pro další testování.

1.4. Etapa IV – Návrh a výběr optimální kombinovaně modifikované receptury



Etapu IV

Cílem předchozí etapy byl výběr potenciálně vhodných modifikovaných receptur, ve kterých byla nahrazena vždy pouze složka pojiv nebo složka plniv. V Etapě IV proběhne návrh kombinovaně modifikovaných receptur, ve kterých budou nahrazena plniva i pojiva. Z navržených hmot budou vytvořeny zkušební hmoty, na kterých budou stanovovány požadované vlastnosti. V čerstvém stavu bude stanovena konzistence, počátek a doba tuhnutí, objemová hmotnost, objemová stálost a stabilita směsi. Objemová stálost bude ověřena kontinuálním hydrostatickým měřením. Stabilita modifikovaných směsí bude porovnávána dle množství dekantované vody v odměrném válci. Ve ztuhlém stavu hmot bude stanovena objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku a nasákavost zkušebních těles. Stanovené vlastnosti hmot budou vyhodnoceny a na základě stanovení proběhne výběr optimální receptury.

1.5. Metodika vytváření a ošetřování zkušebních vzorků

Výroba, uložení a ošetřování zkušebních těles, prováděné v rámci etap II a III, jsou popsány v následující kapitole.

Výroba a uložení zkušebních vzorků

Zkušební vzorky byly vyráběny mícháním v laboratorní míchačce. Míchání bylo prováděno v souladu s normou ČSN EN 196-1. Plnění míchačky však bylo modifikováno. Na základě provedených míchání se osvědčila metoda, kdy byla do míchací nádoby přesunuta veškerá navážená záměsová voda, do které se postupně přidávala předem zhomogenizovaná suchá směs. Doba míchání byla 5 minut 45 vteřin až 6 minut. Po zamíchání byla ověřena konzistence v souladu s normou ČSN EN 12 715 průtokoměrem (Marshův kužel).

Pro zkoušení objemových změn hydrostatickým vážením byla hmota naplněna do polypropylenových sáčků a následně zavakuována.

Pro stanovení pevností v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku byla směs plněna do zkušebních forem o rozměrech 40×40×160 mm. Z každé směsi byly vytvořeny tři trojformy. Dostatečné zhutnění směsi ve formách bylo dosaženo poklepem formy. Byla tak vytvořena zkušební tělesa pro zjištění pevností po 7, 28 dnech a zároveň tělesa pro zkoumání dlouhodobých vlastností. Naplněné formy byly přikryty neprodyšnou fólií. Odformování bylo prováděno po dvou až třech dnech, kdy byly zaručené dostatečné pevnosti zkušebních vzorků. Po odformování byly veškeré vzorky uloženy do vodního prostředí v laboratorních podmínkách.

Pro stanovení míry odstoje vody z čerstvé směsi, byly čerstvé hmoty nalévány do válců o objemech 1 l. Hrdla odměrných válců byla přikryta smršťovací neprodyšnou fólií.

1.6. Metody zkoušení

1.6.1. Prováděné zkoušky na vstupních substitučních surovinách

Na vstupních substitučních surovinách byly v rámci Etapy I provedeny základní fyzikálně chemické zkoušky, pro stanovení základních parametrů.

Laserová analýza velikosti částic

Pomocí laserové difrakční analýzy byla stanovena zrnitost druhotných surovin. Laserová difrakční analýza byla provedena ve výzkumném centru AdMaS. Při stanovování velikosti částic je měřen úhel ohybu emitovaného světla (difrakce). Emitované světlo prochází pouzdrem s připraveným vzorkem. Stanovený úhel ohybu vyzařovaného světla je přímo úměrný velikosti částic. Přesnost měření suché disperze všech laserových zařízení odpovídá ISO 13 320.

Stanovení zrnitosti – síťový rozbor

Stanovení zrnitosti bylo prováděno taktéž síťovým rozbořem. Stanovení byla prováděna dle ČSN EN 12192-1.

Nasákavost

Nasákavost je jednou ze základních sledovaných vlastností všech látek. Potřebné množství zkoumané suroviny je ponecháno po dobu minimálně 24 hodin v destilované vodě a následně přefiltrováno přes filtrační papír. Filtrační papír obsahující zachycenou surovinu je vysušen v sušárně. Nasákavost se stanovuje jako rozdíl hmotnosti vysušené a plně nasycené suroviny. Metodika stanovení nasákavosti byla prováděna v souladu s ČSN 72 2448. Zároveň byla při stanovení nasákavosti surovin zohledněna norma ČSN EN 14617-1.

Chemické složení

Na veškerých zkoumaných druhotných surovinách, bylo stanoveno chemické složení. Chemické složení je jedním ze základních parametrů surovin, na jejichž základě se s danou surovinou pracuje. Provedení stanovení chemického složení vstupních surovin bylo provedeno externí zkušební laboratoří.

Sypná hmotnost

Sypná hmotnost byla stanovena dle normy ČSN EN 1097-3. Sypná hmotnost materiálu je stanovena pomocí nádoby o známém objemu i váze.

Měrná hmotnost

Měrná hmotnost byla stanovena pyknometricky. Využívá se kapaliny o známé hustotě, která pevnou látku dobře smáčí. Dále tato kapalina nesmí látku rozpouštět a její hustota musí být menší, než je hustota měřené látky. Pro tyto účely se v praxi

používají látky s malým povrchovým napětím. Z naměřených hodnot objemu a hmotností se určí měrná hmotnost pevné látky.

Měrná hmotnost byla stanovena pomocí héliového pyknometru AccuPyc II 1340 Pycnometer ve výzkumném centru AdMaS. Zkouška byla provedena dle norem ČSN EN 1097-6 a ČSN EN 1097-7.

Měrný povrch

Jemnost mletí částic druhotných surovin byla stanovena v souladu s normou ČSN EN 196-6, pomocí Blainova přístroje. Při zkoušce je měřen čas, za který projde definované množství vzduchu kapslí se zhuštěným vzorkem. Pro stanovení měrného povrchu sypkých částic, bylo využito vybavení výzkumného centra AdMaS.

1.6.2. Úpravy použitých substitučních surovin

Před možným použitím substitučních surovin byla provedena úprava jejich základních vlastností, zejména úprava frakcí. Dále musely být veškeré složky pro vhodné spolupůsobení důkladně homogenizovány.

Mletí surovin

Suroviny pro náhradu plniv byly upraveny mletím na požadovanou frakci. Mletí probíhalo v laboratorním čelistovém a kulovém mlýně. Byl použit čelistový mlýn Retsch model BB200 Mangan a omílací buben Brio Hranice OM 20f, který se pro účel mletí druhotných surovin ukázal jako optimální řešení. Obdobně byly upravovány suroviny nahrazující pojivovou složku (CEM I 42,5 R). Byla sledována závislost jemnosti mletí na vlastnostech výsledné navrhované směsi.

Homogenizace surovin

Pro správné spolupůsobení všech složek obsažených v navrhované směsi, byly veškeré vstupní suroviny zhomogenizovány. Homogenizace byla provedena pomocí kontejnerového homogenizátoru typ HMG 14/2 vyrobená společností VUGI Brno.

1.6.3. Ověřované vlastnosti hmoty v čerstvém stavu

Na zkušebních vzorcích byly v čerstvém stavu ověřovány tyto běžné vlastnosti:

Stanovení zpracovatelnosti

Zpracovatelnost a doba zpracovatelnosti jsou jednou z klíčových parametrů při práci s injektážními hmotami. Zpracovatelnost je do značné míry ovlivňována použitým vodním součinitelem. Správné množství použité záměsové vody bylo ověřováno na střešacím stolku. Zkouška byla prováděna v souladu s normou ČSN EN 1015-3. Při zkoušce byl využíván komolý kužel o výšce $60 \pm 0,5$ mm, vnitřním průměru horní

podstavy $70\pm 0,5$ mm a vnitřním průměru spodní podstavy $100\pm 0,5$ mm [1]. Na stříšacím stolku bude stanovena konzistence modifikovaných cementových past po 15 rázech. Dále bude na témže zařízení stanovena konzistence rozlitím čerstvých injektážních hmot.

Stanovení počátku a doby tuhnutí

Zkouška byla prováděna pomocí automatického měřicího Vicatova přístroje dle normy ČSN EN 196-3 [34].

Objemová hmotnost v čerstvém stavu

Objemová hmotnost v čerstvém stavu byla provedena dle ČSN EN 12390-6. Stanovení objemové hmotnosti proběhlo výpočtem z rozdílů hmotností forem naplněných čerstvou směsí a hmotnosti prázdných forem o známém objemu [35].

1.6.4. Ověřované vlastnosti hmoty ve ztvrdlém stavu

Na zkušebních vzorcích byly ve ztvrdlém stavu ověřovány tyto běžné vlastnosti:

Objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu

Objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu byla stanovena dle ČSN EN 12390-7 z podílu hmotnosti těles v nasyceném stavu a jejich vypočtených objemů z naměřených rozměrů. Hmotnosti byly měřeny na vahách s přesností 0,001 kg. Rozměry byly určeny posuvným měřítkem s přesností měření 0,01 mm [36].

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu

Pevnosti v tahu za ohybu byly stanoveny dle normy ČSN EN 12390-5. Pro stanovení ohybových vlastností byla zhotovena zkušební tělesa o rozměrech $160\times 40\times 40$ mm. Stanovení ohybových pevností bylo provedeno pomocí tříbodového ohybu při rozpětí podpor 100 mm. Pevnost v tahu za ohybu byla vypočtena z kritické síly, při které došlo k porušení vzorku [37].

Stanovení pevnosti v tlaku

Pevnosti v tlaku byly stanoveny na fragmentech vzniklých při zkoušení pevnosti v tahu za ohybu. Zkoušení proběhlo v souladu s ČSN EN 12390-4. Pevnosti v tlaku byly určeny z kritického napětí při porušení vzorku [38].

Sledování objemových změn kontinuálním hydrostatickým vážením

Pro sledování objemových změn čerstvé tuhnoucí a tvrdnoucí směsi v čase bylo využito kontinuální hydrostatické vážení. Vzorky byly převedeny do polymerních vodonepropustných sáčků, které byly zataveny a zavakuovány. Vzorek byl zvážen na

laboratorních vahách za sucha a následně zavěšen na závěs vah tak, aby byl kompletně ponořený pod vodou.

Měřicí zařízení bylo umístěno v klimatizované místnosti o konstantních laboratorních podmínkách.

Stanovení množství dekantované vody

Dekantace, odстой směsi nebo také sedimentace je stanovována v odměrném válci o objemu 1 l o vnitřním průměru 60 mm. Zkouška byla prováděna dle ČSN EN 12716. Po dané době se pomocí rysek na odměrném válci určuje množství odstáté vody. Pro účel injektážní hmoty je požadováno maximální množství dekantované vody do 5 % objemu. Směsi s množstvím odstáté vody menším nežli 5 % označujeme jako stabilní.

2. Etapa I – Rozbor vstupních surovin

Experimentální část diplomové práce vychází z poznatků uvedených v teoretické části práce. Pro navrhování injektážní směsi bylo třeba zejména průzkumu prostředí a možných vlivů působících na navrhovanou hmotu. Prostoru kanalizačních stok je typické zejména biologickými procesy způsobující síranovou korozi použitých konstrukčních materiálů. Historicky používanými materiály pro stavbu kanalizačních stok byly zejména kanalizační cihly a železobeton či prostý beton. Beton v současné době čím dál více nahrazuje tradiční zdící materiály. Zároveň je odolnost stokových systémů zvyšována pomocí ochranných vyzdívek z vhodných materiálů – zejména kameniny nebo čediče, který který jsou odolné vůči okolním vlivům a přítomné abrazi.

Dále bylo za potřebí zpracovat problematiku injektážních technologií a zejména technologii rubové injektáže. Navrhovaná hmota je vyvíjena pro použití jako sanační materiál zpracováváný právě technologií rubové injektáže.

Tato etapa navazuje na bakalářskou práci [4], ve které byla stanovena optimální receptura sestavena z primárních surovin. Tato receptura bude ověřena jako optimální. Stěžejní částí této etapy je rozbor vstupních surovin primárních, ale taktéž rozbor potenciálně vhodných druhotných surovin. Na základě provedeného rozboru vstupních surovin budou v navazujících etapách navrženy zkušební receptury.

2.1. Analýza vstupních složek surovinové směsi

Byla provedena analýza vstupních složek primárních i druhotných surovin. Analyzované druhotné suroviny byly běžně dostupnými surovinami, u kterých nebylo zapotřebí větších nutných předúprav. Typicky byly suroviny pouze drceny či mlety a následně roztříděny na jednotlivé frakce. Frakce byly následně seskládány do křivky zrnitosti stanovené na optimální receptuře sestavené z primárních surovin.

Suroviny byly podrobeny následujícím laboratorním zkoumáním:

- Zrnitost,
- nasákavost,
- chemické a mineralogické složení,
- sypná hmotnost,
- měrný povrch.

2.1.1. Vybrané primární vstupní suroviny

V následující tabulce jsou uvedeny složky vybrané optimální receptury a zároveň v Tab. 11: potenciálně vhodné druhotné suroviny. Výběr těchto surovin proběhl v bakalářské práci [4]. Následně byl výběr proveden znovu v rámci práce diplomové. Seznam vybraných surovin je uveden v Tab. 8:

Tab. 8: Vybrané primární suroviny.

Primární surovina	Označení	Náhrada
Cement CEM I 42,5 R	Cem.	Pojivo
Velmi jemně mletý vápenec	Váp.	Pojivo/Plnivo
Živcové odprašky	Živc.	Plnivo
Bentonit	Bent.	Plnivo
Křemičitý písek PR 33c	PR 33c	Plnivo
Křemičitý písek PR 0,5 - 1,0	PR 0,5 - 1,0	Plnivo
Křemičitý písek GS 13	GS 13	Plnivo

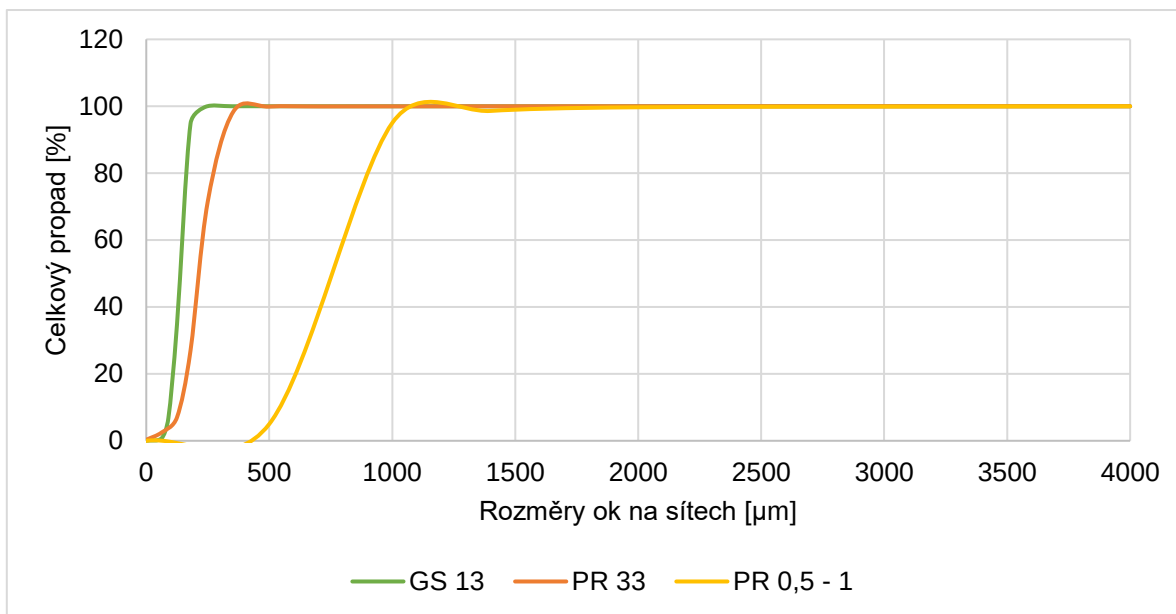
Z vybraných primárních surovin, byly navrženy receptury, z nichž byly dále vybrány a zkoumány tři základní receptury. Tyto receptury byly sestavovány v následující Etapě II.

2.1.2. Analýza primárních surovin

Výše uvedené primární suroviny budou detailněji zkoumány v rámci Etapy I diplomové práce. Zkoumány budou pouze suroviny, které budou v dalších fázích této práce nahrazovány nebo modifikovány. Bude stanovena zrnitost, nasákavost, chemické a mineralogické složení, sytná hmotnost a měrný povrch nahrazovaných primárních vstupních složek.

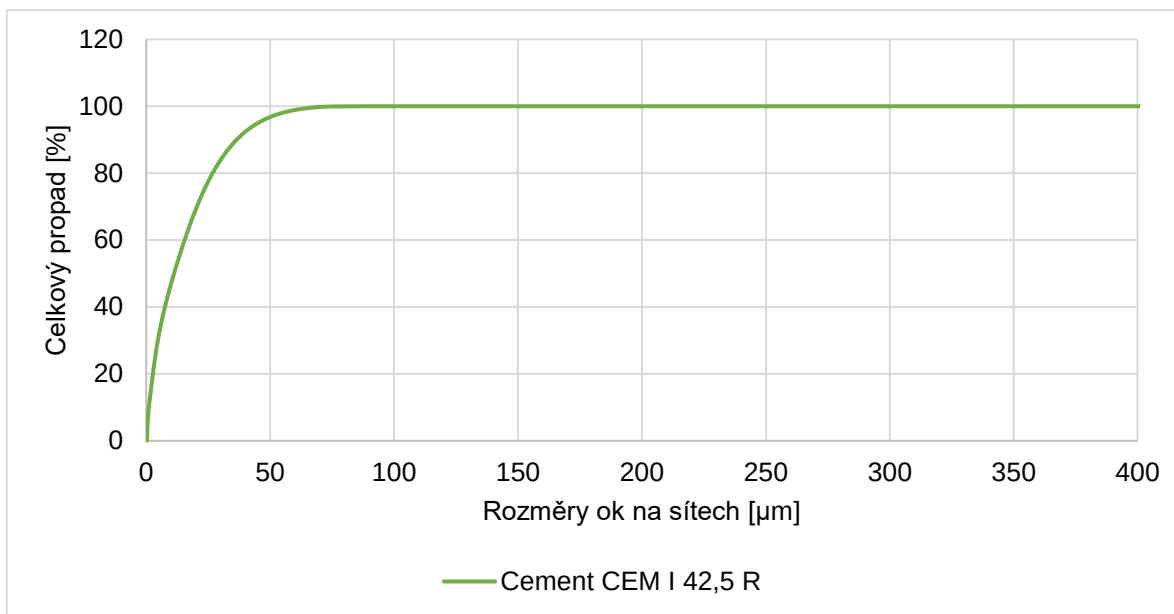
Stanovení zrnitosti

V rámci testování primárních plniv byly provedeny síťové rozbory vstupních složek. Zejména byly analyzovány plnivé složky surovinové směsi. Byly analyzovány tři složky kameniva, označovány jako PR 33, PR 0,5-1,0 a GS 13. Jednalo se o křemičité písky různých frakcí, které byly dále kombinovány v určitém poměru pro dosažení požadované křivky zrnitosti. Mimo jiné bylo třeba zajistit, aby byla zrna maximální frakce do 1,0 mm. Tato podmínka je dána požadavky na injektážní směsi. Dále byla stanovena zrnitost cementu CEM I 42,5 R z cementárny Prachovice. V následujících grafech jsou znázorněny křivky zrnitosti jednotlivých kameniv a pojiva.



Graf č. 1 Stanovené křivky zrnitosti vstupních křemičitých písků.

Zrnitost vstupních plniv byla stanovena pomocí síťového rozboru s rozšířenou sadou sít. Po smíchání frakcí dle návrhu primární receptury, která byla navržena v následující etapě, byla křivka zrnitosti stanovena pomocí laserového granulometru Malvern Mastersizer.



Graf č. 2 Křivka zrnitosti primárního pojiva.

Křivka zrnitosti použitého základního pojiva byla stanovena pomocí laserového granulometru Malvern Mastersizer. V dalších fázích práce bude křivka základního pojiva porovnávána s druhotnými surovinami nahrazujícími pojivové složky.

Fyzikálně mechanické parametry

Sypná hmotnost, měrný povrch a nasákavost základních surovin byly určeny dle kapitoly Metody zkoušení. Stanovené výsledky jsou uvedeny v Tab. 9:

Tab. 9: Fyzikálně mechanické vlastnosti základních surovin.

Označení	Sypná hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Měrný povrch [$\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$]	Nasákavost [%]
Cem.	1000	3370	-
PR 33c	1400	140	5,9
PR 0,5 - 1,0	1500	150	5,9
GS 13	1300	175	6,0

Chemické a mineralogické složení

Chemické a mineralogické složení bylo stanoveno externí zkušební laboratoří.

Chemické složení jednotlivých vstupních materiálů je uvedeno v Tab. 10:

Tab. 10: Chemické složení primárních surovin.

Ozn.	Zastoupení v hm. %									
	Cl	SiO ₂	SO ₃	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	TiO ₂
Cem.	0,023	20,0	3,2	5,00	65,00	3,00	0,81	1,00	0,13	-
PR 33c	-	99,0	-	0,30	0,02	0,03	-	0,02	-	0,05
PR 0,5 - 1,0	-	99,0	-	0,30	0,02	0,03	-	0,02	-	0,05
GS 13	-	99,1	-	0,27	x	0,098	-	x	-	0,38

2.1.3. Analýza druhotných surovin

Uvedené primární suroviny byly v dalších etapách této práce nahrazovány druhotnými surovinami. Pro tuto náhradu byly zvoleny druhotné suroviny uvedené v Tab. 11: Druhotné suroviny pro funkci náhrady plniv bylo nutné předupravit mletím a tříděním na sadě sít.

Tab. 11: Seznam analyzovaných druhotných surovin.

Druhotná surovina	Producent	Označení	Náhrada
Elektrárenský popílek Chvaletice-vysokoteplotní	Sev.en EC	ECH	Pojivo
Elektrárenský popílek Poříčí-fluidní	ČEZ	EPO	Pojivo
Elektrárenský popílek Tušimice-vysokoteplotní	ČEZ	ETU	Pojivo
Elektrárenský popílek Ledvice-fluidní	ČEZ	ELE	Pojivo
Skelný recyklát Vetropack	Vetrop.	SKLO	Pojivo/ plnivo
Slévárenský písek pojený furanem	Arcelor.	Furan.	Plnivo
Slévárenský písek pojený vodním sklem	Arcelor.	Vod. sklo	Plnivo

Na základě teoretických poznatků, chemického složení a zrnitost druhotných surovin uvedených v tabulce výše bylo rozhodnuto, jakou funkci budou suroviny pro navrhovaný účel splňovat – náhrada plniv, či pojivových složek.

2.1.3.1. Vysokoteplotní popílký

Vybranými vysokoteplotními popílký jsou elektrárenské popílký z provozu Chvaletice a Tušimice. Vysokoteplotní popílký z elektrárny Tušimice a Chvaletice jsou druhotnou surovinou vzniklou spalováním hnědého uhlí. Vlastnosti popílků jsou obecně dost kolísavé v závislosti na typu a teplotě spalování, typu paliva apod.

Zároveň se však vlastnosti daného popílku v daném provozu mohou lišit v závislosti ve které fázi je popílek zachycen. Z pravidla bývá používáno vícero odlučovačů pevných částic z kouřových plynů za sebou. Na prvním z řady odlučovačů tak najedeme popílek odlišných vlastností nežli na odlučovači posledním v řadě.

V této kapitole jsou stanovovány požadované vlastnosti těchto druhotných surovin a následně porovnávány.

Chvaletice

Roční produkce elektrárenského popílku z provozu ve Chvaleticích je okolo 300 000 tun ročně. Popílek Chvaletice je nehořlavá, ve vodě nerozpustná, šedožlutá látka bez zápachu. Měrná hmotnost byla stanovena na $2040 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Nasákavost popílku Chvaletice byla stanovena na 75,1 %. Hodnota měrného povrchu byla stanovena na $243 \text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$. Fyzikálně mechanické vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 12:.

Tušimice

Pro tuto práci byla použita a analyzována směs popílku ze tří odlučovačů elektrárny v Tušimicích. Zastoupení popílků z jednotlivých odlučovačů ve směsi podléhá požadavkům normy ČSN 72 2071. Měrná hmotnost směsi vysokoteplotního popílku Tušimice byla stanovena na $2410 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Hodnota měrného povrchu byla stanovena na $490 \text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$.

V Graf č. 3 jsou znázorněny křivky zrnitosti zkoumaných popílků. Dále byly zkoumány další fyzikálně mechanické vlastnosti, které jsou pro přehlednost uvedené v Tab. 12:.

2.1.3.2. Fluidní popílky

Vybranými Fluidními popílky jsou elektrárenské popílky z provozu Poříčí a Ledvice. V této kapitole jsou stanovovány požadované vlastnosti těchto druhotných surovin a následně porovnávány. Složení popílku tvoří kalcit, anhydrit, β křemen, volné vápno, hematit a ortoklas. Rozdílné složení oproti vysokoteplotnímu popílku je dáno fluidním spalováním spolu s vápencem. Jedná se o šedou, nehořlavou látku bez zápachu, která je ve vodě nerozpustná a nehořlavá

Poříčí

Fluidní popílek z provozu v Poříčí je elektrárenský odpad vzniklý spalováním hnědého uhlí za nižších teplot, nežli je tomu u vysokoteplotních popílků. Roční produkce popílku v elektrárně Poříčí je okolo 50 000 tun. Měrná hmotnost fluidního

popílku Poříčí byla stanovena na $2510 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Fyzikálně mechanické vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 12:.

Ledvice

Fluidní popílek elektrárny Ledvice je odpad vzniklý spalováním hnědého uhlí. Fyzikálně mechanické vlastnosti fluidního popílku Levice jsou uvedené v Tab. 12:

2.1.3.3. Skelný recyklát

Skelný recyklát ze společnosti Vetropack je recyklovaná drť z obalového skla. Množství skelného recyklátu se pohybuje okolo 10 000 tun ročně. Sodnovápenaté sklo je pevná nehořlavá, ve vodě nerozpustná látka bez zápachu. Nasákavost materiálu byla stanovena 0,1 %.

Před použitím skelného recyklátu je třeba surovinu upravovat. Je třeba odstranit etikety a jiné možné nečistoty původního obsahu. Materiál je dodáván jako kusy skla a je třeba materiál drtit a mlít dle požadovaného měrného povrchu a následně tříděním vyseparovat nežádoucí větší zrna. Po provedené předúpravě materiálu byla stanovena křivka zrnitosti, která je znázorněna v Graf č. 4. Měrná hmotnost daného skla byla stanovena na $2560 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Sypná hmotnost volně sypaného materiálu je $1530 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a sypná hmotnost v setřeseném stavu je $1650 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Fyzikálně mechanické vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 12:.

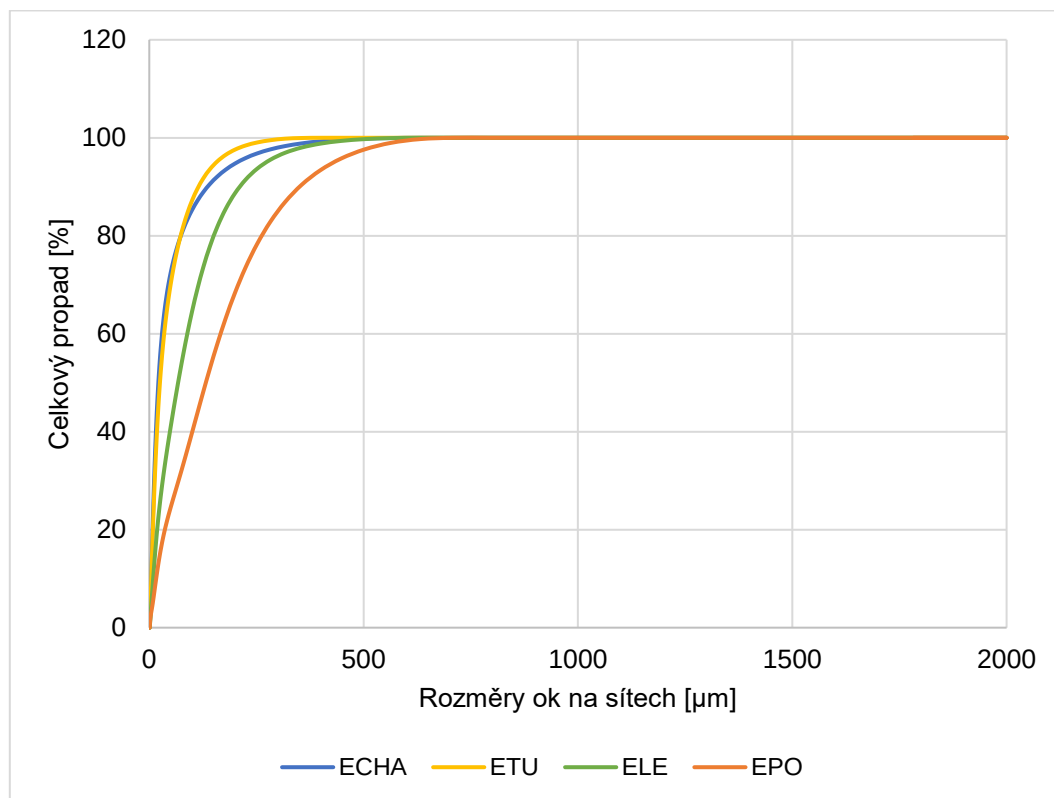
2.1.3.4. Slévárenské písky – Arcelormittal

Formovací slévárenské písky jsou recyklovatelné a část je vrácena do procesu výroby forem. Část písků, která byla při recyklování vyřazena, je analyzována v této práci. Ze společnosti Arcelormittal byly analyzovány dva typy slévárenských písků – slévárenský písek pojený furanovou pryskyřicí a slévárenský písek pojený vodním sklem. Slévárenský písek pojený furanovou pryskyřicí byl dodán v drobných frakcích s občasnými spečenými velkými kusy a bylo nutné pouze oddělit požadované frakce tříděním. Písek pojený vodním sklem bylo nutné zdrobnit mletím v kulovém mlýnu, který se pro daný materiál osvědčil. Následně byl slévárenský písek pojený vodním sklem taktéž tříděn proséváním přes sadu sít a byly z něj vyseparovány požadované frakce. Křivky zrnitostí jsou uvedeny v Graf č. 5. Fyzikálně mechanické vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 12:.

Stanovení zrnitosti

Stanovení Zrnitosti

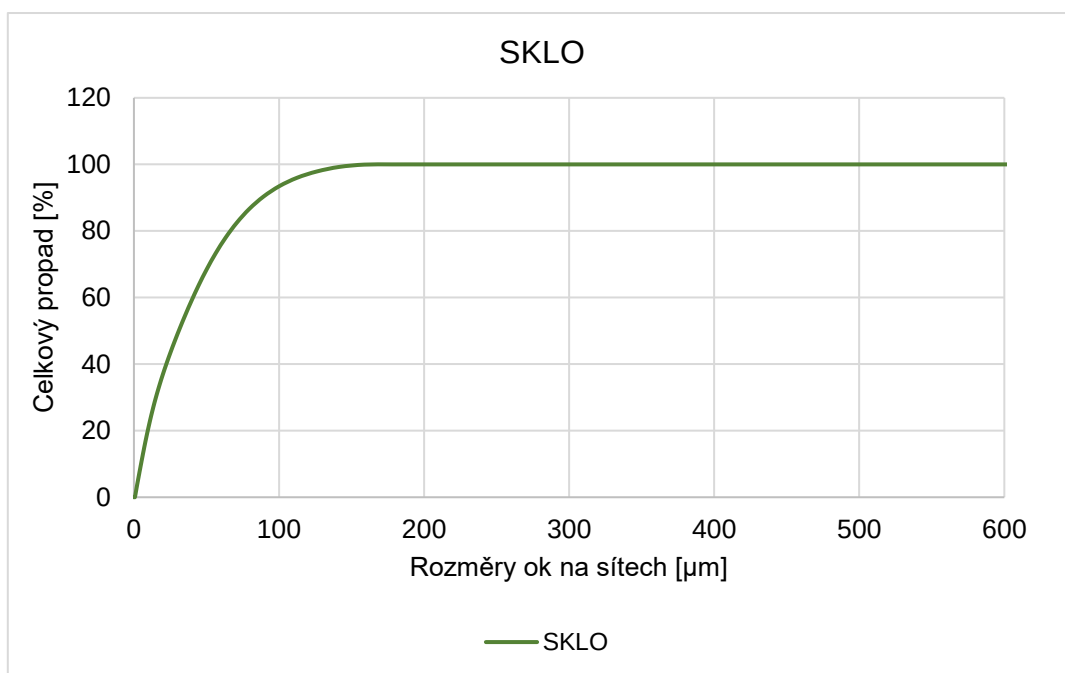
U všech vybraných druhotných surovinách byl pomocí granulometru Marven Mastersizer proveden granulometrický rozbor. Stanovené výsledky jsou uvedeny v následujících grafech.



Graf č. 3 Kumulativní křivka zrnitosti vysokoteplotních i fluidních popílků.

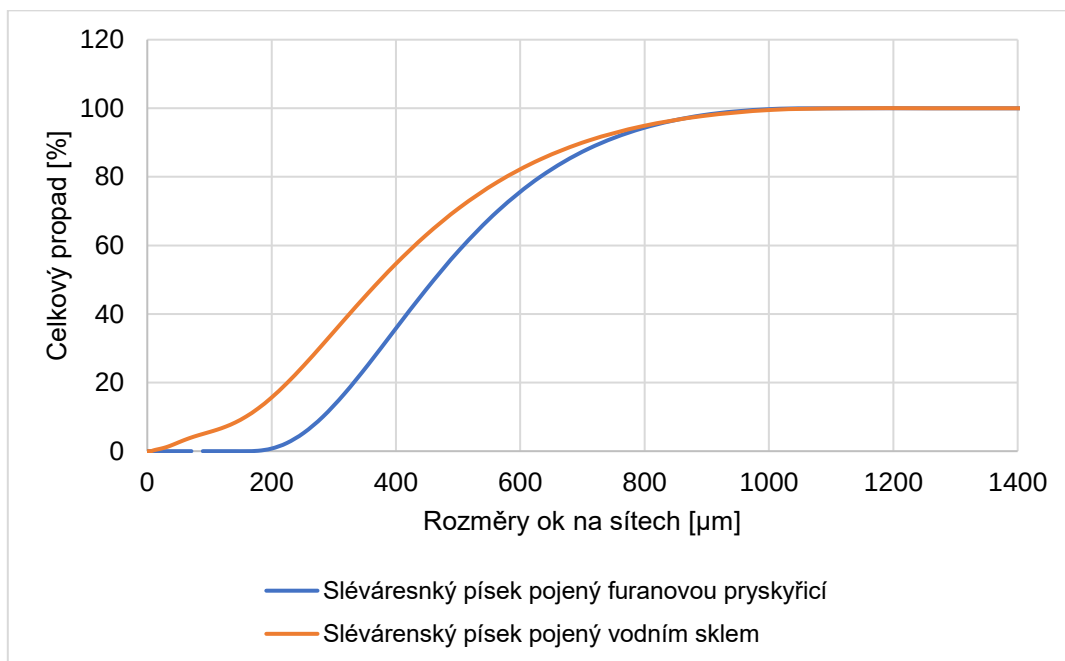
Z Graf č. 3 je patrné, že je zrnitost vysokoteplotních popílků takřka totožná. Křivka vysokoteplotního popílku Chvaletice má zpočátku strmější nárůst až do velikosti částic 80 μm . Od tohoto rozměru dále po 400 μm je naopak strmější křivka zrnitosti vysokoteplotního popílku Tušimice.

Fluidní popílký mají v obou případech rozdílnou směrnici kumulativní křivky zrnitosti. Vzhledem k vysokoteplotním popílkům měly fluidní popílký Ledvice i Poříčí nižší zastoupení jemné frakce. V případě popílku Poříčí bylo množství jemných částic nejnižší.



Graf č. 4 Kumulativní křivka zrnitosti upraveného skelného recyklátu Vetropack.

Skelný recyklát je dodáván jako kusy skla, které je třeba předupravovat. Je nutné vyseparovat veškeré nežádoucí zbytky obalového skla. Sodnokřemičité sklo je mleto na požadovaný měrný povrch a nežádoucí frakce jsou tříděním vyseparovány. Mletím na požadovaný měrný povrch je zamezeno alkalickokřemičité reakci.



Graf č. 5 Kumulativní křivky zrnitosti slévárenských písků.

Fyzikálně mechanické parametry

Sypná hmotnost, měrný povrch a nasákavost základních surovin byly určeny dle kapitoly Metody zkoušení. Stanovené výsledky jsou uvedeny v Tab. 12:.

Tab. 12: Fyzikálně mechanické vlastnosti druhotných surovin

Označení	Měrná hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Měrný povrch [$\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$]	Nasákavost [%]
ECHA	2040	334	48,0
ETU	2410	327	49,1
EPO	2720	347	55,4
ELE	2800	353	45,3
SKLO	2560	298	35,6
SPPVS	2860	190	13,9
SPPFP	2450	110	13,2

V tabulce jsou použité zkratky SPPVS a SPPFP. Jedná se o slévárenský písek pojený vodním sklem (SPPVS) a slévárenský písek pojený furanovou pryskyřicí (SPPFP).

Vypracovaný soubor základních vlastností a materiálových charakteristik dále sloužil v navazujících etapách experimentální části, kde byly jednotlivé navržené receptury vyráběny a testovány v čerstvém i ve ztvrdlém stavu. Dílčí výsledky byly zkoumány a posuzovány. K posouzení vlastností testovaných hmot bylo nutné znát základní charakteristiky vstupních složek směsi. Pro návrh nových směsí byly vybrány všechny výše uvedené vstupní primární i druhotné suroviny.

2.1.3.5. Chemické složení druhotných surovin

V následující tabulce je uvedeno chemické složení zkoumaných materiálů.

Tab. 13: Chemické složení zkoumaných druhotných surovin.

Ozn.	Zastoupení v hm. %										
	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
ECHA	<0,05	51,0	0,5	<0,1	28,4	2,2	10,0	1,6	1,32	0,06	0,41
EPO	-	38,3	9,1	-	18,8	21,1	4,5	1,0	0,81	0,01	0,18
ETU	<0,05	55,6	0,4	<0,1	26,4	1,5	5,9	1,9	1,05	0,06	0,29
ELE	-	32,1	6,7	-	27,9	21,2	7,0	0,9	0,38	-	0,47
SKLO	-	71,0	-	-	1,7	10,4	0,7	0,3	2,30	-	1,77
Furan.	<0,05	35,0	1,54	<0,1	3,0	1,14	3,8	0,2	0,32	0,07	0,27
Vod. sklo	<0,05	82,7	0,10	<0,1	1,5	0,30	2,6	0,5	0,53	0,04	0,23

2.2. Shrnutí Etapy I

V rámci Etapy I byly stanovovány vlastnosti nahrazovaných základních vstupních surovin. Paralelně se základními surovinami byly testovány druhotné suroviny. Byly stanoveny požadované fyzikálně-mechanické vlastnosti zkoumaných surovin. Stanovené fyzikálně-mechanické vlastnosti a chemické složení budou dále využívány při hodnocení hmot, které budou laboratorně zkoumány.

Byla stanovena zrnitost plnivových složek i cementu. Dle stanovených křivek budou dále upravovány druhotné suroviny tak, aby zastoupení jednotlivých frakcí v modifikovaných směsích co nejvíce odpovídalo zrnitosti vybrané základní receptury.

Nasákavost, chemické a mineralogické složení, měrný povrch a sypná hmotnost vstupních surovin jsou vlastnosti dílčích složek navrhované hmoty, na jejichž základě bude možné odůvodnit chování navrhovaných směsí.

3. Etapa II – Návrh a výběr vhodných základních surovinových směsí

Ve druhé etapě experimentální části této práce jsou na základě výsledků z předchozí etapy a znalostí nabitých v teoretické části diplomové práce navrhovány základní zkušební receptury. Z navržených zkušebních receptur budou vytvořeny hmoty, které budou podrobeny laboratornímu zkoušení dle navržených metod zkoumání. Vlastnosti receptur budou porovnávány s běžně dostupnou komerční injektážní směsí, která sloužila jako referenční směs. Při návrhu a zkoušení daných receptur bude žádoucí se v co největší míře přiblížit vlastnostem komerční hmoty nebo vlastnostem lepším. Dle navržených receptur, budou vytvořeny zkušební hmoty, které byly testovány v čerstvém i ve ztvrdlém stavu. V čerstvém stavu hmoty bude kladen důraz zejména na reologické vlastnosti směsi a její zpracovatelnost, dobu tuhnutí a tvrdnutí. Ve ztvrdlém stavu navrhovaných hmot budou zkoumány pevnosti v tahu za ohybu, pevnosti v tlaku, nasákavosti, objemové hmotnosti. Stanovené vlastnosti budou vyhodnoceny a na základě vyhodnocení bude vybrána vhodná základní receptura pro další zkoumání.

3.1. Návrh základní receptury

Pro účel diplomové práce byla použita základní receptura vytvořená v bakalářské práci, která byla testována ve třech modifikacích. Surovinová směs byla takřka shodná. Receptury se lišily pouze dávkou přidané směsi přísad. Na základě zkoumání byla v rámci bakalářské práce vybrána jako optimální receptura CRI rec. 7. V rámci Etapy I diplomové práce byly vstupní složky této receptury důkladněji zkoumány. V Etapě II byla původní receptura C-RI-7 modifikována určitou mírou přídavku krystalizační přísady. Vliv této přísady na fyzikálně-mechanické charakteristiky původní receptury byl ověřen ve třech modifikacích lišících se množstvím použité přísady. V Tab. 14: je uvedeno surovinové složení nových základních směsí, v této práci označených jako CRI rec. 0, resp. 1 či 2.

Tab. 14: Základní receptury vzniklé modifikací původní receptury C-RI-7.

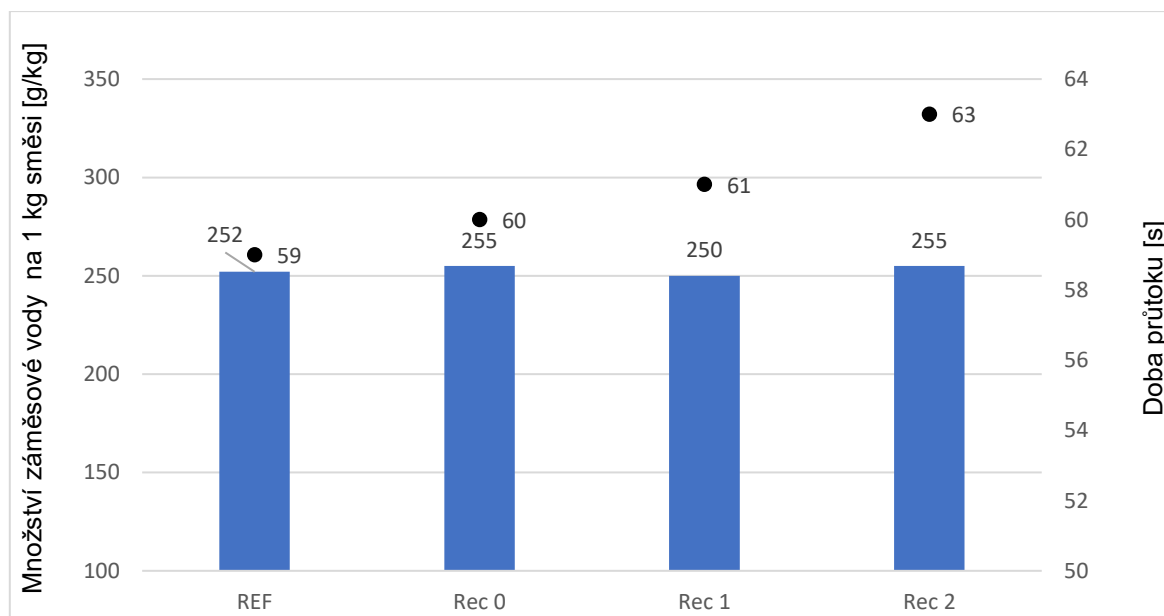
Primární surovina	Označení	Podíl [%]
Cement CEM I 42,5 R	Cem.	0,28
Velmi jemně mletý vápenec	Váp.	0,062
Živcové odprašky	Živc.	0,062
Bentonit	Bent.	0,08
Křemičitý písek PR 33c	PR 33c	0,22
Křemičitý písek PR 0,5 - 1,0	PR 0,5 - 1,0	0,15
Křemičitý písek GS 13	GS 13	0,15
Voda	Vod.	260 g/1 kg suché směsi
Směs přísad	Verze 0, 1, 2	0,71; 1,71; 1,21 % z m_c

3.2. Praktické zkoušení navržených receptur

3.2.1. Zkoušky prováděné v čerstvém stavu

Viskozita

Viskozita základních receptur byla stanovena pomocí Marshova průtokového kužele. Byl posuzován vliv množství záměsové vody na době průtoku Marshovým viskozimetrem.



Graf č. 6 Závislost množství záměsové vody na době průtoku viskozimetrem.

Pro stanovení optimální konzistence zkoušených čerstvých směsí byla zvolena metoda využívající dobu průtoku tzv. Marshova kužele dle normy ČSN EN 12 715. Zvolený normový postup je určen pro injektážní hmoty.

Na základě naměřených hodnot ve Graf č. 6 lze konstatovat, že se konzistence zkoumaných směsí lišila jen velice minimálně. Zaznamenané rozdíly dob průtoku jsou minimální. Nejnižší čas průtoku kuželem byl stanoven u referenční volně dostupné směsi. Při množství 252 g záměsové vody na kilogram suché směsi byl čas průtoku nejvyšší – 59 sekund. Do navrhovaných receptur 0 a 2 bylo použito stejné množství záměsové vody, avšak naměřený čas průtoku byl u receptury 2 o dvě sekundy vyšší. předpokládaná doba průtoku receptury 2 při stejném množství záměsové vody byla nižší, a to zejména z důvodu použití většího množství směsi přísad. Nicméně rozdíl je velice nepatrný a mohl být způsoben nedokonalým rozmícháním receptury 2 nebo jinými odchylkami při měření (rozdílné navlhčení kužele, odečet času na rysce, kdy směs tvořila kopeček). Navrhovaná receptura 1 měla takřka totožnou konzistenci jako receptury 0 a 2. Avšak pro dosažení shodné konzistence bylo zapotřebí nejvyššího množství záměsové vody. Z tohoto hlediska se tedy receptura 1 jevila jako nejlepší z navrhovaných směsí.

Stanovení počátku a doby tuhnutí čerstvé hmoty

Stanovení počátku tuhnutí a doby tuhnutí bylo provedeno pomocí plně automatizovaných Vicatových přístrojů. Doba zpracovatelnosti je jedním ze stěžejních parametrů navrhovaných směsí. Naměřené hodnoty jsou shrnuty v Tab. 15:.

Tab. 15: Počátek a doba tuhnutí.

Ozn. vzorku	Počátek tuhnutí [hh:mm]	Konec tuhnutí [hh:mm]	Doba tuhnutí [hh:mm]	Doba tuhnutí vzhledem k REF [hh:mm]
CRI REF	25:30	36:40	11:10	0,0
CRI rec. 0	17:30	20:30	3:00	8:10
CRI rec. 1	17:20	32:50	15:30	4:20
CRI rec. 2	18:30	21:30	3:00	8:10

Dle normy ČSN EN 196-3 se uvádí počátek a doba tuhnutí v minutách. Avšak pro potřebu této práce byla zvolena varianta zápisu hh:mm z důvodu vysokých hodnot času. Tento formát bude použit v rámci celé diplomové práce.

Z uvedené tabulky je patrné, že se referenční směsi nejvíce přibližovala navrhovaná receptura CRI rec 1 s nejvyšším obsahem směsi přísad. Zároveň bylo pro dosažení podobných vlastností potřeba nižší množství záměsové vody. Tento fakt přispíval k předpokladu lepších výsledných fyzikálně mechanických vlastností. Fyzikálně mechanické vlastnosti navrhovaných základních receptur jsou rozebrány v další části diplomové práce.

Počátek doby tuhnutí je u navrhovaných směsí vzhledem k nepatrně odlišným vodním součinitelům velice podobný. U všech navrhovaných hmot byl stanoven počátek tuhnutí do 18 hodin 30 minut po smíchání suché směsi s vodou. Nicméně navrhovaná receptura CRI rec.1 měla několikanásobnou dobu tuhnutí oproti ostatním navrhovaným směsím. Tímto se receptura č. 1 nejvíce přiblížila referenční směsi v rámci doby tuhnutí a koncem doby tuhnutí.

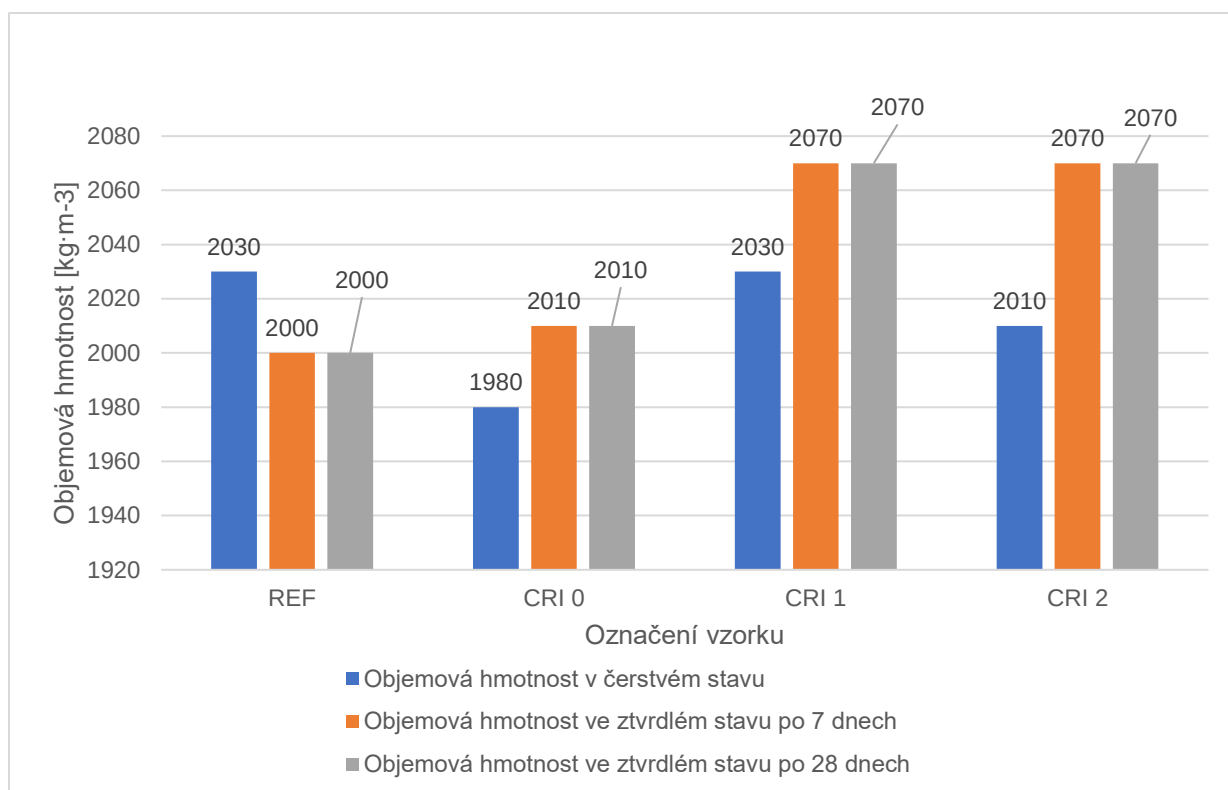
Objemová hmotnost v čerstvém a vyzrálém stavu

Objemové hmotnosti čerstvých směsí byly vyhodnoceny společně s objemovými hmotnostmi hmot ve vyzrálém stavu.

3.2.2. Zkoušky prováděné ve ztvrdlém stavu

Objemové hmotnosti v čerstvém a vyzrálém stavu

Stanovení objemové hmotnosti bylo prováděno dle normy ČSN EN 12390-6 a podrobný popis je uveden v kapitole Metody zkoušení. V Graf č. 7 jsou uvedené naměřené výsledky objemových hmotností v čerstvém i ve vyzrálém stavu.



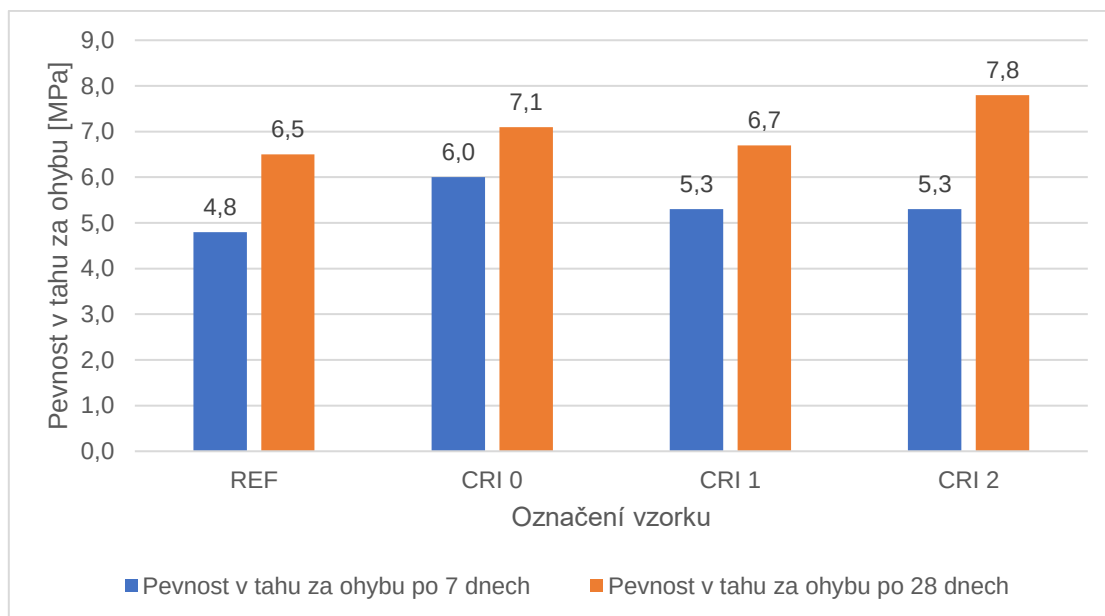
Graf č. 7 Objemové hmotnosti základních směsí.

Objemová hmotnost referenčního materiálu byla stanovena na 2030 kg·m⁻³. Ostatní navrhované směsi měly ve dvou případech nižší hodnoty objemových směsí v čerstvém stavu. Pouze směs navrhované receptury CRI rec. 1, kde bylo použito nejvyšší množství směsi přísad, měla stejnou objemovou hmotnost v čerstvém stavu, což bylo patrně způsobeno právě směsí přísad, které snížili dávku záměsové vody oproti ostatním recepturám.

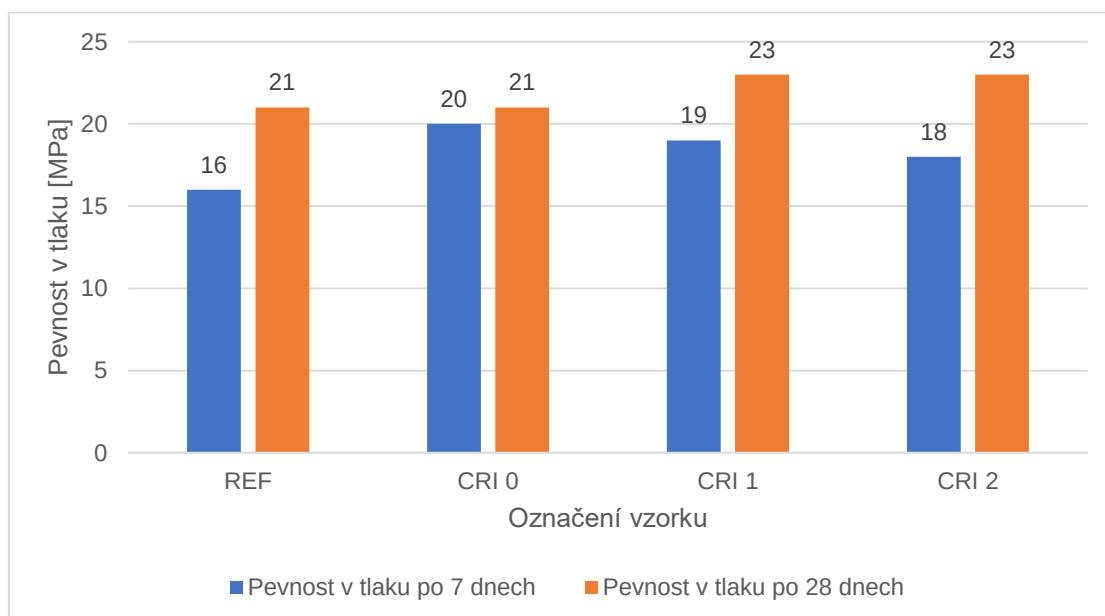
Dále je patrné, že se objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu po 7 a 28 dnech již neměnila. U navrhovaných receptur se však lišil trend vývinu objemových hmotností oproti komerční hmotě. Objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu referenční hmoty se snížila o 30 kg·m⁻³. U navrhovaných směsí se však objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu oproti čerstvém stavu zvyšovala. Po 28 dnech mohl být tento efekt způsoben obsahem krystalizační přísady v použité směsi přísad u navrhovaných hmot.

Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku zkušebních těles navrhovaných směsí bylo provedeno dle metod zkoušení, které byly uvedeny v dokumentu výše. Stanovení proběhlo dle ČSN EN 12390-5 (stanovení pevnosti v tahu za ohybu), ČSN EN 12390-4 (stanovení pevnosti v tlaku). Stanovené hodnoty jsou uvedeny v následujících grafech.



Graf č. 8 Stanovené pevnosti v tahu za ohybu základních směsí.



Graf č. 9 Stanovené pevnosti v tlaku základních směsí.

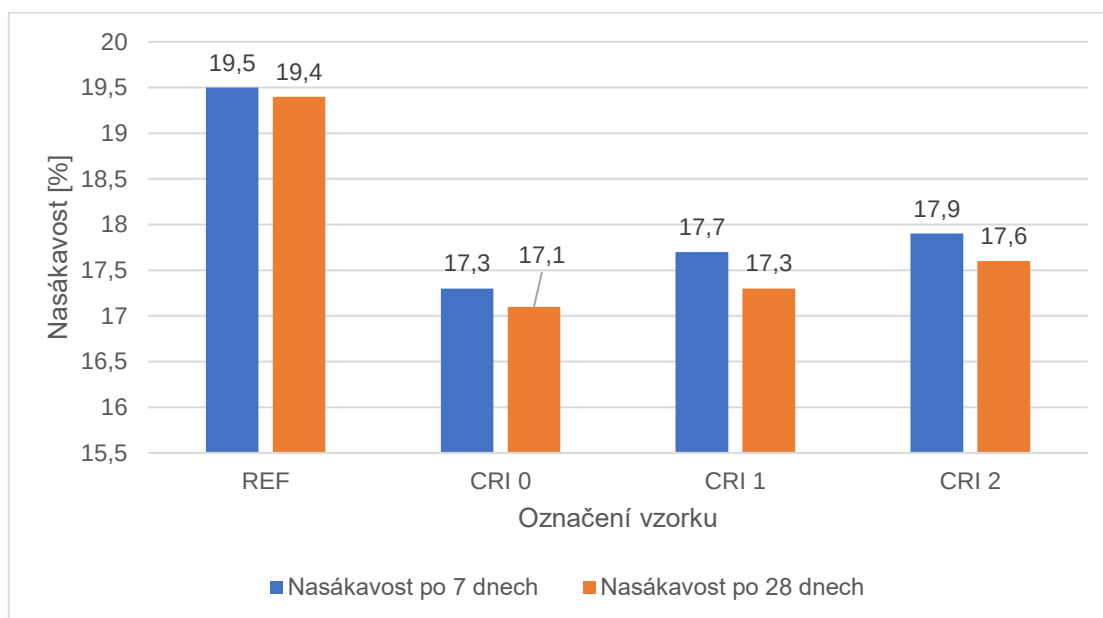
Z výše uvedených grafů Graf č. 8, Graf č. 9 jsou patrné vyšší pevnosti v tahu za ohybu i pevnosti v tlaku navrhovaných základních receptur. Pevnost v tahu za ohybu referenční hmoty byla 4,8 MPa po 7 dnech a po 28 dnech 6,5 MPa. Tyto hodnoty byly ve všech případech nejnižší. Po 7 dnech byly pevnosti navrhovaných hmot vyšší o 0,5 až 1,2 MPa. Rozdíl po 28 dnech byl 0,2 až 1,3 MPa což odpovídá pevnostem vyšším o více než 8 %.

Velice podobný trend je patrný i u stanovených pevností v tlaku, a to jak po 7 dnech, tak po 28 dnech zrání. Ve všech případech jsou pevnosti v tlaku vyšší a pouze v jednom případě byla pevnost vzorku zjištěna shodná s referenční hmotou. Pevnosti v tlaku srovnávací hmoty po 7 a 28 dnech byly stanoveny na 16 MPa (7 dní) a 21 MPa (28 dní). Oproti těmto hodnotám bylo stanoveno navýšení jednotlivých navrhovaných hmot o 2 až 4 MPa po 7 dnech a o 2 MPa po 28 dnech. Tento rozdíl v pevnostech v tlaku odpovídá 4 až 6 %.

Nejvyšší pevnosti tahu za ohybu i pevnosti v tlaku byly stanoveny na navrhovaných recepturách CRI rec. 1 a CRI rec. 2.

Nasákavost

Stanovené hodnoty nasákavostí receptur jsou uvedeny v Graf č. 10. Stanovení proběhlo dle postupu uvedeném v kapitole Metody zkoušení.



Graf č. 10 Stanovené nasákavosti základních receptur.

Z uvedeného Graf č. 10 je evidentní, že nasákavosti navrhovaných základních hmot byly ve všech případech výrazně nižší. Nejvyšší nasákavost byla po 7 i 28 dnech byla určena na vzorcích referenční hmoty. Nasákavost srovnávací hmoty byla 19,5 % po 7 dnech a 19,4 % po 28 dnech. Nasákavosti jsou o 2,2 až 2,3 % což vzhledem k naměřeným hodnotám činí rozdíl 4 %.

3.3. Shrnutí řešení Etapy II

Výsledkem Etapy II byl výběr vhodné receptury s použitím primárních vstupních surovin. Byly navrženy tři receptury, jejichž vlastnosti byly porovnávány s běžně dostupnou komerční hmotou určenou pro rubovou injektáž na silikátové bázi. Na základě stanovených vlastností byla pro další modifikaci druhotnými surovinami vybrána navrhovaná receptura CRI rec. 1. Vlastnosti této receptury byly vyhodnoceny jako optimální pro navrhovaný účel hmoty. Zejména zpracovatelností se nejvíce blížila referenční injektážní hmotě. Dále vykazovala optimální viskozitu, při nejnižším množství použité záměsové vody. Tento fakt pak dále určoval téměř vždy nejlepší fyzikálně mechanické vlastnosti v čerstvém i ve ztvrdlém stavu materiálů. Vybranou recepturou pro další modifikaci druhotnými surovinami je tedy **receptura CRI rec. 1** s nejvyšší dávkou použité směsi přísad.

4. Etapa III – Výběr optimalizované receptury s použitím druhotných surovin

Ve třetí etapě bude vybraná základní receptura modifikována druhotnými surovinami. Budou nahrazována plniva a pojivové složky surovinové směsi zvlášť. Byla zvolena 20% a 40% míra náhrady pojivových složek elektrárenskými popílky a skelným recyklátem. Plniva budou nahrazována ve 100% míře ve frakci od 0,125 mm do 0,500 mm. Požadovaná frakce plniv bude vyseparována ze slévárenských písků. Seznam používaných druhotných surovin je uveden v Tab. 16:. Náhradou plniv nebo pojivových složek budou navrženy nové receptury. Navržené modifikované směsi budou vytvořeny a laboratorně testovány. Na hmotách budou ověřovány fyzikálně-mechanické vlastnosti v čerstvém i ve ztvrdlém stavu. Soubor prováděných testování bude shodný s prováděnými stanoveními ve druhé etapě této práce. Bude ověřována zpracovatelnost směsi v čerstvém stavu, počátek a doba tuhnutí, objemová hmotnost v čerstvém i ve ztvrdlém stavu pevnost a nasákavost vytvořených zkušebních těles.

Vlastnosti navržených receptur budou následně vyhodnoceny. Bude posouzen vliv každé dílčí modifikace druhotnou surovinou na sledované charakteristiky. Na základě výsledků zkoumaných hmot byl vybrán zúžený soubor receptur vhodných pro další zkoumání.

4.1. Modifikace vybrané vhodné základní směsi druhotnými surovinami

Vybraná receptura CRI rec. 1 s nejvyšším podílem směsi přísad byla v rámci této práce dále modifikována druhotnými surovinami. Z testovaných druhotných surovin byly vybrány druhotné suroviny uvedené v Tab. 16:

Tab. 16: Seznam analyzovaných druhotných surovin.

Druhotná surovina	Producent	Ozn.	Náhrada
Elektrárenský popílek Chvaletice-vysokoteplotní	Sev.en EC	ECHA	Pojivo
Elektrárenský popílek Poříčí-fluidní	ČEZ	EPO	Pojivo
Elektrárenský popílek Tušimice-vysokoteplotní	ČEZ	ETU	Pojivo
Elektrárenský popílek Ledvice-fluidní	ČEZ	ELE	Pojivo
Skelný recyklát Vetropack	Vetropack	SKLO	Pojivo/ plnivo
Slévárenský písek pojený furanem	Arcelor.	Furan.	Plnivo
Slévárenský písek pojený vodním sklem	Arcelor.	Vod. sklo	Plnivo

4.2. Substituce pojiv vybrané optimální základní receptury

Z tabulky je patrné, že byly druhotné suroviny používány pro potřebu náhrady plniv, pojiv, případně obojího. Nejprve však byly na pastách ověřovány druhotné suroviny nahrazující pojivové složky základní směsi bez použití plnivových složek. Byly zkoumány fyzikálně mechanické vlastnosti ve ztvrdlém stavu a zároveň byly zkoumány vlastnosti v čerstvém stavu, jako je zpracovatelnost. Aby byly výsledky porovnatelné, byly kaše míchány na stejnou konzistenci, která byla ověřena rozlitím na střešacím stolku dle ČSN EN 196–3. Na pastách byl také stanoven počátek a doba tuhnutí. U všech receptur byla zvolena stejná 40% míra náhrady cementu. Takto zvolené receptury byly dále porovnávány s referenční směsí CRI rec. 1. Zkoumané druhotné suroviny nahrazující pojivové složky jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 17: Druhotné suroviny nahrazující pojiva.

Druhotná surovina	Producent	Označení
Elektrárenský popílek Chvaletice-vysokoteplotní	Sev.en EC	ECHA.
Elektrárenský popílek Poříčí-fluidní	ČEZ	EPO.
Elektrárenský popílek Tušimice-vysokoteplotní	ČEZ	ETU
Elektrárenský popílek Ledvice-fluidní	ČEZ	ELE.
Skelný recyklát Vetropack	Vetropack	SKLO

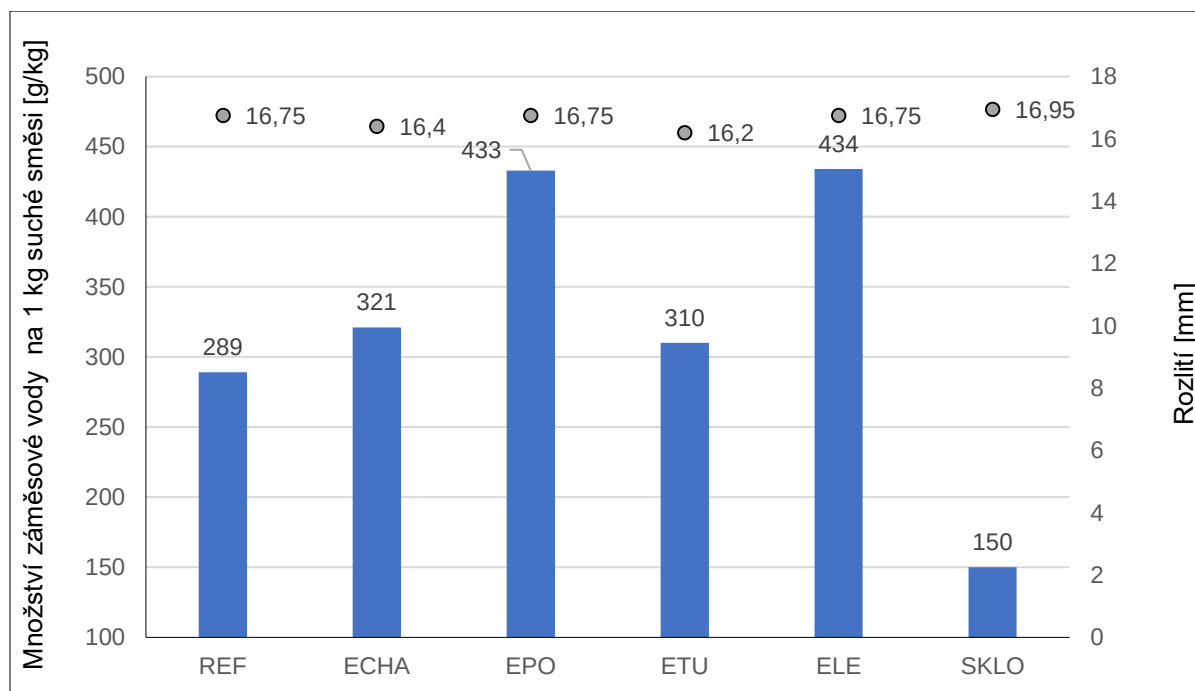
Bylo tedy navrženo pět cementových past s použitím druhotných surovin s určenou mírnou náhrady cementu 40 %. Označení jednotlivých receptur je shodné s označením samotných druhotných surovin.

4.2.1. Praktické zkoušení navržených receptur

4.2.1.1. Zkoušky prováděné v čerstvém stavu

Stanovení konzistence

Konzistence na cementových pastách byla stanovována dle ČSN EN 196-3. Hodnoty rozlití kaše v závislosti na množství záměsové vody jsou znázorněny v následujícím grafu:



Graf č. 11 Stanovení závislosti množství záměsové vody na rozlití.

V 0 jsou uvedené hodnoty rozlití cementových past sednutím na střásacím stolku a zároveň množství záměsové vody potřebné pro dosažení dané konzistence. Při srovnání hodnot rozlití lze konstatovat, že bylo docíleno podobných hodnot vůči referenční hmotě, kterou byla vybraná receptura CRI rec. 1. Z grafu je patrné, že vysokoteplotní popílků – Chvaletice a Tušimice spotřebovaly méně záměsové vody, nežli to bylo v případě fluidních popílků – Poříčí a Ledvice. Sklo jako amorfní látka vykazovalo nejnižší spotřebu záměsové vody. Svými vlastnostmi v čerstvém stavu se referenční hmotě nejvíce přibližovaly směsi s použitím Vysokoteplotních popílků. Jejich struktura byla hladká. Naproti tomu pasty vytvořené ze směsi fluidních popílků s cementem vytvářeli potrhanou strukturu při zpracovávání.

Stanovení počátku a doby tuhnutí

Stanovení počátku a doby tuhnutí bylo provedeno pomocí automatických Vicatových přístrojů. Stanovené hodnoty jsou uvedené v Tab. 18:

Tab. 18: Stanovené počátky a doby tuhnutí modifikovaných cementových past.

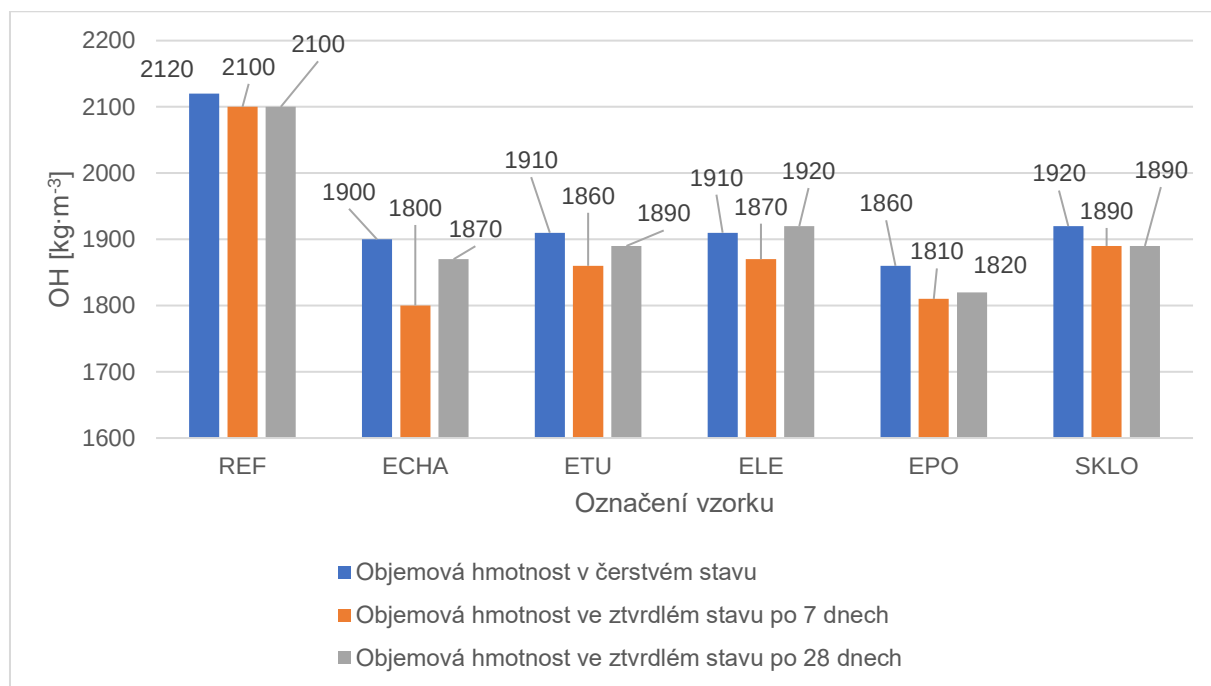
Ozn. vzorku	Počátek tuhnutí [hh:mm]	Konec tuhnutí [hh:mm]	Doba tuhnutí [hh:mm]	Doba tuhnutí vzhledem k REF [hh:mm]
CRI rec 1	00:29	4:00:	3:31	0:00
ECHA	00:59	6:37	5:38	2:07
EPO	1:10	6:49	5:39	2:08
ETU	1:19	6:39	5:20	1:49
ELE.	1:09	6:41	5:32	2:01
SKLO	1:40	7:25	5:45	2:14

Na základě stanovených časů uvedených v Tab. 18: lze konstatovat, že se náhradou cementu druhotnými surovinami posunul počátek doby tuhnutí u všech zkoumaných receptur. Nejvíce se hodnotě 29 minut, která byla stanovena na pastě bez použití druhotné suroviny, přiblížila cementová pasta s příměsí 40 % vysokoteplotního popílku Chvaletice. Příměs ostatních druhotných surovin počátek tuhnutí oddálila výrazněji. Doba tuhnutí v porovnání s referenční pastou byla vždy prodloužena. Doba tuhnutí byla použitím druhotných surovin prodloužena řádově o 2 hodiny.

4.2.1.2. Zkoušky prováděné ve ztvrdlém stavu

Objemové hmotnosti v čerstvém a vyzrálém stavu

Objemové hmotnosti byly prováděny dle popisu uvedeném v Metodách zkoušení. Stanovení proběhla dle ČSN EN 12390-6. V následujícím grafu jsou uvedené naměřené výsledky objemových hmotností v čerstvém i ve vyzrálém stavu.

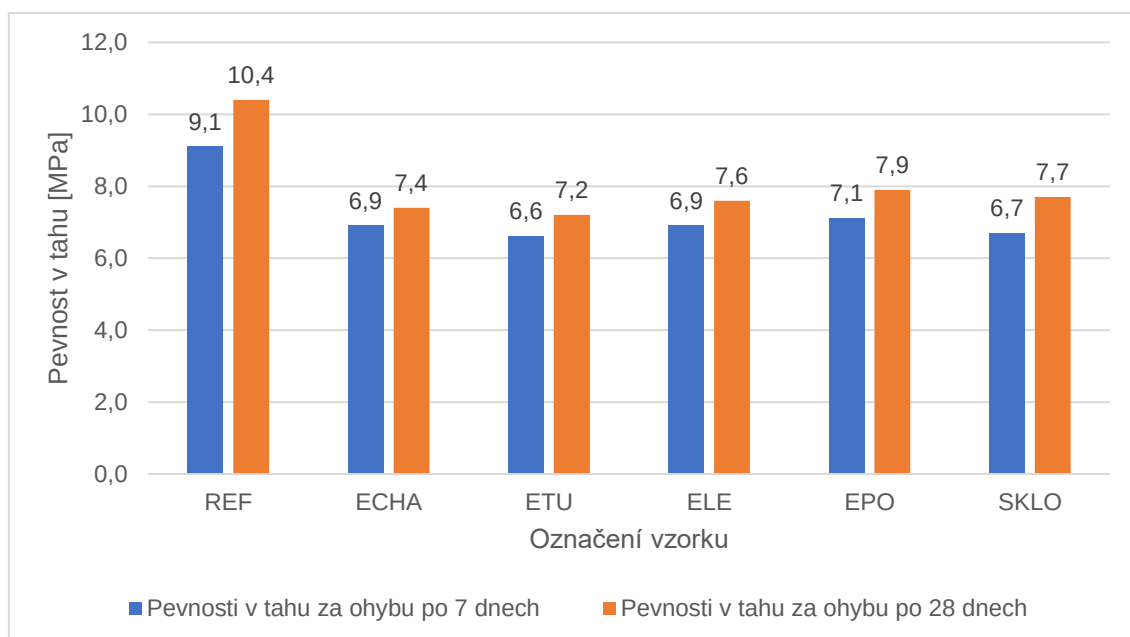


Graf č. 12 Objemové hmotnosti modifikovaných past.

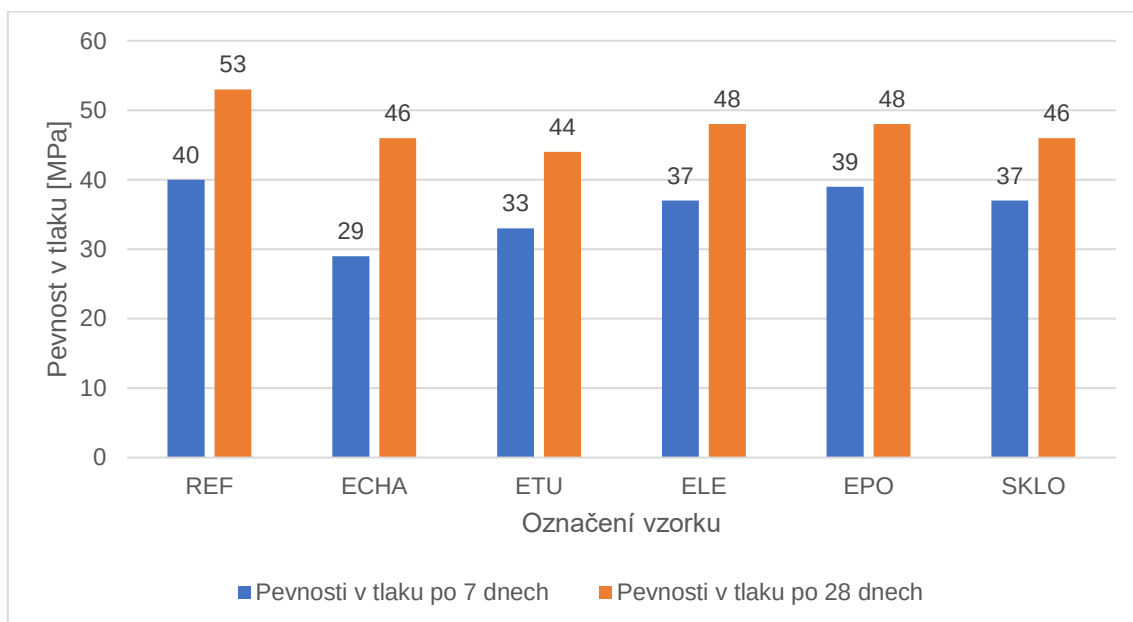
Z grafu lze vypožorovat, že se objemové hmotnosti vlivem přidavku druhotných surovin ve všech případech snížily. Zároveň jsou patrné dva rozdílné trendy vývoje objemových hmotností v čase. Objemová hmotnost referenční směsi v čerstvém stavu byla nejvyšší a po ztvrdnutí směsi se již objemová hmotnost neměnila. Trendy vývinu směsí s přidavkem druhotných surovin byly odlišné. Během prvních sedmi dnů se objemové hmotnosti vlivem ztráty přebytečné záměsové vody snižovaly. V dalším období se však objemové hmotnosti opět začaly zvyšovat. Tento jev byl pravděpodobně způsoben pucolánovým charakterem druhotných surovin, u kterých dochází ke tvorbě hydratačních produktů déle, nežli je tomu u cementu.

Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku navrhovaných pastových směsí bylo provedeno dle metod zkoušení, které byly uvedeny v dokumentu výše. Stanovení proběhlo dle ČSN EN 12390-5 (stanovení pevnosti v tahu za ohybu), ČSN EN 12390-4 (stanovení pevnosti v tlaku). Stanovené hodnoty jsou uvedeny v následujících grafech.



Graf č. 13 Stanovené pevnosti v tahu za ohybu modifikovaných past.



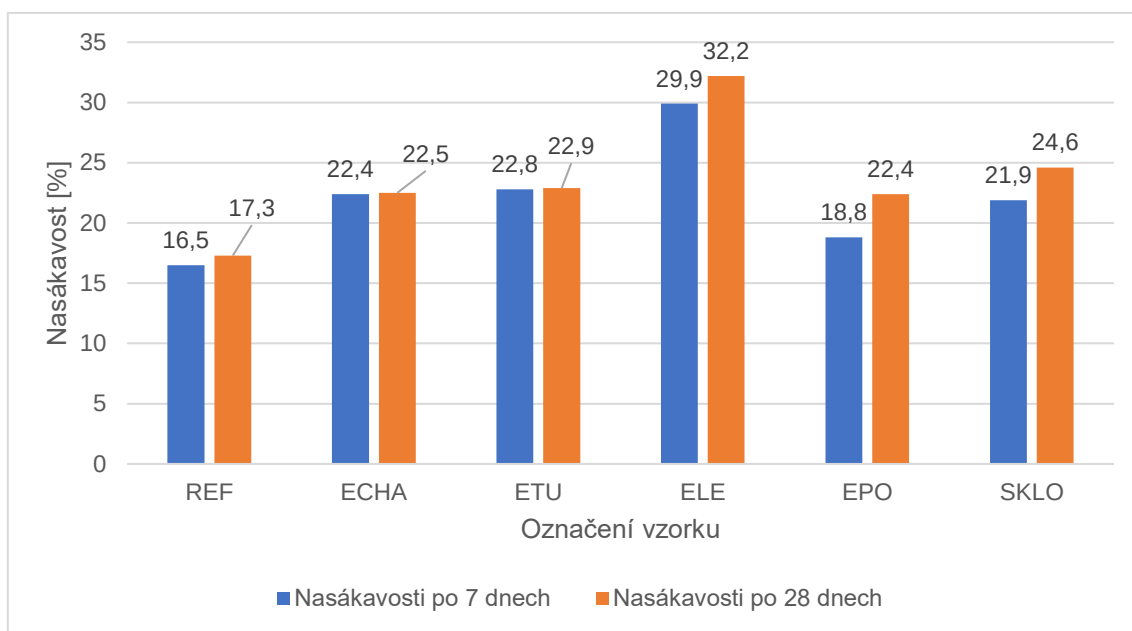
Graf č. 14 Stanovené pevnosti v tlaku modifikovaných past.

Z výše uvedených grafů Graf č. 13, Graf č. 14 jsou patrné ve všech případech nižší pevnosti v tahu za ohybu i v tlaku receptur s použitím druhotných surovin. Snížení pevností v tahu za ohybu bylo v rozmezí 2,0 až 2,5 MPa po 7 dnech. Pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech byly oproti referenční směsi o 2,5 až 3,2 MPa. Snížení pevností v tahu za ohybu odpovídá snížení o 18,2 % po 7 dnech a o 24 % po 28 dnech. Rozdíl pevností v tlaku po 7 dnech byly výrazně vyšší, nežli tomu bylo po 28 dnech. Tento jev opět pravděpodobně způsobil pucolánový charakter druhotných surovin. Rozdíl pevností po 28 dnech byl v rozmezí 5 až 9 MPa, což odpovídá v průměru 37 %.

Substitucí 40 % cementu došlo k výraznému snížení počátečních i výsledných pevností. Pro další zkoumání bude i proto zvolena nižší míra náhrady a následně porovnávána s mírou náhrady cementu 40 %.

Nasákavost

Stanovené hodnoty nasákavostí receptur jsou uvedeny v Graf č. 15. Stanovení proběhlo dle postupu uvedeném v Metodách zkoušení.



Graf č. 15 Stanovené nasákavosti základních receptur.

Z uvedeného Graf č. 15 je evidentní, že nasákavosti navrhovaných základních hmot byly ve všech případech vyšší, nežli bylo stanoveno u základní receptury. Nasákavost základní receptury po 7 dnech byla 16,5 % a po 28 dnech 17,3 %. Této hodnotě se nejvíce přibližovala cementová pasta modifikovaná fluidním popílkem Poříčí a cementová pasta s přísadkou vysokoteplotního popílku Chvaletice. Nasákavosti obou zmíněných modifikovaných past po 28 dnech byly však v průměru více než o 5 % vyšší, což odpovídá téměř 29% bodům.

4.2.2. Shrnutí řešení a výběr optimální druhotné suroviny pro náhradu pojiva

Druhým dílčím výsledkem Etapy II byl výběr optimální druhotné suroviny pro účel náhrady cementu ve vybrané základní receptuře. Na základě stanovených vlastností byly vybrány dvě druhotné suroviny pro další zkoumání. Byl to **vysokoteplotní popílek Chvaletice** a **fluidní popílek Poříčí**. Bylo tak zvoleno pro porovnání vlastností vysokoteplotních a fluidních popílků v konečných recepturách. Fluidní popílek Poříčí vykazoval nejlepší vlastnosti v oblasti pevností a nasákavostí. Směs s použitým

vysokoteplotním popílkem Chvaletice měla ve ztvrdlém stavu nižší pevnosti, nežli tomu bylo u fluidních popílků. Zároveň však dosahovalavýšší pevnosti než směs s vysokoteplotním popílkem Tušimice. Skelný recyklát byl zvolen jako nevhodný pro další zkoumání zejména z důvodu složité úpravy – mletí. Drcení a mletí skelného recyklátu je před použitím nezbytné pro zamezení vzniku alkalicko křemičité reakce. Aby bylo alkalicky křemičité reakci zamezeno je třeba skelný recyklát upravit mletímna frakci o maximální velikosti zrna 300 µm. Tato předúprava je technologicky náročná a zároveň nákladná. Vyjma této skutečnosti vykazovala směs s přidavkem skelného recyklátu výborné vlastnosti porovnatelné s ostatními testovanými hmotami.

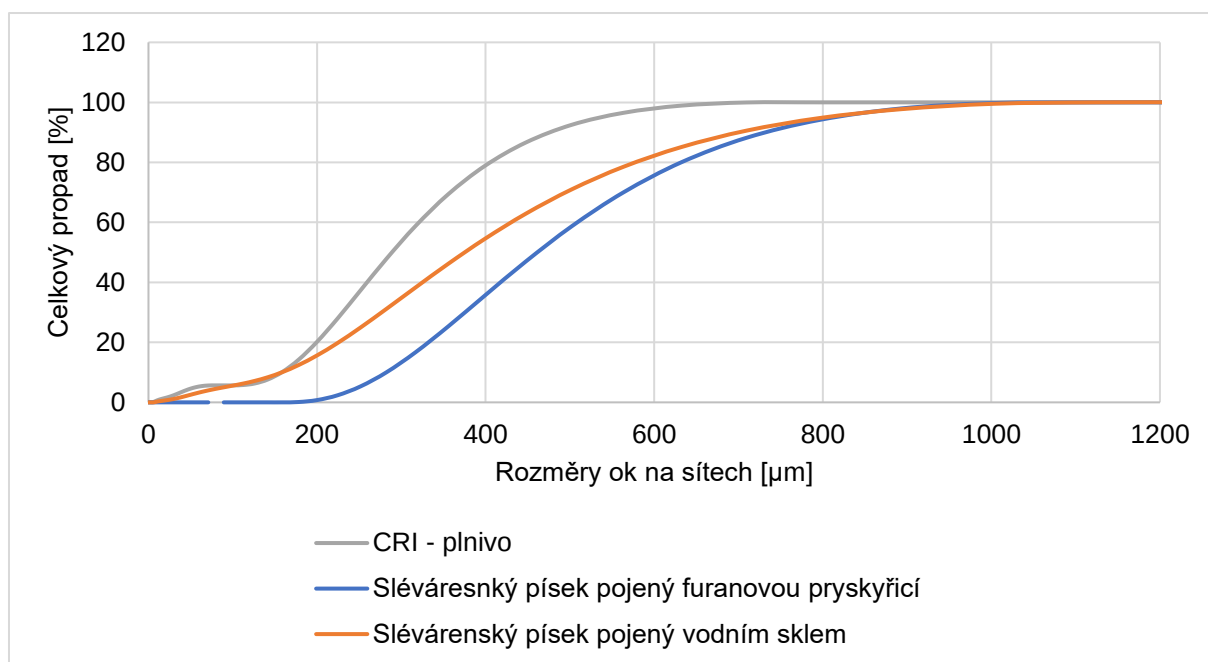
4.2.3. Substituce plniva vybrané optimální základní receptury

Vybraná receptura CRI rec. 1 byla v rámci této práce dále modifikována náhradou plniv. V rámci této části Etapy II diplomové práce byly testovány dostupné slévárenské písky pojené vodním sklem a slévárenské písky pojené furanovou pryskyřicí. Složky plnicí funkci plniv byly nahrazovány ve 100 % míře frakce 0,125 až 0,500 mm. Na takto modifikovaných recepturách byl ověřován stejný soubor vlastností, jako byl testován při náhradě pojiv. Pojivová složka těchto receptur byla ponechána totožná jako u základní receptury. Navržené receptury s nahrazenými plnivovými složkami jsou uvedené v Tab. 19:

Tab. 19: Receptury s použitím druhotných surovin pro náhradu plniv.

Označení receptury	Druhotná surovina + míra náhrady
CRI rec. 1	-
SPPFP	Slévárenský písek pojený furanovou pryskyřicí 100 %
SPPVS	Slévárenský písek pojený vodním sklem 100 %

Zrnitost základních i alternativních plniv byla stanovena pomocí laserového granulometru Malvern Mastersizer. Stanovené zrnitosti plnivových surovin jsou uvedeny v Graf č. 16.



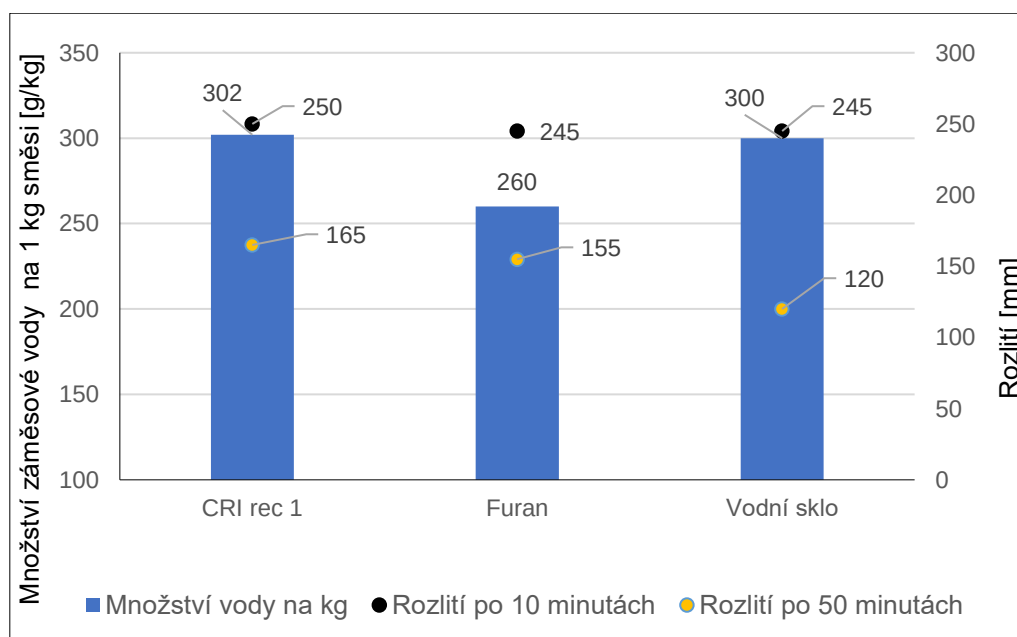
Graf č. 16 Kumulativní křivky zrnitostí plniv.

Z Graf č. 16 je patrné, že se úpravou druhotných surovin mletím a tříděním nepodařilo dosáhnout zcela totožné křivky zrnitosti plnivových složek.

4.2.3.1.1. Praktické zkoušení navržených receptur

Stanovení konzistence

Konzistence navržených receptur se 100% náhradou plniv byla stanovována dle ČSN EN 196-3. Hodnoty rozlití směsi v závislosti na množství záměsové vody jsou znázorněny v následujícím grafu:



Graf č. 17 Stanovené hodnoty konzistence v závislosti na množství záměsové vody.

V Graf č. 17 jsou uvedené hodnoty rozlití čerstvých směsí s náhradou plniv spolu se základní recepturou. Hodnoty rozlití směsí po 10 minutách od kontaktu suchých složek s vodou byly takřka shodné. Pro dosažení totožné konzistence bylo však zapotřebí rozdílného množství záměsové vody. Při použití slévárenského písku pojeného furanovou pryskyřicí bylo zapotřebí nejmenší množství vody. Směs se slévárenským pískem pojeným vodním sklem spotřebovala takřka totožné množství záměsové vody - 300 g/kg suché směsi, jako směs základní receptury.

Konzistence byla ověřována po době 50 minut. Zároveň lze z Graf č. 17 vyčíst, že konzistence upravovaných receptur „vadla“ rychleji nežli konzistence základní receptury.

Stanovení počátku a doby tuhnutí

Stanovení počátku a doby tuhnutí bylo provedeno pomocí automatických Vicatových přístrojů. Stanovené hodnoty jsou uvedené v Tab. 20:

Tab. 20: Stanovené počátky a doby tuhnutí modifikovaných receptur.

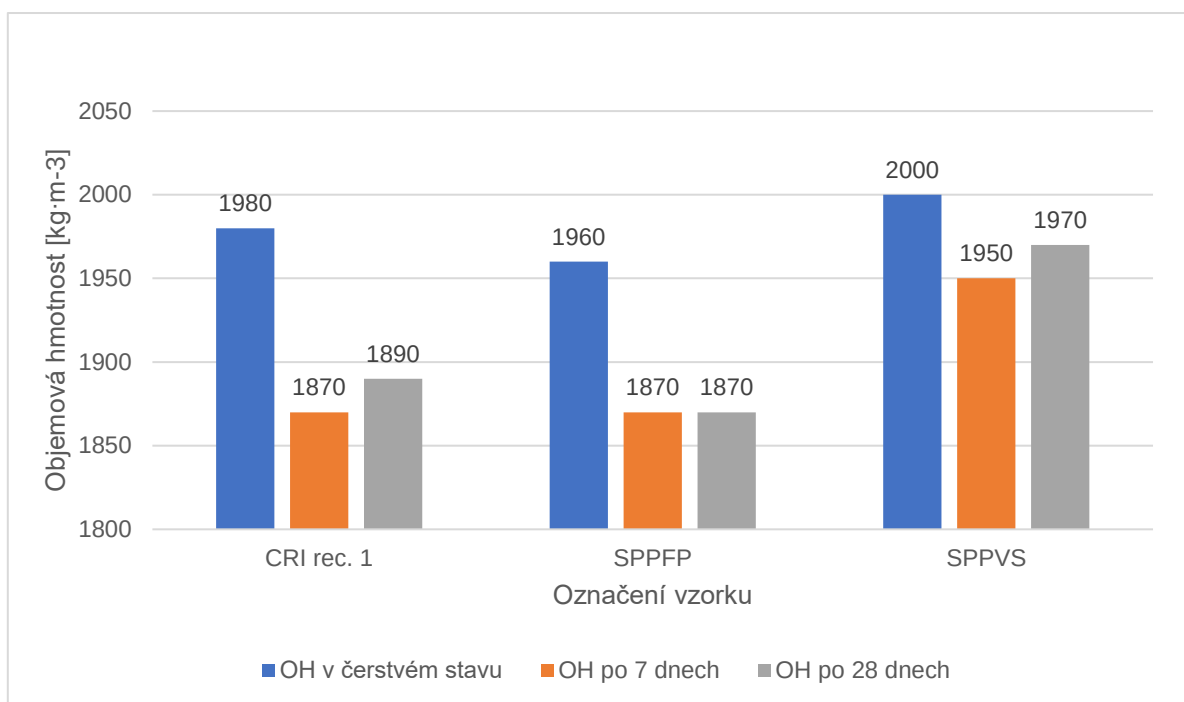
Ozn. vzorku	Počátek tuhnutí [hh:mm]	Konec tuhnutí [hh:mm]	Doba tuhnutí [hh:mm]	Doba tuhnutí vzhledem k REF [hh:mm]
CRI rec 1	00:29	4:00	3:32	0:00
SPPFP	2:05	26:05	23:41	20:09
SPPVS	6:30	21:30	15:00	9:28

Na základě stanovených časů uvedených v Tab. 20: lze konstatovat, že se náhradou plnivových složek základní receptury počátky doby tuhnutí oddálily. Použití slévárenského písku pojeného furanovou pryskyřicí oddálilo počátek tuhnutí řádově o 1,5 hodiny. Při použití slévárenského písku pojeného vodním sklem byl počátek doby tuhnutí oddálen o 6 hodin. Naopak stanovená doba tuhnutí byla kratší u receptury Vodní sklo. Nicméně byla doba tuhnutí receptur delší o 9,5 a 20 hodin.

4.2.3.1.2. Zkoušky prováděné ve ztvrdlém stavu

Objemové hmotnosti v čerstvém a vyzrálém stavu

Objemové hmotnosti byly prováděny dle popisu uvedeném v Metodách zkoušení. Stanovení proběhla dle ČSN EN 12390-6. V následujícím grafu jsou uvedené naměřené výsledky objemových hmotností v čerstvém i ve vyzrálém stavu.

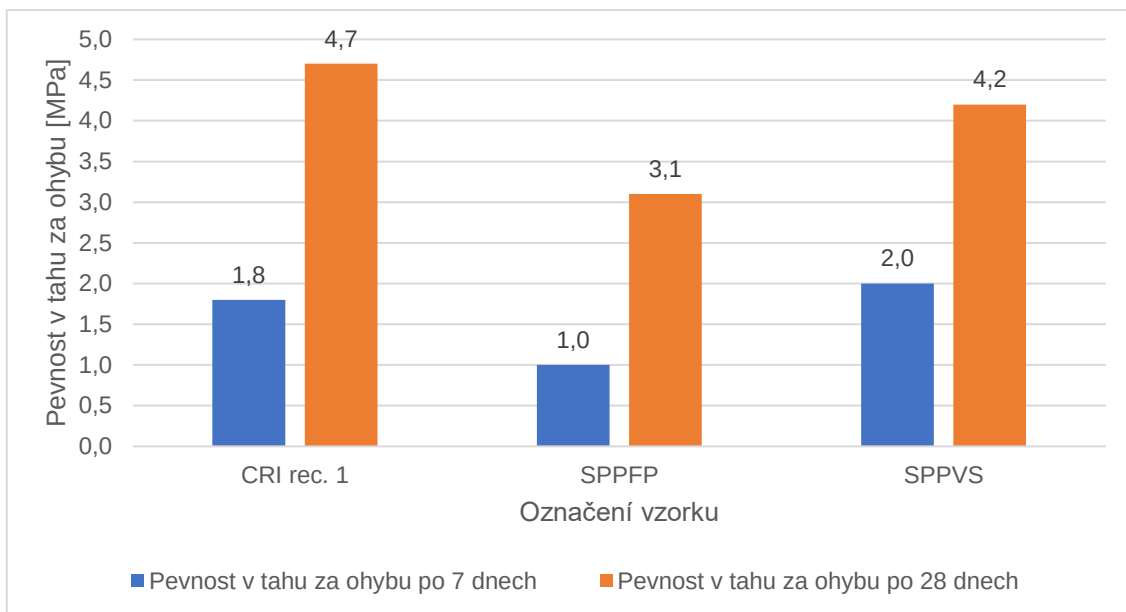


Graf č. 18 Objemové hmotnosti modifikovaných past.

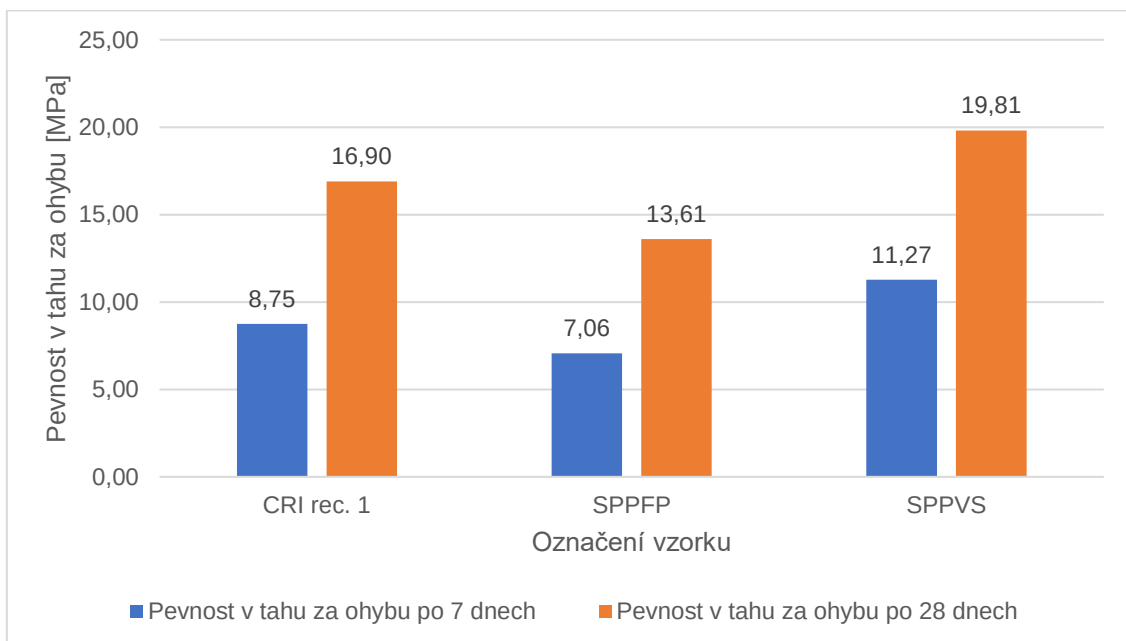
Z Graf č. 18 lze vypočítat, že se objemové hmotnosti v čerstvém stavu vlivem přídavku druhotných surovin měnily o dvě desítky $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Objemová hmotnost receptury s přídavkem slévárenského písku pojeného furanovou pryskyřicí ve ztvrdlém stavu po 7 i po 28 dnech byla takřka shodná se základní recepturou. Kdežto objemová hmotnost směsi označené Vodní sklo s použitím slévárenského písku pojeného vodním sklem byla ve všech případech vyšší. V čerstvém stavu byla objemová hmotnost receptury Vodní sklo patrně vyšší vlivem vyšší dávky záměsové vody. Během tvrdnutí této receptury patrně vznikaly odlišné hydratační produkty nebo vznikaly ve větší míře, což způsobilo kompaktnější strukturu a vyšší objemovou hmotnost zkušebních těles dané receptury.

Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku navrhovaných směsí bylo provedeno dle metod zkoušení, které byly uvedeny v dokumentu výše. Stanovení proběhlo dle ČSN EN 12390-5 (stanovení pevnosti v tahu za ohybu), ČSN EN 12390-4 (stanovení pevnosti v tlaku). Stanovené hodnoty jsou uvedeny v následujících grafech.



Graf č. 19 Stanovené pevnosti v tahu za ohybu modifikovaných past.



Graf č. 20 Stanovené pevnosti v tlaku modifikovaných cementových past.

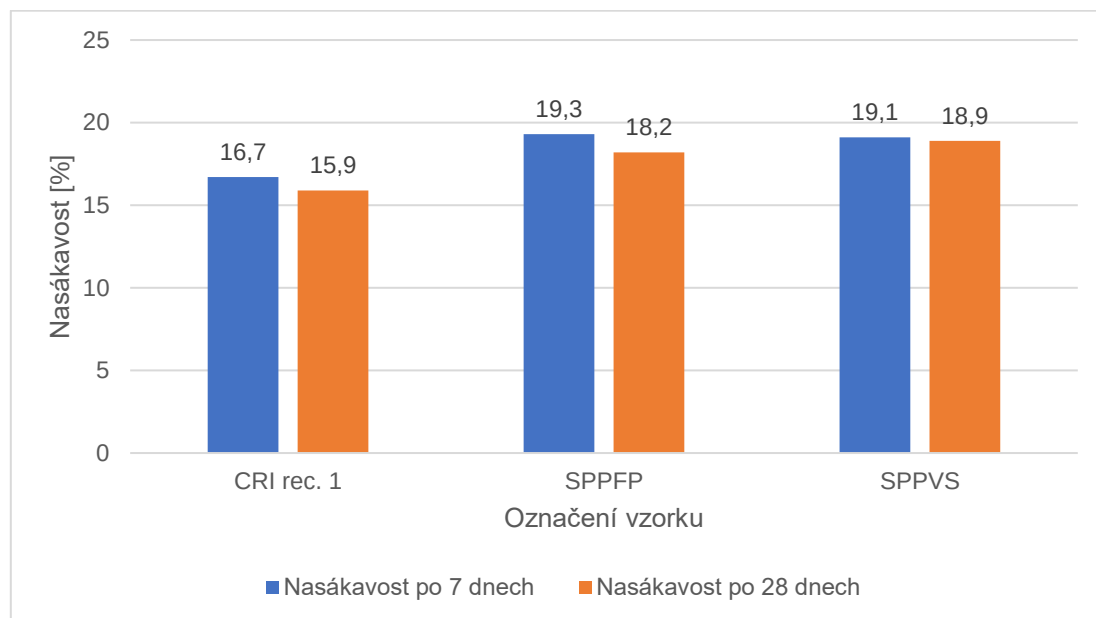
Pevnost v tahu za ohybu byla vlivem příměsí druhotných surovin ve všech případech snížena. Nejméně byly pevnosti v tahu za ohybu sníženy vlivem příměsí slévárenského písku pojeného vodním sklem. Pevnosti v tahu za ohybu po 7 dnech byly dokonce vyšší nežli u základní receptury. Pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech byly sníženy v průměru o 22 %.

Pevnost v tlaku po 7 i po 28 dnech směsi s příměsí slévárenského písku pojeného furanovou pryskyřicí byla nižší o 1 MPa a o 3,3 MPa. Zejména však lze z Graf č. 20 vypočítat u hmoty s použitím slévárenského písku pojeného vodním sklem

navýšení pevností v tlaku po 7 i po 28 dnech o 2,5 a 3,2 MPa. Toto navýšení pevností odpovídá navýšení v průměru o 19 %.

Nasákavost

Stanovené hodnoty nasákavostí receptur jsou uvedeny v Graf č. 21. Stanovení proběhlo dle postupu uvedeném v metodách zkoušení.



Graf č. 21 Stanovené nasákavosti základních receptur.

Z Graf č. 21 je patrné, že se nasákavosti druhotnými surovinami modifikovaných hmot ve všech případech zvýšily. Nasákavosti se zvýšily v průměru o 16 %.

4.2.4. Shrnutí řešení a výběr optimální druhotné suroviny pro náhradu plniva

Z uvedených vyhodnocení v této podkapitole je patrné, že se vlastnosti základní vybrané receptury vlivem substituce plniv druhotnými surovinami razantně změnily. Počátek tuhnutí byl oddálen a doba tuhnutí se prodloužila. Pro dosažení velice podobné konzistence bylo zapotřebí shodné nebo nižší množství záměsové vody. Nicméně bylo také zjištěno, že se konzistence vlivem použití druhotných surovin v čase oproti referenční směsi liší. Konzistence směsí s druhotnými surovinami je za 50 minut od namíchání směsí vždy nižší, nežli byla konzistence základní receptury.

Objemové hmotnosti nově navržených receptur v čerstvém i ve ztuhlém stavu byly srovnatelné nebo vyšší, což byl opět příslib vhodných fyzikálně mechanických parametrů. Pevnosti v tahu za ohybu byly vlivem použití slévárenského písku pojeného furanovou pryskyřicí sníženy více nežli pevnosti v tahu za ohybu zkušebních těles s použitím slévárenského písku pojeného vodním sklem. Vlivem náhrady plniv směsí

označené jako Vodní sklo došlo ke značnému navýšení pevností v tlaku oproti základní receptuře.

Na základě stanovených vlastností, kdy se lépe jevila substituce plniv slévárenským pískem pojeným furanovou pryskyřicí v čerstvém stavu hmoty a ve ztvrdlém stavu hmoty naopak vykazovala lepší vlastnosti hmota s použitím slévárenského písku pojeného vodním sklem, byly obě testované druhotné suroviny vyhodnoceny jako potenciálně vhodné pro další zkoumání.

5. Etapa IV – Návrh a výběr optimální kombinovaně modifikované receptury

Etapa IV se zabývá zejména ověřováním funkčnosti kombinací druhotných surovin. Pro daný účel bude na základě získaných teoretických poznatků, které byly následně laboratorně ověřeny, určena míra náhrady dané složky. Pojivové složky základní receptury byly nahrazovány elektrárenskými popílkami, a to v mírách 20 a 40 % z hmotnosti cementu. Při náhradě plnivových složek základní receptury byla zkoumána 100 % míra náhrady frakce 0,125 až 0,500 mm. V této etapě však budou nahrazovány pojivové složky i plniva současně a tyto náhrady budou kombinovány. V předchozí etapě byly vybrány dva typy elektrárenského popílku a slévárenské písky. Zároveň je ve čtvrté etapě rozšířený soubor zkušebních postupů. K dosavadním prováděným testování přibude po výběru užšího souboru potenciálně vhodných modifikovaných receptur ověření objemové stálosti v čase. Kontinuálním hydrostatickým vážením budou stanoveny objemové změny. Bude stanoveno množství dekantované vody z čerstvé směsi v odměrném válci o objemu 1 l. Na základě stanovených a vyhodnocených vlastností bude vybrána optimální receptura pro rubovou injektáž kanalizačních stok.

5.1. Posouzení a porovnání vlastností vybraných receptur

V předchozí části diplomové práce byly pro účel náhrady cementu vybrány elektrárenské popílků Chvaletice a Poříčí. Tyto popílků budou nahrazovat základní pojivovou složku cement CEM I 42,5 R v mírách 20 a 40 %.

Pro účel náhrady plnivových složek základní receptury byly vybrány slévárenské písky společnosti Arcelormittal – slévárenský písek pojený vodním sklem (dále jen SPPVS) a slévárenský písek pojený furanovou pryskyřicí (SPPFP).

Byly navrženy receptury uvedené v Tab. 21:

Tab. 21: Seznam analyzovaných receptur s kombinací druhotných surovin.

Označení receptury	Druhotná surovina + míra náhrady
1. furan	Slévárenský písek pojený furanovou pryskyřicí
2. furan + 20 % Chval	Slévárenský písek pojený furanovou pryskyřicí + 20 % popílek Chvaletice
3. furan + 40 % Chval	Slévárenský písek pojený furanovou pryskyřicí + 40 % popílek Chvaletice
4. furan + 20 % Poř	Slévárenský písek pojený furanovou pryskyřicí + 20 % popílek Poříčí
5. furan + 40 % Poř	Slévárenský písek pojený furanovou pryskyřicí + 40 % popílek Poříčí
6. vodní sklo	Slévárenský písek pojený vodním sklem
7. vodní sklo + 20 Chval	Slévárenský písek pojený vodním sklem + 20 % popílku Chvaletice
8. vodní sklo + 40 % Chval	Slévárenský písek pojený vodním sklem + 40 % popílku Chvaletice
9. vodní sklo + 20 % Poř	Slévárenský písek pojený vodním sklem + 20 % popílku Poříčí
10. vodní sklo + 40 % Poř	Slévárenský písek pojený vodním sklem + 40 % popílku Poříčí
11. CRI rec 1	-

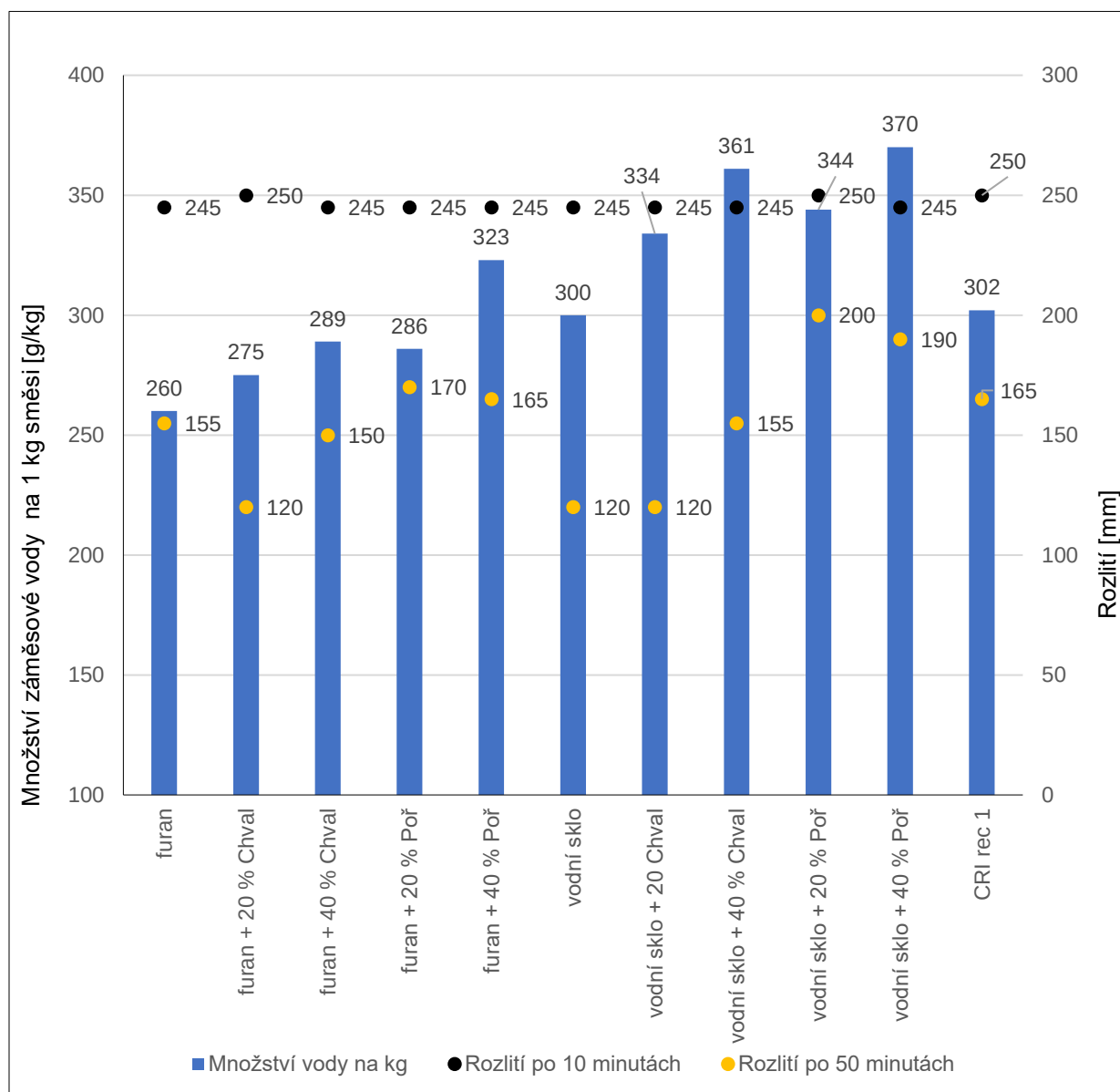
Na navržených recepturách byly ověřovány fyzikálně mechanické vlastnosti v čerstvém i ve ztvrdlém stavu. Byla ověřována zpracovatelnost směsí (stanovení konzistence rozlitím, stanovení počátku a doby tuhnutí), objemová hmotnost v čerstvém i ve ztvrdlém stavu. Dále byly stanoveny pevnosti v tahu za ohybu i pevnosti v tlaku, nasákavosti jednotlivých receptur. Receptury s návrhem substituce plniv i pojivových složek základní směsi byly testovány i z hlediska objemové stálosti materiálu. Soubor zkušebních metod byl rozšířen o stanovení odstoje vody a stanovení objemových změn v čase, které bylo provedeno kontinuálním hydrostatickým měřením.

5.2. Praktické zkoušení navržených receptur

5.2.1. Zkoušky prováděné v čerstvém stavu

Stanovení konzistence

Konzistence navrhovaných receptur byla stanovována zkouškou rozlítí kužele. Během předchozího zkoumání bylo ověřeno, že doba průtoku Marshovým viskozimetrem 75 sekund odpovídá rozlítí směsi 250 mm. Hodnoty rozlítí směsi v závislosti na množství záměsové vody jsou znázorněny v následujícím grafu:



Graf č. 22 Stanovené hodnoty konzistence v závislosti na množství záměsové vody a na čase.

V Graf č. 22 jsou uvedené hodnoty rozlití navrhovaných hmot v závislosti na množství záměsové vody. Uvedené hodnoty rozlití jsou uvedeny po 10 a 50 minutách od počátku doby míchání směsi. Hodnoty rozlití směsí po 10 minutách jsou velice podobné. Maximální rozdíl v rozlití činí 5 mm, přičemž tato hodnota odpovídá 2 %. Výchozí konzistence veškerých směsí je tedy takřka shodná.

Z grafu je patrné, že s rostoucím množstvím přidané druhotné suroviny vždy vzroste množství záměsové vody. Zároveň lze konstatovat, že přídavek elektrárenského popílku Poříčí rovněž způsobuje zvýšení množství záměsové vody oproti popílku Chvaletice. Obdobný trend vývoje zvyšování množství potřebné záměsové vody je patrný při použití jako plniva slévárenského písku pojeného vodním sklem oproti použití slévárenského písku pojeného furanovou pryskyřicí.

Při zkoumání stálosti směsi ve smyslu změny konzistence v čase je patrný rozdílný trend vývoje snižování hodnoty rozlivu. Zatímco při zvyšování množství popílku Chvaletice z 20 % na 40 % vadne směs pomaleji, při použití popílku Poříčí směs vadne rychleji se zvyšováním dávky popílku ve směsi.

Stanovení počátku a doby tuhnutí

Stanovení počátku a dob tuhnutí bylo provedeno pomocí automatických Vicatových přístrojů. Stanovené hodnoty jsou uvedené v následující tabulce.

Tab. 22: Počátek a doba tuhnutí receptur s kombinací druhotných surovin.

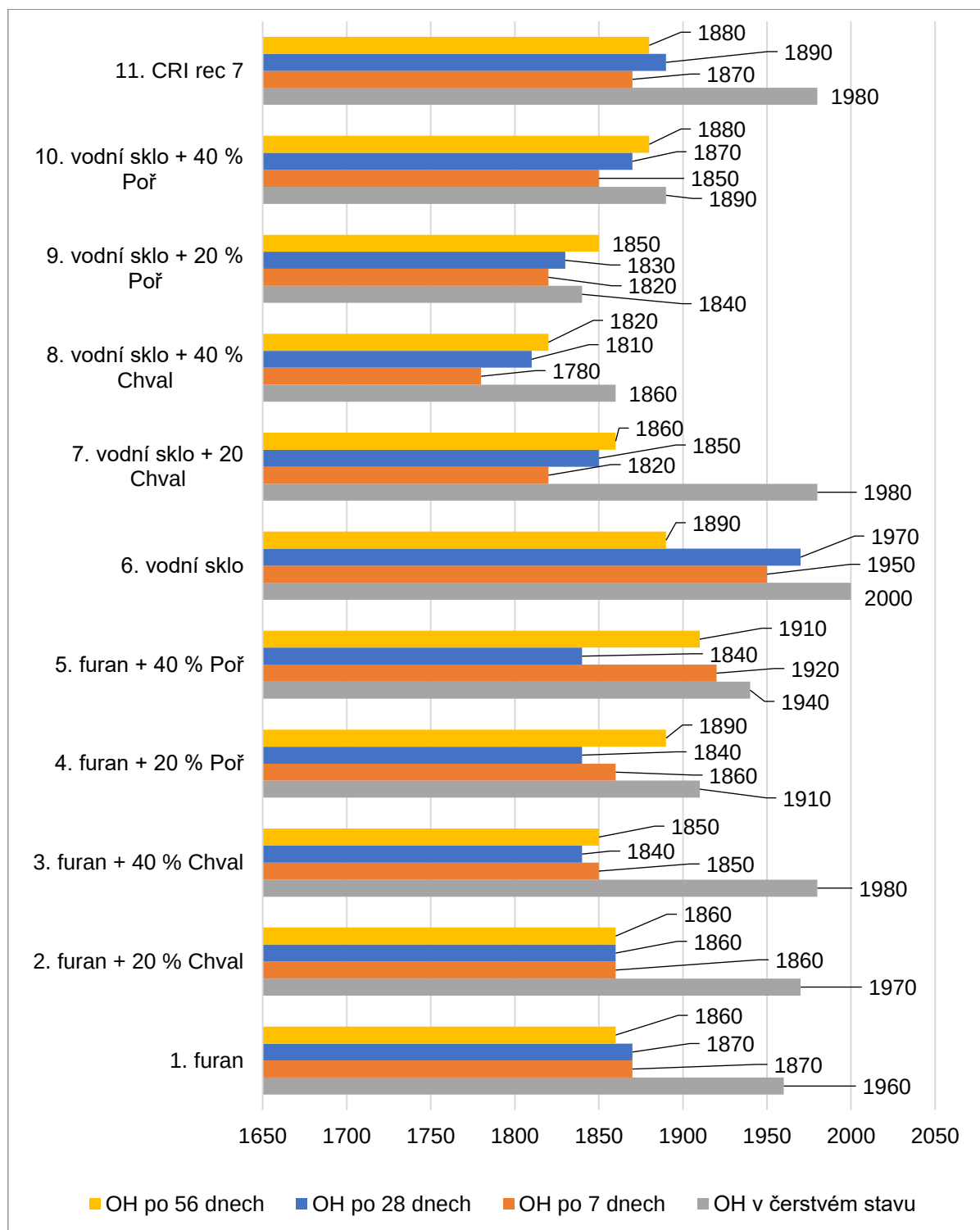
Ozn. vzorku	Počátek tuhnutí [hh:mm]	Konec tuhnutí [hh:mm]	Doba tuhnutí [hh:mm]	Doba tuhnutí vzhledem k REF [hh:mm]
CRI rec 1	2:50	29:59	27:09	0:00:00
furan	2:05	26:05	24:00	3:09
furan + 20 % Chval	2:12	23:19	21:07	6:02
furan + 40 % Chval	2:19	24:42	22:23	4:46
furan + 20 % Poř	2:13	37:33	35:20	15:49
furan + 40 % Poř	2:10	37:41	35:31	16:38
vodní sklo	2:20	22:40	20:20	6:49
vodní sklo + 20 Chval	2:40	23:50	21:10	5:59
vodní sklo + 40 % Chval	2:52	24:22	21:30	5:39
vodní sklo + 20 % Poř	2:21	38:00	35:39	16:30
vodní sklo + 40 % Poř	2:24	38:58	36:34	14:35

Z uvedené Tab. 22: lze vyčíst, že se počátek doby tuhnutí vlivem použití slévárenských písku počátek doby tuhnutí snižoval. Proti tomuto efektu působila příměs vysokoteplotního popílku Chvaletice, který naopak oddaloval počátek doby tuhnutí. Stejný efekt na počátek doby tuhnutí jako popílek Chvaletice měl v menší míře i popílek Poříčí. Dále lze říci, že vlivem použití vysokoteplotního popílku Chvaletice se čas konce doby tuhnutí zkracuje při kombinaci se slévárenským pískem pojeným furanovou pryskyřicí a prodlužuje v kombinaci se slévárenským pískem pojeným vodním sklem. Naopak vlivem fluidního popílku Poříčí se čas konce tuhnutí značně prodlužují. Prodloužení doby tuhnutí odpovídá průměrně 14 až 16 hodinám. Naopak zkrácení doby tuhnutí vlivem použití popílku Chvaletice je v průměru 1 až 3 hodinám. Zkrácení doby tuhnutí vlivem náhrady plniv odpovídá 3 hodinám v případě použití SPPFP a 6,5 hodinám při použití SPPVS.

5.2.2. Zkoušky prováděné ve ztvrdlém stavu

Objemové hmotnosti v čerstvém a vyzrálém stavu

Objemové hmotnosti byly prováděny dle popisu uvedeném v Metodách zkoušení. Stanovení proběhla dle ČSN EN 12390-6. V následujícím grafu jsou uvedené naměřené výsledky objemových hmotností v čerstvém i ve vyzrálém stavu.



Graf č. 23 Objemové hmotnosti receptur s kombinací druhotných surovin.

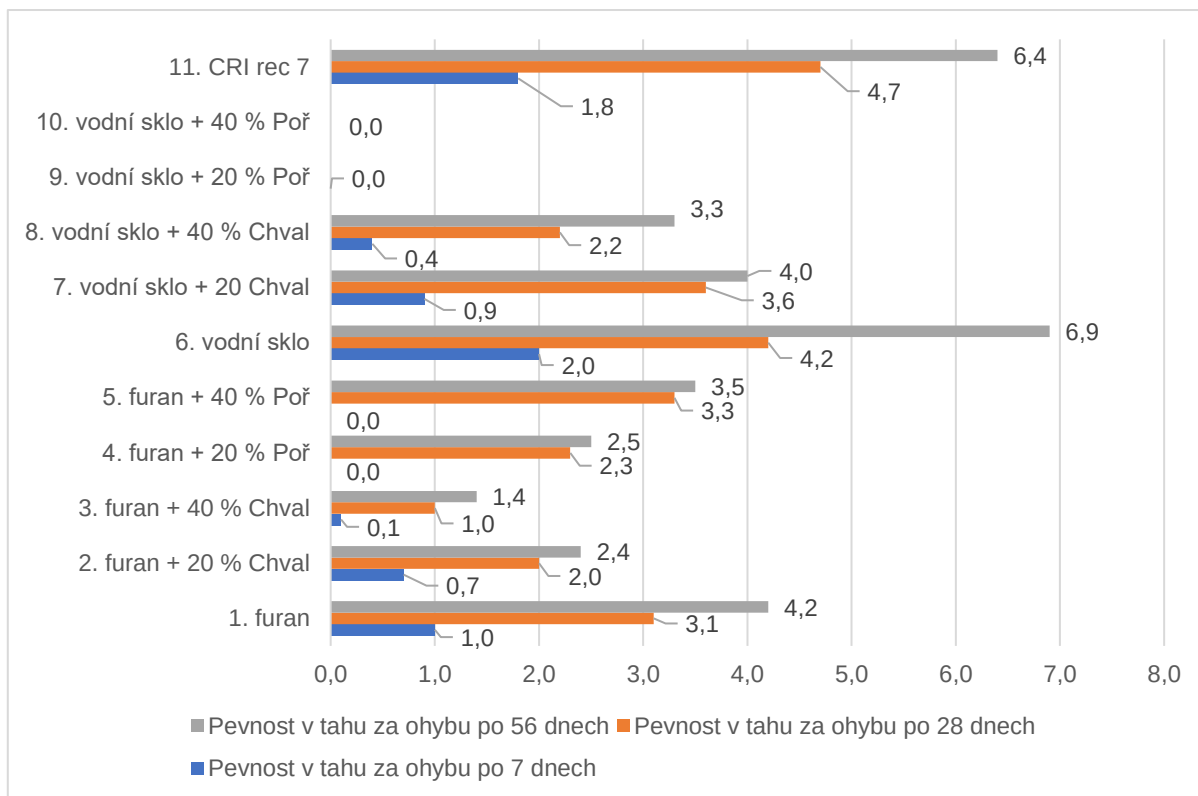
Z grafu lze vypožorovat, že se objemové hmotnosti směsí se slévárenským pískem pojeným furanovou pryskyřicí v čerstvém stavu zvyšují se zvyšujícím se množstvím přidaného popílku. K tomuto dochází v případě vysokoteplotního popílku i v případě fluidního popílku. Opačnou tendenci vykazují směsi s použitím slévárenského písku pojeného vodním sklem a vysokoteplotního popílku Chvaletice. Zde se se zvyšujícím přídavkem popílku objemové hmotnosti snižují. To bylo patrně zapříčiněno již nadměrným množstvím záměsové vody ve směsi. Směsi se slévárenským pískem pojeným vodním sklem a fluidním popínkem Poříčí vykazovaly opět zvyšující se objemovou hmotnost se zvyšujícím množstvím popílku.

Objemové hmotnosti ve ztvrdlém stavu po 7 i 28 dnech měly stejné trendy v závislosti na druhu a mírách náhrady základních surovin. Zde se však projevil rozdíl ve vývoji objemových hmotností v čase. V případě použití plniva s vodním sklem byly naměřené vyšší objemové hmotnosti po 28 dnech, nežli tomu bylo po 7 dnech. Při použití plniva s furanovou pryskyřicí byly naopak vyšší objemové hmotnosti po 7 dnech nežli po 28 dnech nebo bylo shodné.

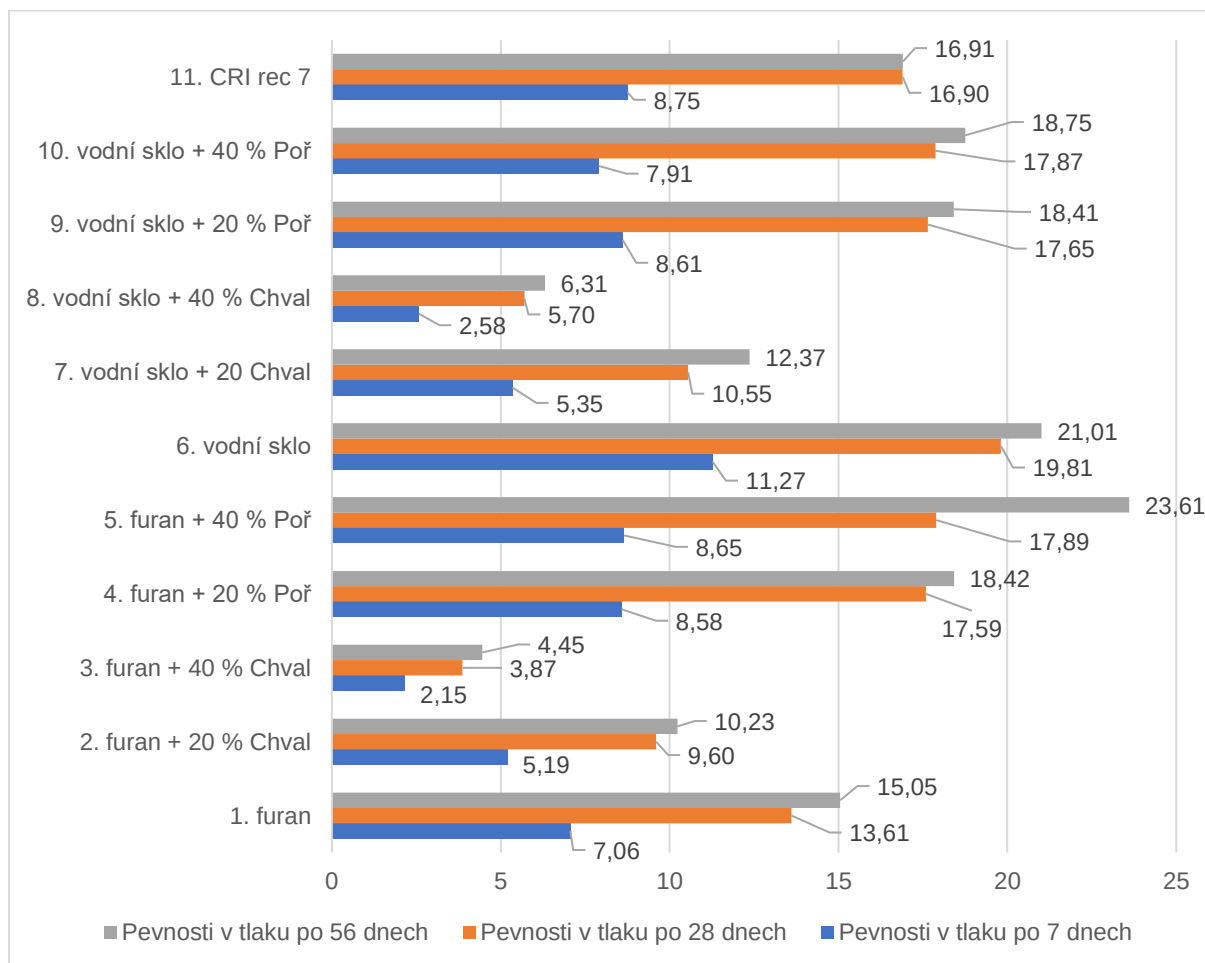
Vývin objemových hmotností po 56 dnech odpovídal předpokladu, že se objemové hmotnosti směsí s příměsí elektrárenských popílků budou zvyšovat i po 28 dnech. Vliv na zvyšování objemových hmotností po 56 dnech byl vyšší u popílku Poříčí než u popílku Chvaletice. Směsi bez použití popílku vykazovaly prakticky stejné objemové hmotnosti, jako po 28 dnech.

Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku navrhovaných receptur s kombinací druhotných surovin bylo provedeno dle metod zkoušení, které byly uvedeny v dokumentu výše. Stanovení proběhlo dle ČSN EN 12390-5 (stanovení pevnosti v tahu za ohybu), ČSN EN 12390-4 (stanovení pevnosti v tlaku). Stanovené hodnoty jsou uvedeny v následujících grafech.

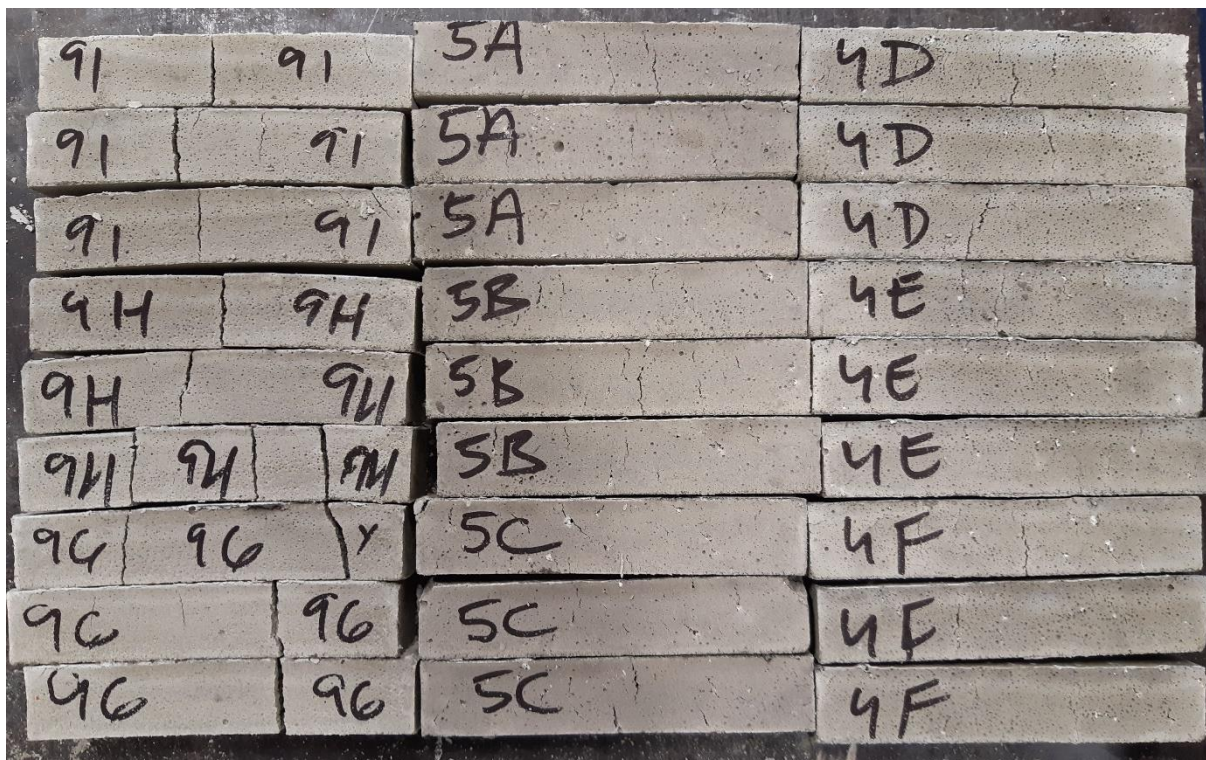


Graf č. 24 Pevnost v tahu za ohybu receptur s kombinací druhotných surovin.



Graf č. 25 Stanovené pevnosti v tlaku receptur s kombinací druhotných surovin.

Z výše uvedeného Graf č. 24 je patrné, že se pevnosti v tahu za ohybu přidavkem kombinace druhotných surovin ve všech případech snížily. Nejvyšší pevnosti v tahu za ohybu vykazovala vybraná základní receptura CRI rec. 1, která měla po 7 dnech pevnost tahu za ohybu 1,8 MPa a po 28 dnech 4,7 MPa. Nejvyšší pevnosti v tahu za ohybu měla receptura bez náhrady pojiv s použitím plniva pojeného vodním sklem, která měla pevnost 2,0 MPa po 7 dnech a 4,2 MPa po 28 dnech. Pevnost po 7 dnech byla tedy vyšší než u základní receptury. Dále je z Graf č. 24 patrné, že přidavkem fluidního popílku Poříčí byly pevnosti v tahu za ohybu naprosto degradovány. Vyrobené trámečky dané receptury vlivem smrštění popraskaly a naměřené pevnosti byly po 7 dnech nulové. Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech receptur s použitím fluidního popílku byly změřitelné pouze u plniva s obsahem furanové pryskyřice. Pokud bylo možné stanovit pevnosti v tahu za ohybu receptur s použitím popílku Poříčí, pevnosti se se zvyšujícím množstvím popílku zvyšovaly. Naopak ve všech případech použití vysokoteplotního popílku Chvaletice byl trend vývoje pevností opačný. Se zvyšující se dávkou popílku Chvaletice se pevnosti hmot snižovaly. Na druhou stranu nedocházelo k deformacím zkušebních těles, jako při použití popílku Poříčí. Dle mého názoru k tomuto smrštění došlo vlivem vysoké reaktivity fluidního popílku Poříčí. Toto tvrzení částečně podporují stanovené doby tuhnutí, jejichž počátek byl oddálen, ale následně došlo k velice rychlému zavadnutí směsí a patrně i rychlému vývoji počátečních pevností. Dále tuto domněnku potvrzuje chemický rozbor fluidního popílku Poříčí, jehož výsledky jsou uvedeny v Tab. 13:. Zde je patrný vysoký obsah reaktivního CaO. Rychlý vývin počátečních pevností měl pravděpodobně za následek vznik trhlin ve zkušebních tělesech.



Obr. 6: Deformované vzorky s fluidním popílkem Poříčí.

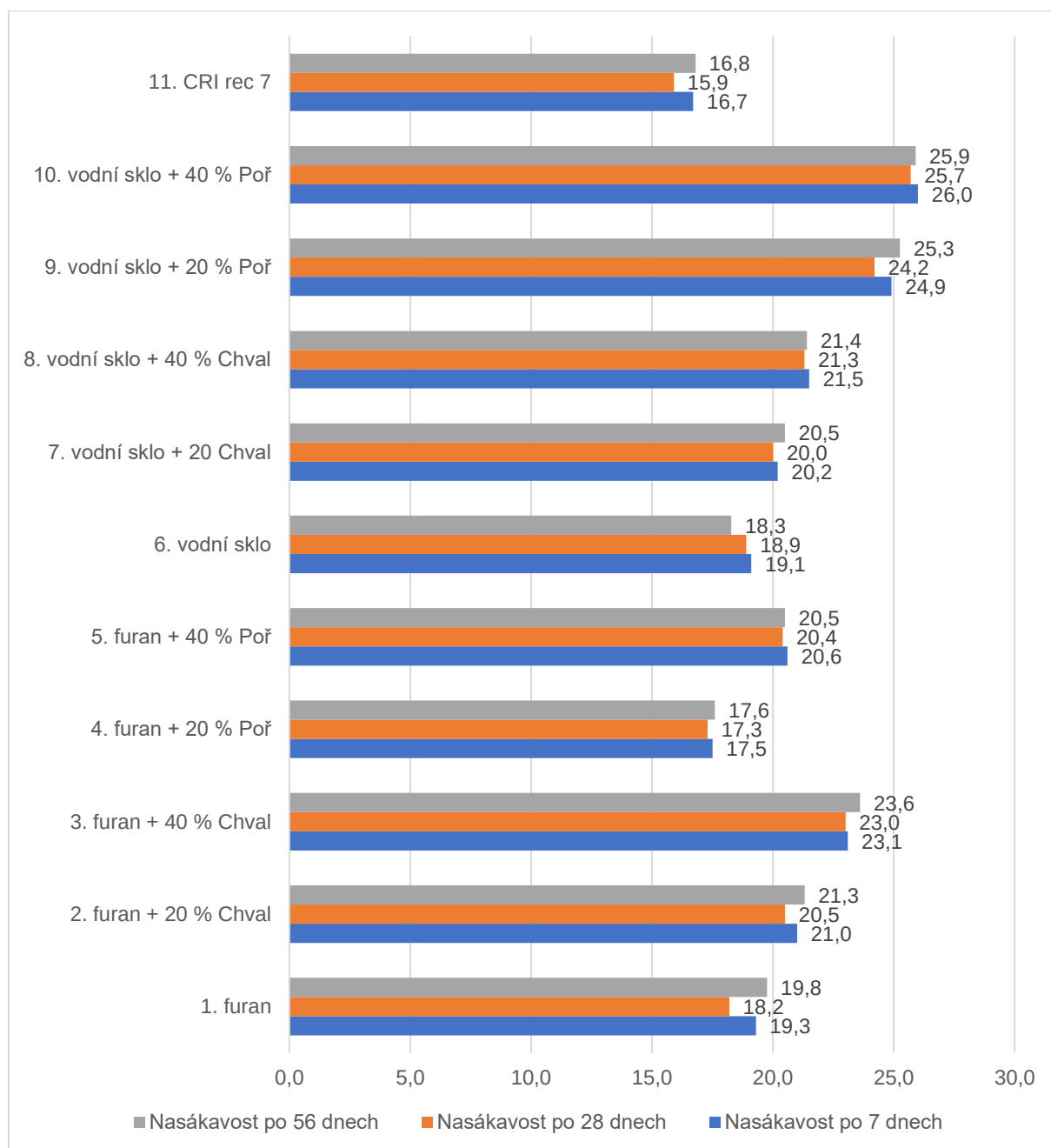
Pevnosti receptur s kombinací druhotných surovin v tlaku jsou uvedené v Graf č. 25. Pevnosti navrhovaných hmot v tlaku byly často vyšší nežli pevnosti v tlaku vybrané základní receptury. Nejvyšší pevnosti v tlaku po 7 i 28 dnech měla receptura 6. vodní sklo bez náhrady pojiv. Pevnost v tlaku receptury po 7 dnech byla 11,27 MPa a po 28 dnech 19,81 MPa. Navýšení pevností oproti základní receptuře činilo téměř 12 % po 28 dnech.

Dále lze z Graf č. 25 vydedukovat shodné trendy vývinu pevností v tlaku, jako tomu bylo při stanovení pevností v tahu za ohybu. Zvyšující se přídavek popílku Chvaletice měl za následek snižování pevností. Naopak se zvyšováním dávky popílku Poříčí se pevnosti hmot zvyšovaly.

Stanovené pevnosti po 56 dnech byly ve všech případech vyšší nežli pevnosti po 28 dnech. U směsí bez příměsí elektrárenských popílků bylo navýšení pevností minimální. Naopak u směsí s příměsí popílků bylo znatelné. Zejména při použití fluidního popílku Poříčí. Vývoj objemových změn a s nimi souvisejícími pevnostmi i po 56 dnech byl patrně způsoben pucolánovým charakterem popílku. Zároveň k tomuto jevu mohla přispět přítomnost krystalizační přísady ve všech směsích.

Nasákavost

Stanovené hodnoty nasákavostí receptur jsou uvedeny v Graf č. 26. Stanovení proběhlo dle postupu uvedeném v kapitole Metody zkoušení.



Graf č. 26 Stanovené nasákavosti receptur s kombinací druhotných surovin.

V Graf č. 26 jsou uvedené nasákavosti receptur s použitými kombinovanými druhotnými surovinami. Z grafu je patrné, že jakýkoli přídavek druhotné suroviny měl za následek zvýšení nasákavosti základní receptury. Základní receptura měla totiž nejnižší nasákavost, a to jak po 7 dnech, tak i po 28 dnech. Nasákavost základní vybrané receptury byla 16,7 % po 7 dnech, 15,9 % po 28 dnech a 16,8 % po 56 dnech.

Této hodnotě se nejvíce přiblížila receptura 4. furan 20 % Poříčí, která měla nasákavost po 7, 28 a 56 dnech 17,5, 17,3 a 17,6 %.

Dále lze z grafu vyčíst, že se zvyšující se dávkou příměsi popílku (Chvaletice i Poříčí) se zvyšuje míra nasákavosti. Zároveň lze konstatovat, že použití slévárenského písku pojeného furanovou pryskyřicí jako náhrady plniva mělo za následek menší navýšení nasákavosti nežli použití slévárenského písku pojeného vodním sklem.

Zároveň je z Graf č. 26 viditelné, že se veškeré nasákavosti v průběhu času snižovaly. Tento efekt byl patrně zapříčiněn tvorbou nových hydratačních produktů ve struktuře zkušebních těles, a tím tak došlo ke vzniku kompaktnější struktury, která byla méně nasákavá. Nicméně po 56 dnech byl trend vývinu nasákavostí zkušebních těles opět opačný a nasákavosti všech hmot se zvyšovaly. Tento trend je patrný prakticky u všech směsí.

5.3. Shrnutí řešení a výběr optimální receptury pro další testování

V rámci Etapy II byly nejprve zkoumány základní navrhované receptury. Na základě stanovených vlastností daných receptur byla vybrána jako optimální základní receptura **CRI rec. 1** s nejvyšším obsahem směsi přísad.

Dále byly zkoumány vybrané druhotné suroviny pro možnou náhradu pojivových složek základní receptury (CEM 42,5 R). Vlastnosti daných druhotných surovin byly stanovovány na cementových pastách se stejnou mírou náhrady pojiv, která byla empiricky určena na 40 %. Tato míra nahrazení byla zvolena pro lepší viditelnost rozdílných vlastností jednotlivých materiálů. Na základě provedených laboratorních zkoumání byly jako optimální vybrány dva elektrárenské popílky. Zvolenými popílky byly vysokoteplotní popílek z provozu Chvaletice a fluidní popílek z provozu Poříčí. Záměrně byly zvoleny dva rozdílné typy elektrárenských popílků pro srovnání výsledných vlastností navrhované hmoty při použití vysokoteplotního a při použití fluidního popílku. Na základě teoretických poznatků ověřených laboratorním zkoumáním byla ověřená míra náhrady pojiva 40 % jako hraniční. Proto byla v dalším testování navrhovaných hmot zvolena další míra náhrady pojiv na 20 %. Zvolené míry náhrad byly dále jednou z porovnávaných vlastností hmot.

Pro účel náhrady plnivových složek základní receptury byly zvoleny dostupné slévárenské písky pojené vodním sklem a slévárenské písky pojené furanovou

pryskyřicí. Před použitím zvolených druhotných surovin bylo nejprve třeba tyto vstupní suroviny předupravit drcením a následným roztříděním dle jednotlivých frakcí tak, aby bylo docíleno co možná nejpodobnější křivky zrnitosti ve srovnání se základní recepturou. Následně byly experimentálně vytvořeny zkušební směsi, na kterých bylo dále prováděno laboratorní testování dle vybraných metod zkoušení.

Laboratorním zkoumáním byly stanoveny základní vlastnosti navrhovaných hmot s kombinací druhotných surovin. Stěžejními vlastnostmi pro výběr potenciálně vhodných receptur byla zejména zpracovatelnost, pevnost v tahu za ohybu a v tlaku a nasákavosti.

Při zkoumání zpracovatelnosti cementových modifikovaných past s nižším vodním součinitelem docházelo k trhání struktury hmot s použitím fluidních popílků. Nicméně při vyšším vodním součiniteli hmot s kombinovanými druhotnými surovinami byla hmota vždy hladká.

Zpracovatelnost byla posouzena jako vhodná při použití obou dvou zkoumaných plniv.

Nasákavosti jednotlivých receptury se jevily nejlépe při použití nižší dávky popílku. Zároveň při použití popílku Poříčí v kombinaci se slévárenským pískem pojeným furanovou pryskyřicí byly nasákavosti sníženy. Na pohled porézní struktura vykazovala nejnižší nasákavost. Došlo tedy pravděpodobně k tvorbě uzavřeného pórovitého systému. Tomuto nasvědčuje i fakt, že se nasákavost nenavýšila vlivem způsobených trhlin v průřezu zkušebních těles.

Pevnosti v tahu za ohybu byly naprosto degradovány u vzorků s použitím fluidního popílku Poříčí vlivem popraskané struktury zkušebních těles. V případě, že bylo možné pevnosti v tahu za ohybu i pevnosti v tlaku stanovit, byly ve většině případů vyšší nežli při použití vysokoteplotního popílku Chvaletice. Nicméně na základě zpracovatelnosti a zároveň na základě znehodnocených zkušebních těles byla vybrána jako optimální receptura s náhradou pojivových složek **popílkem Chvaletice**. Pro další zkoumání byl tedy vybrán vysokoteplotní popílek Chvaletice spolu s oběma testovanými materiály s účelem náhrady plniv.

5.4. Testování vybraných modifikovaných receptur

V poslední kapitole diplomové práce jsou podrobněji zkoumány vybrané kombinovaně modifikované receptury. Krom původních stanovení prováděných na kombinovaně modifikovaných hmotách přibude stanovení objemových změn v čase a ověření stability směsi pomocí stanovení dekantované vody v odměrném válci. Z receptur budou vytvořeny zkušební hmoty a budou laboratorně testovány. Na základě vyhodnocených výsledků bude vybrána optimální receptura pro rubovou injektáž kanalizací.

Podrobněji zkoumané směsi jsou uvedené v Tab. 23:

Tab. 23: Seznam testovaných receptur.

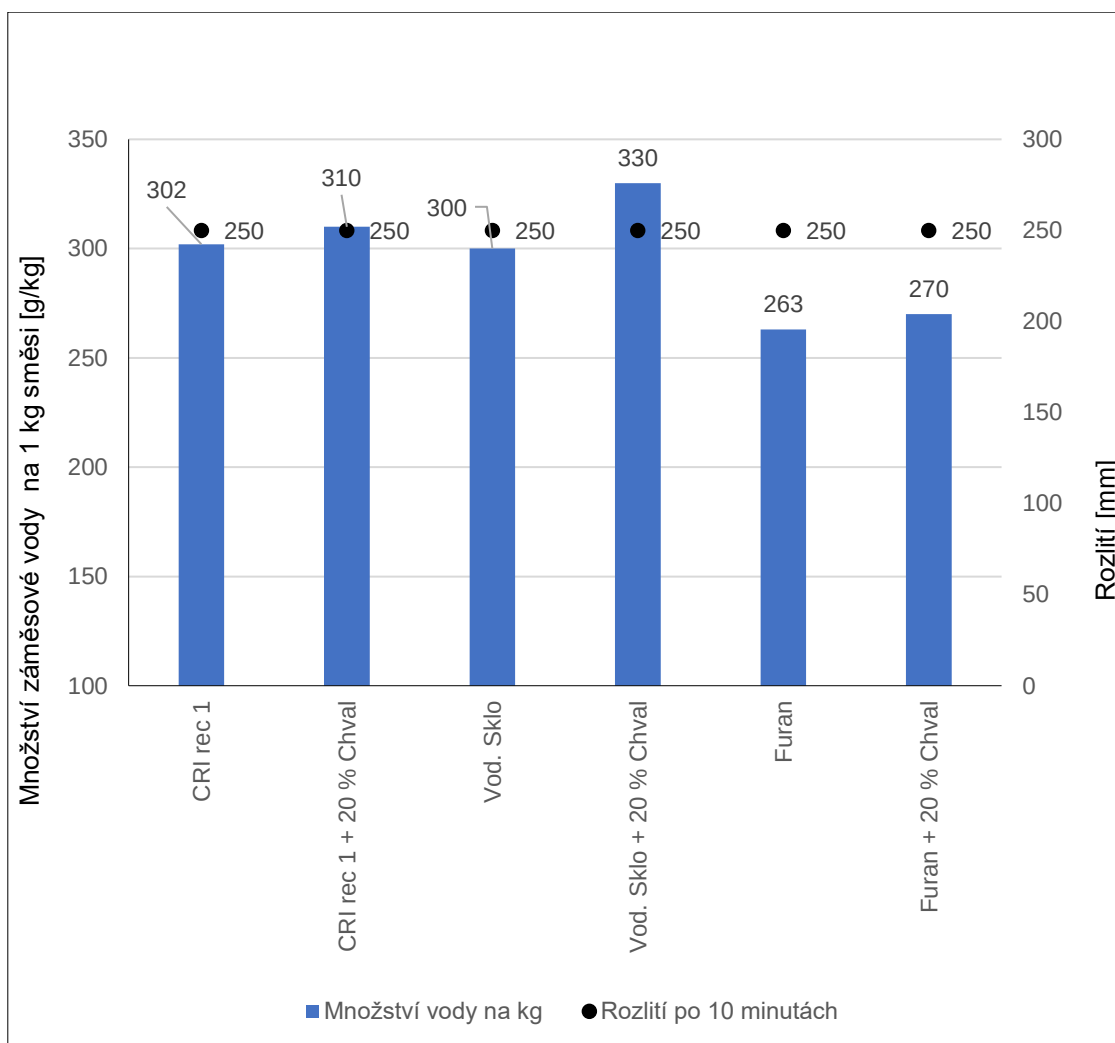
Označení receptury	Druhotná surovina + míra náhrady
CRI rec. 1	-
CRI rec 1 + 20 % Chval	20 % popílku Chvaltice
Vod. Sklo	100 % sléváresnký písek pojený vodním sklem
Vod. Sklo 20 % Chval	100 % sléváresnký písek pojený vodním sklem + 20 % popílku Chvaletice
Furan	100 % sléváresnký písek pojený furanovou pryskyřicí
Furan 20 % Chval	100 % sléváresnký písek pojený furanovou pryskyřicí + 20 % popílku Chvaletice

5.4.1. Zkoušky prováděné v čerstvém stavu

Stanovení konzistence

Konzistence navrhovaných receptur byla stanovována zkouškou rozlítí kužele. Cílem bylo dosáhnout konzistence rozlítí kužele 250 mm. Po dosažení požadovaného rozlítí bylo možné porovnávat vlastnosti směsí. Hodnoty rozlítí směsí v závislosti na množství záměsové vody jsou znázorněny v Graf č. 27:

Během předchozího zkoumání bylo ověřeno, že doba průtoku Marshovým viskozimetrem 75 sekund odpovídá rozlítí směsí 250 mm. Hodnoty rozlítí směsí v závislosti na množství záměsové vody jsou znázorněny v Graf č. 27:



Graf č. 27 Stanovené hodnoty konzistence v závislosti na množství záměsové vody a na čase.

Z Graf č. 27 je patrné, že přítomnost popílku Chvaletice v čerstvé směsi zvyšuje potřebné množství záměsové vody. Dále lze konstatovat, že vlivem nahrazení plnivových složek se při použití SPPVS mírně zvýšilo množství potřebné záměsové vody. Směsi s přídavkem SPPFP vyžadovaly pro dosažení stejné hodnoty rozlití kužele nižší množství záměsové vody.

Stanovení počátku a doby tuhnutí

Stanovení počátku a dob tuhnutí bylo provedeno pomocí automatických Vicatových přístrojů. Stanovené hodnoty jsou uvedené v následující tabulce.

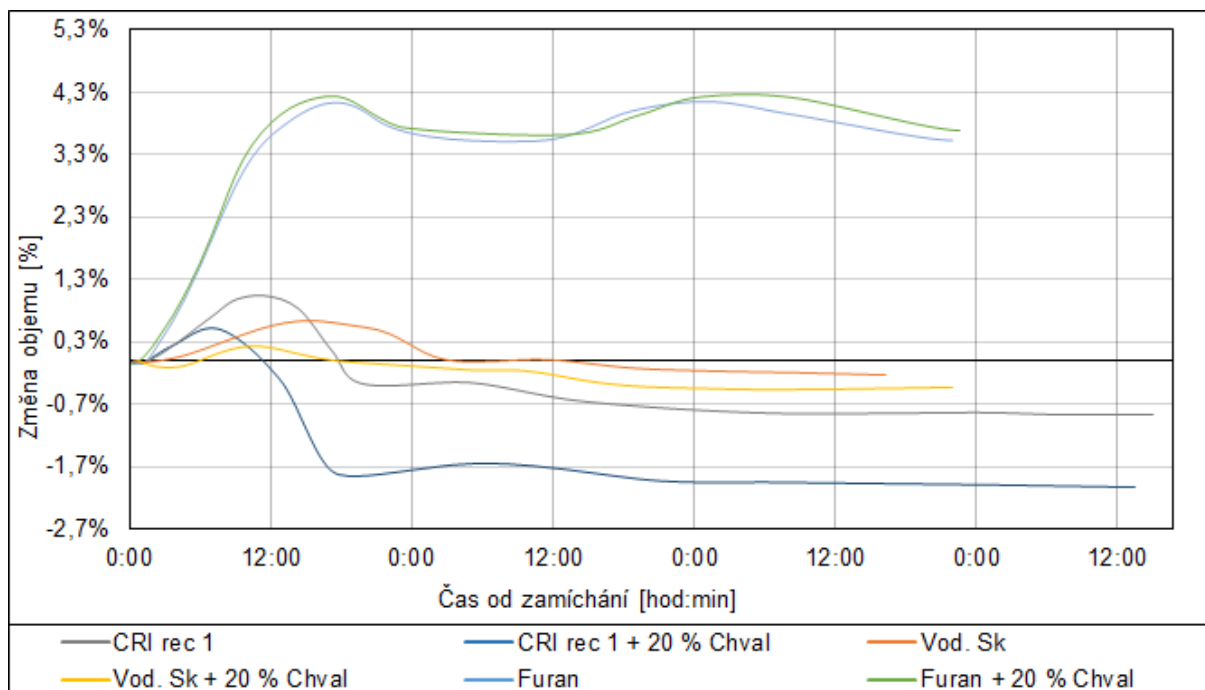
Tab. 24: Počátek a doba tuhnutí vybraných receptur s kombinací druhotných surovin.

Ozn. vzorku	Počátek tuhnutí [hh:mm]	Konec tuhnutí [hh:mm]	Doba tuhnutí [hh:mm]	Doba tuhnutí vzhledem k REF [hh:mm]
CRI rec 1	2:50	29:59	27:10	0:00
CRI rec 1 + 20 % Chval	2:05	28:00	26:55	-0:15
Vod. Sk	2:45	27:45	25:00	-2:10
Vod. Sk + 20 % Chval	2:05	23:45	21:40	-5:30
Furan	2:20	38:00	35:40	8:30
Furan + 20 % Chval	1:55	39:55	38:00	10:50

Z Tab. 24: je patrné, že počátek doby tuhnutí modifikovaných receptur nastal ve všech případech dříve než počátek doby tuhnutí základní směsi. Zároveň je patrné, že vlivem substituce pojiv elektrárenským popílkem Chvaletice nastal počátek doby tuhnutí taktéž dříve. Naopak při použití popílku byla prodloužena doba tuhnutí. Směsi s použitím SPPVS měly kratší dobu tuhnutí oproti základní receptuře. Naopak směsi s přídavkem SPPFP vykazovaly výrazně delší dobu tuhnutí.

Objemové změny

Objemové změny byly stanoveny kontinuálním hydrostatickým vážením. Postup zkoušení je popsán v kapitole Metody zkoušení. Výsledky zkoumání jsou uvedeny v následujícím grafu:



Graf č. 28 Stanovené objemové změny vybraných modifikovaných směsí.

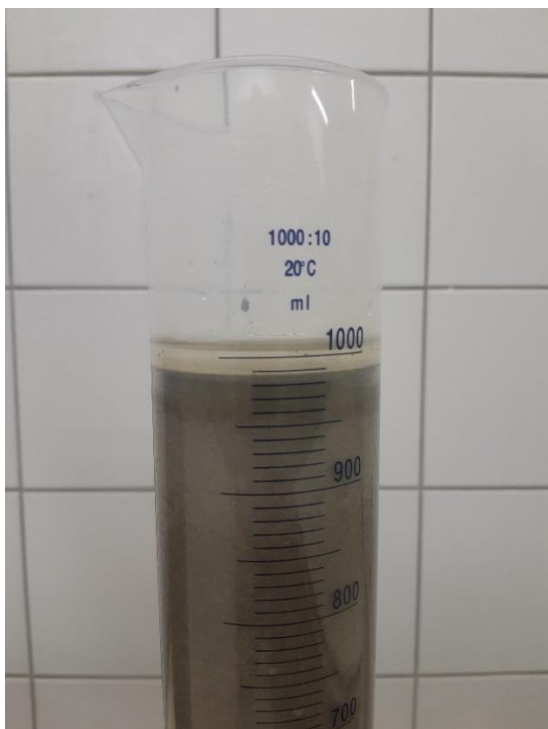
Dle Graf č. 28 lze konstatovat, že téměř ve všech případech došlo v prvotním krátkém časovém úseku ke zvětšování objemu hmoty během tuhnutí. Nejmarkantnější nárůst objemu vykazovaly směsi s použitím SPPFP jako plniva. Zde došlo k nárůstu objemu až o 4,3 %. Základní vybraná hmota taktéž vykazovala během doby tuhnutí zvětšování svého objemu, avšak pouze v rámci 1 %. Použitím SPPVS bylo počáteční bobtnání směsi značně omezeno a při přidavku vysokoteplotního popílku docházelo k mírnému počátečnímu smršťování hmoty. Z Graf č. 28 je taktéž patrné, že vlivem substituce 20 % pojiva vysokoteplotním popílkem vždy došlo k omezení počátečních objemových změn směsi.

Ve fázi tvrdnutí zkoumaných hmot docházelo ve většině případů ke smršťování struktury hmoty. V případě receptur s použitím SPPFP však docházelo k mírnému snížení objemu, ale následnému rozpínání na již zmiňovanou hodnotu 4,3 %. Toto navýšení objemu bylo pravděpodobně způsobeno interakcí vstupních složek směsi, která měla za následek tvorbu porézní struktury zkušebních těles. Ve všech ostatních případech došlo ke snížení konečného objemu. Ve fázi tvrdnutí mělo použití vysokoteplotního popílku za následek větší konečné smrštění hmoty.

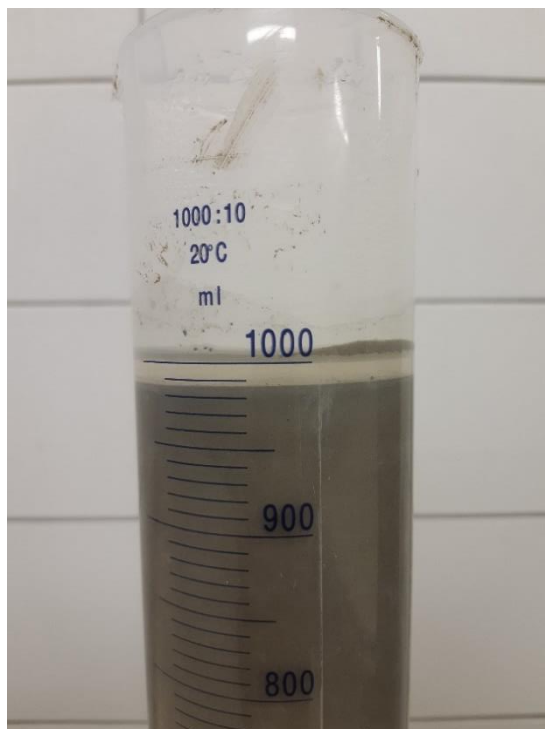
Z hlediska objemových změn se jeví jako optimální receptura s použitím SPPVS s příměsí popílku Chvaletice, kde docházelo k nejmenším objemovým změnám.

Stanovení množství dekantované (odstáté) vody

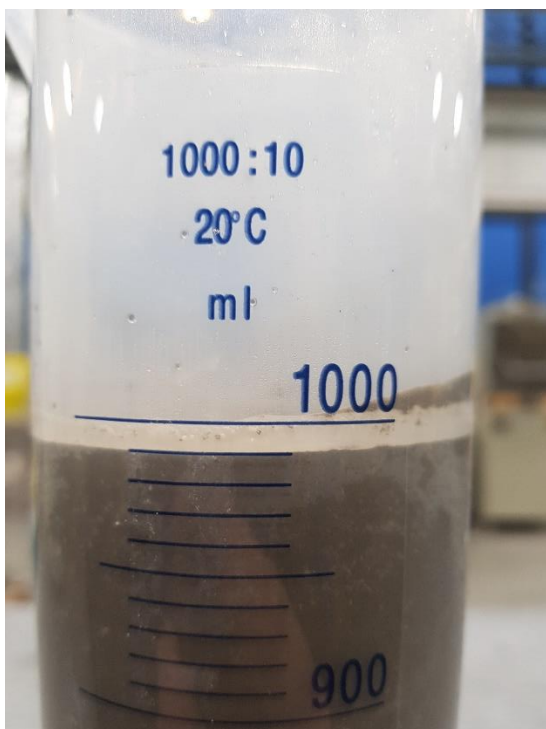
Stabilita směsi byla určována pomocí stanovení množství dekantované vody ze směsi. Jako stabilní směsi se označují hmoty, u kterých je množství odstáté vody menší než 5 % jejich celkového objemu. Postup zkoušky je uveden v kapitole Metody zkoušení. Množství odstáté vody jednotlivých směsí je patrné na následujících obrázcích.



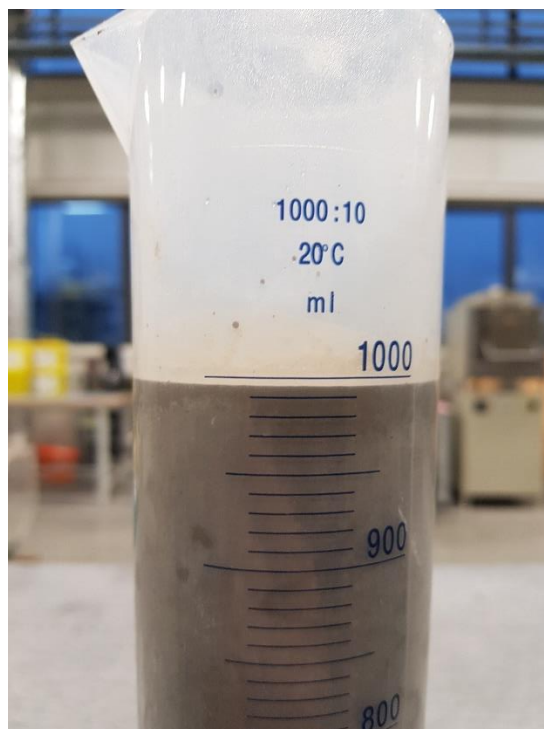
Obr. 7: CRI rec 1.



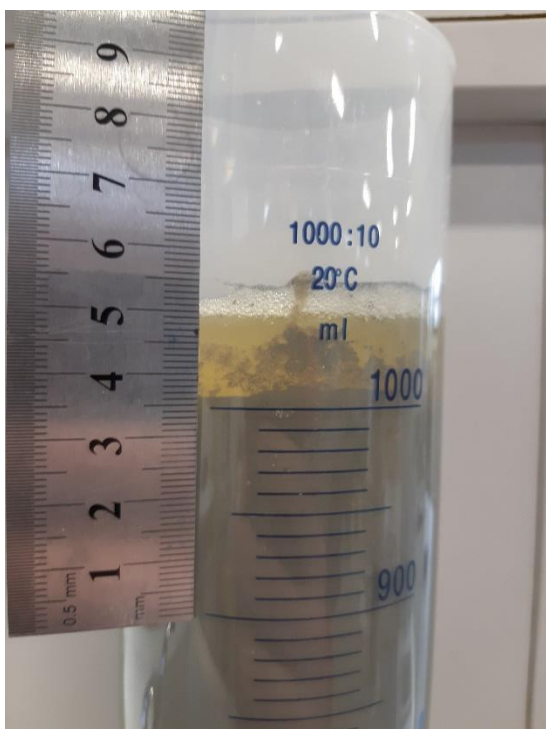
Obr. 8: CRI rec 1 + 20 % Chval.



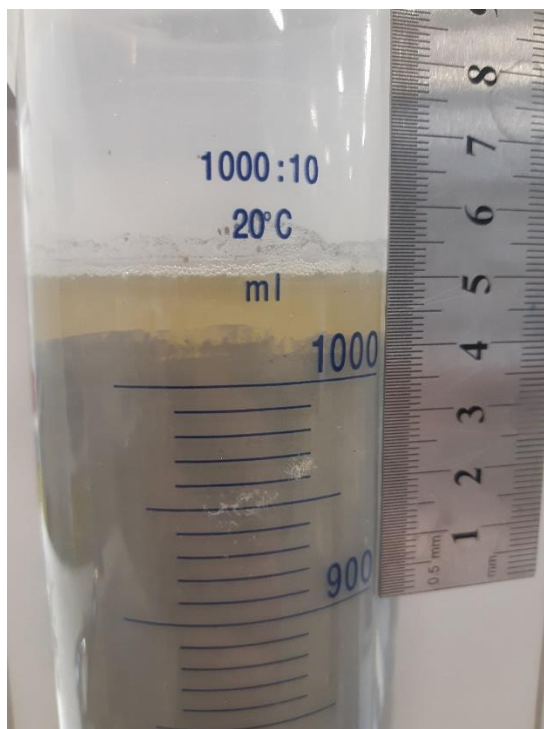
Obr. 9: Vod. Sklo.



Obr. 10: Vod. sklo + 20 % Chval.



Obr. 11: Furan.



Obr. 12: Furan. + 20 % Chval.

Z výše uvedených obrázků je patrné, že vlivem přídatku popílku Chvaletice do čerstvých směsí vždy došlo ke snížení množství dekantované vody. Dále se množství dekantované vody snížilo s použitím SPPVS. Naopak pokud byl použit SPPFP

docházelo k výrazným objemovým změnám a zároveň bylo stanoveno nejvyšší množství dekantované vody. Dle stanovených množství odstáté vody byla vyhodnocena jako nejstabilnější směs s použitím SPPVS a elektrárenského popílku Chvaletice. Naměřená množství dekantovaných hmot jsou uvedena v následující tabulce.

Tab. 25: Množství dekantované vody.

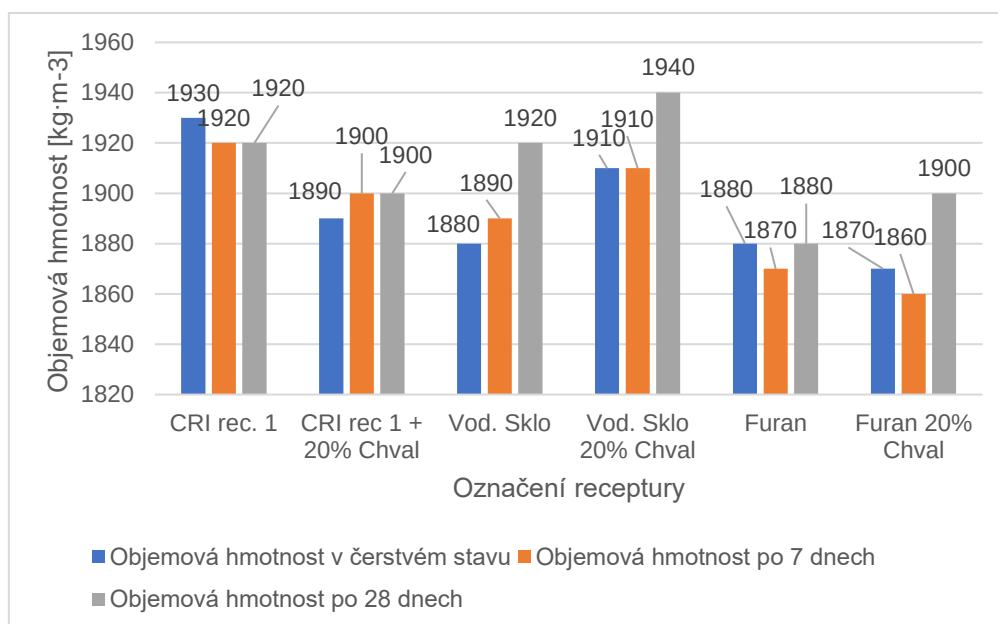
Ozn. vzorku	Množství dekantované vody [ml]	Stabilní směs [-]
CRI rec 1	13	ANO
2 CRI rec 1 + 20 % Chval	11	ANO
3 Vod. Sk	9	ANO
4 Vod. Sk + 20 % Chval	4	ANO
5 furan	45	ANO
6 furan + 20 % Chval	37	ANO

V Tab. 25: jsou uvedena množství dekantované vody z čerstvých směsí. Zároveň lze dle naměřených množství konstatovat, že jsou všechny čerstvé směsi stabilní. Čerstvá směs se považuje za stabilní, pokud je množství odstáté vody nižší, nežli je 5 % jejího objemu. Nicméně je zároveň patrné, že stabilita směsí se značně různila. Modifikací základní receptury popílkem Chvaletice a SPPVS se podařilo zvýšit stabilitu směsi. Ke značnému pohoršení stability došlo u směsi modifikované SPPFP. Nicméně i tato směs je považována za stabilní.

5.4.2. Zkoušky prováděné ve ztvrdlém stavu

Objemové hmotnosti v čerstvém a vyzrálém stavu

Objemové hmotnosti byly prováděny dle popisu uvedeném v Metodách zkoušení. Stanovení proběhla dle ČSN EN 12390-6. V následujícím grafu jsou uvedené naměřené výsledky objemových hmotností v čerstvém i ve vyzrálém stavu.



Graf č. 29 Objemové hmotnosti receptur s kombinací druhotných surovin.

V Graf č. 29 jsou patrné rozdílné trendy vývoje objemových hmotností. Základní hmota CRI rec 1 měla nejvyšší objemovou hmotnost v čerstvém stavu. Ve ztvrdlém stavu se objemová hmotnost základní vybrané receptury čase dále nelišila. Přídavek 20 % popílku k základní receptuře způsobil navýšení objemových hmotností ve ztvrdlém stavu, což bylo patrně způsobeno vyšším vodním součinitelem. Výsledná objemová hmotnost směsi s použitím popílku je oproti základní receptuře nižší.

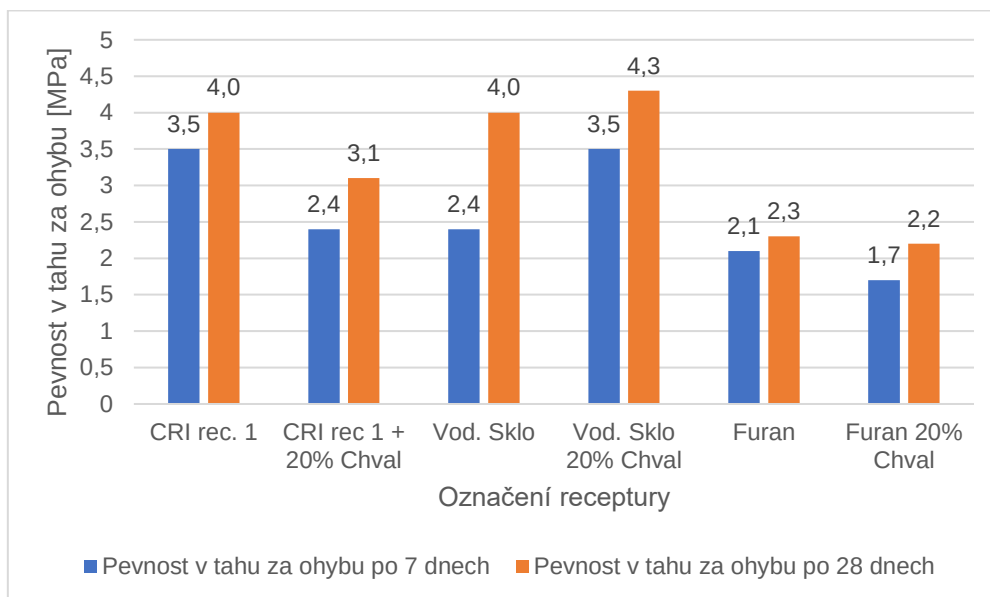
Objemové hmotnosti v čerstvém stavu hmot s použitím SPPVD jsou oproti základní receptuře nižší. Zároveň je patrný výrazný nárůst objemových hmotností i po 7 dnech. Směsi se SPPFP mají nižší objemové hmotnosti po 7 dnech než objemové hmotnosti v čerstvém stavu. Použití popílku Chvaletice mělo za následek výrazné navýšení objemových hmotností po 28 dnech.

Vybraná základní směs měla objemovou hmotnost $1920 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Této hodnotě se nejvíce přiblížila směs s použitím SPPVD. Směs s kombinovanou náhradou SPPVD a 20 % popílku Chvaletice měla po 28 dnech dokonce vyšší objemovou hmotnost $1940 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Vysoký nárůst objemových hmotností po 28 dnech pravděpodobně způsobil pucolánový charakter vysokoteplotního popílku Chvaletice.

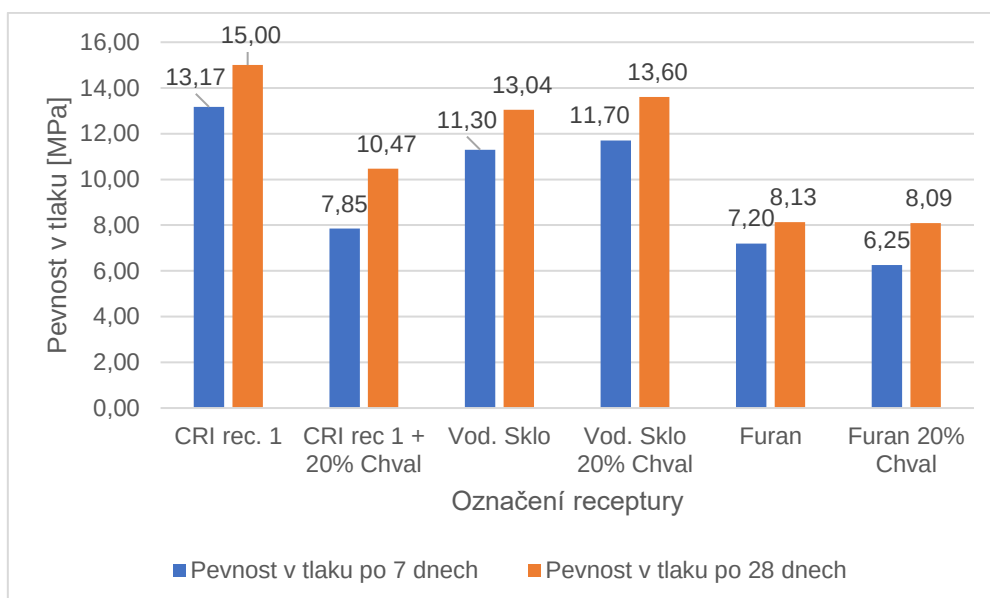
Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku navrhovaných receptur s kombinací druhotných surovin bylo provedeno dle metod zkoušení, které byly uvedeny v dokumentu výše. Stanovení proběhlo dle ČSN EN 12390-5 (stanovení

pevnosti v tahu za ohybu), ČSN EN 12390-4 (stanovení pevnosti v tlaku). Stanovené hodnoty jsou uvedeny v následujících grafech.



Graf č. 30 Pevnost v tahu za ohybu vybraných receptur s kombinací druhotných surovin.



Graf č. 31 Pevnost v tahu za ohybu vybraných receptur s kombinací druhotných surovin.

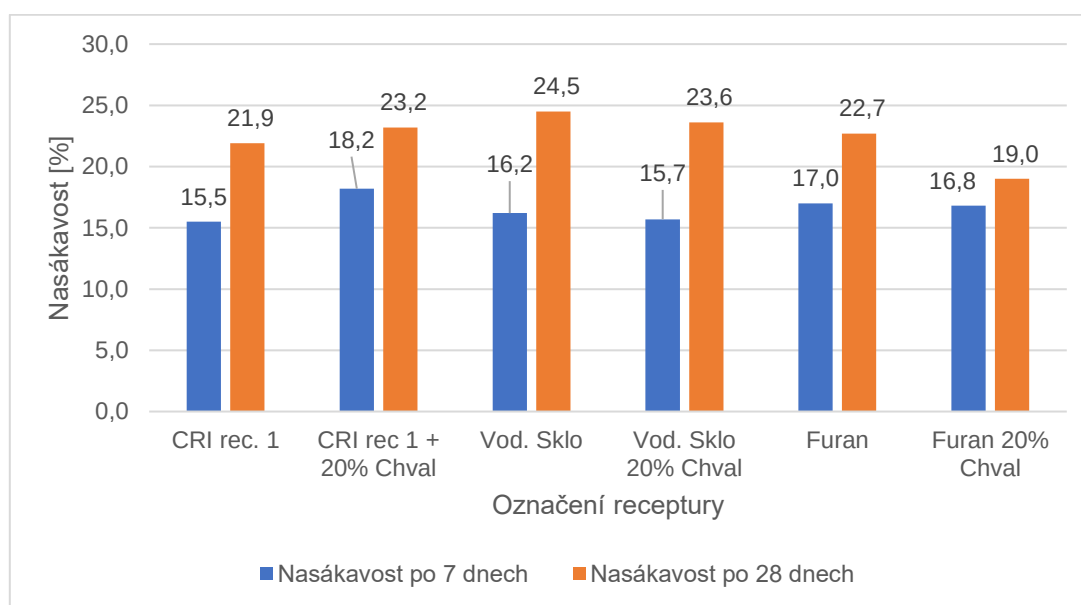
Z Graf č. 30 je patrné, že se modifikací vybrané základní receptury dokázalo navýšit 28denní pevnosti v tahu za ohybu. Směsi s použitím SPPVS vykazovaly pomalejší nárůst pevností, ale konečná pevnost v tahu za ohybu byla ve srovnání se základní recepturou stejná nebo vyšší. Zároveň lze říci, že použitím SPPFP se pevnosti v tahu za ohybu výrazně snížily. Taktéž lze konstatovat, že přidavkem vysokoteplotního popílku se rychlost nárůstu pevností snížila, ale konečné pevnosti

byly velice podobné. Tento jev kopíruje vývoj objemových hmotností a je dán již zmíněným pucolánovým charakterem vysokoteplotního popílku.

V Graf č. 31 jsou patrné velice podobné trendy vývoje pevností zkoušených hmot ve ztvrdlém stavu. Nicméně pevnosti v tlaku zkoumaných hmot se vlivem kombinované modifikace základní směsi nepodařilo navýšit. Z modifikovaných hmot měly nejvyšší pevnosti v tlaku směsi s použitím SPPVS. Zároveň měl přídavek vysokoteplotního popílku za následek navýšení pevností v tlaku po 7 i po 28 dnech.

Nasákavost

Stanovené hodnoty nasákavostí receptur jsou uvedeny v Graf č. 26. Stanovení proběhlo dle postupu uvedeném v kapitole Metody zkoušení.



Graf č. 32 Stanovené nasákavosti vybraných receptur s kombinací druhotných surovin.

Z Graf č. 32 je patrné, že vlivem náhrady základních pojivových složek popílkem se nasákavost ztvrdlých hmot zvyšuje. Zároveň bylo ověřeno, že je nasákavost všech hmot po 28 dnech nižší nežli po 7 dnech. Tento jev je patrně způsoben dotvářením hydratačních produktů a vyšší hutností struktury zkušebních vzorků. Zároveň lze konstatovat, že náhradou plnivových složek základní směsi slévárenskými písky došlo rovněž ke zvýšení nasákavosti zkušebních hmot. V případě SPPVS bylo navýšení menší nežli při použití SPPFP. Hodnota nasákavosti základní směsi je 15,5 % po 7 dnech a 15,4 % po 28 dnech. Vlivem modifikace základní receptury druhotnými surovinami byly nasákavosti vytvořených hmot navýšeny až o 16 %.

5.5. Shrnutí řešení Etapy IV

Cílem Etapy IV byl návrh a výběr optimální kombinovaně modifikované receptury injektážní hmoty. V rámci této etapy byly vybrané potenciálně vhodné modifikované receptury z předcházející etapy kombinovány tak, aby byla nahrazena složka plniv i pojivové složky základní směsi. Kombinovaně modifikované receptury byly testovány shodným souborem zkušebních metod a na základě výsledků bylo vybráno šest potenciálně vhodných směsí, na kterých byl ověřován širší soubor laboratorních zkoumání. Podrobněji byly hmoty testovány zejména v čerstvém stavu. Krom původních zkoušení byla sledována objemová stálost čerstvých směsí a stabilita směsí. Na základě stanovených výsledků pak byla vybrána optimální receptura.

Při totožné konzistenci čerstvých směsí byla stanovena objemová hmotnost, počátek a doba tuhnutí, objemová hmotnost v čerstvém i ve ztvrdlém stavu, objemová stálost, stabilita směsi, pevnosti v tahu za ohybu a pevnost v tlaku a nasákavost hmot ve ztvrdlém stavu. Bylo zjištěno, že se vlivem substituce vstupních složek směsi prodloužila doba tuhnutí směsí až o 10 hodin. Modifikací základní receptury se podařilo značně omezit objemové změny směsi. Ve všech případech byla vytvořena stabilní injektážní hmota. Některé modifikované receptury vykazovaly lepší pevnosti v tahu za ohybu, nežli měla základní receptura. Dosažené pevnosti v tlaku modifikovaných receptur byly nižší nežli pevnosti v tlaku základní receptury. Použitím druhotných surovin byla taktéž zvýšena nasákavost zkušebních hmot.

Vzhledem k naměřeným výsledkům se jako optimální kombinovaně modifikovaná receptura jeví receptura s použitím slévárenského písku pojeného vodním sklem a s příměsí 20 % vysokoteplotního popílku Chvaletice.

V. Závěr

Cílem práce byl vývoj a ověření vlastností nových injektážních hmot pro rubovou injektáž kanalizačních stok. Na základě teoretického zpracování rešerše poznatků týkající se problematiky kanalizačních stok byly sestaveny teoretické podklady pro hodnocení odolnosti hmot pro rubovou injektáž. Byl sestaven soubor potenciálně vhodných druhotných surovin a na základě experimentálního testování byla posouzena jejich využitelnost v injektážních materiálech. Dále byly vybrány a charakterizovány vhodné primární a druhotné suroviny pro experimentální činnost a z vybraných surovin byly navrženy základní surovinové varianty pro ověřování jejich vlastností. Následně proběhl návrh a laboratorní ověření surovinové varianty injektážní směsi s využitím druhotných surovin. Výsledkem práce byla formulace optimálního složení hmoty pro rubovou injektáž. Součástí závěru je ekonomické vyhodnocení navržené hmoty.

V rámci práce byla navržena směs sestavená ze základních vstupních surovin, která vykazovala oproti běžně dostupné komerční hmotě lepší vlastnosti. Bylo dosaženo lepších fyzikálně mechanických vlastností. Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech byla navýšena o 8 % a pevnost v tlaku po 28 dnech byla navýšena 6 %. Zároveň byla docílena nižší nasákavost navrhované směsi vzhledem k vybrané referenční hmotě.

V další části této práce byla experimentálně ověřována možnost náhrady základních vstupních složek navržené základní surovinové směsi druhotnými surovinami. Bylo prokázáno, že vlivem 100% míry náhrady plnivových složek slévárenským pískem pojeným vodním sklem lze částečně zachovat nebo či zvýšit fyzikálně mechanické parametry injektážní směsi. Bylo docíleno navýšení pevností v tahu za ohybu. Zároveň bylo modifikací základní receptury docíleno snížení objemových změn hmoty během tuhnutí a tvrdnutí a zvýšení stability směsi v čerstvém stavu.

Zároveň se nahrazením základních vstupních surovin injektážní směsi povedlo snížit náklady na výrobu vyvíjené hmoty. Základní plnivé složky byly zcela nahrazeny nerecyklovatelnou odpadní surovinou ze slévárenské výroby. Požadavky na úpravu odpadních slévárenských písků pro zajištění použitelnosti byly standartní. Směs bylo třeba upravit mletím a tříděním vyseparovat požadované frakce plniva.

Zároveň byla ověřena 20% míra náhrady pojiv, tedy veskrze náhrada cementu elektrárenským popílkem. Výroba cementu je energeticky a finančně vysoce náročná činnost. Snížení dávky cementu v navrhované směsi je tak nezanedbatelným ekologickým i ekonomickým zvýhodněním.

Výsledným výstupem této práce je optimální receptura pro výrobu rubové injektážní směsi kanalizačních stok. Budoucí výzkum může být zaměřen na stanovení dlouhodobé chemické odolnosti hmoty.

Seznam použité literatury

- [1] *Zákon č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu a o změně některých zákonů (zákon o vodovodech a kanalizacích).*
- [2] *Vyhláška Ministerstva zemědělství, kterou se provádí zákon č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu a o změně některých zákonů (zákon o vodovodech a kanalizacích).*
- [3] *Tomáš Novák Studie alternativ rekonstrukce vybrané části stokové sítě. Brno, 2017. 76 s., 2 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce doc. Ing. Jaroslav Raclavský, Ph.D.*
- [4] *DOLÁK, Martin. Návrh nových technologií rubové injektáže zděných kanalizačních stok. Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební. Vedoucí práce Prof. Ing. ROSTISLAV DROCHYTKA, CSc., MBA.*
- [5] *DANĚK, Tomáš. Objekty na stokové síti. Ostrava, 2019. Technický standart.*
- [6] *HORÁK, Marek. ANALÝZA STÁRNUTÍ VYBRANÝCH MATERIÁLŮ STOKOVÝCH SÍTÍ. Brno, 2013. Disertační. VUT v Brně.*
- [7] *BRE CONSTRUCTION DIVISION. Concrete in aggressive ground. 3. ed. Garston, Watford: BRE, 2005. ISBN 18-608-1754-8*
- [8] *HERMANN, Radek. Vývoj chemicky odolné stříkané směsi. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců.*
- [9] *LEDEREROVÁ, Jaroslava a kol. Biokorozní vlivy na stavební díla. Praha: Silikátový svaz, 2009. ISBN 978-80-86821-50-4.*
- [10] *PRUDIL, S. Průběh koroze betonu. Brno: Vysoká škola zemědělská v Brně, 1975*
- [11] *ČSN 73 1326 - Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. 2003.*

- [12] ČSN EN 73 1326 - Stanovení odolnosti proti zmrazování/rozmrazování s rozmrazovací solí. 2004.
- [13] ČSN 73 1322 - Stanovení mrazuvzdornosti betonu. 1968.
- [14] DIN 19753 - Draft on mortars for construction and rehabilitation sewer system. 2004.
- [15] ČSN EN 12715: Provádění speciálních geotechnických prací - Injektáže. listopad 2001.
- [16] RS servis: Provádění sanačních prací - Rubová injektáž zdiva. RS servis [online]. 2019 [cit. 2020-09-02]. Dostupné z: <https://www.rssg.cz/provadeni-sanacnich-praci/rubova-injektaz-zdiva>
- [17] DIN 19753 - Draft on mortars for construction and rehabilitation sewer system. La Plaine Saint-Denis Cedex, 2017.
- [18] AMBRUZ, Pavel. VÝVOJ BETONŮ S VYSOKÝM OBSAHEM POPÍLKU A OVĚŘENÍ JEHO TRVANLIVOSTI V RŮZNÝCH PROSTŘEDÍCH. Brno, 2014. Diplomová práce. VUT v Brně.
- [19] SUPIT, S.W.M. a F.U.A. SHAIKH. Durability properties of high volume fly ash concrete containing nano-silica [online]. 2015 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1617/s11527-014-0329-0. ISSN 13595997. Dostupné z: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84938967773&origin=inward&txGid=c31c9a4ea8edf2fd436f22959adbf e29>
- [20] ATIŞ, C.D. High-volume fly ash concrete with high strength and low drying shrinkage [online]. 2013 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:2(153). ISSN 08991561. Dostupné z: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0037368261&origin=inward&txGid=d7ed2d5901cd093bfa71eefa9f2c2 eb9>

- [21] WANG, S., E. LLAMAZOS, L. BAXTER a F. FONSECA. *Durability of biomass fly ash concrete: Freezing and thawing and rapid chloride permeability tests* [online]. 2008 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1016/j.fuel.2007.05.027. ISSN 00162361. Dostupné z: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-36349008039&origin=inward&txGid=dab4d1ca30db1601cbf080e51c7f68ef>
- [22] SOKOLOVÁ, Kristýna. *Vlastnosti deponovaných elektrárenských popílků*. Praha, 2018. *Bakalářská práce*. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE FAKULTA STAVEBNÍ Katedra technologie staveb.
- [23] TZB info [online]. Brno, 2018 [cit. 2020-11-03]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/cihly-bloky-tvarnice/18458-vlastnosti-fluidnich-elektrenskych-popilku-s-ohledem-na-jejich-pouzitelnost-ve-vyrobe-palenych-staviv>
- [24] SHA, Fei, Shucaí LI a Rentai LIU. *Experimental study on performance of cement-based grouts admixed with fly ash, bentonite, superplasticizer and water glass*. Science direct [online]. 10. února 2018, , 282-291 [cit. 2019-05-22]. DOI: 10.1016. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181732247X?via%3Dihub>
- [25] FIGALA, Petr, Vít ČERNÝ a Rostislav DROCHYTKA. *Vliv druhotných surovin na strukturu polymercementového kompozitu*. IMateriály [online]. 25. 2. 2019, 2019 [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: https://www.imaterialy.cz/rubriky/materialy/vliv-druhotnych-surovin-na-strukturu-polymercementoveho-kompozitu_46664.html
- [26] AITCIN, Pierre-Claude a český překlad Vlastimil Bílek, Josef Krátký, Ivan Smolík. *Vysokohodnotný beton*. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2005. ISBN 80-867-6939-9.
- [27] PIERRE-CLAUDE, Aitcin. *Binders for durable and sustainable concrete*. Velká Británie: Taylor and Francis, 2008.

- [28] KOPECKÝ, Filip. *MOŽNOSTI VYUŽITÍ ODPADNÍCH SLÉVÁRENSKÝCH PÍSKŮ*. Brno, 2013. Diplomová. VUT v Brně.
- [29] BEDNÁŘOVÁ, Vlasta. *Recyklace slévárenských odpadů*. Ostrava, 2004. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [30] Bentonit. *Medium internacional* [online]. [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <http://www.bentonit.cz/mediuminternacional>
- [31] *Bentonity pro stavebnictví* [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://www.keramost.cz/cz/produkty/bentonity/bentonity-pro-stavebnictvi>
- [32] MOHAMMAD, Reza Azadi. *Optimization of cement-based grouts using chemical additives*. *Science direct* [online]. srpen 2017, , 623 - 637 [cit. 2019-05-22]. DOI: 10.1016. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775516300956?via%3DiHub>
- [33] ČSN EN 12390-5 (731302) *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. 2019.
- [34] ČSN EN 12390-7 (731302) *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. 2019.
- [35] ČSN EN 12390-6 (731302) *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. 2010.
- [36] ČSN EN 1015-3 (722400) *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím strásacího stolku)*. 2000.
- [37] ČSN EN 196-3 (722100) *Metody zkoušení cementu - Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti*. 2017.
- [38] ČSN EN 12390-4 (731302) *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 4: Pevnost v tlaku - Požadavky na zkušební lisy*. 2001.

Seznam tabulek

Tab. 1:	Mechanické vlastnosti kanálových cihel [6].	17
Tab. 2:	Hodnocení odolnosti vůči působení chemikálií dle DIN 19753 [17].	34
Tab. 3:	Parametry charakterizující vlastnosti injekčních směsí [15].	34
Tab. 4:	Chemické složení běžného popílku [4].	38
Tab. 5:	Seznam producentů popílku [4].	39
Tab. 6:	Přibližné složení některých vysokoteplotních škvár [4].	40
Tab. 7:	Přibližné složení drceného skelného recyklátu [4].	41
Tab. 8:	Vybrané primární suroviny.	61
Tab. 9:	Fyzikálně mechanické vlastnosti základních surovin.	63
Tab. 10:	Chemické složení primárních surovin.	64
Tab. 11:	Seznam analyzovaných druhotných surovin.	64
Tab. 12:	Fyzikálně mechanické vlastnosti druhotných surovin	69
Tab. 13:	Chemické složení zkoumaných druhotných surovin.	69
Tab. 14:	Základní receptury vzniklé modifikací původní receptury C-RI-7.	72
Tab. 15:	Počátek a doba tuhnutí.	73
Tab. 16:	Seznam analyzovaných druhotných surovin.	80
Tab. 17:	Druhotné suroviny nahrazující pojiva.	80
Tab. 18:	Stanovené počátky a doby tuhnutí modifikovaných cementových past.	82
Tab. 19:	Receptury s použitím druhotných surovin pro náhradu plniv.	86
Tab. 20:	Stanovené počátky a doby tuhnutí modifikovaných receptur.	88
Tab. 21:	Seznam analyzovaných receptur s kombinací druhotných surovin.	94
Tab. 22:	Počátek a doba tuhnutí receptur s kombinací druhotných surovin.	97
Tab. 23:	Seznam testovaných receptur.	106
Tab. 24:	Počátek a doba tuhnutí vybraných receptur s kombinací druhotných surovin.	108
Tab. 25:	Množství dekantované vody.	112

Seznam grafů

Graf č. 1	Stanovené křivky zrnitosti vstupních křemičitých písků.	62
Graf č. 2	Křivka zrnitosti primárního pojiva.	63
Graf č. 3	Kumulativní křivka zrnitosti vysokoteplotních i fluidních popílků.	67
Graf č. 4	Kumulativní křivka zrnitosti upraveného skelného recyklátu Vetropack.	68
Graf č. 5	Kumulativní křivky zrnitosti slévárenských písků.	68
Graf č. 6	Závislost množství záměsové vody na době průtoku viskozimetrem.	72
Graf č. 7	Objemové hmotnosti základních směsí.	75
Graf č. 8	Stanovené pevnosti v tahu za ohybu základních směsí.	76
Graf č. 9	Stanovené pevnosti v tlaku základních směsí.	76
Graf č. 10	Stanovené nasákavosti základních receptur.	77
Graf č. 11	Stanovení závislosti množství záměsové vody na rozlití.	81
Graf č. 12	Objemové hmotnosti modifikovaných past.	83
Graf č. 13	Stanovené pevnosti v tahu za ohybu modifikovaných past.	84
Graf č. 14	Stanovené pevnosti v tlaku modifikovaných past.	84
Graf č. 15	Stanovené nasákavosti základních receptur.	85
Graf č. 16	Kumulativní křivky zrnitostí plniv.	87
Graf č. 17	Stanovené hodnoty konzistence v závislosti na množství záměsové vody.	87
Graf č. 18	Objemové hmotnosti modifikovaných past.	89
Graf č. 19	Stanovené pevnosti v tahu za ohybu modifikovaných past.	90
Graf č. 20	Stanovené pevnosti v tlaku modifikovaných cementových past.	90
Graf č. 21	Stanovené nasákavosti základních receptur.	91
Graf č. 22	Stanovené hodnoty konzistence v závislosti na množství záměsové vody.	95
Graf č. 23	Objemové hmotnosti receptur s kombinací druhotných surovin.	98
Graf č. 24	Pevnost v tahu za ohybu receptur s kombinací druhotných surovin.	100
Graf č. 25	Stanovené pevnosti v tlaku receptur s kombinací druhotných surovin.	100
Graf č. 26	Stanovené nasákavosti receptur s kombinací druhotných surovin.	103
Graf č. 27	Stanovené hodnoty konzistence v závislosti na množství záměsové vody.	107
Graf č. 28	Stanovené objemové změny vybraných modifikovaných směsí.	109
Graf č. 29	Objemové hmotnosti receptur s kombinací druhotných surovin.	113
Graf č. 30	Pevnost v tahu za ohybu vybraných receptur s kombinací druhotných surovin.	114
Graf č. 31	Pevnost v tahu za ohybu vybraných receptur s kombinací druhotných surovin.	114
Graf č. 32	Stanovené nasákavosti vybraných receptur s kombinací druhotných surovin.	115

Seznam obrázků

Obr. 1:	Schématický řez šachtou a betonovou stokou [5].	16
Obr. 2:	Schéma rozdělení metod oprav kanalizací.	18
Obr. 3:	Schéma síranové koroze ve stokovém systému [9].....	28
Obr. 4:	Všeobecné rozdělení injekčních směsí [15].	30
Obr. 5:	Principy a metody injekčních prací [15].	31
Obr. 6:	Deformované vzorky s fluidním popínkem Poříčí.	102
Obr. 7:	CRI rec 1.	110
Obr. 8:	CRI rec 1 + 20 % Chval.	110
Obr. 9:	Vod. Sklo.	111
Obr. 10:	Vod. sklo + 20 % Chval.....	111
Obr. 11:	Furan.	111
Obr. 12:	Furan. + 20 % Chval.	111