



# 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 SPECIÁLNÍCH SANAČNÍCH HMOT NA BETON PRO EXTRÉMNÍ NAMÁHÁNÍ S VYUŽITÍM DRUHOTNÝCH SUROVIN

DEVELOPMENT OF SPECIAL REHABILITATION MATERIALS FOR CONCRETE FOR EXTREME STRESS  
WITH USE OF SECONDARY RAW MATERIALS

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Jakub Hodul

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA

BRNO 2019

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Kontaminovaný popílek, pevnost, druhotné suroviny, CT tomografie, správková hmota, zálivka, kotvící hmota, epoxidová pryskyřice, mikrostruktura, nebezpečný odpad, chemická odolnost, soudržnost, ekologické aspekty, dlouhodobá trvanlivost, sanace, inkorporace těžkých kovů.

## **KEYWORDS**

Contaminated fly ash, strength, secondary raw materials, CT tomography, repairing material, grout, anchoring material, epoxy resin, microstructure, hazardous waste, chemical resistance, adhesion, ecological aspects, long-term durability, remediation, incorporation of heavy metals.

## **NÁZEV PRACOVISTĚ**

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

## OBSAH:

1 ÚVOD.....	5
2 CÍL PRÁCE.....	6
3 METODIKA PRÁCE.....	6
3.1 ETAPA 1 – Identifikace vstupních surovin, návrh receptur speciálních sanačních hmot na beton a aplikační test.....	7
3.2 ETAPA 2 – Laboratorní prověření základních receptur .....	9
3.3 ETAPA 3 – Pokročilé experimentální prověření vybraných receptur .....	10
3.4 ETAPA 4 – Sledování mikrostruktury a vlivu plniva na vnitřní kompozici mechanicky a jinak namáhaných vyvinutých sanačních hmot .....	11
4 REALIZACE, VYHODNOCENÍ A DISKUSE PRÁCE JEDNOTLIVÝCH ETAP .....	12
4.1 ETAPA 1 – Identifikace vstupních surovin, návrh receptur speciálních sanačních hmot na beton a aplikační test.....	12
4.1.1 Plniva .....	12
4.1.2 Polymerní pojiva .....	13
4.1.3 Prvotní zkoušení navržených receptur .....	13
4.2 ETAPA 2 – Laboratorní prověření základních receptur .....	13
4.2.1 Zkoušky hmot v čerstvém stavu .....	13
4.2.2 Zkoušky hmot v zatvrdlém stavu.....	14
4.3 ETAPA 3 – Pokročilé experimentální prověření vybraných receptur .....	18
4.4 ETAPA 4 – Sledování vlivu mikrostruktury vyvinutých sanačních hmot na jejich fyzikálně-mechanické parametry a dlouhodobou trvanlivost .....	20
4.4.1 Sledování mikrostruktury vybraných sanačních hmot .....	20
4.4.2 Sledování mikrostruktury pomocí SEM a EDX.....	21
4.4.3 Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací (FTIR) .....	22
4.4.4 CT Tomografie .....	23
5 ZÁVĚR.....	25
6 PŘÍNOS PRO VĚDNÍ OBOR A PRAXI.....	27
7 SEZNAM VYBRANÉ LIERATURY.....	28
8 CURRICULUM VITAE .....	28
9 ABSTRACT .....	30



# 1 ÚVOD

Rostoucí tlak na kvalitu a životnost konstrukcí vytváří prostor pro vývoj nových, progresivních sanačních hmot, mezi které se řadí např. správkové, zálivkové a kotvící hmoty. Tyto hmoty mimo jiné umožňují obnovení funkce a požadovaných vlastností zdegradované části stavební konstrukce. Na správkové hmoty předurčené k použití v průmyslových provozech jsou kladeny zvláště náročné požadavky vycházející z extrémních podmínek panujících ve většině průmyslových odvětvích. Průmyslové provozy vytváří namáhaní opravované části, ať už mechanického, chemického či tepelného charakteru, kterým by etablované sanační prostředky nemusely odolávat. Speciální správkové, zálivkové a kotvící hmoty pro extrémní zatížení s vysokými nároky na mechanické vlastnosti jsou většinou vytvořeny z polymerní matrice a vhodného plniva tak, aby vytvořily kompozit s vynikajícími vlastnostmi, odpovídajícími vysoce kvalitnímu sanačnímu materiálu.

S rozvojem průmyslových odvětví dochází také k výraznější tvorbě průmyslových odpadů. Environmentální uvažování moderní společnosti předpokládá opětovné využití odpadních surovin, kterým docílíme ekologického zacházení s odpady, namísto jejich pouhého uskladnění. Odpadní a druhotné suroviny, vhodné pro použití do sanačních hmot, jsou nejčastěji využívány jako plniva, kterými lze efektivně nahradit primární suroviny. V současnosti je snaha a vytváří se tlak co nejvíce naplnit stavební hmoty odpadními i druhotnými surovinami při zachování dosavadních vlastností materiálů, popřípadě jejich zlepšení. Tento trend může mít pozitivní efekt jak z ekonomického, tak ekologického hlediska.

V současnosti se nejvíce řeší využití popílku z vysokoteplotního spalování kontaminovaného vlivem denitrifikace spalin. Tento popílek již nelze dále využívat jako plnivo do betonu nebo jako částečnou náhradu za cement, a proto je nevyhnutné najít jeho vhodné využití. Nejvhodněji se jeho využití jeví jako plnivo do polymerních sanačních hmot, nicméně tento předpoklad se musí nejprve řádně ověřit, což je dílčím cílem této disertační práce. Mimo jiné je zapotřebí najít využití dalších druhotných surovin, ale také nebezpečných odpadů, jejichž skládkování je ekologicky i ekonomicky velice náročné. V budoucnu bude potřeba řešit především nejen uskladnění, ale také další využití těchto druhů odpadů. Z toho důvodu se tato práce zabývá i touto problematikou a řeší vývoj nových polymerních stavebních hmot, které by dokázaly do své matrice pojmout zatím jinak nevyužitelné odpadní produkty.

## 2 CÍL PRÁCE

Disertační práce se zabývá výzkumem a vývojem speciálních sanačních hmot s využitím druhotných a odpadních surovin primárně určených na betonové konstrukce, kde se požaduje vysoká odolnost vůči extrémnímu namáhání. Mezi speciální sanační hmoty, které se vyvíjí, zkouší a podrobně popisují v rámci této práce, se řadí správkové (reprofiláční), zálivkové a kotvící materiály na polymerní (epoxidové) bázi, které obsahují relativně vysoké množství druhotných nebo odpadních surovin při současném zachování nebo zlepšení některých vlastností v porovnání s referenčními hmotami. U speciálních sanačních hmot se klade důraz nejenom na normové vlastnosti, ale také na ekologickou vhodnost, a to především u hmoty obsahující jako plnivo upravený nebezpečný odpad (EKO-X).

Důležitou částí provedeného výzkumu je sledování mikrostruktury vyvinutých sanačních hmot při použití zařízení jako je CT tomografie a skenovací elektronový mikroskop s podporou EDX analýzy, pomocí kterých lze sledovat vnitřní strukturu vyvinutých sanačních hmot a míru inkorporace kontaminantů do epoxidové matrice především u sanační hmoty EKO-X. Přínosem této práce je tedy nejen efektivní využití odpadních a druhotných surovin, které zatím nemají další využití a musí se ukládat na skládky, ale také hodnocení vnitřní struktury vyvinutých sanačních hmot pomocí nových progresivních metod. V rámci práce je vytvořena zcela nová metodika posuzování ekologické vhodnosti využívání odpadů do stavebních hmot, která byla prověřena u vyvinuté sanační hmoty s obsahem nebezpečného odpadu (EKO-X), kdy se sleduje především míra inkorporace polutantů.

## 3 METODIKA PRÁCE

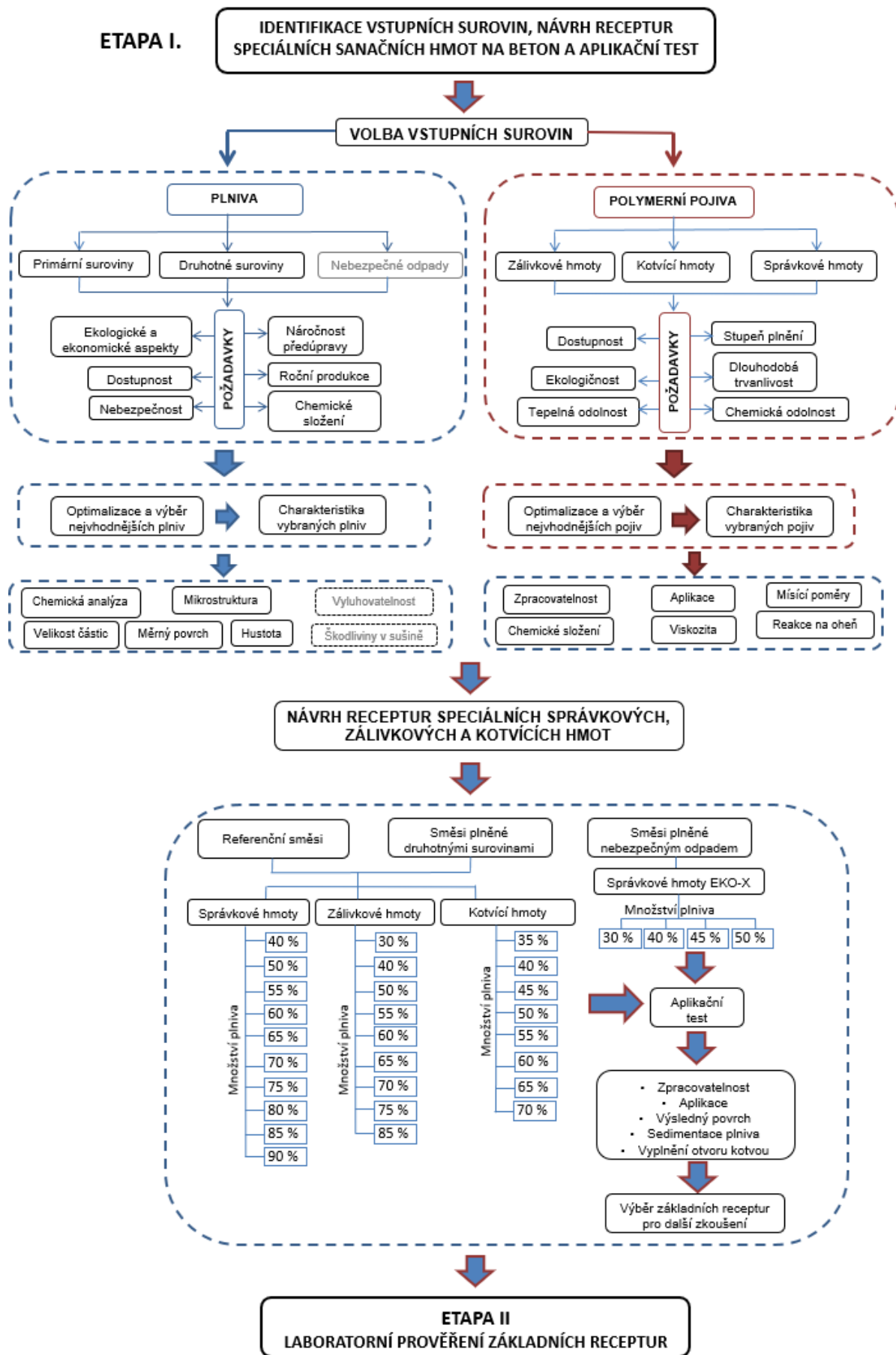
Praktická část práce je rozdělena do čtyř na sebe navazujících etap, ve kterých jsou postupně řešeny jednotlivé dílčí cíle práce s ohledem na dosažení primárního cíle, což je vývoj speciálních sanačních hmot určených převážně pro betonové konstrukce. Speciálními sanačními hmotami se rozumí materiály na polymerní (epoxidové) bázi, které obsahují relativně vysoké množství druhotných nebo odpadních surovin při současném zachování nebo zlepšení některých vlastností v porovnání s referenčními hmotami vykazujícími odolnost vůči extrémnímu namáhání. V rámci této práce se rozdělují do třech podkategorií, a to správkové, zálivkové a kotvící. Správkové hmoty mohou být označovány taky jako reprofiláční hmoty, protože jejich hlavní funkce je reprofilace zdegradovaného stavebního prvku. Tyto hmoty jsou určeny především na beton, avšak nemusí být použity jenom při sanaci betonových konstrukcí, ale také při výstavbě nových stavebních objektů, jako materiály pro speciální použití, kde se požaduje vysoká mechanická pevnost a chemická odolnost. Speciální jsou tyto hmoty dále z toho důvodu, že se u nich zkouší a požadují jiné parametry než u běžných

sanačních hmot, přičemž důraz se klade především na maximální možné využití odpadních a druhotných surovin. U speciálních sanačních hmot je nezbytné sledovat také jejich ekologickou vhodnost tak, aby nedocházelo k uvolňování kontaminantů z použitého plniva do okolního prostředí. Za tímto účelem se především u speciální sanační hmoty EKO-X, obsahující nebezpečný odpad, předepisuje provádět zkoušku vyluhovatelnosti a posuzování ekotoxicity.

### **3.1 ETAPA 1 – IDENTIFIKACE VSTUPNÍCH SUROVIN, NÁVRH RECEPTUR SPECIÁLNÍCH SANAČNÍCH HMOT NA BETON A APLIKAČNÍ TEST**

V rámci první etapy probíhá především volba vstupních surovin, jejich identifikace a následně je proveden návrh receptur speciálních sanačních hmot na beton. Konkrétně se jedná o návrh vhodných plniv na bázi odpadních a druhotných surovin a polymerních pojiv pro vývoj a výzkum speciálních správkových, zálivkových a kotvících hmot. Jako plniva jsou vybírány i nebezpečné odpady a neutralizační kaly, jejichž předúpravou se dá dosáhnout možnosti použití jako progresivního plniva do polymerní matrice. Jako referenční plnivo je zvolen čistý křemičitý písek, který se do speciálních sanačních hmot používá v současnosti nejvíce. Druhotné a odpadní suroviny jsou vybírány na základě přesně zvolených požadavků, jako je např. roční produkce, chemické složení, nebezpečnost a další. Jejich výběr je realizován na základě optimalizačního výpočtu, který slouží k výběru plniva do speciálních sanačních hmot. Tato plniva jsou následně blíže identifikována pro lepší pochopení jejich působení v polymerní matrici a jejich vlivu na výsledné fyzikálně-mechanické vlastnosti vyvíjených hmot.

Jako polymerní pojiva jsou vybrány a blíže identifikovány ty pryskyřice, které svými vlastnostmi nejvíce vyhovují požadavkům vztahujícím se na vyvíjené speciální sanační hmoty. Obecně se požaduje, aby se zvolené polymerní pojivo dalo velice dobře plnit, vykazovalo zvýšenou tepelnou a chemickou odolnost, dlouhodobou trvanlivost, a především vysokou soudržnost s podkladním betonem. Především na základě požadavků uvedených v diagramu je vybráno pro každý typ vyvíjené sanační hmoty jedno polymerní pojivo, u kterého je pak dále uvedena jeho bližší charakteristika. Po přehledné identifikaci vybraných vstupních surovin probíhá návrh receptur správkových, zálivkových a kotvících hmot. Zvolené množství plniva se odvíjí od požadované viskozity materiálu v čerstvém stavu, přičemž od každé hmoty je pak navrženo minimálně osm různých plnění. Následně proběhne experimentální prověření prvotních receptur pomocí aplikačního testu. V závěru první etapy se vybírají receptury, které prošly aplikačním testem a mohou postoupit do dalšího zkoušení, které probíhá ve druhé etapě.

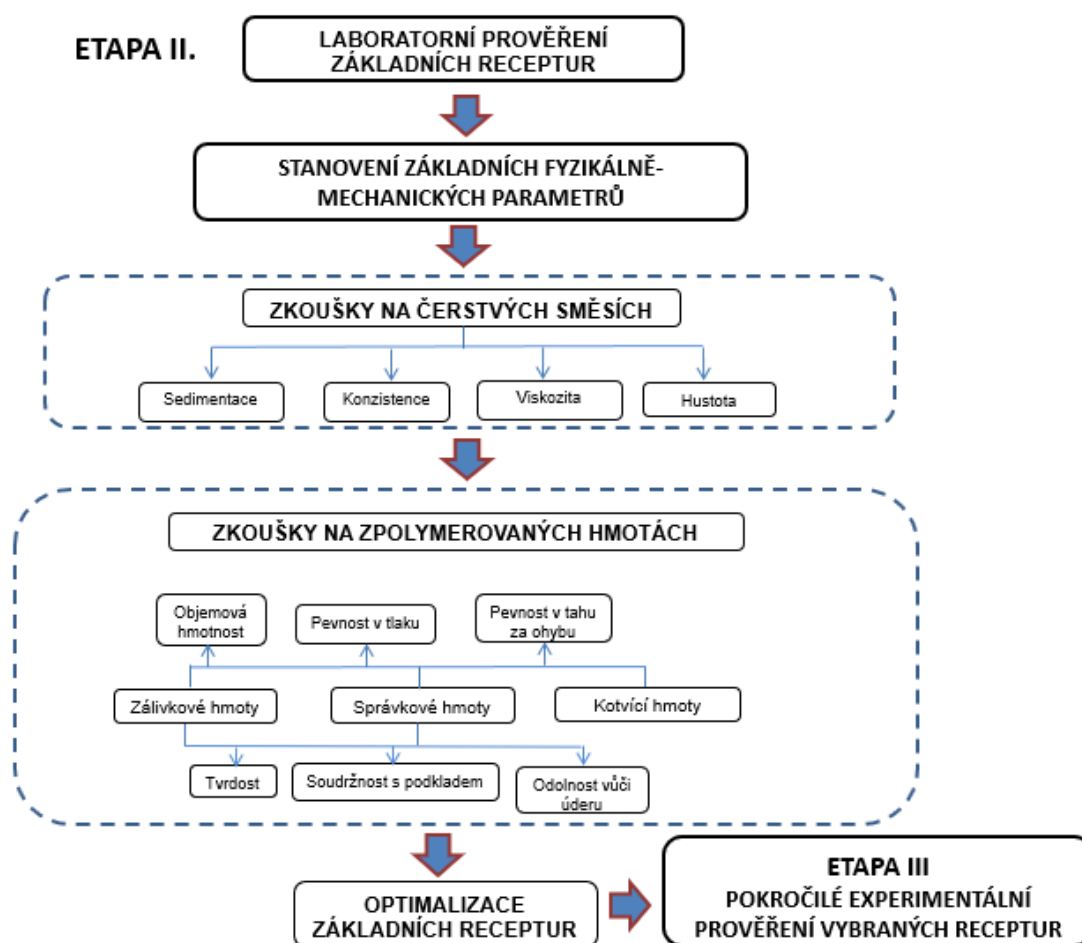


Obr. 1: Schéma postupu řešení disertační práce v rámci první etapy



### 3.2 ETAPA 2 – LABORATORNÍ PROVĚŘENÍ ZÁKLADNÍCH RECEPTUR

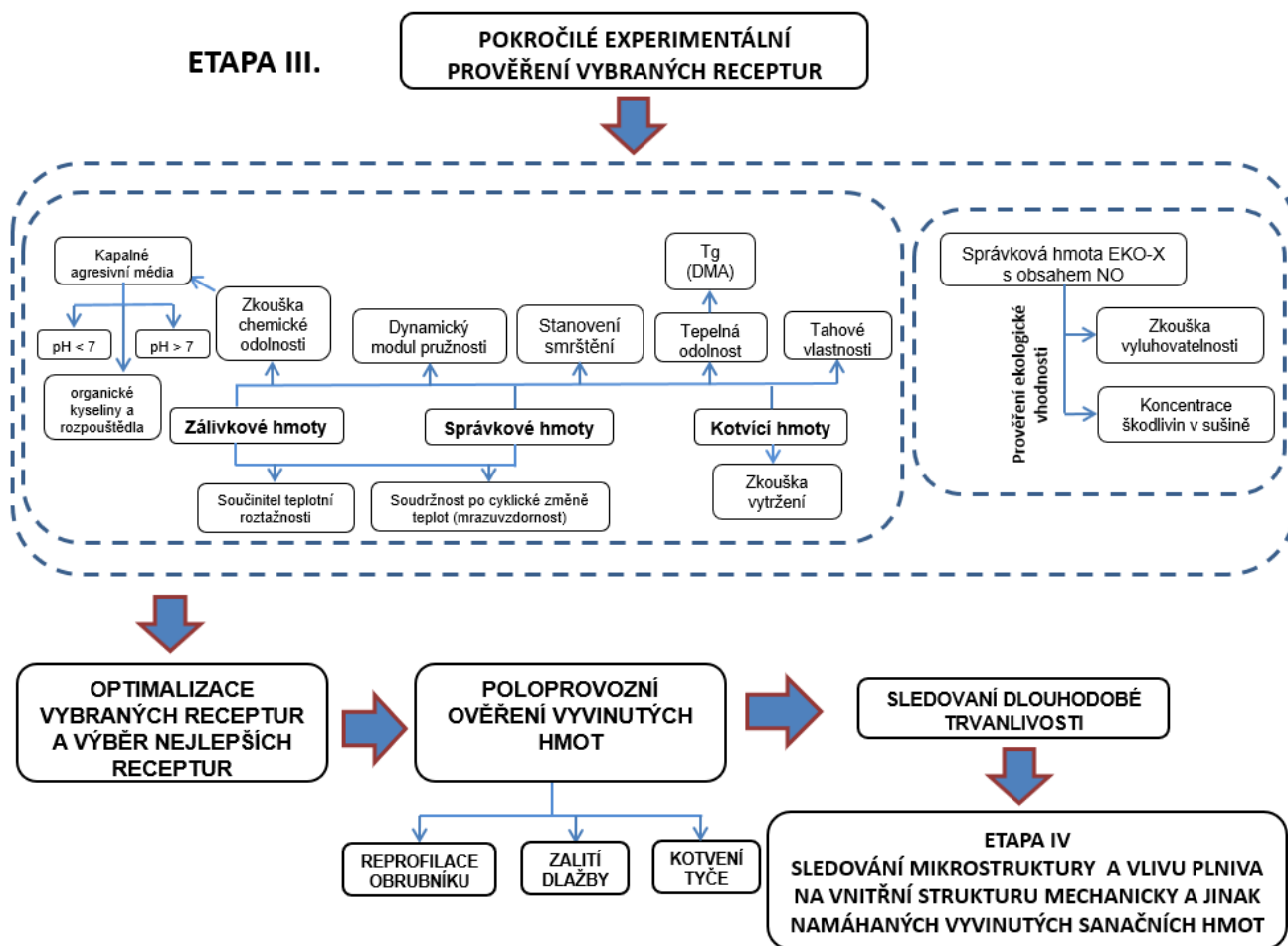
Druhá etapa práce je zaměřena na experimentální laboratorní zkoušení základních receptur, které prošly hodnocením prvotního aplikačního testu. Experimentální ověření začíná zkouškami, jako je např. sedimentace a viskozita, na čerstvých směsích. Dále následují zkoušky na zpolymerovaných vzorcích, přičemž se jedná především o prověření fyzikálně-mechanických vlastností vyvíjených speciálních polymerních sanačních hmot na beton. Některé zkoušky jsou stejné pro všechny tři typy vyvíjených hmot, jako např. stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku, protože jsou tyto parametry pro všechny vyvíjené hmoty důležité. Na druhé straně, zkoušky jako stanovení odolnosti vůči úderu a soudržnosti s podkladním betonem jsou charakteristické pouze pro zálivkové a správkové hmoty. U kotvících hmot není potřeba provádět zkoušení tvrdosti, soudržnosti s podkladem a odolnost vůči úderu, protože jsou namáhány především tahovým a smykovým napětím, čímž se liší od správkových a zálivkových hmot. Po provedení a vyhodnocení všech základních zkoušek navržených receptur je provedena optimalizace prověřovaných receptur pro všechny vyvíjené sanační hmoty. V závěru etapy jsou vybrány receptury, které vykazovaly nejlepší výsledky a mohou pak následně podstoupit další, pokročilé zkoušení, které je řešeno v další etapě.



Obr. 2: Schéma postupu řešení disertační práce v rámci druhé etapy

### 3.3 ETAPA 3 – POKROČILÉ EXPERIMENTÁLNÍ PROVĚŘENÍ VYBRANÝCH RECEPTUR

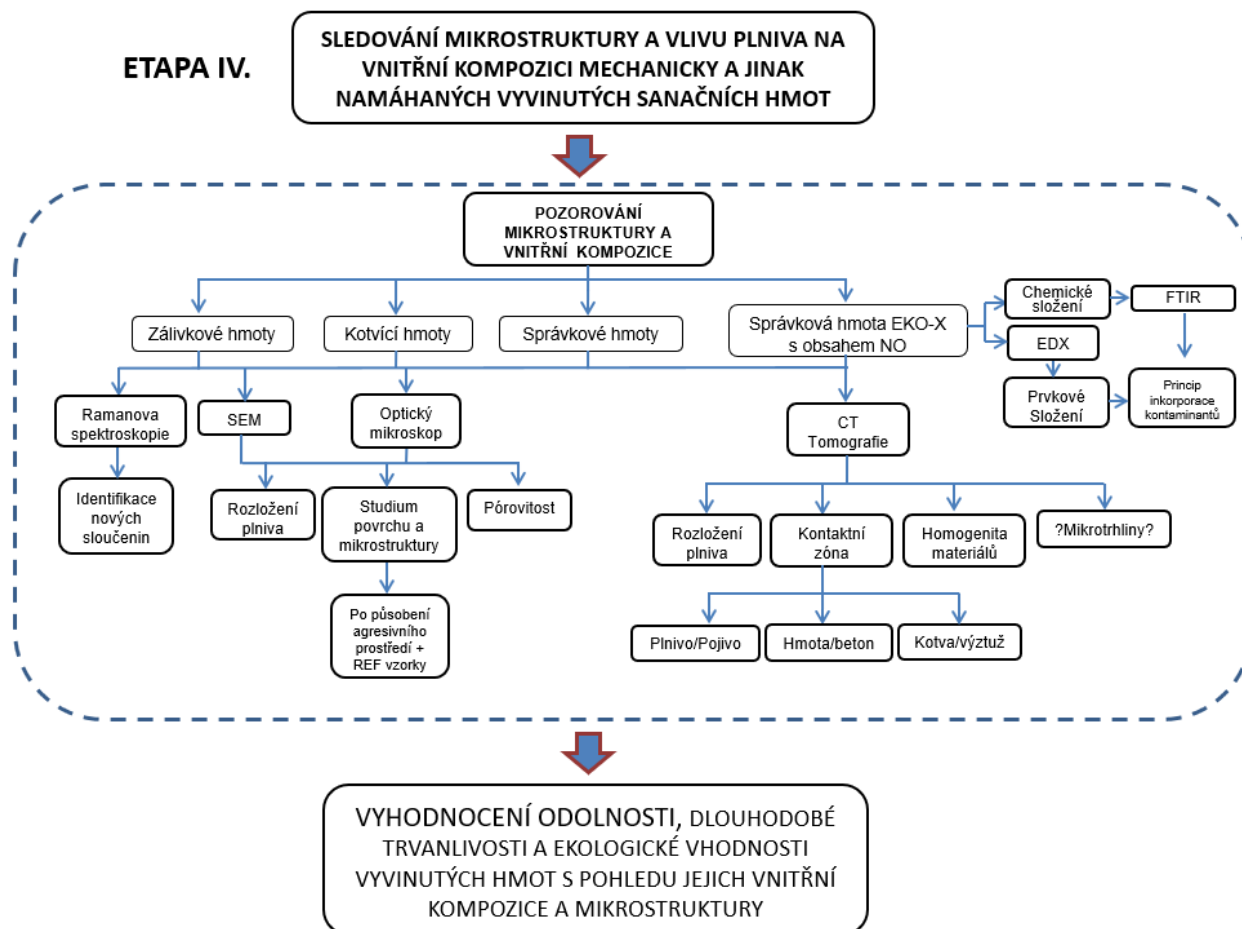
V rámci třetí etapy, která souvisle navazuje na předchozí etapu, se řeší pokročilé experimentální zkoušení receptur, které se jeví jako nejvhodnější. V rámci pokročilého zkoušení se klade důraz na podrobnější přezkoumání vyvíjených speciálních sanačních hmot, přičemž realizované zkoušky úzce souvisí s požadavky vyplývající z praxe. Vyvinuté sanační hmoty musí po jejich aplikaci a následném úplném zatvrdnutí odolávat zvýšené teplotě, chemicky agresivnímu prostředí, především kapalnému, ale také je velice důležité, aby vykazovaly minimální smrštění pro dosažení požadované soudržnosti k podkladu. U kotvicích hmot je navíc velice důležitá vysoká kotvicí síla, která je prověřována v této etapě pomocí zkoušky vytržení. Správková (reprofiláční) hmota s pracovním označením EKO-X musí být také prověřována z pohledu ekologických aspektů, konkrétně jestli nebude představovat negativní vlivy na okolní životní prostředí potenciálním vyluhováním kontaminantů. Po vyhodnocení všech zkoušek se pomocí optimalizačního výpočtu stanoví nejlepší receptury, které jsou následně poloprovazně ověřeny z praktického hlediska. Na reprofilovaných prvcích je dále sledována dlouhodobá trvanlivost, protože zabezpečení dlouhodobé funkčnosti hmot i v extrémních povětrnostních podmínkách je v praxi velice důležitým parametrem a nelze ho podceňovat.



Obr. 3: Schéma postupu řešení disertační práce v rámci třetí etapy

### 3.4 ETAPA 4 – SLEDOVÁNÍ MIKROSTRUKTURY A VLIVU PLNIVA NA VNITŘNÍ KOMPOZICI MECHANICKY A JINAK NAMÁHANÝCH VYVINUTÝCH SANAČNÍCH HMOT

Poslední čtvrtá etapa řeší především vědecký přínos disertační práce. Zaměřuje se podrobně na průzkum mikrostruktury jednotlivých vyvinutých hmot (nejlepších receptur) pomocí špičkových přístrojů jako je CT tomografie, skenovací elektronový mikroskop (SEM), Ramanův disperzní mikroskop (RM) a infračervená spektrometrie s Fourierovou transformací (FTIR). Za účelem přesnějšího vyhodnocení spekter z RM a FTIR a následného objasnění inkorporace polutantů do epoxidové matrice je provedena analýza chemického složení vyvinuté sanační hmoty EKO-X. Pomocí CT a SEM je sledováno rozložení plniva v polymerní matrici, jeho zakomponování v mikrostruktuře, homogenita materiálu, kontaktní zóna a případné mikrotrhliny ve hmotě po zatěžovacích zkouškách, jako je např. zkouška vytržení. Pomocí optického mikroskopu s vysokým rozlišením je pozorován povrch sanačních hmot, nejen těch, které byly vystaveny normálním podmínkám, ale také těch, na které působilo agresivní kapalné prostředí. Zjišťuje se, jakou míru degradace způsobila jednotlivá agresivní prostředí na povrchu či v struktuře hmoty. V závěru etapy se hodnotí vliv pórovitosti a homogenity sledovaných hmot na dosažené pevnosti a zjištěné výsledky se srovnají s referenčními hmotami obsahujícími primární plnivo.



Obr. 4: Schéma postupu řešení poslední etapy disertační práce

## 4 REALIZACE, VYHODNOCENÍ A DISKUSE PRÁCE JEDNOTLIVÝCH ETAP

### 4.1 ETAPA 1 – IDENTIFIKACE VSTUPNÍCH SUROVIN, NÁVRH RECEPTUR SPECIÁLNÍCH SANAČNÍCH HMOT NA BETON A APLIKAČNÍ TEST

V rámci první etapy probíhala především identifikace použitých surovin – plniv a polymerních pojiv. Bližší specifikace použitých surovin je důležitá pro následný návrh receptur pro vyvíjené sanační hmoty na beton. Vybraný nebezpečný odpad (NO) – neutralizační kal (NK), byl charakterizován taky stanovením koncentrace škodlivin v sušině a třídou vyluhovatelnosti. Na závěr této etapy byl na základě zhodnocení výsledků aplikačního testu proveden výběr receptur pro další zkoušení.

#### 4.1.1 Plniva

Vhodná plniva do vyvíjených speciálních sanačních hmot, uvedená v *Tab. 1*, byla vybrána na základě optimalizačního výpočtu, který byl proveden metodou kvantitativního párového srovnání. Při vybírání vhodných plniv na bázi druhotných a odpadních surovin byl kladen důraz na jejich původ, kumulované roční množství, náročnost předúpravy, dostupnost, chemické složení a vlastnosti, co nejvíce se přibližující referenčnímu plnivu (křemičitému písku). Jednotlivá plniva byla pak blíže popsána v přehledných tabulkách v podobě identifikačních karet.

*Tab. 1: Vybraná vhodná plniva pro jednotlivé vyvíjené speciální sanační hmoty na beton*

Typ plniva a označení	Vyvíjená polymerní sanační hmota		
	správková	zálivková	kotvicí
Křemičitý písek Dorsilit (REF)	X	X	X
Odpadní autosklo (AS)	X	X	X
Odpadní obalové sklo transparentní (OS)	X	X	X
Odpadní sklo ze solárních panelů typu QS Solar (QS)	-	X	X
Odpadní slévárenský písek z forem (SP)	X	X	-
Odpad z výroby izolačních desek z minerální vlny (OIDM)	X	X	-
Odpadní slévárenská struska (SS)	X	-	-
Filtrový vysokoteplotní popílek kontaminován vlivem denitrifikace spalin – Třebovice (KP-TŘ)	X	-	-
Filtrový vysokoteplotní popílek kontaminován vlivem denitrifikace spalin – Nováky (KP-NOV)	X	-	X
Filtrový vysokoteplotní popílek kontaminován vlivem denitrifikace spalin – Opatovice (KP-OPAT)	X	-	-
Filtrový fluidní popílek kontaminován vlivem denitrifikace spalin – Kladno (FP-KLAD)	X	-	X
Nebezpečný odpad (NO) – neutralizační kal ŽDB (NK)	X	-	-

### 4.1.2 Polymerní pojiva

Pro všechny vyvíjené polymerní sanační hmoty byla vybrána jako nejvhodnější pojivo Epoxidová pryskyřice (EP). Ze všech v současnosti využívaných se EP jeví jako nejvhodnější, protože vykazuje vynikající zpracovatelnost, vysoké pevnosti a soudržnost s betonovým podkladem, dobrou chemickou a tepelnou odolnost a v neposlední řadě velice krátkou dobu vytvrzení. U všech hmot (**EP-S** pro správkové hmoty, **EP-Z** pro zálivkové hmoty, **EP-K** pro kotvící hmoty) je schnutí při 20 °C většinou do 6–12 hodin (lze aplikovat další vrstvu), plně zpolymerované přibližně do 12 hodin a plně vytvrzené do 5–7 dnů. Ve všech případech se jedná o dvoukomponentní EP, kdy se do samotné pryskyřice přidává pro vytvrzení tvrdidlo na polyaminové bázi.

### 4.1.3 Prvotní zkoušení navržených receptur

Receptury, které byly podrobeny prvotnímu zkoušení, v rámci kterého byl prováděn **aplikační test**, jsou uvedeny v metodice práce v etapě 1. Na základě výsledků aplikačního testu jsou následně vybrány ty receptury, které vykazují požadovanou **zpracovatelnost, vhodnou konzistenci a rovný povrch** bez imperfekcí. Aplikační test byl prováděn pouze u správkových a zálivkových hmot. Pro stanovení správné konzistence vyvíjené kotvící hmoty bylo provedeno sledování **vyplnění otvoru** vyvrtaného do betonového obrubníku namíchanou hmotou. Na základě provedeného aplikačního testu bylo zjištěno, že jemnějších plniv lze do vyvíjených sanačních hmot na beton přidat méně (max. 65 %), na rozdíl od hrubozrnných plniv, kdy hmoty vykazovaly požadované vlastnosti i při 85% plnění. Receptury kotvících hmot (EP-K) s obsahem odpadního skla vykazovaly lepší reologické vlastnosti a došlo k lepšímu zakotvení ocelové tyče při vyšším plnění (60–70 %), kdy nedocházelo k výrazné sedimentaci plniva. U popílků vykazovaly optimální vlastnosti kotvících hmot receptury s 40–55% obsahem plniva.

## 4.2 ETAPA 2 – LABORATORNÍ PROVĚŘENÍ ZÁKLADNÍCH RECEPTUR

V první části bylo provedeno stanovení parametrů čerstvých směsí, kdy se sledovala především sedimentace, viskozita a konzistence vyvíjených speciálních sanačních hmot. Následně byly na vytvrzených vzorcích požadovaných rozměrů stanovovány pevnostní charakteristiky, což jsou jedny z nejdůležitějších parametrů sanačních hmot na beton.

### 4.2.1 Zkoušky hmot v čerstvém stavu

Nejvýraznější **sedimentace** (5) byla zaznamenána u receptur s odpadními skly, a to až do plnění 80 %, kdy byla jasně rozeznatelná hranice mezi usazeným plnivem a pojivem (sl. A). Nejlépe této zkoušce vyhověly receptury obsahující kontaminované popílky, kdy při 60% plnění nebylo možné volným okem pozorovat sedimentaci plniva v pryskyřici. Nežádoucí sedimentace může nastat především při použití

hrubozrnnějších plniv. Ve vyvinutých kotvících hmotách se především z toho důvodu doporučuje používat popílky nebo jiná vhodná jemnozrnná plniva.

**Viskozita** vyvíjených hmot úzce souvisela s typem plniva a jeho množstvím v epoxidové pryskyřici (EP), přičemž její hodnota se zvyšovala s množstvím plniva ve směsi – výtoková doba (průměr otvoru 12 mm) u hmoty EP-Z 60% AS byla 110 s a u hmoty EP-Z 70% OIDM byla tato hodnota 1590 s.

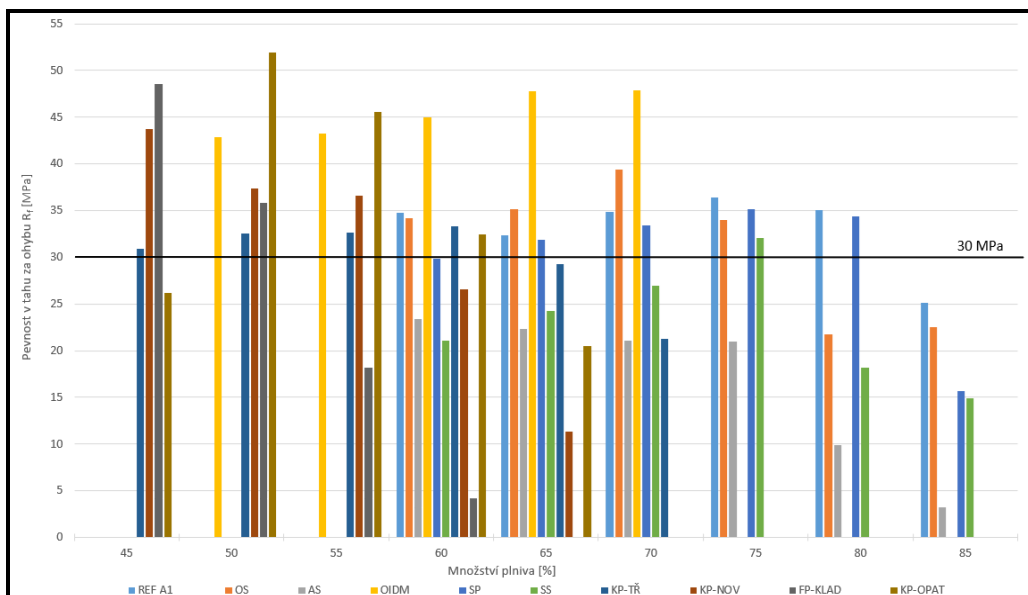
Stanovení **konzistence** pomocí střásacího stolku probíhalo pouze u vyvíjených správkových hmot. U receptur, které obsahovaly malé množství hrubozrnného plniva (60 %) bylo rozlití větší než 300 mm, protože vykazovaly nízkou viskozitu. Čím je plnivo jemnější a jeho obsah v EP vyšší, rozlití se snižuje. Hmoty s 65% obsahem popílků vykazovaly rozlití kolem hodnoty 140 mm, přičemž stejného rozlití bylo dosaženo u hmot s 85% množstvím hrubozrnných plniv.

#### 4.2.2 Zkoušky hmot v zatvrdlém stavu

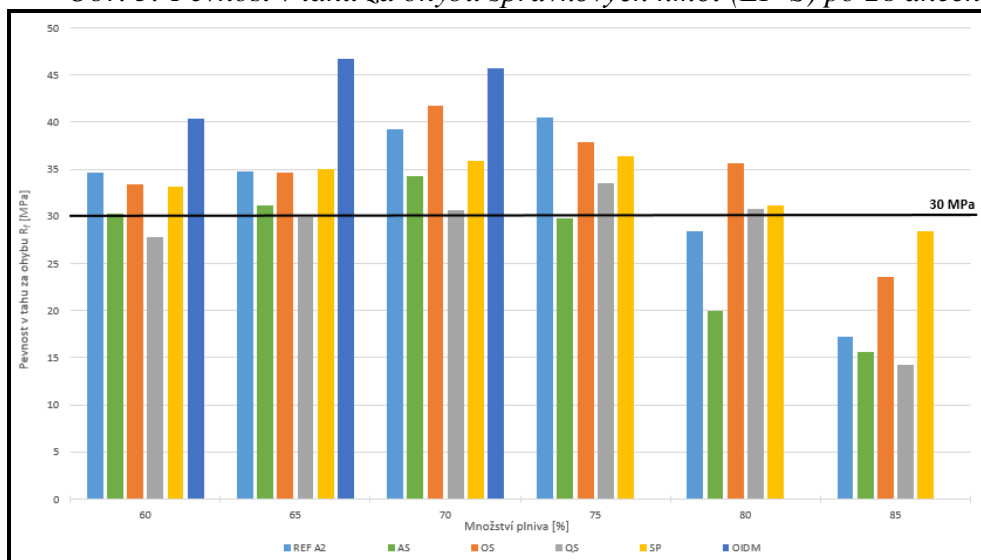
**Objemová hmotnost v zatvrdlém stavu** byla o něco nižší než hustota v čerstvém stavu, a to především v důsledku odpaření části rozpouštědel. Nicméně hustota v čerstvém stavu měla být přibližně stejná, jako objemová hmotnost v zatvrdlém stavu (OH), protože použité bezrozpouštědlové EP obsahují minimální množství rozpouštědel a většina z nich se naváže do epoxidové matrice v průběhu polymerizace. U správkových hmot byla nejvyšší objemová hmotnost dosažena u referenční hmoty obsahující 85 % křemičitého písku, a to  $1950 \text{ kg/m}^3$ . Jinak stejně jako u OH v čerstvém stavu, hmoty obsahující hrubozrnnější plniva s vyšší měrnou hmotností vykazovaly vyšší hodnoty než hmoty s popílkem. U kotvících hmot byla dosažena nejvyšší OH u referenčních hmot, přičemž tato hodnota byla v porovnání s hmotami obsahujícími popílek ( $1400 \text{ kg/m}^3$ ) přibližně až o  $250 \text{ kg/m}^3$  vyšší.

#### *Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku*

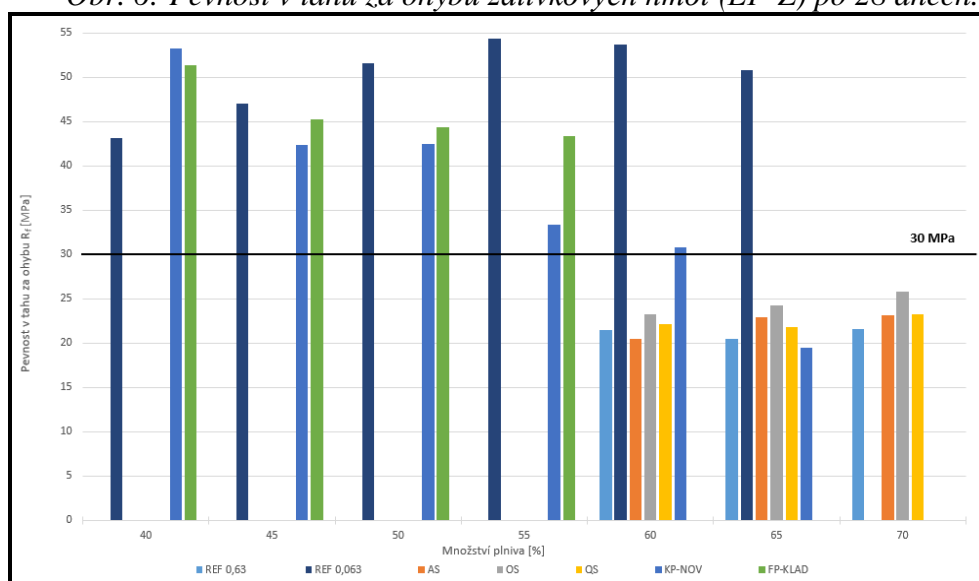
U správkových hmot bylo nejvyšší pevnosti v tahu za ohybu (52 MPa) dosaženo u receptury obsahující 50% množství kontaminovaného vysokoteplotního popílku Opatovice (KP-OPAT). V porovnání s nejvyšší hodnotou u referenčních hmot byla tato hodnota až o 15 MPa vyšší (viz *Obr. 5*). Z výsledků je jasně vidět, že hmoty s jemnějším plnivem vykazovaly vyšší pevnosti v tahu za ohybu než hmoty s hrubozrnným plnivem. Tato skutečnost byla pravděpodobně způsobena homogennější strukturou hmoty a dokonalejším obalením zrn plniva pryskyřicí, přičemž při použití jemného plniva byla kontaktní zóna plnivo/pojivo, na které dochází většinou k porušení vzorku, nejmenší. U komerčních epoxidových zálivkových hmot se pevnost v tahu za ohybu pohybuje kolem hodnoty 30 MPa. Tato hodnota nebyla dosažena u receptur s 85% plněním (*Obr. 6*). Nejvyšší pevnost byla dosažena u receptury obsahující 65 % odpadu z výroby minerálních izolačních desek (OIDM). U polymerních kotvících hmot hodnotu 30 MPa překročily receptury obsahující popílky do množství 55 %. Nejhorší výsledky byly zaznamenány u receptur obsahujících odpadní autosklo (AS) a odpadní sklo ze solárních panelů QS (*Obr. 7*).



Obr. 5: Pevnost v tahu za ohybu správkových hmot (EP-S) po 28 dnech

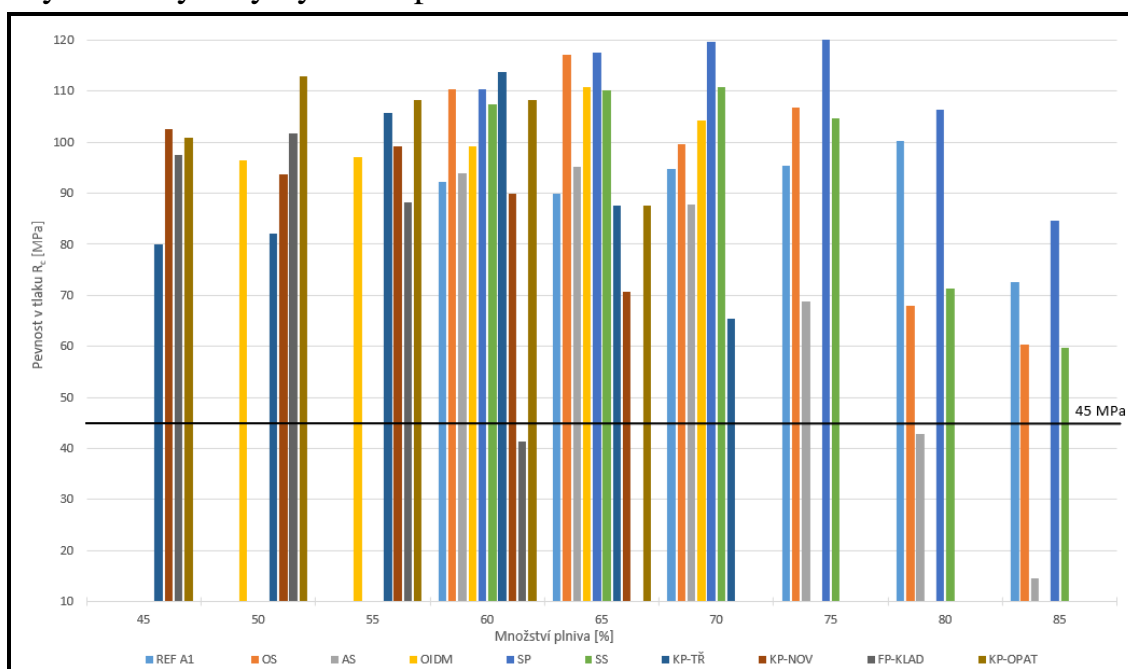


Obr. 6: Pevnost v tahu za ohybu zálivkových hmot (EP-Z) po 28 dnech.

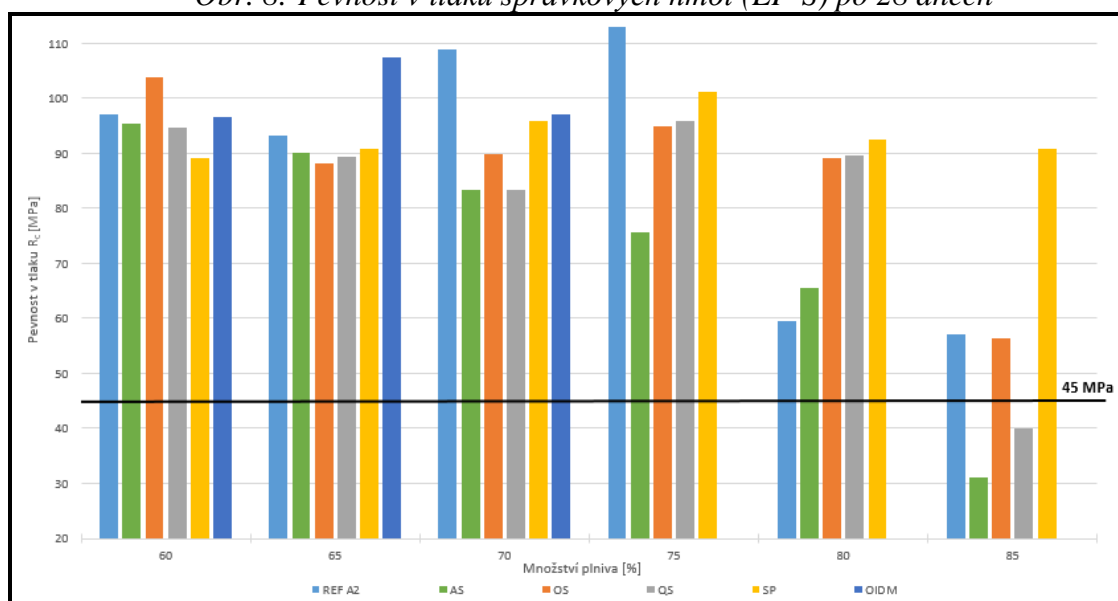


Obr. 7: Pevnost v tahu za ohybu kotvicích hmot (EP-K) po 28 dnech.

Dle TP SSBK III měly správkové hmoty se statickou funkcí tř. R4 vykazovat pevnost v tlaku minimálně 45 MPa. Tuto limitní hodnotu splnily, až na 3 receptury, všechny hmoty (*Obr. 8*). U zálivkových hmot byla pevnost v tlaku u všech receptur, kromě receptury EP-Z 85% QS, vyšší než 45 MPa (*Obr. 9*), přičemž nejvyšší pevnost v tlaku, kromě EP-Z REF, dosáhla hmota s 65% obsahem plniva OIDM, které bylo oproti ostatním plnivům o dost jemnější, a tato hmota byla pravděpodobně nejvíce homogenní, přičemž kontaktní zóna, kde nejčastěji dochází k porušení vzorku, zde byla nejmenší. U komerčních polymerních kotvicích hmot se dosahuje pevnosti v tlaku minimálně 80 MPa. Jak je vidět na *Obr. 10*, tak tuto hodnotu překročily hmoty s jemnými plnivý. U hrubozrnnějších plniv byla pevnost v tlaku nižší. Obecně bylo pozorovatelné, že vyvinuté speciální sanační hmoty s vysokou pevností v tahu za ohybu vykazovaly taky vysokou pevnost v tlaku.

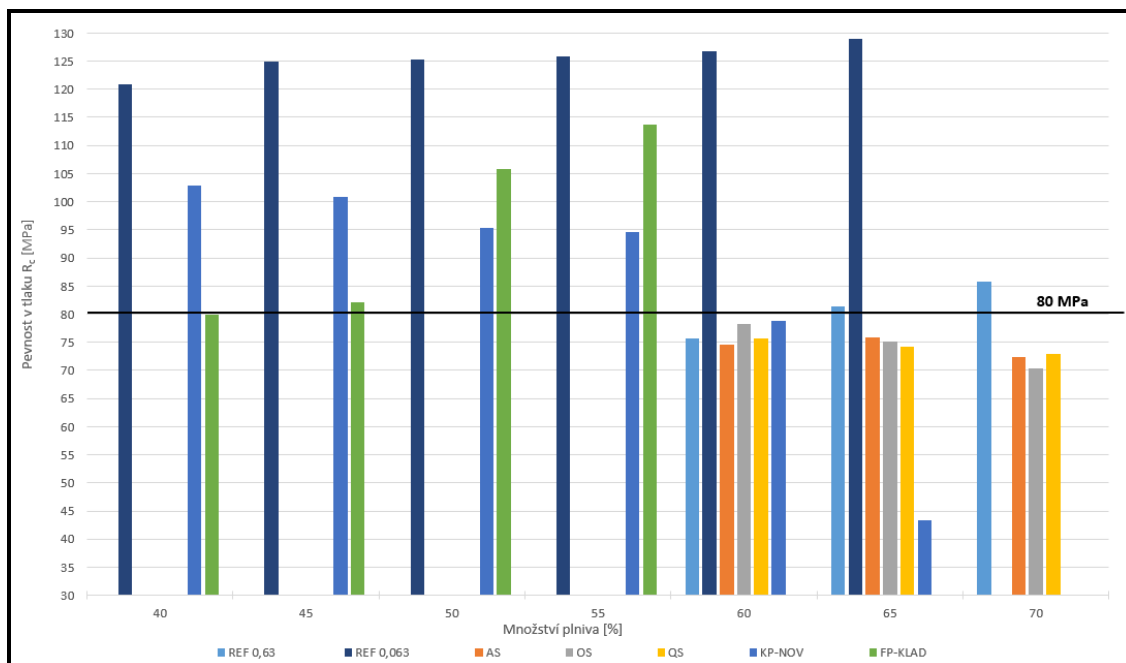


Obr. 8: Pevnost v tlaku správkových hmot (EP-S) po 28 dnech



Obr. 9: Pevnost v tlaku zálivkových hmot (EP-Z) po 28 dnech





Obr. 10: Pevnost v tlaku kotvicích hmot (EP-K) po 28 dnech

### Soudržnost s podkladem

Dále byla prověřována soudržnost vyvíjených záливkových a správkových hmot s betonovým podkladem. U všech zkoušených hmot došlo k normálnímu koheznímu porušení v betonovém podkladu (A). Vyvíjené záливkové (EP-Z) a správkové hmoty (EP-S) vykazovaly vynikající soudržnost s betonovým podkladem (dlažba) – ve všech případech byla soudržnost ( $f_h$ ) vyšší než 4MPa.

### Vyhodnocení výsledků základních zkoušek – správková hmota EKO-X

Vyvíjená správková hmota s obsahem nebezpečného odpadu, neutralizačního kalu (NK), byla vyhodnocována samostatně. Výsledky 2 receptur, obsahujících 40 % a 45 % NK jsou uvedeny v Tab. 2. U hmoty se 45% plněním došlo k porušení u zkoušky soudržnosti ( $f_h$ ) s podkladem v samotné hmotě (B) pravděpodobně v důsledku nedostatečného zhmogenizování směsi. Nicméně i přesto, že nedošlo k porušení v podkladním betonu, tak hodnota soudržnosti byla 4,3 MPa. Dále je z výsledků patrné, že 5% přídatkem NK do EP se výrazně zhoršily výsledné mechanické vlastnosti hmoty po 28 dnech.

Tab. 2: Výsledky základních fyzikálně-mechanických vlastností vyvíjené hmoty EKO-X

Parametr	Hustota v čerstvém stavu [kg/m <sup>3</sup> ]	OH v zatvrdlém stavu [kg/m <sup>3</sup> ]	R <sub>f</sub> [MPa]	R <sub>c</sub> [MPa]	f <sub>h</sub> [MPa]	Odolnost vůči úderu [Nm]	Tvrдость H <sub>D</sub> [-]
40 % NK	1400	1220	23,5	77,9	4,0 (A)	6,0	89
45 % NK	1490	1380	19,2	45,8	4,3 (B)	5,0	84

Optimalizace získaných výsledků a výběr receptur pro další pokročilé zkoušení byl realizován metodou kvantitativního párového srovnání. Vyhodnocení provedeného

optimalizačního výpočtu, tedy optimální receptury postupující do dalšího pokročilého zkoušení jsou uvedeny v *Tab. 3*.

*Tab. 3: Vybrané receptury pro další (pokročilé) zkoušení*

Hmota	Vybrané receptury		
EP-S	75 % OS	60 % KP-TŘ	80 % SP
EP-Z	75 % OS	65 % OIDM	75 % SP
EP-K	45 % FP-KLAD	70 % OS	45 % KP-NOV
EKO-X	40 % NK		

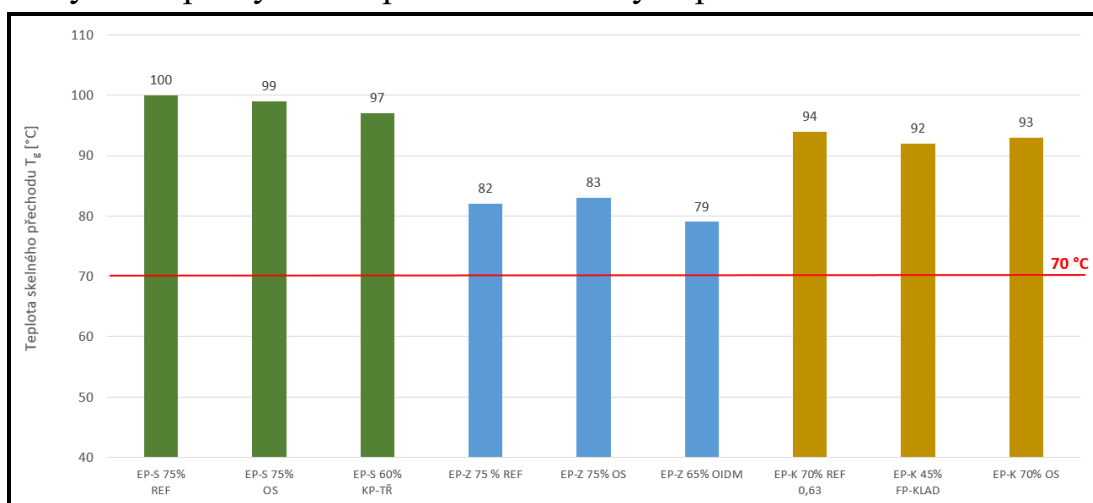
### 4.3 ETAPA 3 – POKROČILÉ EXPERIMENTÁLNÍ PROVĚŘENÍ VYBRANÝCH RECEPTUR

V této etapě se řešilo pokročilé zkoušení vybraných receptur. Bylo provedeno stanovení tahových vlastností, dynamického modulu pružnosti v tahu a tlaku ( $E_{dyn}$ ), součinitele teplotní roztažnosti, smrštění a zkoušky mrazuvzdornosti. V důsledku toho, že se očekává využití vyvíjených hmot také do silně agresivního prostředí, byla provedena zrychlená zkouška chemické odolnosti. Dále se provádělo také stanovení teploty skelného přechodu ( $T_g$ ). U kotvících hmot byla dále provedena zkouška vytržení, kdy bylo stanovováno maximální tahové zatížení na kotvu a příslušný posun.

U kotvících hmot se požaduje maximální pevnost v tahu při minimálním poměrném prodloužení. Nejvyšší pevnost v tahu při přetržení ( $\sigma_b$ ) byla dosažena u hmoty EP-K 45% FP-KLAD, a to 31 MPa. Obecně nižší pevnost v tahu byla prokázána u vybraných hmot obsahujících hrubozrnnější plnivo. U hmot vykazujících nízké poměrné prodloužení byla dosažena nižší pevnost v tahu.

#### *Stanovení tepelné odolnosti*

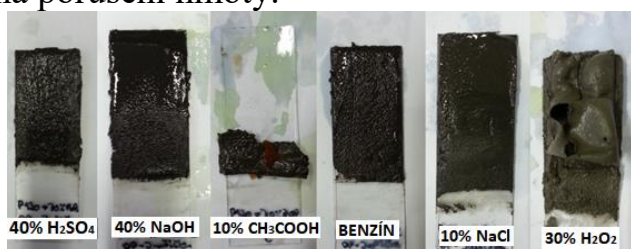
Nejvyšší teplota skelného přechodu ( $T_g$ ) byla vypočítaná z hodnoty ztrátového činitele ( $\tan \delta$ ), kdy při dosažení  $T_g$  bylo dosaženo jeho maxima. Grafické porovnání stanovených  $T_g$  je uvedeno na *Obr. 11*. Z dosažených výsledků je patrné, že na  $T_g$  nemá výrazný vliv použité plnivo, ale především typ pojiva (EP) a princip jeho vytvrzení. U všech zkoušených hmot byla  $T_g$  vyšší než 70 °C, což zaručuje jejich bezpečné využití i při vyšších teplotách v náročných provozech.



*Obr. 11: Porovnání teploty skelného přechodu ( $T_g$ ) vybraných sanačních hmot*

### Stanovení chemické odolnosti

Na základě předpokládaného využití vyvíjených sanačních hmot v průmyslových a energetických provozech byly vybrány roztoky, které se v těchto prostředích využívají ve větší míře. Z organických kyselin byla pro přípravu agresivního roztoku vybrána kyselina octová ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ). Bylo zjištěno, že vybrané správkové hmoty odolávají silným anorganickým kyselinám a hydroxidům (Obr. 12, Obr. 13). Naopak bylo prokázáno, že tyto hmoty neodolávají kyselině octové, a to už při její 10% koncentraci. U vybraných záливkových hmot vykazovala receptura EP-Z 65% OI DM o něco nižší chemickou odolnost než ostatní zkoušené receptury. Tento rozdíl může být způsoben rozdílným plnivem – především velikostí a tvarem částic a jeho chemickým složením. Povrch některých vzorků po chemickém namáhání byl dále zkoumán pomocí optické mikroskopie za účelem pozorování vlivu agresivního média na porušení hmoty.



Obr. 12: Hmoty EP-S 60% KP-TŘ po 30 denním působení agresivních kapalných roztoků



Obr. 13: Hmoty EP-S 75% OS po 30 denním působení agresivních kapalných roztoků

### Koeficient lineární teplotní roztažnosti

V případě správkových hmot pro sanaci betonových konstrukcí se požaduje stejný nebo podobný koeficient teplotní délkové roztažnosti ( $\alpha$ ), jaký vykazuje podklad. Pro běžný beton se udává  $\alpha = 14 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Vyvinuté sanační hmoty tento požadavek úplně nesplňují, vzhledem k dosaženým hodnotám  $\alpha$  v rozmezí  $40 \cdot 10^{-6} - 58 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . V případě zatížení sanované části konstrukce vyvinutými hmotami cyklickým střídáním teplot by mohlo u těchto materiálů docházet ke vzniku drobných trhlinek vlivem vyššího napětí v místě napojení sanační hmoty a podkladu. Avšak v důsledku vysoké soudržnosti sanačních hmot s podkladem a nižšímu modulu pružnosti by měly být schopné odolávat i střídavým změnám teplot za přítomnosti vlhkosti.

### Poloprovozní ověření

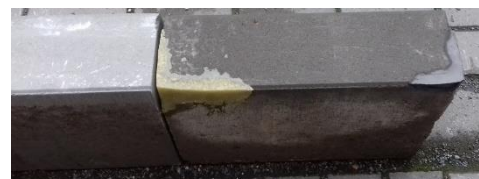
V rámci poloprovozního ověření vyvinutých správkových hmot (EP-S 60% KP-TŘ, EP-S 75% OS) se reprofilyvaly odštípnuté rohy vibrolisovaného silničního obrubníku o rozměrech  $500 \times 150 \times 250 \text{ mm}$  (viz Obr. 14 až Obr. 16). Po 28 dnech byl reprofilovaný obrubník vystaven vnějším povětrnostním podmínkám po dobu více než jednoho roku.



Obr. 14: EP-S 75% OS



Obr. 15: EP-S 60% KP-TŘ



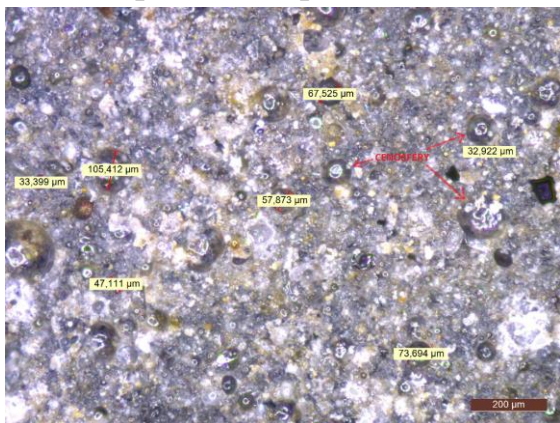
Obr. 16: Po 400d vystavení vnějším vlivům

#### 4.4 ETAPA 4 – SLEDOVÁNÍ VLIVU MIKROSTRUKTURY VYVINUTÝCH SANAČNÍCH HMOT NA JEJICH FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ PARAMETRY A DLOUHODOBOU TRVANLIVOST

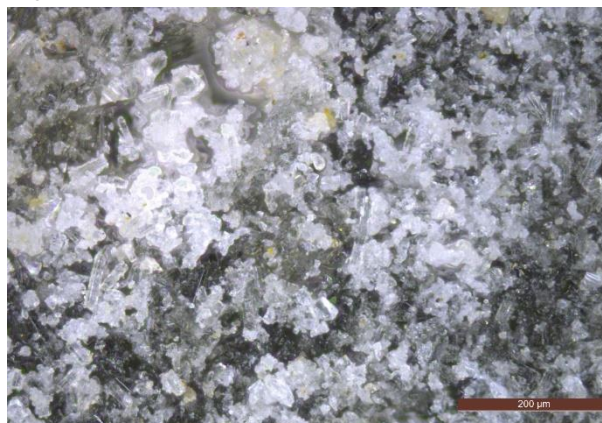
V rámci poslední etapy práce byla sledována především mikrostruktura vyvinutých sanačních hmot na polymerní bázi. Byly použity nejnovější zařízení, jako je např. CT tomografie, optický mikroskop s vysokým rozlišením a skenovací elektronový mikroskop (SEM) s podporou prvkové (EDX) analýzy.

##### 4.4.1 Sledování mikrostruktury vybraných sanačních hmot

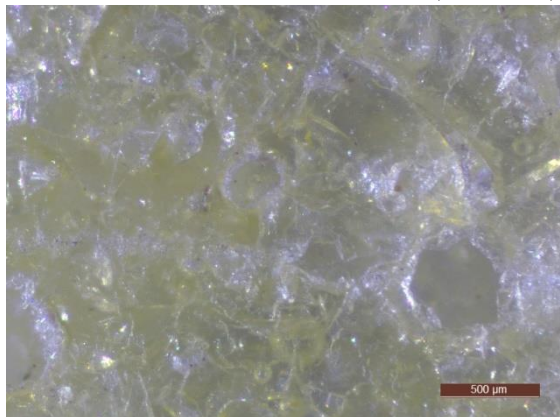
Na *Obr. 17* lze pozorovat mikrostrukturu vzorku vyvinuté správkové hmoty EP-S 60% KP-TŘ v průřezové ploše. Je zde jasně vidět rovnoměrně rozložené cenosfér v epoxidové matrici, přičemž na snímku nejsou patrné téměř žádné shluky částic. Snímek z optického mikroskopu zobrazen na *Obr. 18* byl proveden na vyvinuté zálivkové hmotě s 65% obsahem odpadu z výroby minerálních izolačních desek (OIDM). Je zde jasně vidět vyvážené rozložení částic plniva, které mají tvar podélného čtyřbokého hranolu (světlá místa) – EP představuje ideální pojivo pro dokonalé obalení částecek jemnozrnného plniva. Porovnáním snímků na *Obr. 19* a *Obr. 20* lze vidět rozdíly mezi povrchem hmoty EP-S 60% KP-TŘ, která nebyla vystavena povětrnostním vlivům a povrchem stejné hmoty, vystavené 400dennímu působení povětrnostních podmínek. Degradace povrchu správkové hmoty byla způsobena především působením UV záření, jedná se o „fotooxidační destrukci“ EP.



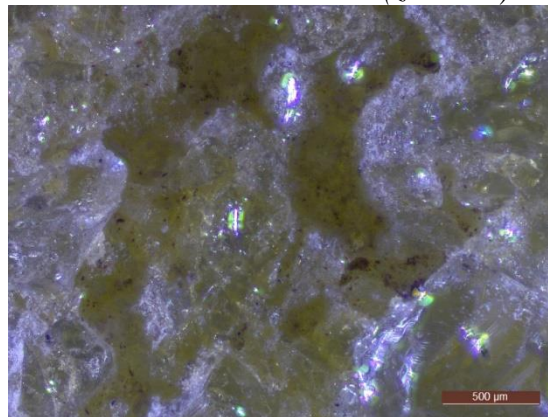
*Obr. 17: Vzorek EP-S 60% KP-TŘ (zv. 200x)*



*Obr. 18: EP-Z 65% OIDM (zv. 200x)*



*Obr. 19: Povrch EP-S 75% OS nevystaven působení povětrnostních vlivů (zv. 100x)*

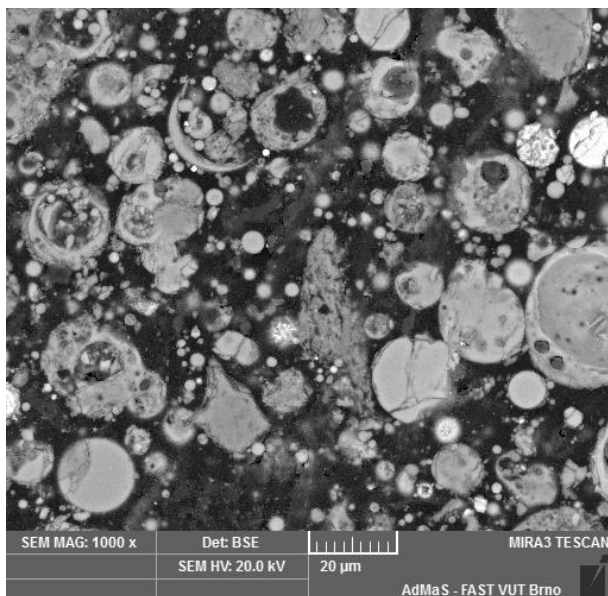


*Obr. 20: Povrch EP-S 75% OS po 400denním působením povětrnostních vlivů zv. 100x*

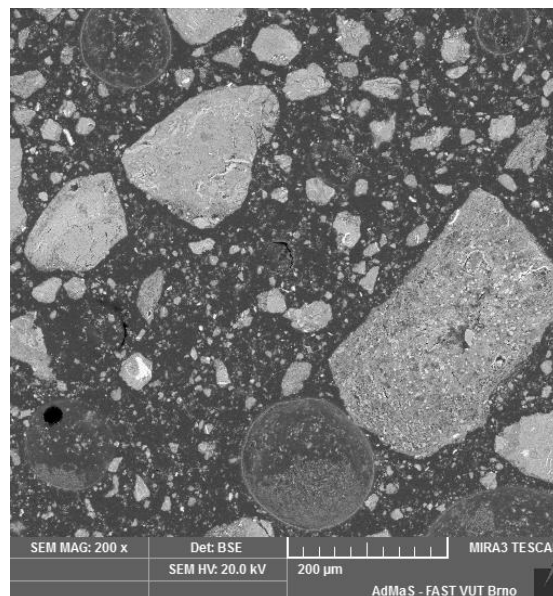
#### 4.4.2 Sledování mikrostruktury pomocí SEM a EDX

Mikrostruktura vybrané správkové hmoty s 60% obsahem denitrifikovaného popílku (EP-S 60% KP-TŘ) zjištěna pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM) je zobrazena na *Obr. 21*. Lze konstatovat, že sférické částice popílku jsou dokonale uzavřené v epoxidové matrici. Na těchto snímcích lze také pozorovat nestejnoroďá zrna popílku s morfologií ovlivněnou SNCR denitrifikační technologií. Částice nebezpečného opadu (NK), které vykazují docela nerovnoměrnou distribuci velikosti částic, jsou dokonale inkorporovány v epoxidové matrici (viz *Obr. 22*). Kulaté útvary na snímcích představují vzduchové póry.

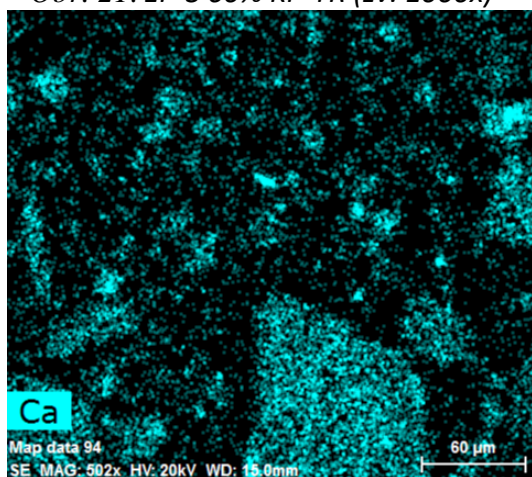
Na *Obr. 23* lze pozorovat rozložení vápníku (Ca) v jednotlivých částicích neutralizačního kalu (NK) a na *Obr. 24* je vidět rozložení železa (Fe), objasněné pomocí energiově disperzní spektroskopie (EDX). Vysoká přítomnost vápníku je způsobena neutralizací odpadních galvanických roztoků pomocí  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Přítomnost těžkých kovů nebylo možné pomocí EDX analýzy prokázat, protože jejich množství bylo v porovnání s ostatními prvky zanedbatelné. Nicméně bylo prokázáno, že rozložení jednotlivých prvků je v epoxidové matrici rovnoměrné.



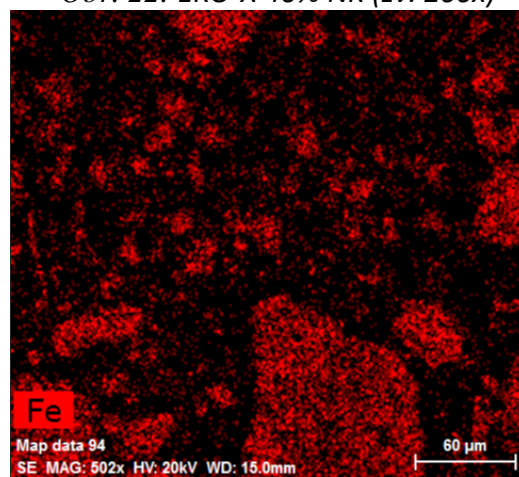
*Obr. 21: EP-S 60% KP-TŘ (zv. 1000x)*



*Obr. 22: EKO-X 40% NK (zv. 200x)*



*Obr. 23: Rozložení vápníku– EKO-X 40% NK*

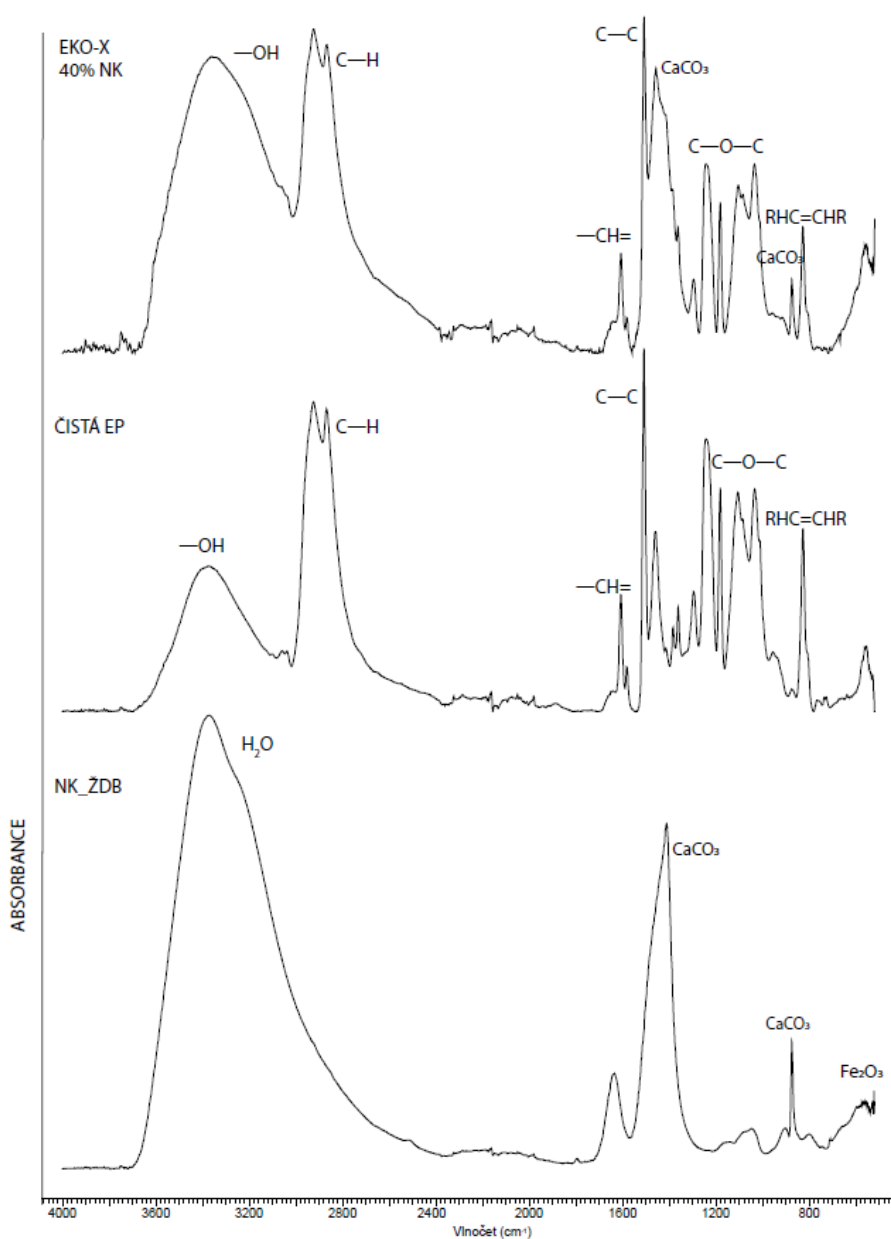


*Obr. 24: Rozložení železa– EKO-X 40% NK*

### 4.4.3 Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací (FTIR)

Na *Obr. 25* jsou pomocí FTIR identifikovány některé skupiny sloučenin nacházejících se ve hmotě EKO-X 40% NK. Porovnáním FTIR spekter plniv, pojiv a samotných hmot lze konstatovat, že s vysokou pravděpodobností nedošlo ke vzájemným chemickým reakcím mezi částicemi plniva (NK) a epoxidového pojiva. Lze pozorovat, že spektra plněných hmot neobsahují žádné sloučeniny, které by se lišily od těch, jež byly identifikovány u plniva nebo pojiva. Kontaminanty nacházející se v upraveném NO jsou tedy uvnitř epoxidové matrice s vysokou pravděpodobností vázány fyzikálně. Z pohledu známých chemických reakcí není ani pravděpodobné, že by těžké kovy nacházející se v NO mohly reagovat s EP.

U hmoty s popílkem byly pozorovány pásy hlinitokřemičitanů a křemičitanů ze samotného popílku, přičemž pravděpodobně došlo k navázání  $-OH$  skupiny na hlinitanovou složku popílku, což bylo možné pozorovat při vlnočtu  $850\text{ cm}^{-1}$ .



*Obr. 25: Porovnání jednotlivých FTIR spekter – plniva (NK), pojiva (EP) a hmoty EKO-X 40% NK*

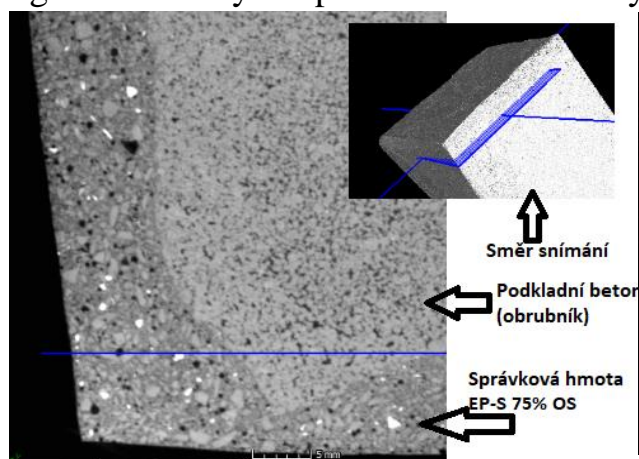
#### 4.4.4 CT Tomografie

##### *Správkové a záливkové hmoty*

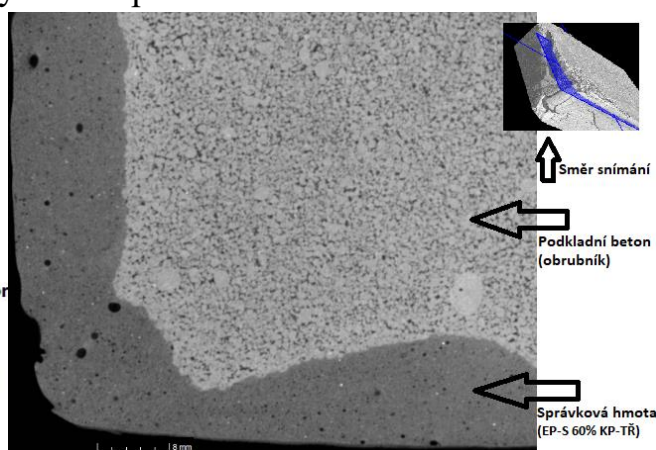
Na snímcích z CT tomografie (*Obr. 26 až Obr. 28*), které byly pořízeny na vzorcích vybraných sanačních hmot aplikovaných v rámci reprofilace uražených rohů betonového cestného obrubníku, lze pozorovat následující:

- ✓ Žádná z vyvinutých sanačních hmot nevykazovala známky porušení (nejsou patrné žádné trhliny, mikrotrhliny ani povrchová narušení).
- ✓ Správkové i záливkové hmoty jsou dokonale napojeny na podkladní beton obrubníku, čímž se potvrdila laboratorně prověřovaná soudržnost s betonem.
- ✓ Všechna použitá plniva jsou rovnoměrně rozložena v polymerní matici, přičemž jednotlivé částice jsou dokonale obaleny epoxidovou maticí.
- ✓ Vyvinuté sanační hmoty obsahují minimální množství pórů (černá místa na snímcích), nicméně nižšího množství a objemu pórů by se dalo dosáhnout lepším mícháním čerstvé směsi a jejím dokonalejším ztuhnutím v bedně.

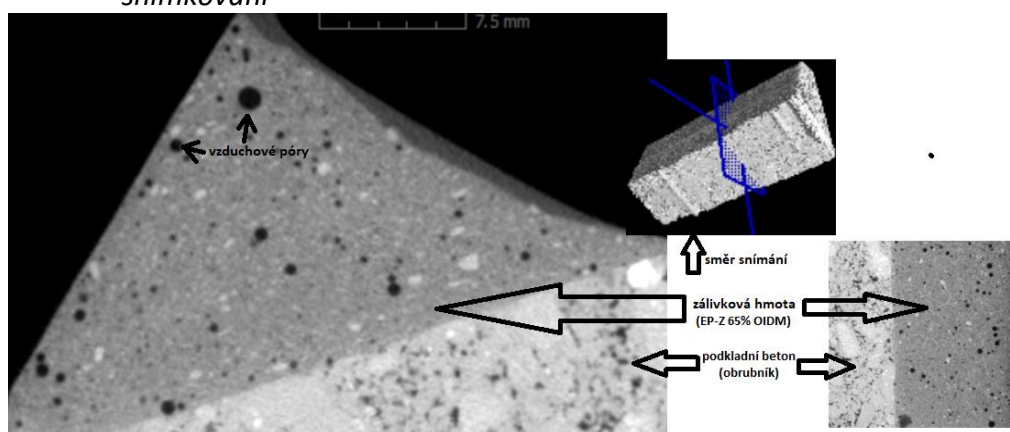
U sanačních hmot EP-S 60% KP-TŘ a EP-S 75% OS nebyla patrná žádná degradace hmoty ani po více než ročním vystavení povětrnostním vlivům.



*Obr. 26: CT snímek reprofilovaného rohu obrubníku (EP-S 75% OS) – horizontální snímkování*



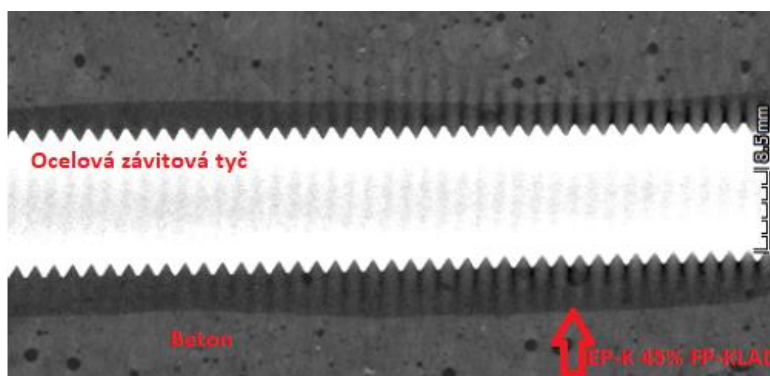
*Obr. 27: CT snímek reprofilovaného rohu obrubníku (hmota EP-S 60% KP-TŘ) – horizontální snímkování*



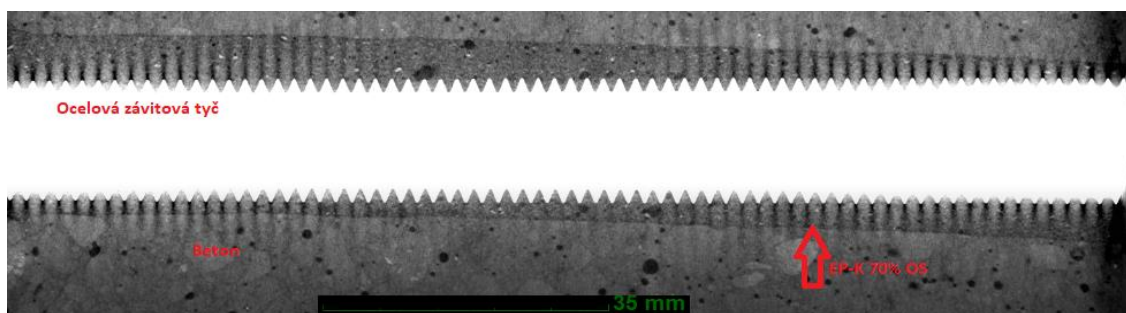
*Obr. 28: CT snímek reprofilovaného rohu obrubníku hmotou EP-Z 65% OI DM – vertikální směr*

## Kotvící hmoty

Pro zjištění kvality zakotvení závitových ocelových tyčí kotevními hmotami ve vysokopevnostním betonu (C 50/60) byla použita CT tomografie. CT snímání bylo prováděno na jádrových betonových vývrtech se zakotveným ocelovým prvkem (Obr. 29, Obr. 30). Vývrty byly prováděny až po zkoušce vytržení, aby se zjistilo, zdali nedošlo k nějakému narušení spoje kotvící hmoty s ocelovým prvkem a betonem. Na snímcích je vidět, že všechny zkoušené závitové tyče jsou dokonale zakotveny, což dokazuje, že vyvinuté polymerní kotvící hmoty (EP-K) mají vhodnou konzistenci – po vložení závitové ocelové tyče do čerstvé hmoty směs zateče do otevřených pórů okolního betonu, a taky do záhybů ocelové tyče. Ze snímků je patrné, že typ použitého plniva nemá vliv na míru zakotvení ocelového prvku – kotvící hmoty plně zatekly do závitů ocelové tyče. I po zkoušce vytržení, po tahovém namáhání vyšším než 120 kN, na snímcích není žádné porušení soudržnosti mezi kotvící hmotou a betonem, resp. mezi kotvící hmotou a závitovou tyčí.



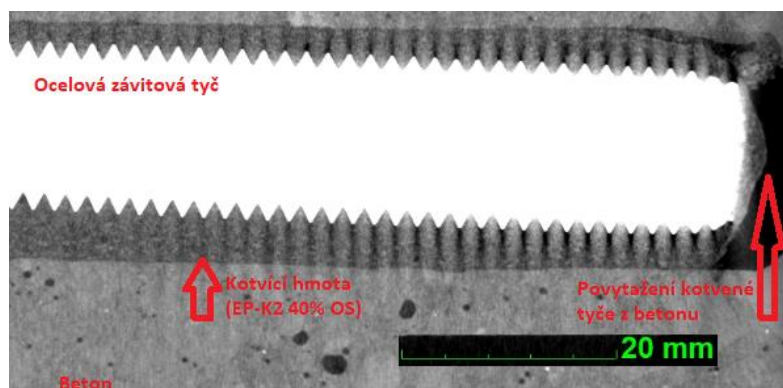
Obr. 29: CT snímek zobrazující kvalitu zakotvení závitové tyče pomocí kotvící hmoty s 45% obsahem fluidního popíku Kladno (EP-K 45% FP-KLAD)



Obr. 30: CT snímek zobrazující kvalitu zakotvení závitové tyče pomocí kotvící hmoty s 70% obsahem odpadního skla (EP-K 70% OS)

Snímání kvality zakotvení probíhalo pro srovnání také u další zkoušené kotvící hmoty EP-K2, která po provedení zkoušky vytržení nevyhověla příslušné normě EN 1504-6, a to z pohledu nedodržení přípustného posunutí kotveného prvku a nedosažení požadované kotvící síly. Od předešlé kotvící hmoty se tato hmota vyznačovala velice rychlým zatuhnutím (5 minut). Hmota nedokonale zatekla do záhybů kotvené závitové tyče a do pórovité struktury betonu. Na CT snímku (Obr. 31) je jasně vidět volný prostor mezi kotvou a okolním betonem vzniklý v průběhu provádění zkoušky vytržení.





Obr. 31: CT snímek zobrazující povysunutí zakotvené ocelové závitové tyče pomocí další kotvicí hmoty s 40% obsahem odpadního skla (EP-K2 40% OS)

## 5 ZÁVĚR

Hlavním cílem disertační práce bylo vyvinout speciální sanační (EP-S, EP-Z, EP-K) hmoty primárně určené pro sanaci betonových konstrukcí, kde se požaduje vysoká odolnost vůči extrémnímu namáhání. Speciálními sanačními hmotami se v rámci této práce rozumí materiály na polymerní (epoxidové) bázi, které obsahují relativně vysoké množství druhotných nebo odpadních surovin při současném zachování nebo zlepšení některých vlastností v porovnání s referenčními hmotami vykazujícími odolnost vůči extrémnímu namáhání. Speciálními jsou tyto hmoty dále z toho důvodu, že se u nich zkouší a požadují jiné parametry než u běžných sanačních hmot. Dílčím cílem práce bylo experimentální prověření možnosti využití filtrových popílků kontaminovaných vlivem denitrifikační technologie (SNCR) do polymerních správkových hmot jako progresivních plniv. Dále byla prozkoumána možnost využití upraveného nebezpečného odpadu, neutralizačního kalu (NK), jako plniva do ekologické správkové hmoty EKO-X.

V rámci experimentálního prověření bylo zjištěno, že hmoty obsahující plnivo o jemné granulometrii (popílků (KP, FP), odpad z výroby minerálních izolačních desek (OIDM)) dosahují vyšších pevností než hmoty s hrubozrnnějším plnivem, např. odpadní sklo (OS, AS) – tvarový index, distribuce velikosti částic, rovnoměrnost rozložení ve hmotě, optimální množství a důležitou roli hraje v tomto případě také síla kontaktní zóny plnivo/pojivo.

Nejlepší tahové vlastnosti vykazují kotvicí hmoty s optimálním množstvím kontaminovaného popílku (45 hm. %). Typ použitého plniva nemá vliv na tepelnou odolnost speciálních sanačních hmot na epoxidové bázi –  $T_g$  je ovlivněna především typem použitého pojiva. Vyvinuté hmoty odolávají většině silnějších roztoků anorganických kyselin a zásadám, avšak neodolávají kyselině octové. Vykazují vynikající poměr mezi pevností v tlaku a modulem pružnosti v tahu a tlaku (110 MPa / 22 GPa). U všech vyvinutých kotvicích hmot byla dosažena kotvicí síla vyšší než 75 kN a maximální posunutí nepřesáhlo hodnotu 0,6 mm. Dlouhodobá trvanlivost vyvinutých správkových hmot byla také úspěšně prokázána, a to především dosažením vysoké soudržnosti s podkladním betonem i po zmrazovacích cyklech (T50). U vyvinuté ekologické správkové hmoty EKO-X s 40% obsahem NO,

neutralizačního kalu (NK), bylo na základě výsledků zkoušky vyluhovatelnosti významně prokázáno, že použitím tohoto ekologického plniva do epoxidové matrice se dospělo nejen k vynikajícím fyzikálně-mechanickým výsledkům, ale došlo také k úspěšné solidifikaci NO obsahujícího vysoké množství těžkých kovů pomocí EP jako solidifikačního činidla.

V poslední etapě práce bylo úspěšně prokázáno, že pomocí CT tomografu lze pozorovat nejen vnitřní strukturu, pórovitost a trhliny materiálů, ale i případné skryté vady zakotvených prvků, u kterých došlo k porušení především vysunutím vlivem tahové síly. Tato metoda může tedy sloužit také jako podpůrná metoda při řešení znaleckých posudků v oblasti kotvení prvků do betonových konstrukcí v součinnosti se stanovením hlavní příčiny porušení kotveného prvku v konstrukci. Prozkoumáním snímků z CT tomografu bylo také zjištěno, že vyvinuté kotvící hmoty vykazují vynikající adhezi ke kotvené ocelové tyči a k betonu i po provedení zkoušky vytržení, a potvrzují také ideální viskozitu čerstvé hmoty. Bylo potvrzeno, že ani po přibližně ročním působení povětrnostních vlivů nedochází k žádné degradaci hmoty, a ani ke zhoršení kontaktní zóny beton/správková hmota. Pomocí SEM s podporou EDX analýzy bylo prokázáno, že rozložení jednotlivých prvků je u vyvinuté ekologické správkové hmoty EKO-X rovnoměrné a částice NO byly úspěšně inkorporovány v uzavřené struktuře hmoty při současném zamezení jejich vyluhování. Pomocí FTIR analýzy a Ramanovy spektroskopie bohužel nebyl potvrzen vznik nových sloučenin, které by mohly vzniknout chemickou reakcí polutantů obsažených v NK s EP, a lze tedy předpokládat, že došlo jenom k fyzikální inkorporaci NO do polymerní matrice.

Jako nejlepší plnivo se jeví z pohledu finanční náročnosti denitrifikovaný elektrárenský popílek, protože tato druhotná surovina je z důvodu kontaminace  $\text{NH}_3$  ionty pořizována pouze za transportní náklady a nemusí se dále upravovat. Naproti tomu při použití odpadního skla je nutné toto sklo nejdříve upravit, poté podrtit, pomlít a roztrždit na požadovanou frakci, a až pak je možné takto připravené plnivo použít pro výrobu sanačních hmot. Použití takto upraveného odpadního skla do nízkoviskózní epoxidové pryskyřice umožňuje zakomponovat větší množství tohoto plniva (80 %) než popílků (50 %), ale vzhledem ke skutečnosti, že příprava plniva z odpadního skla je podstatně nákladnější, tak je kontaminovaný popílek z ekonomického hlediska nejvhodnějším plnivem do sanačních hmot.

*Z pohledu využívání druhotných a odpadních surovin v oblasti stavebnictví tato práce jednoznačně potvrdila, že některé vedlejší produkty z energetiky a průmyslu vykazující vhodné vlastnosti a kumulující se ve větším množství lze úspěšně využít při výrobě speciálních sanačních hmot na beton. Nejedná se přitom jenom o samotné využití těchto vedlejších produktů, ale také se dospělo v některých případech k výrazně lepším fyzikálně-mechanickým parametrům, než jakými disponují referenční běžné dostupné hmoty využívající pouze primární suroviny. Hlavní myšlenka, která vyplývá z této práce je tedy taková, že pro dosažení požadovaných výsledných parametrů sanačních hmot není potřeba využívat pouze primární suroviny, ale požadavky lze dosáhnout i ekologičtějším způsobem za využití značného objemu druhotných surovin, přičemž se dosáhne výrazného snížení ekologické stopy samotného výrobku.*

## 6 PŘÍNOS PRO VĚDNÍ OBOR A PRAXI

Výsledky získané v rámci vypracování této práce přinášejí značné přínosy, jak pro vědu, tak pro praxi. Mezi hlavní přínosy v těchto oblastech lze zařadit především:

- Úspěšné využití druhotných a odpadních surovin jako plniv do speciálních sanačních hmot (kotvící, zálivkové, správkové) na polymerní bázi a dosažení lepších výsledných fyzikálně-mechanických parametrů než u referenčních hmot. Omezení potřeby skládkování vybraných odpadů bude znamenat pro producenty těchto odpadů snížení nákladů spojených s jejich uložením na skládku, a na druhou stranu může přinést v budoucnu zisk za jejich prodej.
- Návrh nové metodiky zkoušení polymerních sanačních hmot s různým typem a obsahem plniva, včetně podrobného prozkoumání mikrostruktury těchto hmot. Úspěšně byla odzkoušena nová technologie pro zjišťování vnitřních poruch kotvených ocelových prvků a sanovaných částí betonových prvků pomocí CT Tomografie.
- Bylo zjištěno, že jako nejvhodnější plnivo do polymerních sanačních hmot se jeví denitrifikovaný elektrárenský popílek, protože tato druhotná surovina je z důvodu kontaminace  $\text{NH}_3$  ionty pořizována pouze za transportní náklady a nemusí se dále upravovat. Použití odpadního skla do nízkoviskózní EP umožňuje zakomponovat větší množství tohoto plniva (až 70 %) než popílků (až 50 %). Ceny běžně prodávaných kotvících hmot na bázi epoxidové pryskyřice se na trhu pohybují od 30 do 58 EUR za jedno balení, které má většinou objem 200 ml. Výrobní cena vyvinuté kotvící hmoty je přibližně 9 EUR za 1 kg.
- V rámci vyvinuté a následně podrobně prozkoumané ekologické správkové hmoty s označením EKO-X využívající jako plnivo NO, neutralizační kal s vysokým obsahem těžkých kovů, bylo prokázáno, že rozložení jednotlivých kontaminantů je v epoxidové matici rovnoměrné a částice NO byly úspěšně inkorporovány v uzavřené struktuře hmoty, čímž se dospělo k zamezení jejich vyluhování. Pomocí FTIR analýzy a Ramanovy spektroskopie bylo zjišťováno, jestli došlo ke vzniku nových sloučenin interakcí mezi EP a polutanty v NK.
- Tato disertační práce vznikala za podpory projektů TAČR TA04010425 „Komplexní systém speciálních správkových hmot s využitím druhotných surovin pro průmyslové provozy“ a FAST-J-17-4575 „Experimentální prověření možnosti využití popílků kontaminovaných vlivem DeNOx technologie do polymerních správkových hmot“, a za její praktický přínos lze považovat využití získaných výsledků jako podkladů pro případnou komerční výrobu speciálních sanačních hmot plněných odpadními materiály.

Posledním zcela samozřejmým přínosem je publikace řady odborných článků o tématu disertační práce, a tím rozšíření získaných informací a dosažených výsledků mezi odbornou veřejnost, které mohou ve výsledku podpořit používání těchto materiálů a jejich další výzkum a vývoj.

## 7 SEZNAM VYBRANÉ LIERATURY

- [1] VAYSBURD, A.M. and EMMONS, P.H. How to make today's repairs durable for tomorrow corrosion protection in concrete repair. *Construction and Building Materials* [online]. Elsevier. 21 February 2000, 14, 189–197 [cit. 5.2.2018]. ISSN 0950-0618.
- [2] DROCHYTKA, Rostislav, DOHNÁLEK, Jiří, BYDŽOVSKÝ, Jiří, PUMPR, Václav, DUFKA, Ámos, DOHNÁLEK, Pavel. *Technické podmínky pro sanace betonových konstrukcí*. Brno: Sdružení pro sanace betonových konstrukcí, 2012. ISBN 978-80-260-2210-7.
- [3] YILMAZ, Salih, ÖZEN, Muhammet Ali, YARDIM, Yavuz. Tensile behavior of post-installed chemical anchors embedded to low strength concrete. *Construction and Building Materials* [online]. Elsevier. 15 June 2013, 47, 861–866 [cit. 5.3.2018]. ISSN 0950-0618.
- [4] ŽLEBEK, Tomáš, HODUL, Jakub, DROCHYTKA, Rostislav. Experimental Testing Suitability of the Waste Glass into the Polymer Anchor Materials Based on Epoxy Resin. *Procedia Engineering* [online]. Elsevier. 20 July 2017, 195, 220–227 [cit. 5.3.2018]. ISSN 1877-7058.
- [5] DUCHÁČEK, Vratislav. *POLYMERY – výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2.vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006, 280 s. ISBN 80-7080-617-6.
- [6] REBEIZ, K.S., ASCE, M., SERHAL, P., CRAFT, A.P. Properties of Polymer Concrete Using Fly ash. *Journal of Materials in Civil Engineering* [online]. ASCE LIBRARY. 16 January 2004, 16(1) (2004) [cit. 5.4.2018]. ISSN 0899–1561.
- [7] RIBEIRO, M.C.S., NÓVOA, P.R., FERREIRA, A.J.M., MARQUES, A.T. Flexural performance of polyester and epoxy polymer mortars under severe thermal conditions. *Cement and Concrete Composites*. Elsevier [online]. 8 July 2003, 26(7) (2004), 803–809. [cit. 5. 6. 2018]. ISSN 0020-0190.
- [8] WANG, Yan-Shuai, DAI, Jian-Guo. X-ray computed tomography for pore-related characterization and simulation of cement mortar matrix, *NDT&E International* 86 (2016) 28–35. [cit. 5. 6. 2018] ISSN 0963-8695.

## 8 CURRICULUM VITAE

### Osobní údaje:

Jméno a příjmení: Jakub Hodul  
Datum a místo narození: 9.2.1990, Piešťany  
Stav: slobodný  
Trvalé bydliště: Palárikova 6, 921 01 Piešťany, Slovenská republika

### Dosažené vzdělání:

2015–dosud: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Doktorský studijní program, Obor: Fyzikální a stavebně materiálové inženýrství, státní doktorská zkouška absolvována 23. 9. 2016  
2013–2015: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Magisterský studijní program, Obor: Stavebně materiálové inženýrství, získán titul inženýr  
2009–2013: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Bakalářský studijní program, Obor: Stavebně materiálové inženýrství, získán titul bakalář  
2005–2009: Gymnázium Pierra de Coubertina, Piešťany, Slovenská republika, zaměření informatika, studium zakončeno maturitou

### Pracovní zkušenosti:

2018–dosud: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, odborný asistent  
2015–2018: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, technicko-hospodářský a vědecký pracovník ve výzkumném centru AdMaS.  
2013: Stavebniny IDEA, Piešťany, Slovenská republika, prodejce a odborný poradce

## Vybrané publikace:

1. HODUL, J.; DROCHYTKA, R.; DOHNÁLKOVÁ, B. New possibilities of neutralisation sludge solidification technology. *Journal of Cleaner Production*, 2018, no. 204, p. 1097-1107. ISSN: 0959-6526.
2. HODUL, J.; ŽLEBEK, T.; DROCHYTKA, R. Possibilities of filling polymeric anchors with secondary raw materials with effect on price and final parameters. *Advanced Materials Letters*, 2018, vol. 1, no. 10, p. 29-34. ISSN: 0976-3961.
3. VYHNÁNKOVÁ, M.; HODUL, J.; BYDŽOVSKÝ, J. Issue of epoxy based coatings system crystallization and effect of partial crystallinity on mechanical parameters. In *19th International Conference on Rehabilitation and Reconstruction of Building 2017. Key Engineering Materials*, Switzerland, 2018. p. 147-152. ISBN: 978-3-0357-1361-9. ISSN: 1013-9826.
4. ŽLEBEK, T.; HODUL, J.; DROCHYTKA, R. Utilization of fly ash contaminated by SNCR flue gas denitrification into polymer epoxy anchor. In *19th International Conference on Rehabilitation and Reconstruction of Building 2017. Key Engineering Materials*, Switzerland, 2018. p. 98-103. ISBN: 978-3-0357-1361-9. ISSN: 1013-9826.
5. HODUL, J.; MĚSZÁROSOVÁ, L.; DROCHYTKA, R. Monitoring the long-term durability and microstructure of polymer concrete patching materials with high content of secondary raw materials using advanced methods. In *Construmat 2018. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. United Kingdom: IOP Publishing, 2018. p. 1-6. ISSN: 1757-8981.
6. ŽLEBEK, T.; HODUL, J.; DROCHYTKA, R. Repairing composite using hazardous waste containing heavy metals. In *Construmat 2018. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. United Kingdom: IOP Publishing, 2018. p. 1-6. ISSN: 1757-8981.
7. HODUL, J.; ŽLEBEK, T.; DROCHYTKA, R. Experimental testing suitability of the waste glass into the polymer anchor materials based on epoxy resin. *Procedia Engineering*, ISSN: 1877-7058. HODUL, J.; DROCHYTKA, R.; HODNÁ, J. Experimental verification of utilization of fly ash from the flue gas denitrification process as a filler to epoxy patching mortar. *Procedia Engineering*, ISSN: 1877-7058.
8. HODUL, J.; DROCHYTKA, R.; HODNÁ, J. Experimental verification of utilization of fly ash from the flue gas denitrification process as a filler to epoxy patching mortar. *Procedia Engineering*, ISSN: 1877-7058.
9. HODUL, J.; ŽLEBEK, T.; DROCHYTKA, R.; SEJÁK, F. Prověření vhodnosti využití druhotných surovin jako plniv do polymerních antibakteriálních nátěrů na epoxidové bázi pro hygienicky čisté provozy. In *CONSTRUMAT 2017 - International Conference on Structural Materials*. Ing. Zuzana Štefunková, PhD. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, Vydavateľstvo Spektrum STU 2017, 2017. s. 160-166. ISBN: 978-80-227-4689-2.
10. ŽLEBEK, T.; HODUL, J.; DROCHYTKA, R. Možnosti využití odpadního skla do polymerních chemických kotev. In *CONSTRUMAT 2017 - International Conference on Structural Materials*. Ing. Zuzana Štefunková, PhD. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, Vydavateľstvo Spektrum STU 2017, 2017. s. 226-233. ISBN: 978-80-227-4689-2.
11. HODUL, J.; HODNÁ, J.; DROCHYTKA, R. Experimental Verification of Scrub and Impact Resistance of the Epoxy Coatings Filled with the Finely Milled Waste Glass. *Key Engineering Materials (print)*, 2016, no. 723, p. 416-421. ISSN: 1013-9826.
12. HODUL, J.; DROCHYTKA, R.; HODNÁ, J. Examination of Mechanical Properties and Temperature Resistance of Epoxy Coatings Filled with Secondary Raw Materials. *Applied Mechanics and Materials*, 2016, no. 861, p. 32-39. ISSN: 1660-9336.
13. DOHNÁLKOVÁ, B.; DROCHYTKA, R.; HODUL, J. Durability testing of cement matrices for neutralization sludge disposing. In *Energy and Clean Technologies Conference Proceedings, Volume III. International multidisciplinary geoconference SGEM*. Vienna: SGEM World Science, 2016. p. 11-16. ISBN: 978-619-7105-82-7. ISSN: 1314-2704.
14. HODNÁ, J.; HODUL, J.; DROCHYTKA, R.; VYHNÁNKOVÁ, M. Utilization of waste glass in polymer concrete. In *Binders, Materials and Technologies in Modern Construction II. Materials Science Forum*. Switzerland: Trans tech publication, 2016. p. 171-177. ISBN: 978-3-03835-740-7. ISSN: 0255-5476.
15. HODUL, J.; DROCHYTKA, R. Examination of microstructure of solidification product containing hazardous sludge. *Procedia Engineering*, 2016, no. 151, p. 402-409. ISSN: 1877-7058.
16. HODUL, J.; HODNÁ, J.; DROCHYTKA, R. VÝVOJ POLYMERBETONU S OBSAHEM ODPADNÍHO SKLA VYUŽITELNÉHO PŘI SANACI BETONOVÝCH KOSTRUKCÍ. In *CONSTRUMAT 2016, Sborník příspěvků z XXII. mezinárodní konference o stavebních materiálech*. Praha: 2016. s. 99-106. ISBN: 978-80-01-05958-6.

17. HODUL, J.; DROCHYTKA, R.; BYDŽOVSKÝ, J. Development in the Rehabilitation of Concrete Structures in the Czech Republic, for the past 25 years. In *Restoration and Building-Physcs past-present-future*. Hans-Peter Leimer (Hresg.). Stuttgart, Germany: Fraunhofer IRB Verlag, 2016. p. 31-42. ISBN: 978-3-8167-9590-2.
18. HODUL, J.; DOHNÁLKOVÁ, B.; DROCHYTKA, R. Experimental testing of Solidification Products containing hazardous waste- Neutralization Sludge with aim of material utilization. In *Advances in Civil, Architectural, Structural and Constructional Engineering*. London, UK: CRC Press/ Balkema, 2016. p. 275-280. ISBN: 978-1-315-67590-9.
19. HODUL, J.; HODNÁ, J. POKROČILÉ EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠENÍ POLYMERBETONU S ODPADNÍM SKLEM. In *JUNIORSTAV 2016*. BRNO: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2016. s. 432-439. ISBN: 978-80-214-5312-8.
20. HODUL, J.; DROCHYTKA, R.; DOHNÁLKOVÁ, B.; HODNÁ, J. Experimental verification of utilization of solidification product containing galvanic neutralisation sludges in building industry. *Waste forum*, 2015, vol. 2015, no. 4, p. 181-191. ISSN: 1804-0195.
21. HODUL, J.; DOHNÁLKOVÁ, B.; DROCHYTKA, R. Solidification of Hazardous Waste with the Aim of Material Utilization of Solidification Products. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 2015 (108), no. 108, p. 639-646. ISSN: 1877-7058.
22. DOHNÁLKOVÁ, B.; DROCHYTKA, R.; HODUL, J.; ŤAŽKÝ, T. The examination of waste industry sludge solidification/ stabilization possibility. In *Advanced Materials Research/Binders, Materials and Technologies in Modern Construction. Advanced Materials Research*. Švýcarsko: Trans Tech Publications, 2015. p. 211-217. ISBN: 978-3-03835-452-9. ISSN: 1022-6680.
23. DOHNÁLKOVÁ, B.; DROCHYTKA, R.; HODUL, J.; HODNÁ, J. The Study of Cement Composites with Inbuilt Hazardous Waste. In *CMME 2014 - Abstract. Applied Mechanics and Materials*. Švýcarsko: Trans Tech Publication, 2015. p. 47-51. ISBN: 978-3-03835-385-0. ISSN: 1662-7482.
24. DOHNÁLKOVÁ, B.; HODUL, J.; DROCHYTKA, R.; HODNÁ, J. New evaluation methodology for solidification product durability assessment. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2014, vol. 8, no. 6, p. 448-452. ISSN: 1307-6892.

## 9 ABSTRACT

The doctoral thesis deals with finding the use of some waste and secondary raw materials in the production of special polymer remediation materials for concrete, which could be applied even in constructions, where extreme mechanical and chemical load is occurred. The aim of this doctoral thesis is experimental examination of the possibility of using selected types of waste, including hazardous waste which represent the highest risk to environment, and secondary raw materials as a substitute for the currently used primary fillers in order to reduce the ecological footprint of the product itself. Some types of secondary raw materials, such as filter fly ash contaminated by flue gas denitrification process, are no longer used as a concrete admixture or partial cement substitution due to unwanted release of toxic ammonia (NH<sub>3</sub>). Mainly for this reason, the thesis deals with the progressive utilization of such types of secondary raw materials as well as with another currently unused waste into polymeric patching, grouting and anchoring materials while preserving or improving the final properties compared to reference materials using only primary raw materials. The result of this thesis is to find out suitable formulations for efficient preparation of special polymeric remediation materials for concrete containing waste and secondary raw materials as fillers. The partial aim of the thesis and a the scientific contribution is an observation of the developed materials internal structure using a modern device, CT tomography, an influence of the filler type on the long-term durability, and last but not least the observation of the rate of pollutants incorporation, found in hazardous waste, into the polymeric matric with the aid of EDX and FTIR analysis.