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

VÝZKUM A VÝVOJ VYSOCEODOLNÝCH KOMPOZITŮ PRO CHEMICKY NAMÁHANÉ STAVEBNÍ KONSTRUKCE
RESEARCH AND DEVELOPMENT OF HIGH RESISTANT COMPOSITES FOR CHEMICALLY STRESSED BUILDING STRUCTURES

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE
ABRIDGED VERSION OF DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE — Ing. Petr Figala
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — prof. Ing. ROSTISLAV DROCHYTKA, CSc., MBA, dr. h. c.
SUPERVISOR

BRNO 2024

Klíčová slova:
Portlandský cement, přísada, příměs, krystalizační přísada, substituce, druhotná surovina, vysokoteplotní elektrárenský popílek, skelný recyklát, slévárenský písek pojený vodním sklem, silica vyzdívka, kamenné odprašky, cementové odprašky, uhelná škvára, správková malta, zdící hmota, spárovací hmota, stříkaná malta pro torkret, chemická odolnost, biogenní koroze, kyselina sírová, sírany

Keywords:
Portland cement, admixture, additive, crystallizing admixture, substitution, secondary raw material, high-temperature fly ash, recycled glass, foundry sand bonded with water glass, silica lining, stone filler, cement filler, coal slag, remediation mortar, masonry compound, grout compound, shotcrete mortar for torkrettage, chemical resistance, biogenic corrosion, sulfuric acid, sulphates

Název pracoviště:
Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců

Původní, nezkrácená verze disertační práce je uložena na Ústavu technologie stavebních hmot a dílců, Fakulta stavební, VUT v Brně.

© Ing. Petr Figala, 2024

ÚVOD 5
1 CÍLE PRÁCE 6
2 METODIKA PRÁCE 6
2.1 ETAPA 1: Charakterizace expozičních prostředí, návrh metody laboratorní simulace 7
2.2 ETAPA 2: Ověření charakteristik dostupných správkových hmot 8
2.3 ETAPA 3: Výběr vstupních surovin, návrh základních surovinových variant jednotlivých komponent systému 9
2.4 ETAPA 4: Laboratorní ověření základních surovinových variant 10
2.5 ETAPA 5: Návrh a laboratorní ověření receptur s využitím druhotných surovin 11
2.6 ETAPA 6: Sledování vlivu přidaných druhotných surovin na vybrané charakteristiky vyvinutých hmot 12
3 VÝSLEDKY, HODNOCENÍ A DISKUSE 13
3.1 Sestavení a ověření základních surovinových variant 13
3.2 Optimalizace vybraných surovinových variant příměsí vhodných druhotných surovin 15
3.3 Posouzení vlivu optimalizace na vybrané charakteristiky nových hmot 17
3.4 Vývoj nové metodiky pro stanovení chemické odolnosti kompozitů v prostředí odpadních systémů 19
4 SHRNUTÍ 20
5 ZÁVĚR 23
6 PŘÍNOSY PRO VĚDNÍ OBOR 24
7 PŘÍNOS PRO PRAXI 24
8 SEZNAM VYBRANÉ LITERATURY 25
9 CURRICULUM VITAE 26
10 ABSTRAKT 28
11 ABSTRACT 28

ÚVOD

V České republice je velice rozsáhlá vodohospodářská infrastruktura, přičemž v současné době mají stokové sítě cca 30 tisíc kilometrů. Přitom vlastníci těchto sítí jsou zákonem vázáni tato stavební díla udržovat v dobrém technickém stavu, což vzhledem k vysokému stáří, špatnému stavebně technickému stavu a náročným expozičním podmínkám představuje nelehký úkol. Výměna stávajících zděných či betonových děl za konstrukce z odolnějších materiálů je velmi nákladná a v mnoha případech z několika příčin nerealizovatelná. Z těchto důvodů se snaží celá řada výrobců stavebních hmot vyvinout trvanlivý chemicky odolný sanační systém ze správkových materiálů na polymercementové bázi, který bude použitelný na celou řadu prvků kanalizačního systému. Zaměření těchto sanačních systémů je poměrně úzce specializované na opravy daného typu stavebních konstrukcí, a to z důvodu specifického charakteru agresivních činitelů vyskytujících se v kanalizačních sítích.

Hmoty na bázi cementového či polymercementového pojiva jsou v současné době nejpoužívanějšími stavebními materiály na trhu. Tento trend má spojitost s širokým spektrem uplatnění v rozdílných expozičních podmínkách a zároveň se vyznačuje poměrně nízkými pořizovacími náklady ve srovnání s jinými stavebními materiály. Výroba kvalitního cementu je však stále poměrně nákladný proces, přičemž snaha výrobců stavebních materiálů je snižovat výrobní náklady. Současně při výrobě cementu vzniká velké množství skleníkových plynů, což jde proti rostoucímu tlaku na ekologickou stránku výroby stavebních materiálů. To vše dohromady výrazně zvyšuje poptávku po moderních stavebních materiálech využívajících druhotné suroviny. Z toho vyplývá, že trend výroby nových stavebních materiálů směřuje k co možná největšímu nahrazení cementu i dalších primárních surovin alternativními druhotnými surovinami. Takové suroviny však musejí být nejen levnější než substituované složky, ale zároveň nesmí jejich využitím dojít ke změně technologie a výrobního procesu ani k zhoršení vlastností výsledného kompozitu. Druhotnými či alternativními surovinami jsou v rámci této práce chápany mimo jiné: odpadní produkty energetického a hutního průmyslu, odpad z průmyslové výroby nebo komunální odpad vyřazený z recyklačního procesu.

Na českém trhu se stavebními hmotami je celá řada materiálů a systémů určených k ochraně a obnově chemicky namáhaných stavebních konstrukcí. Tyto konstrukce mohou být vystaveny extrémně agresivním podmínkám, z čehož vyplývají i požadavky kladené na správkové hmoty. Obyčejné hmoty na cementové bázi tyto požadavky nemohou splnit, a tak hmoty na polymercementové bázi představují zajímavou alternativu pro ostatní, obvykle dražší stavební materiály na trhu. V dnešní době je dostupné velké množství polymerních přísad rozlišných bází, které mají odlišný vliv na charakteristiky výsledného kompozitu, včetně odolnosti ve specificky agresivních podmínkách.

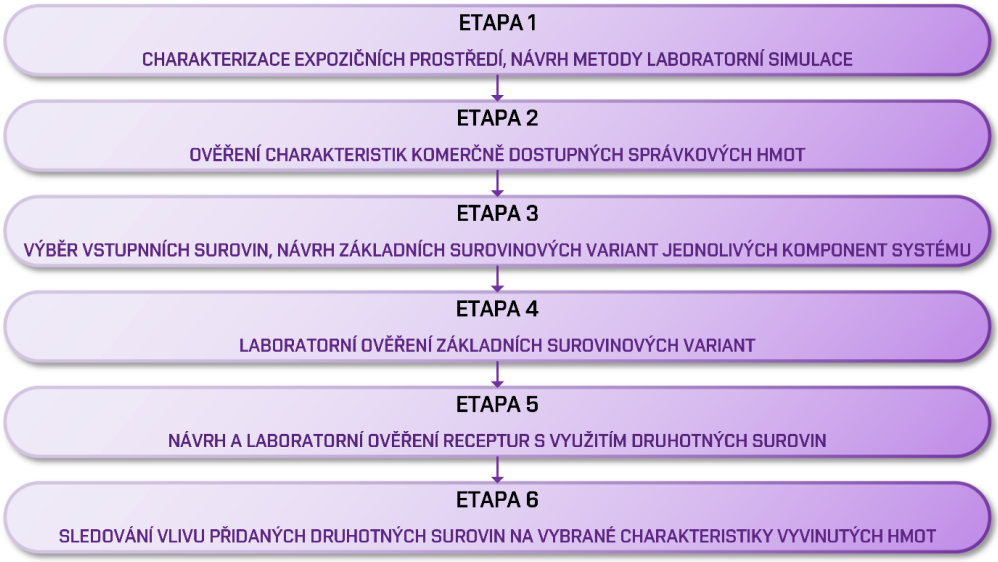
1 CÍLE PRÁCE

Tato práce se zabývá výzkumem nového uceleného systému vysoce odolných kompozitních materiálů na bázi portlandského cementu určených pro sanaci stavebních konstrukcí kanalizačních stok či šachet, u nichž se požaduje zvýšená odolnost proti specifickým druhům namáhání. V rámci výzkumu jsou popsána i další relevantní expoziční prostředí a pro ně charakteristické agresivní vlivy. Jak je však uvedeno výše, stěžejní expoziční prostředí představují kanalizační systémy, čemuž je uzpůsoben výsledný soubor laboratorních zkoušek pro simulaci expozičních prostředí i skladba jednotlivých chemicky odolných komponent systému. Těmi jsou: zdící hmota pro případnou dostavbu části konstrukce, spárovací hmota pro kvalitní utěsnění mezer mezi zdícími prvky, správková malta pro reprofilaci poškozených míst či pro opravu složitějších profilů a také torkretovací malta pro případ nutnosti zacelit a sjednotit povrch stoky či šachty stříkaným betonem. Celý systém musí splňovat specifické požadavky vybraného expozičního prostředí. Musí být vodotěsný a bezpečně odolný proti mechanickým, chemickým, biologickým a jiným vlivům protékajících odpadních vod. Současně musí umožnit bezpečné a účinné čištění stok.

Do surovinových variant nového systému budou zakomponovány i alternativní suroviny, jejichž vhodným použitím by mělo dojít ke snížení konečné ceny produktů a také by měla být zvýšena odolnost jednotlivých komponent systému proti agresivním vlivům odpadních vod i jejich výparů. Dosažení vysoké chemické odolnosti užitných vlastností je možné pouze za předpokladu výběru nejvhodnějších materiálů, jejich správným sestavením v recepturách jednotlivých hmot, ať už z hlediska granulometrie, tak i vzájemné kompatibility.

2 METODIKA PRÁCE

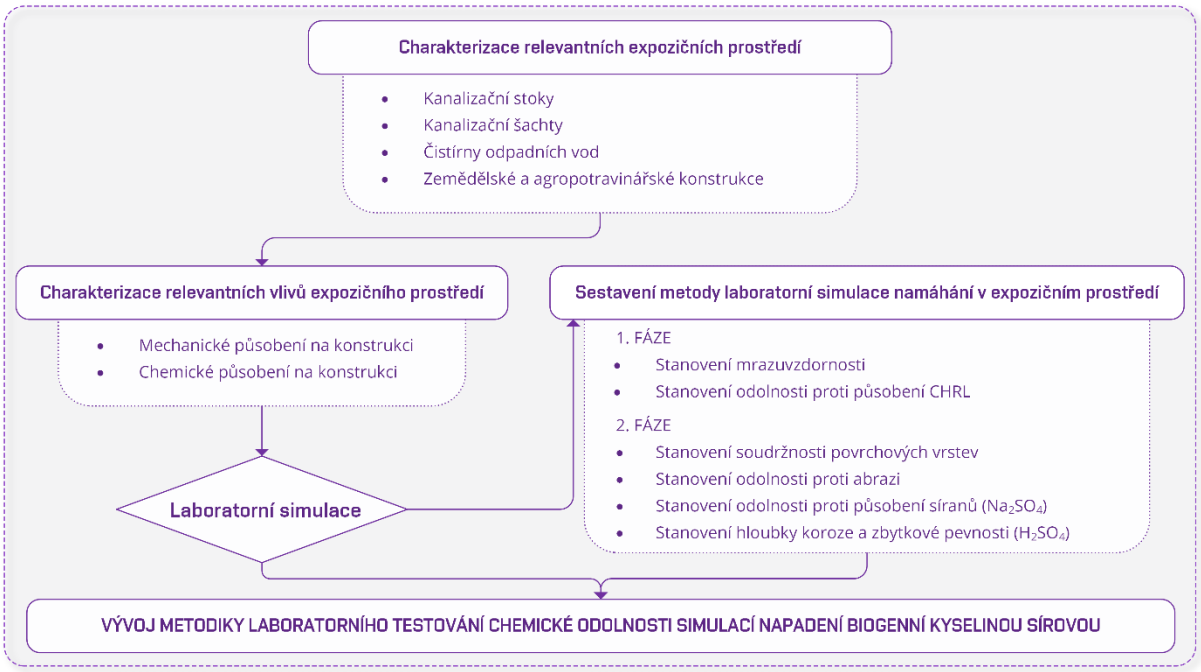
Vzhledem k rozsahu praktické části disertační práce je metodika rozdělena do šesti na sebe navazujících etap, přičemž posloupnost jednotlivých etap řešení této práce je názorně uvedena na Obr. č. 1. Náplň jednotlivých etap je popsána v následujících podkapitolách. Návaznost etap je volena tak, aby při plnění dílčích cílů v rámci těchto etap došlo k naplnění primárního cíle celé práce. Tím je vývoj speciálního, komplexního, vysoce odolného systému pro sanaci chemicky namáhaných stavebních konstrukcí. Nový ucelený sanační systém se skládá z celkem čtyř jednotlivých komponent se zvýšenou chemickou odolností: správkové malty, zdící hmoty, spárovací hmoty a stříkané malty na torkret. Zdící hmota je určena pro dostavbu části konstrukce, spárovací hmota pro kvalitní utěsnění mezer mezi zdícími prvky, správková hmota pro opravu a reprofilaci složitějších tvarů konstrukce a směs na torkret pro případ nutnosti zacelit a sjednotit sanovaný povrch stříkanou maltou. Rozsahem možných aplikací všech nových hmot je zajištěna komplexnost a univerzálnost nového systému při použití na konstrukcích rozdílného technického řešení i stavu degradace. Všechny komponenty systému jsou navrženy na bázi portlandského cementu a obsahují relativně vysoké množství druhotných surovin, s cílem oproti referenčním hmotám dosáhnout zlepšení sledovaných parametrů.



Obr. č. 1 *Souhrn jednotlivých experimentálních etap disertační práce.*

2.1 ETAPA 1: CHARAKTERIZACE EXPOZIČNÍCH PROSTŘEDÍ, NÁVRH METODY LABORATORNÍ SIMULACE

První etapa disertační práce je zaměřena na charakterizaci expozičních prostředí, do nichž jsou jednotlivé nové hmoty určeny a následné sestavení metody laboratorní simulace relevantních agresivních vlivů vybraných expozičních prostředí, včetně výroby potřebných zkušebních aparatur pro zrychlenou laboratorní simulaci vybraných expozičních prostředí. Schéma metodiky první etapy této práce je uvedeno na Obr. č. 2.



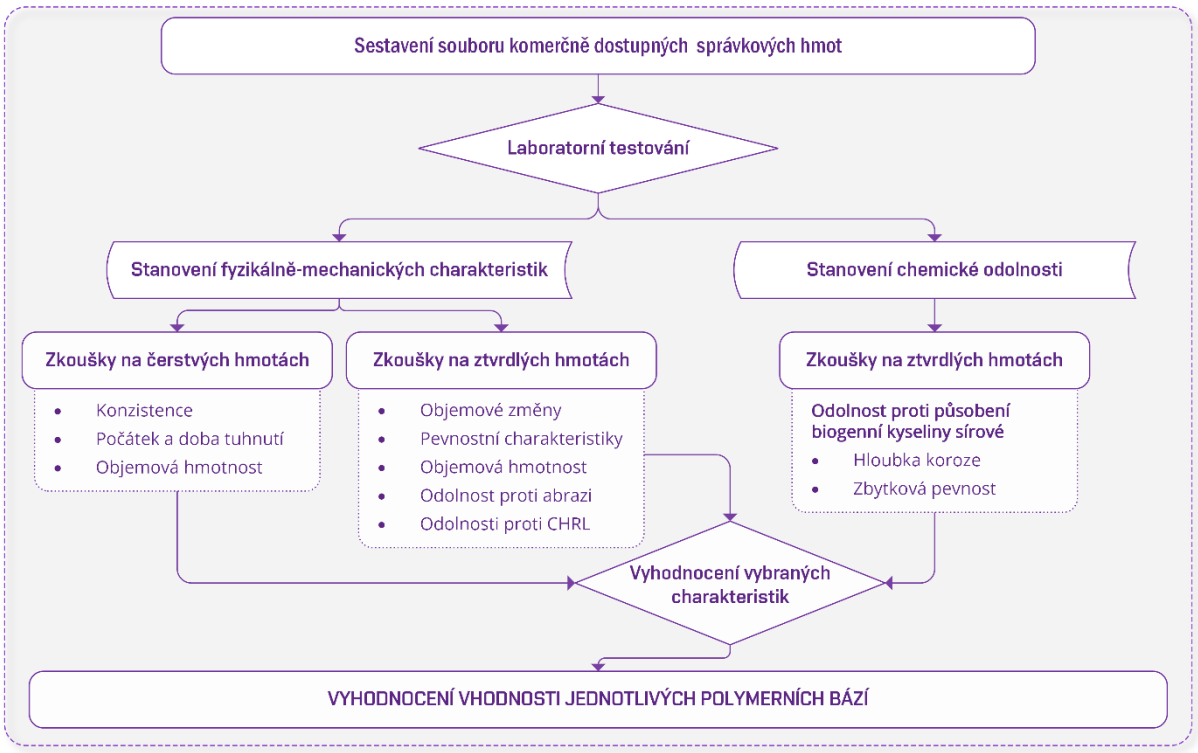
Obr. č. 2 *ETAPA 1: Charakterizace expozičních prostředí, návrh metody laboratorní simulace.*

V úvodu etapy jsou definovány všechny relevantní vlivy i kritéria pro další činnost. V rámci této etapy jsou zároveň popsány mechanismy fyzikálně-mechanického a chemického namáhání stavebních materiálů v různých agresivních prostředích, jako kanalizační stoky, silážní žlaby či čističky odpadních vod. Zároveň je několik referenčních zkušebních těles správkové hmoty vystaveno působení agresivních činidel

charakteristických pro dané expoziční prostředí. Výstupem etapy je soubor zkušebních postupů laboratorní simulace expozičních prostředí a experimentálního ověření nových hmot. Obsažené zkušební postupy jsou zaměřeny na simulaci agresivního prostředí kanalizačních stok a šachet. Důraz je kladen na chemické působení prostředí, na charakter agresivních látek a jejich vliv na stavební dílo. Sledovány jsou i způsoby mechanického namáhání. Součástí výstupu řešení etapy je na základě navržené metody laboratorní simulace návrh, výroba a otestování specifické zkušební aparatury pro laboratorní simulaci vybraných expozičních prostředí.

2.2 ETAPA 2: OVĚŘENÍ CHARAKTERISTIK DOSTUPNÝCH SPRÁVKOVÝCH HMOT

Druhá etapa disertační práce, jejíž schéma je uvedeno na Obr. č. 3, je zaměřena na laboratorní ověření vybraných fyzikálně-mechanických charakteristik a ověření chemické odolnosti komerčně dostupných správkových malt pro sanaci chemicky atakovaných stavebních konstrukcí, s důrazem na namáhání biogenní kyselinou sírovou v kanalizačních stokách či šachtách.



Obr. č. 3 *ETAPA 2: Ověření charakteristik dostupných správkových hmot.*

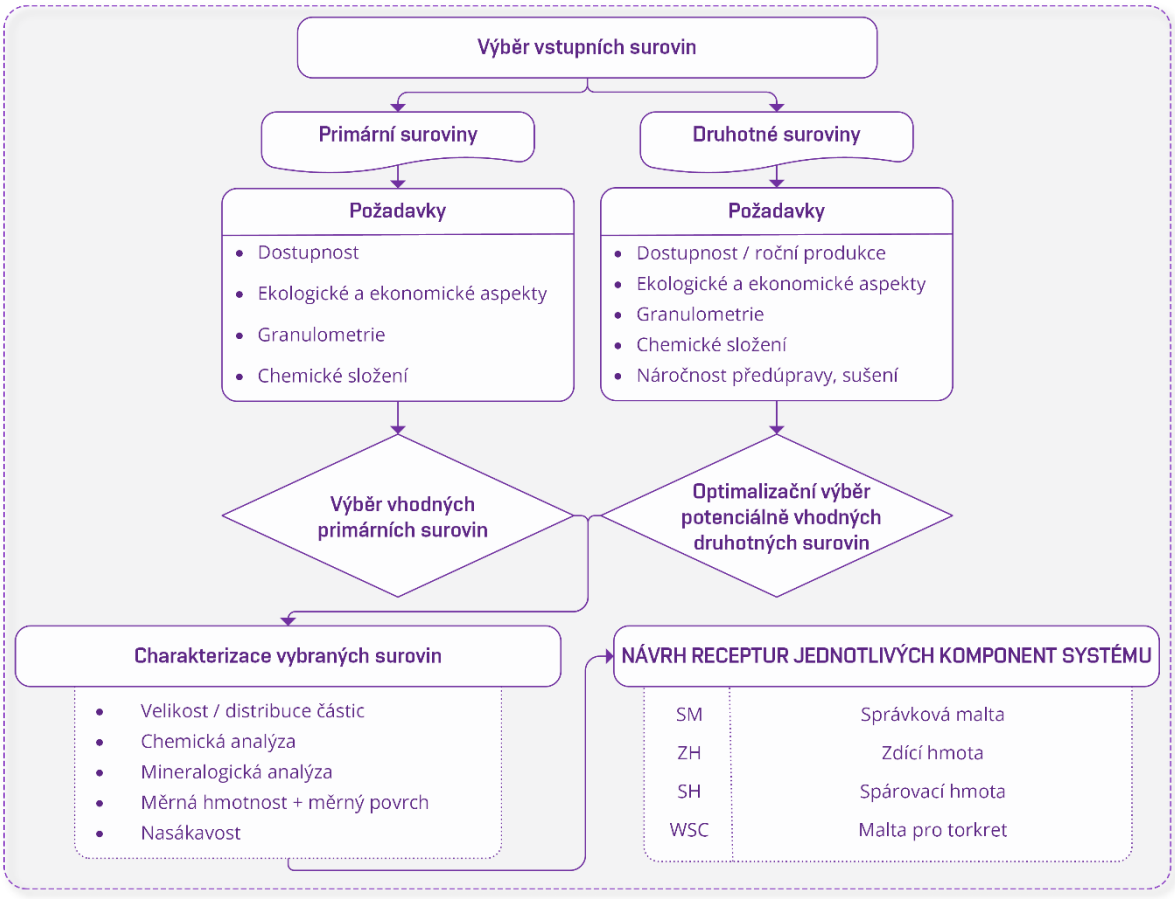
Pro laboratorní výzkum jsou vybrány hmoty vhodné k finálnímu ošetření stavební konstrukce, jelikož z hlediska životnosti agresivními činidly napadeného stavebního díla tvoří materiál na exponované ploše jednu z nejpodstatnějších komponent celého systému. Zároveň jsou vybrány hmoty, u nichž výrobce garantuje určitou míru chemické odolnosti dle normy DIN 19 753.

V rámci laboratorního zkoušení jsou ověřeny základní fyzikálně-mechanické charakteristiky správkových malt v čerstvém stavu. Zde patří např. objemová hmotnost, počátek a doba tuhnutí či zpracovatelnost. Zároveň jsou vyrobena zkušební tělesa

pro ověření charakteristik jako jsou pevnost v tahu za ohybu a tlaku, přídržnost, nasákavost či odpor ke kapilární absorpci. Současně je ověřena odolnost zkušebních těles proti působení chemických rozmrazovacích látek a biogenní kyseliny sírové. Na základě získaných charakteristik je upřesněn soubor požadavků kladených na určité stěžejní komponenty nového sanačního systému.

2.3 ETAPA 3: VÝBĚR VSTUPNÍCH SUROVIN, NÁVRH ZÁKLADNÍCH SUROVINOVÝCH VARIANT JEDNOTLIVÝCH KOMPONENT SYSTÉMU

V rámci třetí etapy disertační práce (Obr. č. 4) je analyzován široký soubor surovin, selekce potenciálně vhodných surovin z oblasti primárních a následně i alternativních zdrojů (druhotné suroviny, odpady, vedlejší produkty např. hutního a energetického průmyslu atd.).



Obr. č. 4 *ETAPA 3: Výběr vstupních surovin, návrh základních surovinových variant jednotlivých komponent systému.*

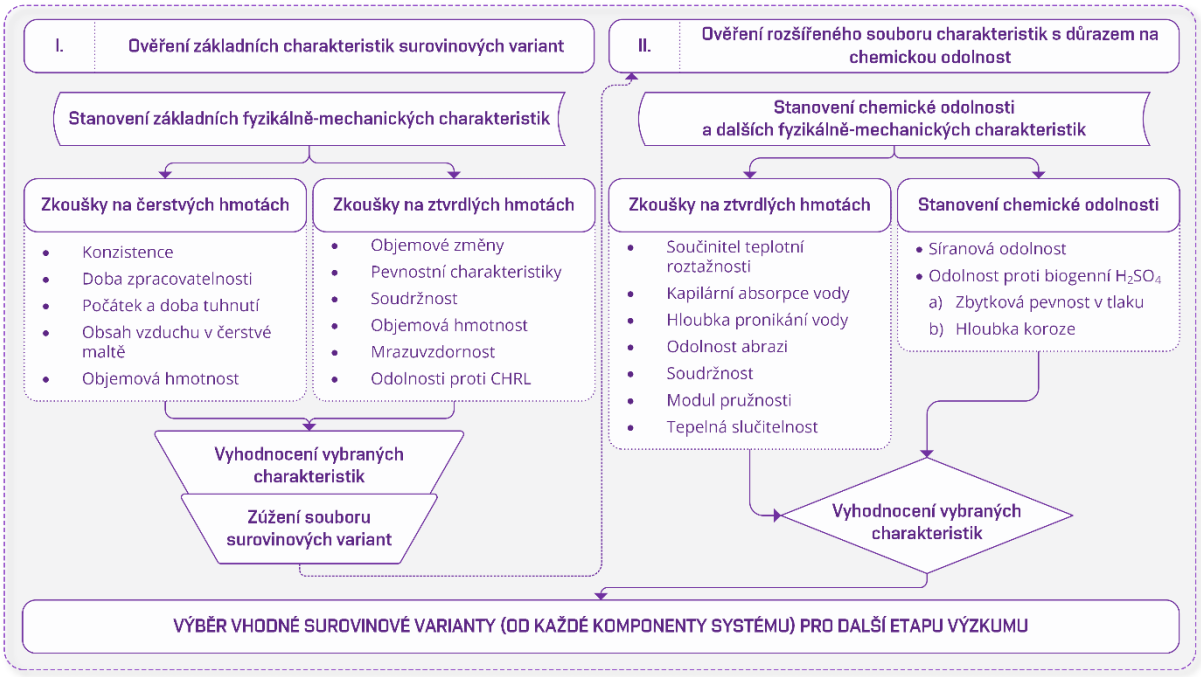
Tyto vybrané potenciálně vhodné suroviny jsou dále analyzovány fyzikálně-mechanickými a chemickými zkouškami včetně mikrostruktury. Mj. je analyzováno chemické složení, fázové složení, granulometrii atd. V případě alternativních surovin je zohledněna i nutnost jejich případné předúpravy, ať již v podobě sušení, třídění na požadované frakce, drcení či mletí. Použití dané analýzy se odvíjí od konkrétní suroviny a od požadavků na ni kladených. Soubor primárních surovin pro návrh základních receptur je volen na základě zkušeností s návrhem obdobných materiálů, závěrů vycházejících z předešlé etapy a dostupnosti daných surovin. V rámci výběru potenciálně vhodných

alternativních surovin je po nashromáždění potřebných charakteristik provedena selekce potenciálně vhodných surovin optimalizačním výpočtem.

Tímto způsoben je sestaven soubor konkrétních alternativních surovin vhodných pro jednotlivé komponenty systému. V závěru etapy jsou navrženy základní surovinové varianty jednotlivých vyvíjených hmot, a to bez využití alternativních surovin jako náhrady primárních složek.

2.4 ETAPA 4: LABORATORNÍ OVĚŘENÍ ZÁKLADNÍCH SUROVINOVÝCH VARIANT

Čtvrtá etapa je rozdělena na dvě dílčí podetapy, resp. fáze. Schéma této etapy je uvedeno na Obr. č. 5.



Obr. č. 5 *ETAPA 4: Laboratorní ověření základních surovinových variant*

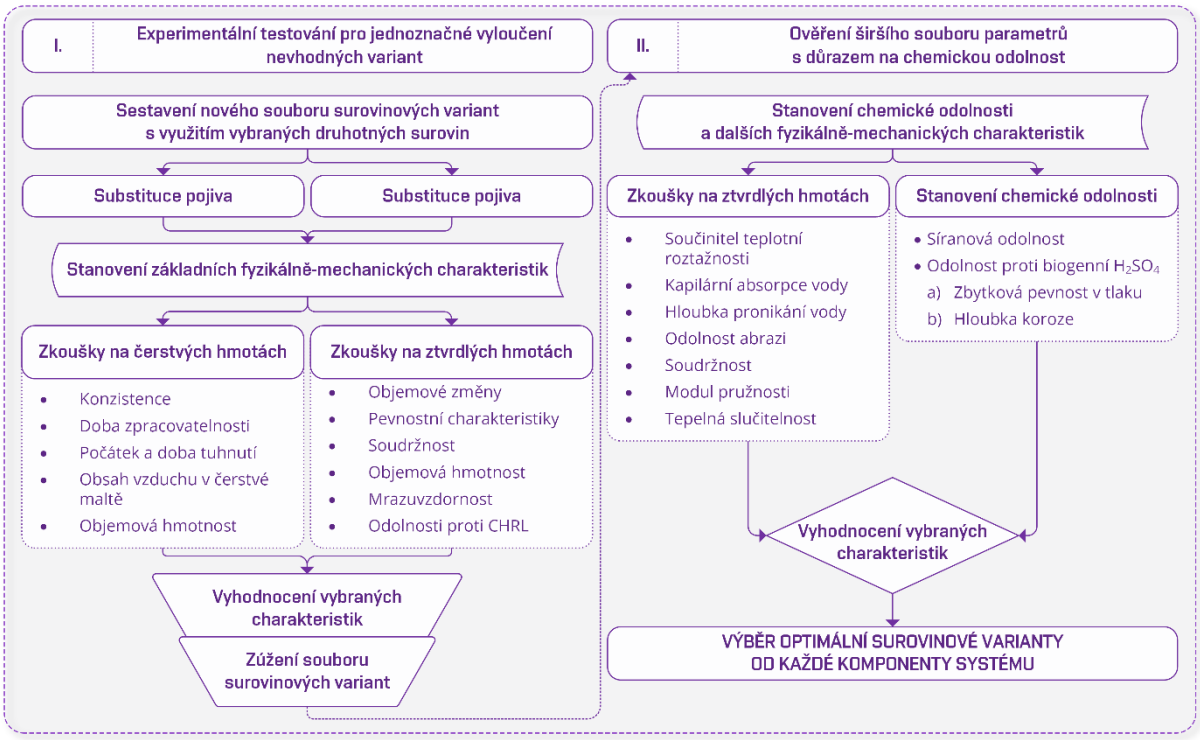
Cílem první z nich je pomocí vybraných vhodných laboratorních zkoušek ověřit vhodnost základních surovinových variant jednotlivých komponent systému pro použití jako vysoce odolných kompozitů k sanaci chemicky namáhaných stavebních konstrukcí. V rámci této etapy jsou sledovány primárně fyzikálně-mechanické charakteristiky jednotlivých hmot jako je konzistence, viskozita, počátek a doba tuhnutí, objemové změny, objemová hmotnost v čerstvém či ztvrdlém stavu, pevnostní charakteristiky či nasákavost. Konkrétní výčet těchto sledovaných charakteristik je pro jednotlivé komponenty odlišný, a to z důvodu lišících se požadavků na vlastnosti jednotlivých hmot. Odolnost zkušebních těles je ověřována pouze okrajově zjednodušenými zkouškami jako mrazuvzdornost a odolnost vůči CHRL. Na základě výsledků laboratorního zkoušení je provedeno zúžení souboru surovinových variant.

Druhá fáze etapy souvisle naváže na závěry první, přičemž cílem bude vybrat surovinovou variantu každé z dílčích komponent vyvíjeného systému, která se bude jevit jako nejvhodnější. Přičemž důraz při výběru bude kladen na chemickou odolnost. V rámci této části etapy je u zkušebních těles vybraných surovinových variant sledována odolnost

vůči působení agresivní biogenní kyseliny sírové (vyhodnocována je účinná hloubka koroze a relativní zbytková pevnost v tlaku) či odolnost vůči působení síranů. Zároveň je rozšířen soubor sledovaných fyzikálně-mechanických charakteristik, a to například o modul pružnosti, tepelnou slučitelnost, součinitel teplotní roztažnosti, odpor ke kapilární absorpci, součinitel kapilární absorpce, přídržnost, otěruvzdornost či hloubku pronikání vody. Stejně jako v předešlé fázi řešení etapy i zde platí, že soubor požadavků se liší v závislosti na charakteru jednotlivých komponent systému a požadavků na ně kladených. Na základě všech získaných parametrů je pro další laboratorní výzkum a vývoj proveden finální výběr jedné vhodné surovinové varianty od každé vyvíjené komponenty systému.

2.5 ETAPA 5: NÁVRH A LABORATORNÍ OVĚŘENÍ RECEPTUR S VYUŽITÍM DRUHOTNÝCH SUROVIN

Cílem páté etapy disertační práce (Obr. č. 6) je zakomponovat do receptur jednotlivých hmot vhodné alternativní suroviny v co možná největším množství tak, aby došlo ke zvýšení či alespoň zachování hodnot vybraných fyzikálně-mechanických charakteristik a odolnosti vůči působení vybraných agresivních látek.



Obr. č. 6 *ETAPA 5: Návrh a laboratorní ověření receptur s využití druhotných surovin.*

Pro tento účel jsou vybrány vhodné druhotné suroviny z předem sestaveného souboru potenciálně vhodných druhotných surovin. Jako základ každé receptury slouží v předešlé etapě vybrané surovinové varianty. V jejich složení jsou plniva či pojiva do určité míry substituována alternativními surovinami. Tímto způsobem je navržen širší soubor nových surovinových variant pro každou komponentu systému. Samotné laboratorní ověření správnosti návrhu jednotlivých surovinových variant je opět rozděleno do dvou podetap, obdobně jako v předcházející etapě.

V rámci první fáze jsou u jednotlivých nových surovinových variant ověřovány primárně fyzikálně-mechanické vlastnosti hmot v čerstvém stavu a okrajově také

ve ztvrdlém stavu. Mezi sledované parametry patří zpracovatelnost, obsah vzduchu v čerstvé maltě, průběh objemových změn v ranných dnech hydratace, pevnostní charakteristiky, nasákavost či objemová hmotnost. Na konci této podetapy je proveden výběr potenciálně vhodných surovinových variant, přičemž jsou vybrány maximálně tři od každé komponenty nového sanačního systému. Zároveň na základě výsledků laboratorních zkoušek je proveden dílčí návrh nových surovinových variant s rozdílnou mírou náhrady primárních surovin nebo s kombinací různých druhotných surovin v rámci jedné receptury.

V druhé fázi etapy je obdobně jako v předešlé etapě kladen důraz primárně na sledování chemické odolnosti vybraných receptur. Opět je v závislosti na konkrétní komponentě systému rozšířen soubor sledovaných fyzikálně-mechanických charakteristik. Zároveň je u jednotlivých receptur sledována odolnost vůči působení agresivní biogenní kyseliny sírové či odolnost vůči působení síranů. Na základě všech získaných výsledků je postupně soubor receptur zúžen. Od každé komponenty systému je vybrána jedna až tři optimalizované receptury pro další laboratorní zkoušení.

2.6 ETAPA 6: SLEDOVÁNÍ VLIVU PŘIDANÝCH DRUHOTNÝCH SUROVIN NA VYBRANÉ CHARAKTERISTIKY VYVINUTÝCH HMOT

V rámci šesté etapy je u zkušebních těles vybraných receptur (optimální receptury z předešlé etapy) všech komponent nového systému podrobně sledován vliv chemického zatěžování na sktrukturu cementového kamene. Schéma metodiky této etapy disertační práce na uvedeno na Obr. č. 7.

Obr. č. 7 *ETAPA 6: Sledování vlivu druhotných surovin na vybrané charakteristiky vyvinutých hmot.*

Zjištěné výsledky jsou srovnány s referenčními tělesy bez příměsi alternativních surovin. Cílem je pomocí moderních diagnostických metod posoudit přínos substituce primárních složek alternativními surovinami. Pomocí výkonného optického mikroskopu je sledována homogenita kompozitu a projevy degradace těles na povrchu po odstranění korozních zplodin. Zároveň je pomocí elektronového mikroskopu (SEM analýza) sledovány novotvary vzniklé při hydratačních procesech, tzn. zda vlivem použití alternativních surovin s určitým vlivem na hydratační procesy nedošlo ke změnám v porovnání s referenčními tělesy. V neposlední řadě jsou SEM analýzou diagnostikovány novotvary vznikající při vystavení zkušebních těles jednotlivým agresivním vlivům: koroze způsobená působením roztoku kyseliny sírové a síranová koroze, a to s cílem ověřit míru poškození

a míru pronikání korozních zplodin do struktury kompozitu. Dále jsou vzorky diagnostikovány pomocí RTG analýzy. Touto analýzou je vyhodnocen výskyt jednotlivých korozních zplodin, vztah mezi mini a použitými druhotnými surovinami aj. V závěru etapy je posouzen vliv použitých druhotných surovin (ve spojitosti s jejich chemickým složením, distribucí částic, granulometrií aj.) na vlastnosti vyvíjených kompozitů a jejich přínos či negativa ve srovnání s referenčními hmotami.

3 VÝSLEDKY, HODNOCENÍ A DISKUSE

V následujících kapitolách jsou uvedeny jednotlivé výsledky laboratorních zkoušek, jež byly v rámci etap řešení experimentální části disertační práce stanoveny, a to včetně vyhodnocení a následné diskuse.

3.1 Sestavení a ověření základních surovinových variant

Vývoj nových sanačních hmot probíhal v rámci společného projektu mezi VUT v Brně a zavedeným českým výrobcem stavebních hmot, firmou Betosan, s r.o. V rámci této spolupráce byly z portfolia výrobce vybrány specifické sanační hmoty na bázi portlandského cementu bez významných požadavků na chemickou odolnost. Ty představují referenční malty jednotlivých vyvíjených komponent systému – správkové malty (SM), zdící hmoty (ZH), spárovací hmoty (SH) a malty pro stříkání (torkretáž) (WSC).

Současně byl i návrh jednotlivých základních receptur proveden ve společné kooperaci a byly využity zkušenosti obou subjektů této spolupráce. Od každé komponenty bylo navrženo deset surovinových variant (Tab. č. 1). Rozdíl mezi jednotlivými základními surovinovými variantami daného materiálu jsou v množství použité krystalizační přísady XYPEX ADMIX C-1000. Výrobcem tohoto materiálu je doporučeno dávkování 0,5–1,5 hm.% z hmotnosti cementu (m_c). Poměr ostatních surovin byl vždy volen s ohledem na požadavky kladené na daný sanační materiál.

Tab. č. 1 *Soubor všech základních surovinových variant jednotlivých komponent systému, jež byly navrženy pro testování v rámci první fáze čtvrté etapy.*

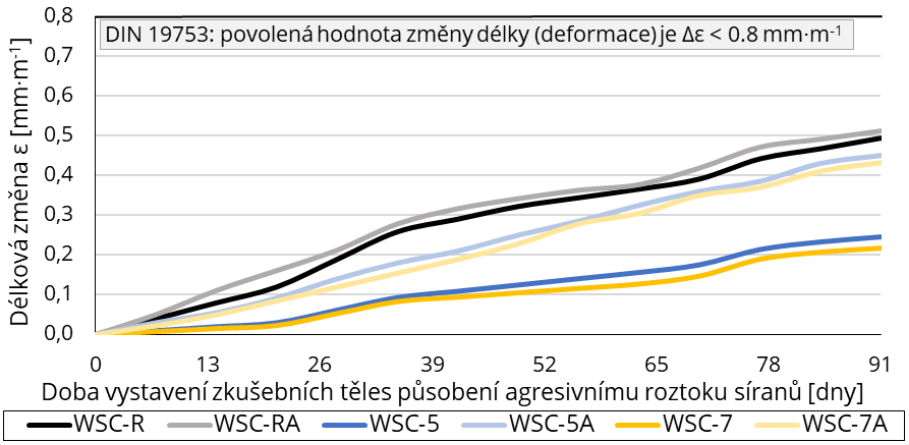
Komponenta systému	Typ hmoty	Krystalizační přísada [hm% z m_c]	Označení
Správková malta	Referenční	-	SM-R
	Upravená	0,2 – 2,0	SM-1 (10)
Zdící hmota	Referenční	-	ZH-R
	Upravená	0,2 – 2,0	ZH-1 (10)
Spárovací hmota	Referenční	-	SH-R
	Upravená	0,2 – 2,0	SH-1 (10)
Stříkaná malta pro torkret	Referenční	-	WSC-R
	Upravená	0,3 – 3,0	WSC-1 (10)

Dále byl také sestaven soubor sledovaných parametrů, přičemž laboratorní testování bylo rozděleno do dvou fází. V rámci první byl u širokého souboru surovinových variant ověřen užší soubor základních fyzikálně-mechanických charakteristik a parametrů odolnosti. Tímto způsobem byly jednoznačně vybrány nejvhodnějších receptury pro druhou fázi laboratorního testování. Její náplní bylo ověření rozšířeného souboru charakteristik, přičemž důraz byl kladen na chemickou odolnost. V obou fázích se soubor

sledovaných charakteristik pro jednotlivé komponenty systému mírně lišil, a to z důvodu specifických požadavků na vlastnosti daných hmot.

V rámci výběru jednotlivých surovinových variant pro další část laboratorního výzkumu byly stěžejními parametry výsledky stanovení chemické odolnosti dle DIN 19573 [1], konkrétně stanovení odolnosti v roztoku kyseliny sírové a v roztoku síranu sodného.

Ze stanovených výsledků vyplývá, že příměs krystalizační přísady měla pozitivní vliv nejen na fyzikálně-mechanické parametry, ale také došlo k významnému zvýšení chemické odolnosti. Na Obr. č. 8 je uveden průběh objemových změn zkušebních těles malty pro stříkání (WSC) během zatěžování v roztoku Na_2SO_4 o koncentraci 29,8 g × l^{-1} (44 g × l^{-1} Na_2SO_4). V případě této komponenty systému byla u vybraných základních receptur provedena výroba zkušebních těles i v poloprovozních podmínkách in situ torkretáží do normových beden a následným vyřezáním na požadované rozměry. Výsledky těchto zkušebních těles jsou na Obr. č. 8 označena písmenem *A*.



Obr. č. 8 *Grafické vyjádření průběhu délkových změn zkušebních těles vystavených působení síranů v čase.*

Z výsledků vyplývá, že chemická odolnost zkušebních těles vyrobených v laboratoři byla vyšší než v případě strojně aplikovaných hmot. Důvodem je primárně nehomogenita stříkaného kompozitu, u něhož se ve struktuře cementového kamene vyskytovalo větší množství kavern aj. defektů, které mají negativní vliv na výsledné parametry daného materiálu.

Z uvedených výsledků dále vyplývá, že vliv krystalizační přísady na chemickou odolnost je pozitivní a rozdíl mezi referenční maltou a navrženými základního recepturami je významný. Obdobných výsledků bylo dosaženo i u ostatních komponent systému, a to nejen u síranové odolnosti, ale také odolnosti vůči roztoku kyseliny sírové (Tab. č. 2).

Zkušební tělesa vybraných základních surovinových variant jednotlivých komponent systému byla vystavena roztoku Na_2SO_4 o koncentraci 29,8 g × l^{-1} (44 g × l^{-1} Na_2SO_4) po dobu 91 dní. Zkušební tělesa týž hmot byla pro posouzení odolnosti vůči kyselině sírové vystavena po dobu 14 dní působení roztoku kyseliny sírové o pH0 ($c(H_2SO_4)$ = 1,0 mol×l^{-1}). Tyto uvedené základní surovinové varianty jednotlivých komponent nového sanačního systému byly vybrány pro navazující optimalizaci příměsí druhotných surovin.

Výsledky odolnosti vůči síranům i kyselině sírové vybraných surovinových variant všech komponent systému jsou uvedeny v Tab. č. 2.

Tab. č. 2 *Výsledky parametrů chemické odolnosti referenčních a vybraných základních surovinových variant jednotlivých komponent systému.*

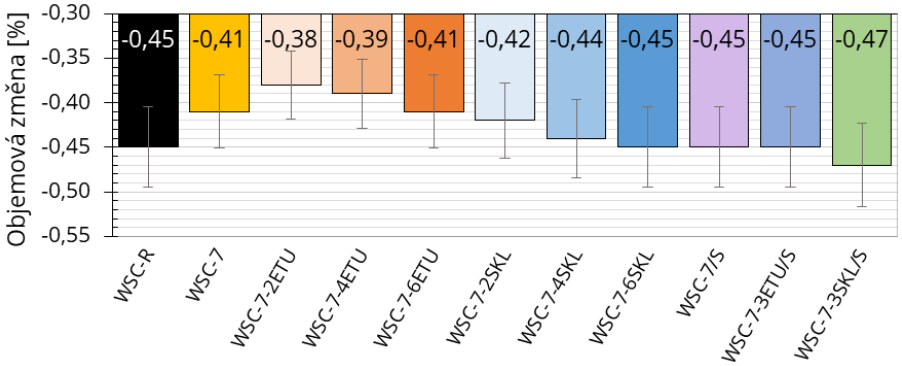
Charakteristika chemické odolnosti			Surovinová varianta							
			SM-R	SM-9	ZH-R	ZH-5	SH-R	SH-6	WSC-R	WSC-7
Odolnost	$f_{c,r}$ [b]	[%]	67,4	81,4	58,7	63,9	49,3	56,1	58,7	83,0
biogenní H_2SO_4 [a]	$X_{f,D}$ [c]	[mm]	3,176	1,707	2,803	1,704	6,215	4,821	2,803	1,379
Síranová odolnost	Δε [d]	[mm×m^{-1}]	0,901	0,199	0,403	0,190	0,981	0,689	0,403	0,204

[a] *Vystaveno působení roztoku kyseliny sírové o pH0 (c(H_2SO_4) = 1,0 mol×l^{-1}) po dobu 14 dní*
[b] *Relativní zbytková pevnost v prostém tlaku (pH0: $f_{c,r}$ > 55 %; pH1: $f_{c,r}$ > 75 %)*
[c] *Účinná hloubka koroze (pH0: $X_{f,D}$ < 5,2 mm; pH1: $X_{f,D}$ < 2,7 mm)*
[d] *Maximální přípustná délková změna (dle DIN 19573 Δε <0,8 mm×m^{-1}) po 91 dnech expozice v roztoku Na_2SO_4 o koncentraci 29,8 g×l^{-1} (44 g×l^{-1} Na_2SO_4)*

3.2 Optimalizace vybraných surovinových variant příměsí vhodných druhotných surovin

V další část disertační práce byla zaměřena na ověření možnosti substituce určitého podílu primární surovin (pojiva a plniva), a to mj. s cílem zlepšení či alespoň zachování vlastností původního kompozitu. Využity přitom byly potenciálně vhodné druhotné suroviny vybrané v předcházející fázi experimentálního výzkumu. Pro částečnou substituci pojiva ve20 až 60% míře byly využity např. vysokoteplotní elektrárenské popílky (ETU či ECH), kamenné odprašky (OZE), mletý skelný recyklát (SKL) nebo mechanicky předupravené odpady z hutního průmyslu (slévárenský písek (SVS) či silica vyzdívka(SVY)). Slévárenské písky, uhelná škvára (OSL) nebo kamenné odprašky byly zároveň testovány i jako alternativní suroviny pro až 100% míru substituce dílčích specifických složek plniva vybraných komponent systému.

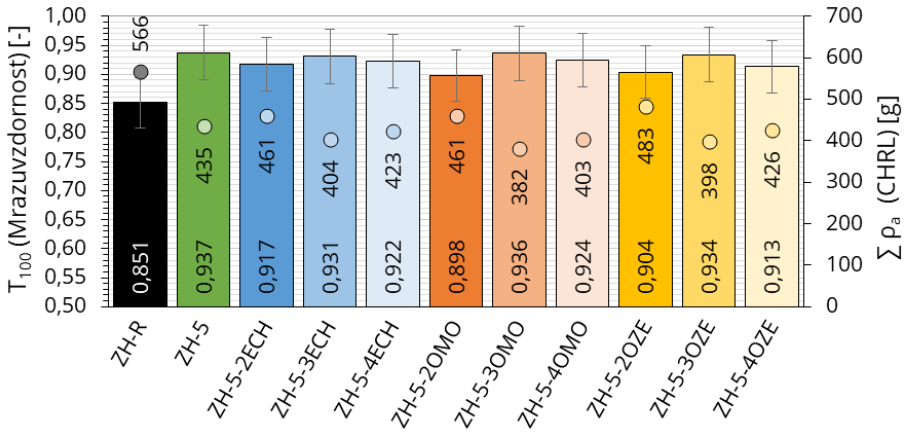
Vliv příměsi vybraných druhotných surovin na objemové změny v prvních dnech hydratace malty pro torkretáž je uveden na Obr. č. 9.



Obr. č. 9 *Vybrané výsledky stanovení objemových změn metodou hydrostatického vážení.*

Ověřeno bylo celkem osm alternativních surovin, přičemž při návrhu surovinového složení jednotlivých komponent systému byly zohledněny specifické požadavky kladené na danou hmotu. Výše uvedené výsledky potvrzují, že vhodné druhotné suroviny mají pozitivní vliv na sledované fyzikálně-mechanické parametry. V tomto případě se ověřil vliv vysokoteplotního elektrárenského popílku na snížení objemových změn v prvních dnech hydratace. Zároveň bylo u surovinových variant s podílem 20 až 40 hm.% z m_c vhodných alternativních surovin dosaženo zlepšení či alespoň zachování sledovaných fyzikálně-mechanických parametrů.

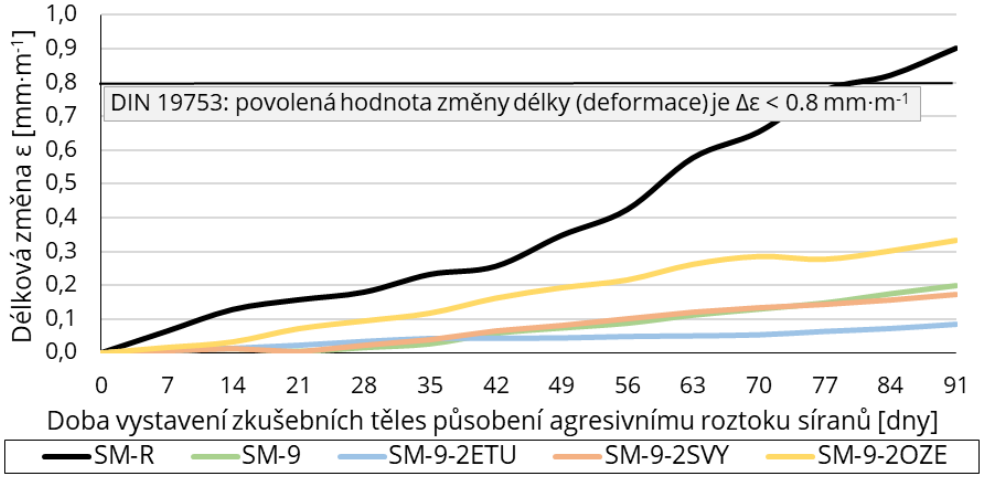
Mimo vliv druhotných surovin na vybrané fyzikálně-mechanické parametry byl ověřen také jejich vliv na základní parametry odolnosti (mrazuvzdornost a odolnost vůči CHRL) po 100 zmrazovacích cyklech. Právě výsledky stanovení vlivu vybraných druhotných surovin na tyto charakteristiky odolnosti zdící hmoty jsou uvedeny na Obr. č. 10.



Obr. č. 10 *Základní parametry odolnosti zdící hmoty modifikované 20 až 40% substitucí pojiva vysokoteplotními popílky Tušimice (ETU), a Chvaletice (ECH) a kamennými odprašky (OZE).*

Z uvedených výsledků vyplývá, že při optimální míře substituce pojiva vhodnými druhotnými surovinami je možné zvýšit odolnost vyvíjených kompozitů vůči mrazu i CHRL.

Dále byla u vybraných surovinových variant jednotlivých komponent systému opět ověřena i chemické odolnost v souladu s DIN 19573 [1], tedy vůči síranům (Obr. č. 11) a vůči roztoku kyseliny sírové.



Obr. č. 11 *Grafické vyjádření průběhu délkových změn zkušebních těles modifikovaných surovinových variant vystavených působení síranů v čase.*

Z výše uvedených výsledků stanovení průběhu objemových změn zkušebních těles vybraných surovinových variant správkové malty vyplývá, že částečnou substitucí pojiva vhodnými druhotnými surovinami je možné zvýšit (vysokoteplotní elektrárenský popílek) či alespoň zachovat (mletá silica vyzdívka) síranovou odolnost výsledného kompozitu.

Stejné závěry platí i pro další vybrané druhotné suroviny, jimiž bylo substituováno pojivo či plnivo, tedy že při optimální míře náhrady je možné dosáhnout zvýšení parametrů sledovaných užitných vlastností, v čele s chemickou odolností. Velmi dobrý výsledků bylo dosaženo při částečné substituci pojiva vysokoteplotními elektrárenskými popílky nebo mletým skelným recyklátem či silica vyzdívkou. Pro náhradu jemných podílů přísad či plniva se osvědčil mletý slévárenský písek pojený vodním sklem či kamenné odprašky.

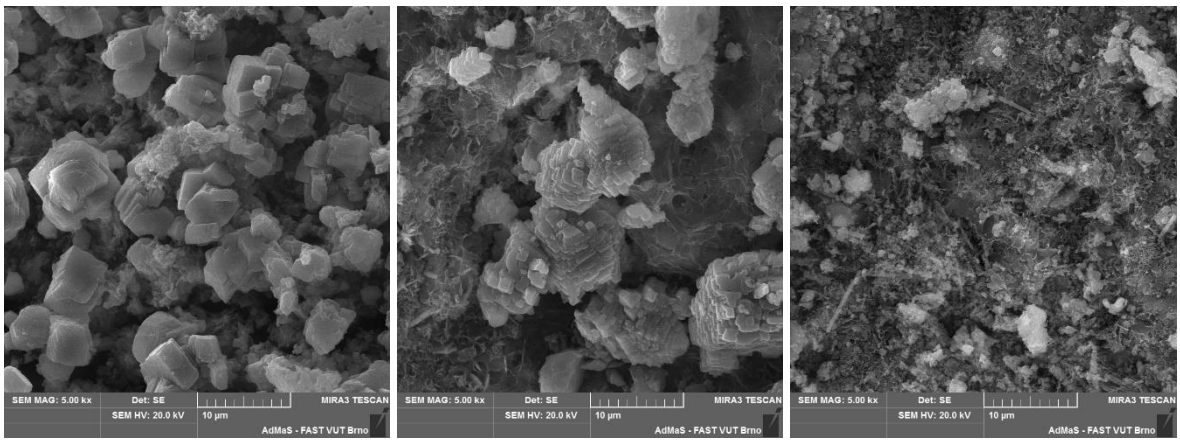
3.3 Posouzení vlivu optimalizace na vybrané charakteristiky nových hmot

Na základě výsledků širokého souboru laboratorních zkoušek byl stanoven soubor výsledných surovinových variant, resp. druhotných surovin vhodných pro substituci pojiva či plniva v recepturách jednotlivých komponent nového sanačního systému, přičemž při výběru byl důraz kladen na výsledky chemické odolnosti.

Pro hlubší pochopení vlivu krystalizační přísady a jednotlivých druhotných surovin na chemickou odolnost výsledných kompozitů byla makro a mikro struktura kompozitu vybraných surovinových variant studována pomocí moderních diagnostických metod.

Struktura kompozitu, jeho celistvost, hutnost, pórovitost či distribuce pórů, defekty na rozhraní plniva a cementové matrice atd. byly sledovány pomocí optického mikroskopu. Pro charakterizaci hloubky a míry koroze materiálu byl na lomovou plochu aplikován fenolftaleinový roztok.

Sledován a vyhodnocován byl i efekt chemického zatěžování na strukturu cementového kamene pomocí SEM (Obr. č. 12) a RTG analýz. Těmito diagnostickými metodami byly sledovány mineralogické změny způsobené působením chemicky agresivních prostředí na matrici portlandského cementu a vliv druhotných surovin na tyto změny. Zjištěné výsledky byly srovnány s referenčními tělesy bez příměsi alternativních surovin. Zároveň byly sledovány rozdíly mezi referenčními a modifikovanými hmotami, v jejichž receptuře je obsažena krystalizační přísada.

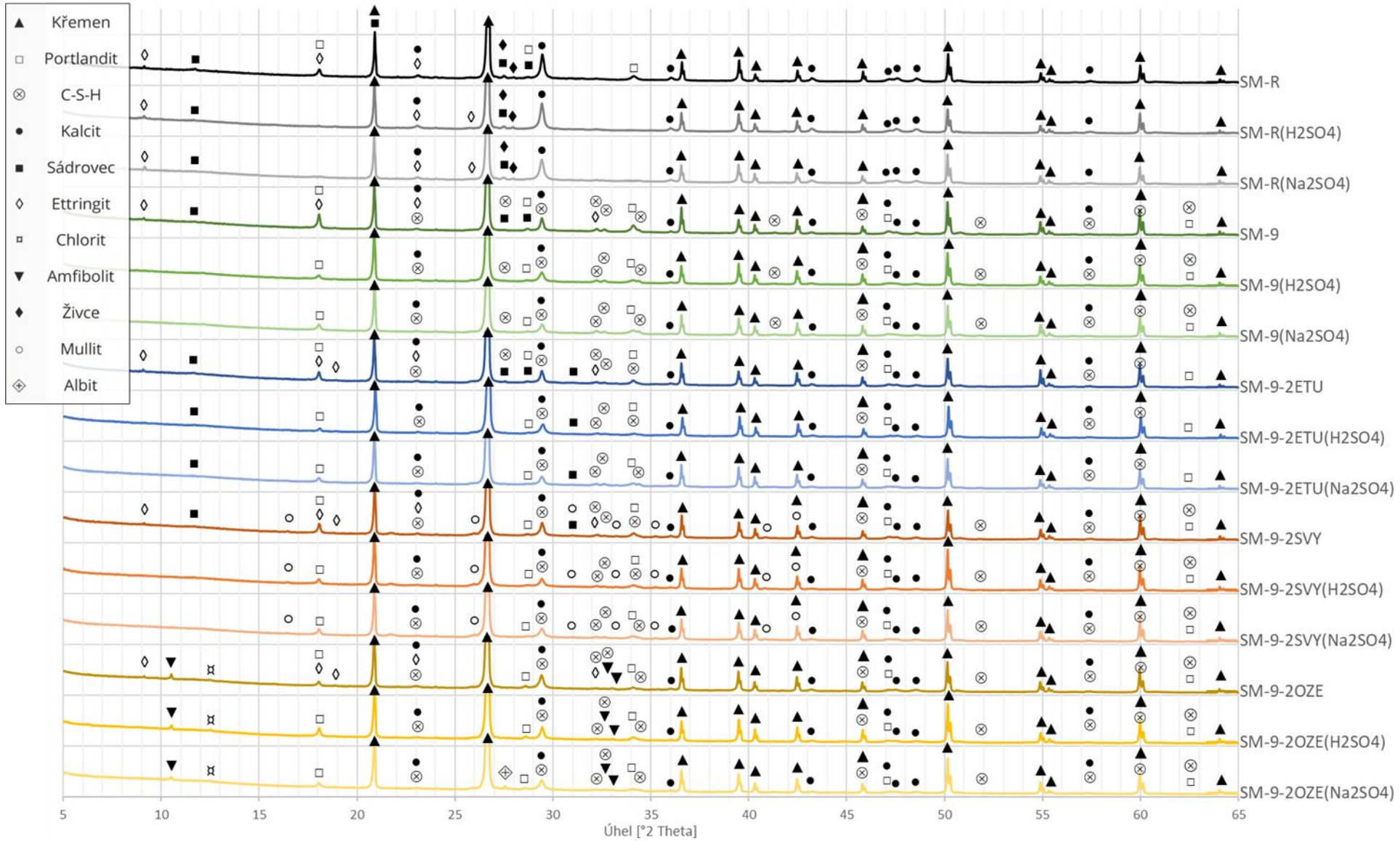


Obr. č. 12 *Snímky povrchu zkušebních těles správkové malty SM-9 modifikované krystalizační přísadou pořízené SEM analýzou. Povrch těles po vystavení (z leva) roztoku H_2SO_4, Na_2SO_4 a referenční uložení.*

Z výsledků studia povrchu zkušebních těles všech vyvinutých surovinových variant, včetně malty SM-9, vystavených působení roztoku kyseliny sírové vyplývá, že i přes důkladné mechanické očištění, přinejmenším rezidua korozních zplodin na povrchu zkušebních těles stále zůstávají. Zároveň se neprokázalo, že by během koroze vlivem síranů či kyseliny sírové docházelo ke vzniku ettringitu.

Kompletní výsledky rentgenové (RTG) difrakční analýzy vyvíjené správkové malty (SM) jsou uvedeny na Obr. č. 12, přičemž sledováno bylo mineralogické složení svrchních vrstev (cca 0-2 mm povrchová vrstva) zkušebních těles s cílem zaznamenat mineralogické změny způsobené působením chemicky agresivních látek na matrici portlandského cementu.

Dále byl sledován vliv surovinového složení, formy a míry substituce primárních surovin surovinami druhotnými na mineralogické složení, vznik minerálních novotvarů, omezení degradace produktů hydratace cementu či pucolánové reakce atd.



Obr. č. 13 *Souhrnné výsledky XRD analýz provedených u vybraných surovinových variant správkové malty.*

Jak vyplývá z uvedených výsledků, na povrchu a ve svrchní vrstvě zkušebních těles malty SM-R došlo působením roztokům H_2SO_4 a Na_2SO_4 k úplnému rozpuštění portlanditu. Z toho je možné vyvodit, že agresivní činidla pronikla do struktury cementového kompozitu a k postupné degradaci cementové matrice nedocházelo pouze na povrchu zkušebních těles malty SM-R, ale i v hloubce vyšší než 2 mm stále soudržného kompozitu.

Naopak zkušební tělesa modifikované malty SM-9 i ostatní surovinové varianty správkové malty odvozené od malty SM-9 vykazovaly zvýšenou chemickou odolnost. Portlandit se ve svrchních vrstvách zkušebních těles vystavených působení chemicky agresivních roztoků H_2SO_4 a Na_2SO_4 nerozpustil kompletně, pouze bylo sníženo jeho množství. Pro zmíněné receptury tedy platí, že ve svrchní vrstvě (0-2 mm soudržného kompozitu) nedocházelo k rozpouštění portlanditu, tedy degradaci cementové matrice.

Zároveň platí, že u zkušebních těles analyzovaných receptur správkové malty, vyjma referenční malty SM-R, nedocházelo vlivem působení chemicky agresivních roztoků H_2SO_4 a Na_2SO_4 ke vzniku ettringitu.

3.4 Vývoj nové metodiky pro stanovení chemické odolnosti kompozitů v prostředí odpadních systémů

Pro ověření chemické odolnosti vyvíjených materiálů byla využita metodika dle normy DIN 19573 [1]. Jedná se o normu definující požadavky pro materiály na bázi portlandského cementu určené mj. k sanaci kanalizačních konstrukcí. Metodika přípravy a ošetřování zkušebních těles, stejně jako metodika samotného zrychleného vystavení roztoku H_2SO_4 byla shledána jako poměrně pracná a časově náročná. Z toho důvodu bylo v rámci disertační práce přistoupeno k sestavení nové aparatury pro uložení zkušebních těles v roztoku H_2SO_4. Na základě poznatků nabytých při řešení disertační práce byly sestaveny celkem tři verze zkušební aparatury, u nichž byla postupně zjednodušována obslužnost a byly napravovány konstrukční vady. Finální třetí zkušební aparatura představuje hotový produkt, jež je uživatelsky velmi přívětivý, dílčí součásti je možné jednoduše vyměnit a celková konstrukce byla designována s cílem dosažení dlouhé životnosti. Zároveň byla optimalizována i metodika výroby, ošetřování, úpravy a laboratorního testování zkušebních těles.

V rámci řešení disertační práce byla ověřena chemická odolnost vůči roztoku biogenní kyseliny sírové porovnány komerčně dostupných hmot, u nichž výrobci definovali odolnost svých materiálů v souladu s metodikou normy DIN 19573 [1]. Z výsledků stanovení hloubky koroze i relativní zbytkové pevnosti vyplývá, že modifikovaná metodika chemického zatěžování je funkční a je ji možné úspěšně použít pro testování nových hmot vyvíjených v rámci nejen této práce. Rozdíly ve výsledcích obou zmíněných veličin, které byly testovány optimalizovanou metodikou i přesně v souladu s DIN 19573, se pohybovaly v rozmezí 0,5-1,5 %, což je možné považovat za statistickou chybu.

Jedním z výstupů této práce je podrobná optimalizovaná metodika nakládání se zkušebními tělesy i nová metodika samotného zrychleného laboratorního stanovení chemické odolnosti malt, vůči působení biogenní kyseliny sírové, v prostředí kanalizací.

4 SHRNUTÍ

Disertační práce byla zaměřena na výzkum nového uceleného systému vysoce odolných kompozitních materiálů na polymercementové bázi, určených pro sanaci chemicky namáhaných stavebních konstrukcí. Celý proces výzkumu a vývoje nových vysoceodolných kompozitů byl rozdělen do šesti provázaných etap.

Obsahem první etapy byla charakterizace expozičních prostředí a relevantních vlivů působících na stavební konstrukce. V rámci etapy bylo definováno několik relevantních expozičních prostředí a pro ně charakteristické agresivní vlivy. Konkrétně se jednalo o:

- kanalizační šachty a stoky,
- čističky odpadních vod,
- zemědělské a agropotravinářské konstrukce.

Na základě zjištěných informací byl proveden návrh metody laboratorní simulace zatěžování v chemicky agresivních expozičních podmínkách, přičemž právě prostředí kanalizačních systémů bylo formulováno jako stěžejní expoziční prostředí, čemuž je uzpůsoben výsledný soubor laboratorních zkoušek pro zrychlenou simulaci chemického namáhání i skladba jednotlivých chemicky odolných komponent systému.

Jako klíčový metodický postup zrychlené laboratorní simulace chemicky agresivních podmínek v prostředí kanalizačních těles byla zvolena norma DIN 19573, která definuje i zkoušku pro stanovení chemické odolnosti simulací napadení biogenní kyselinou sírovou. Pro tuto laboratorní zkoušku byla v rámci první etapy sestavena první verze zkušební aparatury. Součástí první etapy je souhrnný retrospektivní popis vývoje této aparatury, který probíhal během řešení druhé, čtvrté a páté etapy.

Náplní druhé etapy bylo laboratorní ověření charakteristik dostupných správkových hmot na cementové či polymercementové bázi, u nichž byla výrobcem garantována zvýšená odolnost mj. v prostředí kanalizací a kanalizačních stok. Účelem bylo:

- Hlubší porozumění dostupným sanačním hmotám, charakterem a pojivovou bází blízkým hmotám vyvíjeným v rámci této práce.
- Ověření nové metodiky laboratorního testování, v níž je kladen důraz na posouzení chemické odolnosti.
- Ověření funkčnosti nově sestavené aparatury pro testování odolnosti vůči biogenní kyselině sírové a získání podkladů pro její další zdokonalení.

Na základě získaných výsledků byl optimalizován soubor požadavků kladených na určité stěžejní komponenty nového sanačního systému a zároveň byla ověřena funkčnost nově sestavené aparatury pro testování odolnosti vůči biogenní kyselině sírové.

Obsahem třetí etapy byl výběr vstupních surovin a návrh základních surovinových variant jednotlivých komponent zamýšleného sanačního systému. V první části etapy byly charakterizovány primární vstupní suroviny, tedy pojivo, plniva, příměsi a přísady. V druhé části etapy byl charakterizován široký soubor druhotných surovin či odpadů, jimiž bylo potenciálně možné do určité míry substituovat pojivo, ale i další vybrané primární suroviny. Mimo jiné byly charakterizovány odpadní či vedlejší produkty z:

- hutního a energetického průmyslu,
- těžby a zpracování nerostů,
- výroby a zpracování staveních materiálů či demolice stavebních konstrukcí,

- zpracování komunálního odpadu.

Z tohoto širokého souboru potenciálně vhodných alternativních surovin byl pomocí multikriteriálního optimalizačního výběru sestaven soubor osmi druhotných surovin, jež byly v rámci páté etapy využity k substituci primárních surovin.

V závěrečné třetí části třetí etapy byl navržen široký soubor základních surovinových variant jednotlivých komponent systému: správkové malty (SM), zdící hmoty (ZH), spárovací hmoty (SH) a stříkané matly pro torkretáž (WSC), přičemž v rámci dané komponenty systému se jednotlivé receptury lišily dávkou krystalizační přísady.

Náplní čtvrté a páté etapy byl samotný vývoj nových sanačních hmot, tedy výroba zkušebních těles, provádění laboratorních zkoušek a jejich vyhodnocení.

Obsahem čtvrté etapy bylo laboratorní testování základního souboru surovinových variant, přičemž celý proces byl rozdělen do dvou fází. V rámci první fáze byl ověřen relativně úzký soubor fyzikálně-mechanických charakteristik jednotlivých hmot pro jasné definování dvou až tří receptur s největším potenciálem dosažení vysokých užitných vlastností. Mezi vyhodnocované parametry patřil mj. vliv surovinového složení na zpracovatelnost, obsah vzduchu v čerstvé maltě, objemové změny v prvních 72 hodinách hydratace, nasákavost, pevnostní charakteristiky, ale také mrazuvzdornost či odolnost vůči CHRL.

Na základě získaných výsledků byl zúžen soubor základních receptur a byla zahájena druhá fáze laboratorního testování v rámci čtvrté etapy. Byly vyhotoveny nové sady zkušebních těles a důraz byl kladen na posouzení stěžejních parametrů chemické odolnosti vůči působení roztoku agresivní biogenní kyseliny sírové (stanovení účinné hloubky koroze a relativní zbytkové pevnosti v tlaku) a odolnost vůči působení síranů (vliv na délkové změny zkušebních těles). Zároveň byl i rozšířen soubor sledovaných fyzikálně-mechanických charakteristik, např. o odpor ke kapilární absorpci, koeficient kapilární absorpce vody, přídržnost, tepelnou slučitelnost či odolnost vůči obrusu.

Na základě získaných výsledků byla pro každou komponentu systému vybrána jedna surovinová varianta, která byla dále v rámci páté etapy modifikována substitucí určitého hmotnostního podílu pojiva, plniva či příměsi. Byla ověřena možnost substituce pojiva ve 20 až 60% míře a náhrada dílčích frakcí plniva či příměsí ve 100% míře. Pro každou komponentu systému bylo navrženo devět až čtrnáct specifických surovinových variant.

Metodika laboratorního testování v rámci páté etapy byla opět rozdělena do dvou fází, které kopírovaly postup použitý v etapě čtvrté. V první fázi byl tedy opět posouzen relativně úzký soubor parametrů pro výběr dvou až tří surovinových variant, každé komponenty systému, z širokého souboru navržených receptur.

V druhé fázi páté etapy byl jako stěžejní posuzován vliv jednotlivých druhotných surovin na chemickou odolnost výsledného kompozitu. Jak vyplývá i z Tab. č. 3 uvedených vybraných výsledků chemické odolnosti správkové malty, resp. malty pro torkretáž, substitucí pojiva v optimální míře vhodnými druhotnými surovinami je možné významně zlepšit užitné vlastnosti nových sanačních hmot na bázi PC.

Tab. č. 3 *Vybrané výsledky chemické odolnosti nových surovinových variant dílčích komponent sanačního systému.*

Surovinová varianta	Odolnost biogenní H_2SO_4		Síranová odolnost
	$f_{c,r}$ [a]	$X_{f,D}$ [b]	Δε [c]
	[%]	[mm]	[mm×m^{-1}]
SM-9	67,3	1,495	0,199
SM-9-2SVY	71,0	1,084	0,174
WSC-7	83,0	1,379	0,204
WSC-7-3SKL	84,1	1,120	0,229
WSC-7-3ETU	87,1	0,125	0,152

[a] *Relativní zbytková pevnost v prostém tlaku (pH0: $f_{c,r}$ >55 %; pH1: $f_{c,r}$ >75 %)*

[b] *Účinná hloubka koroze (pH0: $X_{f,D}$ <5,2 mm; pH1: $X_{f,D}$ <2,7 mm)*

[c] *Maximální přípustná délková změna (dle DIN 19573 Δε <0,8 mm×m^{-1}) po 91 dnech expozice v roztoku Na_2SO_4 o koncentraci 29,8 g×l^{-1} (44 g×l^{-1} Na_2SO_4)*

V rámci řešení čtvrté a páté etapy byly zároveň provedeny dvě výroby zkušebních těles stříkané malty v poloprovozních podmínkách technologií suchého stříkání. U takto vyrobených těles byl proveden téměř kompletní soubor laboratorních zkoušek, včetně ověření chemické odolnosti. Z nabytých výsledků vyplynulo, že mezi laboratorně vyráběnými hmotami a hmotami aplikovanými v reálných podmínkách jsou poměrně velké rozdíly v homogenitě kompozitu a tím spojenou nekonzistencí fyzikálně-mechanických parametrů i charakteristik chemické odolnosti.

Výstupem páté etapy je soubor optimalizovaných surovinových variant jednotlivých komponent sanačního systému, přičemž byly vybrány čtyři receptury se čtyřmi různými druhotnými surovinami. To vyplynulo ze snahy o ověření přínosu co největšího množství alternativních surovin, avšak při definování finálních receptur bylo nutné zvážit řadu faktorů, mezi které patří nároky na:

- předúpravu druhotných surovin,
- skladovací prostory ve výrobě suchých hmot,
- dávkování surovin do homogenizačního zařízení,
- dostupnost jednotlivých druhotných surovin v alespoň střednědobém horizontu.

S ohledem na širokou škálu parametrů je tedy vhodné vybrat dvě, maximálně tři druhotné suroviny pro specifické použití. Například velmi dobrých výsledků bylo dosaženo při použití vysokoteplotních elektrárenských popílků nebo některých odpadů z hutní výroby, avšak právě u těchto druhotných surovin již v dnešní době vystává relevantní otázka budoucí dostupnosti.

V závěrečné šesté etapě bylo provedeno hlubší studium vlivu druhotných surovin a krystalizační přísady na užitné vlastnosti finálních surovinových variant chemicky odolných sanačních hmot. Mimo jiné byly pomocí optické mikroskopie vyhodnoceny rozdíly mezi jednolitými hmotami z pohledu homogenity, hutnosti struktury, velikosti a distribuce pórů či defekty na mezifázové přechodové vrstvě na rozhraní cementové matrice a plniva. Dále byl pomocí SEM a XRD analýz posouzen přínos použití krystalizační přísady či substituce primárních složek druhotnými surovinami na mineralogické změny během hydratace i po zatěžování ve specifických chemicky agresivních prostředích.

Z nabytých výsledků vyplývá, že i při 30% míře substituce pojiva vybranými druhotnými surovinami nedocházelo ke vzniku odlišných produktů hydratace ani ke vzniku odlišných produktů koroze cementové matrice. Prokázal se pozitivní vliv na hutnost struktury cementového kompozitu a s tím související zvýšenou nepropustnost vůči pronikání chemicky agresivních látek do výsledného sanačního kompozitu. S tím souvisí i vliv na vznik konkrétních korozních novotvarů, kdy u optimalizovaných hmot, na rozdíl od hmot referenčních, nedocházelo ke vzniku ettringitu, ale pouze sádrovce. Zároveň bylo prokázáno, že na vyšší hutnost cementové matrice měla vliv tloušťka zóny, v níž probíhá určitá fáze koroze cementové matrice, což se opět pozitivně promítlo v životnosti cementového kompozitu i v chemicky velmi agresivním prostředí.

5 ZÁVĚR

Disertační práce se zabývala výzkumem a vývojem vysoceodolných kompozitů pro chemicky namáhané stavební konstrukce. Tyto nové kompozity tvoří nově vyvinutý a vyzkoušený ucelený sanační systém na polymercementové bázi, primárně určený pro sanaci stavebních konstrukcí kanalizačních stok či šachet, u nichž se požaduje zvýšená odolnost proti specifickým druhům namáhání.

V rámci disertační práce byly vyvinuty čtyři chemicky odolné komponenty systému pro specifické využití:

- **zdící hmota** pro případnou dostavbu části konstrukce,
- **spárovací hmota** pro kvalitní utěsnění mezer mezi zdícími prvky,
- **správková malta** pro reprofilaci lokálních poškození či opravě složitějších profilů,
- **stříkaná malta pro torkretáž** pro případ nutnosti zacelit a sjednotit povrch stoky či šachty stříkaným kompozitem.

Nový sanační systém splňuje specifické požadavky vybraného expozičního prostředí. Je vodotěsný, bezpečně odolný proti mechanickým, chemickým, biologickým a jiným vlivům protékajících odpadních vod a umožňuje bezpečné a účinné čištění stok a šachet.

Do receptur jednotlivých surovinových variant nového sanačního systému byly zakomponovány i alternativní suroviny, jejichž vhodným použitím bylo dosaženo snížení konečné ceny produktů a také bylo prokázáno zvýšení odolnosti jednotlivých komponent systému proti chemicky agresivním vlivům vyskytujícím se v prostředí kanalizačních stok či šachet. Vysoké chemické odolnosti a dalších užitných vlastností bylo dosaženo substitucí:

- **30 hm.% pojiva** – portlandského cementu CEM I 42,5 R – **mletým skelným recyklátem**,
- **100 hm.% jemného plniva** – křemenného písku frakce 0,1-0,5 mm – tříděným **slévárenským pískem pojeným vodním sklem**,
- **100 hm.% inertní příměsí** – živcokřemičitého filleru – **amfibolitovými odprašky**.

U každé z dílčích uvedených náhrad primárních surovin vybranými druhotnými surovinami byl jednoznačně prokázán pozitivní vliv na chemickou odolnost i fyzikálně-mechanické parametry daného kompozitu. Pozitivní vliv na zlepšení užitných vlastností byl jednoznačně prokázán i při substituci pojiva dalšími vybranými druhotnými surovinami, např. **vysokoteplotními elektrárenskými popílky** či **mletou silika**

vyzdívkou z hutního průmyslu, avšak u těchto alternativně použitelných surovin bylo nutné přihlédnout ve střednědobém horizontu k hledisku dostupnosti na území ČR.

Provedenými analýzami makro a mikrostruktury vybraných surovinových variant bylo prokázán pozitivní vliv optimalizace surovinového složení příměsí vybraných druhotných surovin na hutnost struktury cementového kompozitu, a s tím související zvýšenou nepropustnost vůči pronikání chemicky agresivních látek do struktury kompozitu. Dále byl prokázán vliv na vznik konkrétních korozních novotvarů. U optimalizovaných receptur na rozdíl od referenčních hmot nedocházelo ke vzniku ettringitu, ale pouze sádrovce. Dále bylo prokázáno, že s vyšší hutností cementové matrice má vliv na tloušťka zóny, v níž probíhá určitá fáze koroze cementové matrice, což má opět pozitivní vliv na životnost cementového kompozitu i v chemicky náročných expozičních podmínkách.

Cíl disertační práce byl zcela splněn a nad původní rámec byla vyvinuta unikátní metodika zrychleného stanovení chemické odolnosti hmot v prostředí kanalizací. V ní je simulováno napadání cementové či polymercementové hmoty roztokem biogenní kyseliny sírové. Součástí metodiky je i popis výroby a obsluhy specifické zkušební aparatury pro uložení zkušebních těles v roztoku H_2SO_4.

6 PŘÍNOSY PRO VĚDNÍ OBOR

Hlavním přínosem pro vědní obor je unikátně optimalizovaná metodika zrychleného stanovení chemické odolnosti hmot v prostředí kanalizací, v níž je simulováno napadání cementové či polymercementové hmoty roztokem biogenní kyseliny sírové. Součástí nové metodiky je souhrnný popis způsobu výroby, ošetřování i úpravy zkušebních těles, definován je postup chemického namáhání zkušebních těles, primárně cementových, polymercementových či geopolymerních kompozitů, následné testování a vyhodnocování výsledků. Součástí je i popis výroby a obsluhy specifické zkušební aparatury pro uložení zkušebních těles v roztoku H_2SO_4.

Nová metodika a související zkušební aparatura umožňují rychlé ověření parametrů chemické odolnosti testovaných stavebních materiálů a v kombinaci s pokročilými analytickými metodami i prokázání vlivu chemického namáhání na makro a mikrostrukturu daného kompozitu.

7 PŘÍNOS PRO PRAXI

Mezi hlavní přínosy disertační práce pro praxi, patří celý proces vývoje nového uceleného sanačního systému vysoceodolných kompozitů pro chemicky namáhané stavební konstrukce. Z nabytých výsledků laboratorního měření se prokázal přínos krystalizační přísady i vybraných druhotných surovin na zvýšení užitných vlastnosti nových sanačních kompozitů, a to včetně vlivu na nárust chemické odolnosti v prostředí kanalizačních systémů.

Celý nový sanační systém splňuje specifické požadavky vybraného expozičního prostředí. Je vodotěsný a bezpečně odolný proti mechanickým, chemickým, biologickým a jiným vlivům dopravovaných médií v kanalizacích. Současně také umožňuje bezpečné a účinné čištění stok.

Funkčnost celého sanačního systému byla ověřena širokým souborem relevantních laboratorních experimentů. Mimo jiné bylo provedeno studium makrostrukturálních

a mikrostrukturálních vlivů druhotných surovin a krystalizační přísady na užitné vlastnosti. Příměs krystalizační přísady i optimalizace surovinového složení příměsí vybraných druhotných surovin má prokazatelně pozitivní vliv na hutnost struktury cementového kompozitu, a s tím související zvýšenou nepropustnost vůči pronikání chemicky agresivních látek do struktury kompozitu. Zakomponováním druhotných i alternativních surovin do receptur jednotlivých surovinových variant nového sanačního systému bylo zároveň dosaženo snížení konečné ceny nových stavebních materiálů.

8 SEZNAM VYBRANÉ LITERATURY

[1] DIN 19573:2016-03. *Mortar for construction and rehabilitation of drains and sewers outside buildings: Malta pro výstavbu a obnovu stok a kanalizačních přípojek vně budov*. 03. Německo: DIN, 2016.

[2] LEDERER OVÁ, Jaroslava. *Biokorozní vlivy na stavební díla*. 1. vyd. Praha: Silikátový svaz, 2009. ISBN 978-808-6821-504.

[3] IRASSAR, E.F; BONAVETTI, V.L a GONZÁLEZ, M. Microstructural study of sulfate attack on ordinary and limestone Portland cements at ambient temperature. *Cement and Concrete Research*. 2003, roč. 33, č. 1, s. 31-41. ISSN 00088846. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00914-6.

[4] BROWN, P.W a BADGER, Steven. The distributions of bound sulfates and chlorides in concrete subjected to mixed NaCl, $MgSO_4$, Na_2SO_4 attack. *Cement and Concrete Research*. 2000, roč. 30, č. 10, s. 1535-1542. ISSN 00088846. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00386-0.

[5] WU, Min; WANG, Tian; WU, Kai a KAN, Lili. Microbiologically induced corrosion of concrete in sewer structures: A review of the mechanisms and phenomena. *Construction and Building Materials*. 2020, roč. 239. ISSN 09500618. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117813.

[6] WU, Linping; HU, Chaoshi a LIU, Wei. The Sustainability of Concrete in Sewer Tunnel—A Narrative Review of Acid Corrosion in the City of Edmonton, Canada. *Sustainability*. 2018, roč. 10, č. 2. ISSN 2071-1050. Dostupné z: https://doi.org/10.3390/su10020517.

[7] HOSSAIN, M.M.; KARIM, M.R.; HASAN, M.; HOSSAIN, M.K. a ZAIN, M.F.M. Durability of mortar and concrete made up of pozzolans as a partial replacement of cement: A review. online. *Construction and Building Materials*. 2016, roč. 116, s. 128-140. ISSN 09500618. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.147.

[8] O'CONNELL, M.; MCNALLY, C. a RICHARDSON, M.G. Biochemical attack on concrete in wastewater applications: A state of the art review. *Cement and Concrete Composites*. 2010, roč. 32, č. 7, s. 479-485. ISSN 09589465. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.05.001.

[9] LEE, Hyeongi; HANIF, Asad; USMAN, Muhammad; SIM, Jongsung a OH, Hongseob. Performance evaluation of concrete incorporating glass powder and glass sludge wastes as supplementary cementing material. online. *Journal of Cleaner Production*. 2018, roč. 170, s. 683-693. ISSN 09596526. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.072.

9 CURRICULUM VITAE

Osobní informace:

Jméno a příjmení	Ing. Petr Figala
Adresa	Antonína Macka 2/4, 612 00, Brno, Česká republika
Telefon	Telefon: +420 541 147 525 Mobil: +420 774 322 004
E-mail	Petr.Figala@vut.cz
Národnost	česká
Datum narození	02. březen 1992

Dosažené vzdělání:

2018	Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, obor M stavebně materiálové inženýrství, Prezenční magisterské navazující studium, dosažen titul Ing., Téma práce: Specifický cementový kompozit na bázi druhotných surovin s důrazem na trvanlivost
2016	Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Stavební inženýrství, obor M – stavebně materiálové inženýrství, Prezenční bakalářské studium, dosažen titul Bc., Téma práce: Studium možnosti zvýšení odolnosti průmyslových podlah s využitím druhotných surovin

Pracovní zkušenosti:

Datum	2018 – dosud
Pracovní pozice	Vědecko-výzkumný pracovník, doktorand
Zaměstnavatel	VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Vybrané publikace:

1. MELICHAR, J.; ČERNÝ, V.; MÉSZÁROSOVÁ, L.; DROCHYTKA, R.; DUFKA, A.; FIGALA, P.; BARÁNEK, Š. Study of synergistic effect of fly ash and superabsorbent polymers on properties of cement pastes. Journal of Building Engineering, 2023, vol. 79, no. 107897, p. 1-20. ISSN: 2352-7102.
2. FIGALA, P.; DROCHYTKA, R.; ČERNÝ, V.; DOHNÁLEK, P. The Development of a New Chemically Resistant Sprayed Mixture. In Solid State Phenomena. Solid State Phenomena. 336. 2022. p. 185-191. ISSN: 1012-0394.
3. HERMANN, R.; MAJEROVÁ, J.; DROCHYTKA, R.; FIGALA, P. Assessment of Chemical Resistance of Polymer Repair Mortars. In Materials and Technologies of Modern Production. Key Engineering Materials (web). Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2022. p. 213-218. ISBN: 978-3-0364-1168-2. ISSN: 1662-9795.
4. MELICHAR, J.; ČERNÝ, V.; MÉSZÁROSOVÁ, L.; FIGALA, P.; DUFKA, A.; HOLUBOVÁ, P.; DROCHYTKA, R. Possibilities of fly ash utilization in the cement matrix by superabsorbent polymers. Waste forum, 2021, vol. 2021, no. 4, p. 227-237. ISSN: 1804-0195.
5. FIGALA, P.; DROCHYTKA, R.; HERMANN, R. Study of the properties of chemically resistant repair mortar with the use of secondary raw materials. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. IOP Publishing, 2021. p. 1-7. ISSN: 1757-899X.
6. HERMANN, R.; FIGALA, P.; MÉSZÁROSOVÁ, L.; DROCHYTKA, R. Study of polymer-based adhesive mortar with higher durability. In IOP Conference Series: Materials Science

and Engineering. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. IOP Publishing, 2021. p. 1-7. ISSN: 1757-8981.
7. FIGALA, P.; DROCHYTKA, R.; ČERNÝ, V. The new chemically resistant material for the invert grouting optimized with secondary raw materials. Solid State Phenomena. 325. 2021. p. 200-208. ISBN: 978-3-0357-1870-6. ISSN: 1012-0394.
8. FIGALA, P.; DROCHYTKA, R.; ČERNÝ, V.; HERMANN, R.; KOLÍSKO, J. Monitoring of Chemical Resistance of New Grouting Materials. In Key Engineering Materials. Key Engineering Materials. 2021. p. 27-33. ISBN: 978-3-0357-1810-2. ISSN: 1013-9826.
9. FIGALA, P.; DROCHYTKA, R.; ČERNÝ, V. The development of new chemically resistant material for the invert grouting. In Solid State Phenomena. Solid State Phenomena. 321. 2021. p. 37-42. ISBN: 978-3-0357-1728-0. ISSN: 1012-0394.
10. HERMANN, R.; DROCHYTKA, R.; ČERNÝ, V.; FIGALA, P. Utilization of continuous hydrostatic weighing for monitoring of volume changes. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2021. p. 1-7. ISSN: 1757-899X.
11. FIGALA, P.; DROCHYTKA, R.; HERMANN, R.; KOLÍSKO, J. Silicate Sprayed Mixture Based on Secondary Raw Materials. In Key Engineering Materials. Key Engineering Materials (print). Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2019. p. 129-135. ISBN: 978-3-0357-1492-0. ISSN: 1013-9826.
12. FIGALA, P.; DROCHYTKA, R.; DOHNÁLEK, P. Studium struktury vysokopevnostního polymercementového kompozitu modifikovaného druhotnými surovinami. In Sborník recenzovaných přednášek. mezinárodní konference POPÍLKY VE STAVEBNICTVÍ. 2019. s. 5-12. ISBN: 978-80-214-5751-5.
13. FIGALA, P.; DROCHYTKA, R. The microstructure of a cement composite based on a secondary raw materials. In Construmat 2018. Materials Science and Engineering. 2018. United Kingdom: IOP Publishing, 2018. p. 1-6. ISSN: 1757-899X.

Aplikované výsledky:

1. DROCHYTKA, R.; BYDŽOVSKÝ, J.; ČERNÝ, V.; FIGALA, P.; PUMPR, V.; DOHNÁLEK, P.; DOHNÁLEK, J., Užitný vzor – Systém pro sanaci chemicky atakovaných a namáhaných stavebních konstrukcí, Vysoké učení technické v Brně, Stavební fakulta, Brno, 2021.
2. DROCHYTKA, R.; DOHNÁLEK, P.; DOHNÁLEK, J.; PUMPR, V.; BYDŽOVSKÝ, J.; ČERNÝ, V.; FIGALA, P., Ověřená technologie – Systém pro sanaci chemicky atakovaných a namáhaných stavebních konstrukcí, Vysoké učení technické v Brně, Stavební fakulta, Brno, 2021.
3. DROCHYTKA, R.; DOHNÁLEK, P.; ČERNÝ, V.; FIGALA, P., Funkční vzorek – Chemicky odolná spárovací hmota, Vysoké učení technické v Brně, Stavební fakulta, Brno, 2021.
4. DROCHYTKA, R.; DOHNÁLEK, P.; ČERNÝ, V.; FIGALA, P., Funkční vzorek – Injektážní směs pro rubovou injektáž, Vysoké učení technické v Brně, Stavební fakulta, Brno, 2021.
5. DROCHYTKA, R.; DOHNÁLEK, P.; ČERNÝ, V.; FIGALA, P., Funkční vzorek – Chemicky odolná zdící hmota, Vysoké učení technické v Brně, Stavební fakulta, Brno, 2021.
6. DROCHYTKA, R.; DOHNÁLEK, P.; ČERNÝ, V.; FIGALA, P., Funkční vzorek – Chemicky odolná správková malta, Vysoké učení technické v Brně, Stavební fakulta, Brno, 2021.
7. DROCHYTKA, R.; DOHNÁLEK, P.; ČERNÝ, V.; FIGALA, P., Funkční vzorek – Chemicky odolná směs na torkret, Vysoké učení technické v Brně, Stavební fakulta, Brno, 2021.
8. DROCHYTKA, R.; ČERNÝ, V.; MELICHAR, J.; MÉSZÁROSOVÁ, L.; FIGALA, P.; BARÁNEK, Š.; JEŘÁBEK, Z., Funkční vzorek – Energeticky úsporný pórobeton s využitím alternativních surovin, Vysoké učení technické v Brně, Stavební fakulta, Brno, 2022.

10 ABSTRAKT

Práce se zabývá výzkumem nového, uceleného systému vysoce odolných kompozitních materiálů na polymercementové bázi, určených pro sanaci stavebních konstrukcí, kanalizačních stok či šachet, u nichž se požaduje zvýšená odolnost proti specifickým druhům namáhání s primárním určením do prostředí kanalizačních konstrukcí. Součástí sanačního systému jsou správková malta, zdící a spárovací hmota a stříkaná malta pro torkretáž. Zkoumán byl přínos využití krystalizační přísady pro utěsnění struktury jednotlivých komponent systému. Zároveň byl posouzen vliv určité míry substituce primárního pojiva a plniv vybranými druhotnými surovinami na výsledné užitné vlastnosti nových kompozitů na bázi portlandského cementu. Při vývoji jednotlivých komponent systému byl důraz kladen na chemickou odolnost surovinových variant. Pro tyto potřeby byla optimalizována normová metodika dle DIN 19 573, jež se mj. zaměřuje na zrychlené laboratorního testování chemické odolnosti simulací napadení biogenní kyselinou sírovou.

Výstupem této optimalizace je nová metodika přípravy a ošetřování zkušebních těles a zároveň navržení a vyrobení nové specifické zkušební aparatury pro uložení zkušebních těles v roztoku H_2SO_4. Dále se práce zabývá posouzením vlivu surovinového složení na široký soubor fyzikálně-mechanických parametrů, jako jsou objemové změny v prvních dnech hydratace, pevnostní charakteristiky, kapilární absorpce a odpor ke kapilární absorpci, přídržnost, tepelná slučitelnost nebo odolnost vůči CHRL, mrazu či síranovým solím. Jednotlivé komponenty, a tedy i celý sanační systém splňuje specifické požadavky vybraného expozičního prostředí. Je vodotěsný a bezpečně odolný proti mechanickým, chemickým, biologickým a jiným vlivům protékajících odpadních vod. Současně umožňuje bezpečné a účinné čištění stok. Využitím druhotných surovin je dosaženo snížení ekonomické i ekologické zátěže vztahující se k výrobě nových stavebních hmot, a to za současného zvýšení jejich užitných vlastností.

11 ABSTRACT

The thesis deals with the research of a new, comprehensive system of highly resistant composite materials based on Portland cement intended for the rehabilitation of building structures, sewers or manholes, where increased resistance to specific types of stresses is required, with the primary destination being the environment of sewer structures. The remediation system includes the remediation mortar, masonry and grout and shotcrete mortar for torkrettage. The benefit of using a crystallizing admixture to seal the structure of the individual system components was investigated. At the same time, the effect of a certain degree of substitution of the primary binder and fillers by selected secondary raw materials on the final performance of the new Portland cement-based composites was assessed. In the development of the individual system components, emphasis was placed on the chemical resistance of the raw material variants. For this purpose, methodology according to the DIN 19 573 standard was optimised, which focuses, among other things, on accelerated laboratory testing of chemical resistance by simulating attack by biogenic sulphuric acid.

The result of this optimization is a new methodology for the preparation and treatment of the test bodies, as well as the design and manufacture of a new specific test apparatus

for storing the test bodies in H_2SO_4 solution. Furthermore, the work deals with the assessment of the influence of the raw material composition on a wide set of physical-mechanical parameters such as volume changes in the first days of hydration, strength characteristics, capillary absorption and resistance to capillary absorption, adhesion, thermal compatibility or resistance to CHRL, freezing or sulphate salts. The individual components, and therefore the entire remediation system, meet the specific requirements of the selected exposure environment. It is watertight and safely resistant to mechanical, chemical, biological and other influences of the flowing wastewater. At the same time, it enables safe and efficient cleaning of the sewers. The use of secondary raw materials reduces the economic and ecological burden associated with the production of new building materials while increasing their performance.