



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

DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Jakub Hodul

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. ROSTISLAV DROCHYTKA, CSc., MBA

BRNO 2019

ABSTRAKT

Práce se zabývá nalezením uplatnění některých odpadních a druhotných surovin při výrobě speciálních polymerních sanačních hmot na beton, které by bylo možné aplikovat i v prostředí s extrémním mechanickým a chemickým namáháním. Cílem této disertační práce je experimentálně prověřit možnost využití vybraných druhů odpadních a druhotných surovin včetně nebezpečných odpadů, které představují pro životní prostředí nejvyšší riziko, jako náhradu současně využívaných primárních plniv za účelem snížení ekologické stopy samotného výrobku. Některé druhotné suroviny, jako je např. filtrový popílek kontaminovaný vlivem denitrifikace spalin, již v současnosti nenacházejí uplatnění jako příměs do betonu nebo částečná náhrada cementu z důvodu nežádoucího uvolňování toxického amoniaku (NH_3). Především z toho důvodu se tato práce zabývá progresivním využitím takovýchto typů druhotných surovin, ale i dalších v současnosti nevyužívaných odpadů, do polymerních správkových, zálivkových a kotvicích hmot při zachování nebo zlepšení výsledných vlastností oproti referenčním hmotám využívajících pouze primární suroviny. Výsledkem práce je nalezení a prověření vhodných receptur pro efektivní přípravu speciálních polymerních sanačních hmot na beton s obsahem odpadních a druhotných surovin jako plniv. Dílčím cílem práce a současně vědeckým přínosem práce je prověření vnitřní struktury vyvinutých hmot pomocí moderního zařízení – CT tomografu, vliv typu plniva na dlouhodobou trvanlivost sanačních hmot, a v neposlední řadě sledování míry inkorporace polutantů, nacházejících se v nebezpečném odpadu, do polymerní matrice i za pomoci EDX a FTIR analýzy.

KLÍČOVÁ SLOVA

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

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_3). 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 matrix with the aid of EDX and FTIR analysis.

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.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Ing. Jakub Hodul *Vývoj speciálních sanačních hmot na beton pro extrémní namáhání s využitím druhotných surovin*. Brno, 2019. 196 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem Vývoj speciálních sanačních hmot na beton pro extrémní namáhání s využitím druhotných surovin zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 4. 1. 2019

Ing. Jakub Hodul
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval prof. Ing. Rostislavu Drochytkovi, CSc., MBA, jako vedoucímu mé disertační práce, za odborné vedení, trpělivost při řešení a přínosné rady.

Disertační práce byla vypracována v rámci řešení projektu TAČR TA04010425 "Komplexní systém speciálních správkových hmot s využitím druhotných surovin pro průmyslové provozy" podporovaného Technologickou agenturou ČR. Tato disertační práce byla vypracována s využitím infrastruktury Výzkumného centra AdMaS.

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| 1. ÚVOD | 12 |
| 2. TEORETICKÁ ČÁST | 13 |
| 2.1. Definice a pojmy..... | 13 |
| 2.2. Degradace železobetonu a princip ochrany..... | 14 |
| 2.2.1. Typy a příčiny degradace betonu..... | 14 |
| 2.2.2. Možnosti ochrany proti korozi betonu | 16 |
| 2.3. Rozdělení sanačních hmot dle použití..... | 17 |
| 2.4. Správkové hmoty..... | 17 |
| 2.5. Zálivkové hmoty | 20 |
| 2.6. Kotvící hmoty | 21 |
| 2.7. Specifikace polymerních pryskyřic pro sanační hmoty | 28 |
| 2.7.1. Epoxidové pryskyřice (EP) | 28 |
| 2.7.2. Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP)..... | 32 |
| 2.7.3. Vinylesterové (epoxy-akrylátové) pryskyřice..... | 34 |
| 2.7.4. Polyuretanové pryskyřice (PUR)..... | 35 |
| 2.7.5. Methylmetakryláty..... | 36 |
| 2.8. Plniva | 38 |
| 2.8.1. Vliv typu a množství plniva na mechanické vlastnosti PC a PM..... | 39 |
| 2.8.2. Primární plniva | 43 |
| 2.8.3. Sekundární plniva..... | 45 |
| 2.8.3.1. Popílek | 45 |
| 2.8.3.2. Mikrosilika..... | 48 |
| 2.8.3.3. Vysokopecní struska | 49 |
| 2.8.4. Přilnavost plniva k polymerní matici..... | 50 |
| 2.8.5. Legislativní předpisy pro využívání odpadů do výrobků | 50 |
| 3. CÍL PRÁCE | 51 |
| 4. METODIKA | 52 |
| 4.1. ETAPA 1 – Identifikace vstupních surovin, návrh receptur speciálních sanačních hmot na beton a aplikační test | 52 |
| 4.2. ETAPA 2 – Laboratorní prověření základních receptur | 55 |
| 4.3. ETAPA 3 – Pokročilé experimentální prověření vybraných receptur | 56 |
| 4.4. ETAPA 4 – Sledování mikrostruktury a vlivu plniva na vnitřní kompozici mechanicky a jinak namáhaných vyvinutých sanačních hmot..... | 57 |

| | |
|---|-----------|
| 5. POPIS PROVÁDĚNÝCH ZKOUŠEK | 58 |
| 5.1. ZKOUŠKY PRO BLIŽŠÍ CHARAKTERIZACI PLNIV | 58 |
| 5.1.1. Stanovení velikosti částic | 58 |
| 5.1.2. Chemické složení..... | 59 |
| 5.1.3. Stanovení měrné hmotnosti | 59 |
| 5.1.4. Stanovení měrného povrchu..... | 59 |
| 5.1.5. Stanovení množství amoniaku | 60 |
| 5.2. Aplikační test | 60 |
| 5.3. Zkoušky na čerstvých hmotách | 62 |
| 5.3.1. Stanovení sedimentace..... | 62 |
| 5.3.2. Stanovení hustoty | 63 |
| 5.3.3. Stanovení viskozity..... | 63 |
| 5.3.4. Stanovení konzistence malt pomocí střešacího stolku | 63 |
| 5.3.5. Stanovení smrštění..... | 64 |
| 5.4. Zkoušky na zpolymerovaných hmotách | 65 |
| 5.4.1. Stanovení objemové hmotnosti..... | 65 |
| 5.4.2. Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku | 65 |
| 5.4.3. Stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou..... | 66 |
| 5.4.4. Stanovení tahových vlastností | 67 |
| 5.4.5. Stanovení tvrdosti Shore D | 68 |
| 5.4.6. Odolnost vůči úderu..... | 69 |
| 5.4.7. Zkouška vytržení..... | 69 |
| 5.4.8. Stanovení dynamického modulu pružnosti UZ metodou | 70 |
| 5.4.9. Stanovení tepelné odolnosti | 70 |
| 5.4.10. Stanovení chemické odolnosti..... | 71 |
| 5.4.11. Stanovení soudržnosti po cyklické změně teplot | 72 |
| 5.4.12. Stanovení teplotní délkové roztažnosti | 72 |
| 5.5. Zkoušky zabývající se sledováním mikrostruktury | 73 |
| 5.5.1. Pozorování povrchu optickým mikroskopem a pořízením fotek povrchu s vysokým rozlišením | 73 |
| 5.5.2. Skenovací elektronový mikroskop (SEM) s podporou EDX analýzy | 73 |
| 5.5.3. CT Tomografie | 74 |
| 5.5.4. Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací (FITR) | 74 |

| | |
|--|-----------|
| 5.5.5. Ramanova spektroskopie | 74 |
| 5.6. Prověřování ekologické vhodnosti hmoty EKO-X..... | 75 |
| 5.6.1. Zkouška vyluhovatelnosti..... | 75 |
| 5.6.2. Koncentrace škodlivin v sušině | 75 |
| 5.6.3. Ekotoxicita..... | 76 |
| 6. REALIZACE, VYHODNOCENÍ A DISKUSE PRÁCE JEDNOTLIVÝCH ETAP | 76 |
| 6.1. ETAPA 1 – Identifikace vstupních surovin, návrh receptur speciálních sanačních hmot na beton a aplikační test | 76 |
| 6.1.1. Plniva..... | 77 |
| 6.1.1.1. Primární – referenční plnivo (REF)..... | 78 |
| 6.1.1.2. Odpadní autosklo (AS) | 80 |
| 6.1.1.3. Odpadní obalové sklo (OS)..... | 81 |
| 6.1.1.4. Odpadní sklo ze solárních panelů QS solar | 82 |
| 6.1.1.5. Odpadní slévárenský písek (SP) | 84 |
| 6.1.1.6. Odpadní struska (SS)..... | 85 |
| 6.1.1.7. Opad z výroby minerálních izolačních desek (OIDM) | 86 |
| 6.1.1.8. Popílký kontaminované vlivem denitrifikace spalin | 88 |
| 6.1.1.9. Nebezpečný odpad – Neutralizační kal (NK)..... | 91 |
| 6.1.2. Polymerní pojiva | 93 |
| 6.1.3. Návrh základních receptur pro prvotní zkoušení..... | 95 |
| 6.1.4. Prvotní zkoušení navržených receptur..... | 95 |
| 6.1.4.1. Aplikační test..... | 95 |
| 6.1.4.2. Sledování vyplnění otvoru kotvící hmotou | 97 |
| 6.1.5. ZÁVĚR ETAPY 1 | 98 |
| 6.2. ETAPA 2 – Laboratorní prověření základních receptur | 99 |
| 6.2.1. Zkoušky hmot v čerstvém stavu..... | 99 |
| 6.2.1.1. Stanovení sedimentace..... | 99 |
| 6.2.1.2. Stanovení viskozity..... | 101 |
| 6.2.1.3. Stanovení konzistence pomocí střešacího stolku | 102 |
| 6.2.1.4. Stanovení hustoty | 103 |
| 6.2.2. Zkoušky hmot v zatvrdlém stavu..... | 105 |
| 6.2.2.1. Objemová hmotnost v zatvrdlém stavu..... | 105 |
| 6.2.2.2. Pevnost v tahu za ohybu..... | 107 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| 6.2.2.3. | Pevnost v tlaku..... | 110 |
| 6.2.2.4. | Soudržnost s podkladem..... | 112 |
| 6.2.2.5. | Tvrдост..... | 113 |
| 6.2.2.6. | Odolnost vůči úderu..... | 115 |
| 6.2.3. | Vyhodnocení výsledků základních zkoušek – správková hmota EKO-X..... | 117 |
| 6.2.4. | Optimalizace výsledků..... | 118 |
| 6.2.5. | Závěr Etapy II..... | 121 |
| 6.3. | ETAPA 3 – Pokročilé experimentální prověření vybraných receptur..... | 121 |
| 6.3.1. | Stanovení tahových vlastností..... | 122 |
| 6.3.2. | Stanovení tepelné odolnosti..... | 123 |
| 6.3.3. | Stanovení smrštění..... | 125 |
| 6.3.4. | Zkouška vytržení..... | 127 |
| 6.3.5. | Dynamický modul pružnosti pomocí UZ metody..... | 128 |
| 6.3.6. | Stanovení chemické odolnosti..... | 129 |
| 6.3.7. | Koeficient lineární teplotní roztažnosti..... | 133 |
| 6.3.8. | Stanovení soudržnosti po cyklické změně teplot..... | 135 |
| 6.3.9. | Vyhodnocení prověření ekologické vhodnosti vyvinuté hmoty EKO-X..... | 136 |
| 6.3.9.1. | Zkouška vyluhovatelnosti..... | 136 |
| 6.3.9.2. | Stanovení koncentrace škodlivin v sušině..... | 137 |
| 6.3.9.3. | Ekotoxicita..... | 138 |
| 6.3.10. | Poloprovozní ověření..... | 139 |
| 6.3.10.1. | Správkové hmoty..... | 139 |
| 6.3.10.2. | Zálivková hmota..... | 141 |
| 6.3.11. | Závěr Etapy III..... | 142 |
| 6.4. | ETAPA 4 – Sledování vlivu mikrostruktury vyvinutých sanačních hmot na jejich fyzikálně-mechanické parametry a dlouhodobou trvanlivost..... | 143 |
| 6.4.1. | Sledování mikrostruktury pomocí optického mikroskopu..... | 144 |
| 6.4.1.1. | Hmoty nevystavené působení agresivního namáhání..... | 144 |
| 6.4.1.2. | Vliv chemicky agresivního prostředí na mikrostrukturu povrchu..... | 150 |
| 6.4.2. | Pozorování mikrostruktury sanačních hmot pomocí elektronového mikroskopu..... | 151 |
| 6.4.3. | Infračervená (FTIR) a Ramanova spektroskopie..... | 156 |
| 6.4.4. | CT Tomografie..... | 160 |
| 6.4.4.1. | Správkové a zálivkové hmoty..... | 160 |

| | |
|---|------------|
| 6.4.4.2. Kotvící hmoty EP-K..... | 164 |
| 6.4.4.3. Kotvící hmoty EP-K2..... | 167 |
| 6.4.5. Závěr etapy 4..... | 168 |
| 7. ZÁVĚR..... | 169 |
| 8. POUŽITÁ LITERATURA | 176 |
| 9. SEZNAM CITOVANÝCH NOREM..... | 185 |
| 10. SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ | 186 |
| 11. SEZNAM OBRÁZKŮ..... | 188 |
| 12. SEZNAM TABULEK..... | 195 |

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 namáhání 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. TEORETICKÁ ČÁST

V teoretické části práce je uvedeno rozdělení používaných sanačních hmot a bližší charakteristika správkových, zálivkových a kotvicích hmot. Protože se jedná o materiály, které lze využít především pro sanaci betonových konstrukcí, je zde v krátkosti popsána také degradace betonu a její příčiny. Práce se zabývá vývojem sanačních hmot na polymerní bázi, a tak v této části budou dále uvedeny typy nejpoužívanějších pryskyřic a vhodných plniv. Důraz je kladen na popis odpadních a druhotných surovin, které lze využít jako náhradu primárních surovin.

2.1. Definice a pojmy

Adheze – Vazba dvou povrchů, které jsou vázány fyzikálními silami působícími na jejich rozhraní.

Betonový podklad – Beton původní konstrukce pod prováděným systémem ochrany a opravy (náhradou betonu nebo jiným systémem).

Degradace – Postupné a trvalé narušování betonu mající za následek pokles užitečných parametrů betonu, v extrémních případech vedoucí až k jeho rozpadu.

Druhotné suroviny – materiály mající zejména charakter vedlejších produktů, nebo upravených odpadů, které přestaly být odpadem poté, co splnily podmínky a kritéria, pokud jsou stanovena, materiálů získaných z výrobků podléhajících zpětnému odběru, materiálů z dalších výrobků využitelných pro další zpracování, včetně nespotřebovaných vstupních surovin, materiálů předávaných k novému využití; druhotná surovina slouží jako vstup pro výrobu a nahrazuje primární surovinu.

Epoxidová pryskyřice – třída organických chemických vazebných systémů (polymerů), používaná při přípravě speciálních nátěrů a správkových hmot pro beton nebo jako pojiva polymermaltách a polymerbetonech.

Odpad – Odpad je každá movitá věc, které se osoba zbavuje nebo má úmysl nebo povinnost se jí zbavit.

Polymermalta (Polymerbeton) – směsi reaktivních polymerních pojiv a kameniva vhodné zrnitosti, které se vytvrzují polymerizací

Speciální sanační hmoty – skupina nových typů sanačních hmot na polymerní (epoxidové) bázi zahrnující správkové, zálivkové a kotvicí materiály, které obsahují ve své struktuře druhotné nebo odpadní suroviny, a jsou určeny do prostředí s extrémním namáháním. Přednostně se využívají při sanaci betonových konstrukcí, ale je možné je využít i při rekonstrukcích jiného typu nebo při novostavbách pro speciální účely, kde je požadována zvýšená odolnost. Zkouší a požadují se u nich i další parametry, které u běžných sanačních hmot nejsou prověřovány. Důraz je kladen taky na ekologickou vhodnost, a proto se u některých typů požaduje provádět zkouška vyluhovatelnosti a prověření ekotoxicity – především u sanační hmoty EKO-X obsahující jako plnivo upravený nebezpečný odpad (NO).

Správková hmota – hmota na vhodné materiálové bázi, sloužící k reprofilaci betonových konstrukčních prvků a splňující základní požadavky.

2.2. Degradace železobetonu a princip ochrany

2.2.1. Typy a příčiny degradace betonu

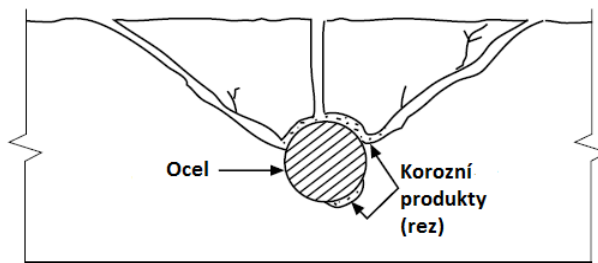
Hlavním důvodem, proč je beton na bázi portlandského cementu nejrozšířenějším materiálem na světě je jeho výjimečná trvanlivost. Avšak jeho nesprávné použití, návrhy a technologické postupy a příliš agresivní expoziční podmínky mohou způsobit zhoršení stavu betonu, což může vést k estetickým, funkčním nebo statickým problémům. Beton může degradovat vlivem různých příčin a jeho poškození je většinou výsledkem kombinace různě působících faktorů. Mezi nejčastější potenciální příčiny a faktory, které ovlivňují degradaci železobetonu, patří koroze výztužné oceli, tloušťka krycí (pasivační) vrstvy, chloridové ionty, karbonatace, mrazové narušení, objemové změny kameniva a chemicky agresivní prostředí [1].

- *Koroze výztužné oceli a jiných vložených kovových prvků*

Koroze výztužné oceli a jiných kovových prvků patří mezi hlavní příčiny poškození betonu. Při korozi oceli dochází k objemovým změnám v podobě korozních produktů, které zaujímají větší objem než původní ocel. Tato expanze vytváří v betonu tahová napětí, které mohou nakonec způsobit trhliny, delaminace a odlupování povrchových vrstev betonu (*Obr. 1 a Obr. 2*). Koroze kovových prvků zabudovaných v betonu může být výrazně snížena, pokud je beton dostatečně kvalitní, nevykazuje smršťovací trhliny, s nízkou propustností a dostatečným krytím [1].



Obr. 1: Koroze výztužné oceli – nejběžnější příčina degradace betonu [1]



Obr. 2: Objemové změny korodující oceli vytvářející tahové napětí v betonu, které zapříčiňuje poruchy následné betonu [1]

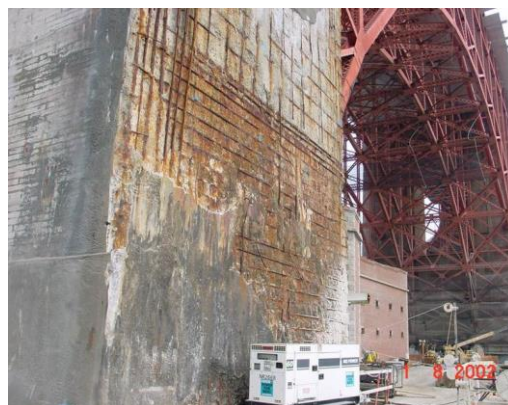
- *Přítomnost chloridových iontů*

Vnikání chloridových iontů (Cl^-), které se vyskytují především v rozmrazovacích solích a v mořské vodě, do železobetonu může způsobit korozi výztužné oceli, pokud jsou zde přítomny kyslík a vlhkost pro udržení reakce (*Obr. 3 a Obr. 4*). Chloridy rozpuštěné ve vodě mohou proniknout do zdravého betonu a dostat se až k výztuži převážně přes

trhliny. Přísady do betonu obsahující chloridy mohou rovněž způsobit korozi. Žádné jiné agresivní prostředí není v literatuře tak značně zdokumentováno jako koroze oceli chloridovými ionty. Nejpravděpodobnější teorie je, že Cl^- ionty pronikají ochrannou krycí vrstvou jednodušeji než ostatní ionty, čímž nechávají ocel méně odolnou korozi [1]. Při dosažení kritické koncentrace v místě výztuže začne docházet ke korozi oceli. Dusičnan vápenatý $(\text{CaNO}_3)_2$, anorganická sloučenina, patří mezi nejpoužívanější typy inhibitorů koroze sloužících k ochraně železobetonu [2].



Obr. 3: Píliře mostu poškozené korozí výztužné oceli vlivem působení chloridů z mořské vody [2]



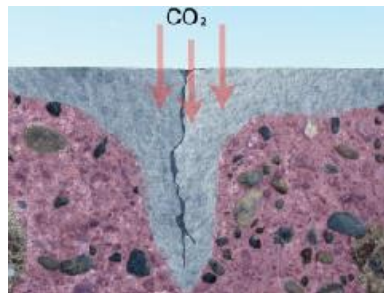
Obr. 4: Píliře mostu poškozené korozí výztužné oceli vlivem působení chloridů z mořské vody [3]

- *Karbonatace*

Karbonatací se rozumí neutralizační proces, chemická reakce hydroxidu vápenatého $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ a kalcium-hydro-silikátového (CSH) gelu s oxidem uhličitým (CO_2) za vzniku uhličitanu vápenatého (CaCO_3) a vody. Vlivem karbonatace dochází ke snížení portlanditu $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$, čímž se snižuje účinnost pasivity výztuže betonem – snižuje se pH betonu. Pod pH 10 již krycí vrstva betonu neplní svoji funkci pasivace výztuže a koroze výztuže probíhá rychleji. Tradičním způsobem stanovení hloubky karbonatace je rozstříkání indikátoru fenolftaleinu (FF) na povrch vyřezaného vzorku z betonové konstrukce [4]. Karbonatace je zpravidla pomalý proces. U vysoce kvalitního betonu se odhaduje, že karbonatace bude probíhat rychlostí maximálně 1,0 mm ročně. Tento jev je značně závislý na relativní vlhkosti betonu. Nejvyšší míra karbonatace nastává, když je relativní vlhkost betonu v rozmezí 50 až 75 %. Degradace betonu vyvolaná převážně karbonatací se často vyskytuje v oblasti fasád budov (Obr. 5), které jsou vystaveny srážkám, jsou zastíněny před slunečním zářením a mají tenkou krycí vrstvu [1].



Obr. 5: Degradace betonu s malou tloušťkou krytí způsobena převážně vlivem karbonatce [1]



Obr. 6: Vymezení zkarbonatované oblasti betonu pomocí FF testu [5]

- **Mrazové narušení**

Když voda zamrzne, zvětšuje svůj objem přibližně o 9 %. Zamrzající voda ve vlhkém betonu, vytváří tlak v kapilárách a pórech betonu. Pokud tento tlak překročí pevnost betonu v tahu, póry a kapiláry o průměru $> 300 \mu\text{m}$ dilatují a prasknou. Akumulační účinek postupných cyklů zmrazování-rozmrazování a narušení cementové pasty s kamenivem může způsobit značné objemové změny, praskliny, zvětšování trhlin a postupný rozpad betonu (Obr. 7, Obr. 8) [1].



Obr. 7: Odlupování povrchu betonové dlažby vlivem mrazového narušení [1]



Obr. 8: Betonový most vykazující silné poškození mrazovým narušením [6]

2.2.2. Možnosti ochrany proti korozi betonu

Ve většině průmyslově vyspělých zemích světa se velké výdaje na opravy a rekonstrukce staly velkou obavou, protože příliš mnoho stavebních objektů je vystaveno problémům s různým stupněm degradace, která nastala mnohem dříve než jejich očekávaná životnost. Prodloužení životnosti sanovaných betonových konstrukcí zůstává záležitostí nejvyššího zájmu všech, kteří se podílejí na jejich návrhu, realizaci, údržbě a využívání. Na trhu existuje velké množství výrobků protikorozi ochrany, které jsou specifické řadou vlastností [7]. Metody sekundární ochrany, které jsou v současnosti využívány zahrnují především: použití ochranných nátěrů na beton; použití kovových, polymerních

(epoxidových, akrylátových) nátěrů na ocel a v neposlední řadě použití různých typů inhibitorů koroze. Nátěry, zejména uhelný dehet, chlorovaný kaučuk, epoxidové pryskyřice apod., jsou používané na základové patky a mola, aby nedocházelo k poškození betonu v důsledku síranového a chloridového napadení. Avšak nátěry na beton několika nových typů jsou i v současnosti uváděny na trh pro zaručení ochrany betonu na úrovni ale i pod úrovní terénu [8].



Obr. 9: Aplikace hydroizolační cementové ochranné hmoty při izolaci betonové budovy po úrovni terénu [9]



Obr. 10: Ochrana betonu bitumenovými pásy [9]

2.3. Rozdělení sanačních hmot dle použití

Materiály pro sanaci betonových konstrukcí můžeme rozdělit do šesti hlavních skupin:

- Materiály pro antikorozi ochranu výztuže (konzervace výztuže)
- Adhezní můstek
- **Správkové hmoty**
- Materiály povrchových ochranných systémů
- Speciální materiály pro zajištění vodotěsnosti
- Injektážní a výplňové (**zálivkové**) hmoty [10]

2.4. Správkové hmoty

Správkové hmoty se používají především za účelem:

- obnovení betonových konstrukčních prvků do původního stavu,
- zvětšení tloušťky krycí vrstvy nad výztuží,
- obnovení trvanlivosti betonových prvků,
- estetického uvedení do původního stavu [10].

Správkové hmoty se rozdělují podle složení do tří skupin:

- cementové malty a betony (CC),
- polymercementové malty a betony (PCC) – cementové malty a betony modifikované polymerními přísadami,
- **polymermalty a polymerbetony (PC)** – pojivem jsou výhradně polymerní pryskyřice [10].

Tato práce se zabývá především správkovými hmotami na polymerní, které vykazují nejlepší fyzikálně-mechanické parametry, a lze do nich zakomponovat nejvíce plniva.

Požadavky na správkové hmoty jsou následující:

- vysoká soudržnost s podkladem,
- dobrá vodotěsnost,
- mrazuvzdornost minimálně na úrovni T100,
- minimální objemové změny v závislosti na změnách vlhkosti a teploty,
- omezený vznik smršťovacích trhlin,
- modul pružnosti, který by měl být:
 - nižší, než je modul pružnosti podkladního betonu, pokud správková hmota nemá statickou funkci,
 - stejný jako je modul pružnosti podkladního betonu, pokud správková hmota má statickou funkci,
- pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu shodná nebo mírně vyšší než podkladní beton, pokud se jedná o hmotu se statickou funkcí,
- odolnost vůči agresivním médiím podle konkrétních podmínek expozice.

Kvalitativní požadavky na správkové hmoty jsou rozděleny na jednotlivé třídy R1 až R4, přičemž třídy R1 a R2 se řadí do skupiny správkových hmot bez statické funkce a třídy R3 a R4 do skupiny se statickou funkcí [10]. Kvantitativní požadavky na správkové hmoty podle příslušné normy ČSN EN 1504-3 jsou uvedeny v *Tab. 1*.

Tab. 1: Požadavky na správkové hmoty dle příslušné normy ČSN EN 1504-3 [10]

| Parametr | Správkové hmoty bez statické funkce | | Správkové hmoty se statickou funkcí | |
|---|-------------------------------------|-----------|-------------------------------------|-----------|
| | Třída R1 | Třída R2 | Třída R3 | Třída R4 |
| Pevnost v tlaku | ≥ 10 MPa | ≥ 15 MPa | ≥ 25 MPa | ≥ 45 MPa |
| Obsah chloridových iontů | ≤ 0,05 % | ≤ 0,05 % | ≤ 0,05 % | ≤ 0,05 % |
| Soudržnost | ≥ 0,8 MPa | ≥ 0,8 MPa | ≥ 1,5 MPa | ≥ 2,0 MPa |
| Vázané smršťování / rozpínání – soudržnost po zkoušce | Bez požadavků | ≥ 0,8 MPa | ≥ 1,5 MPa | ≥ 2,0 MPa |

| | | | | |
|----------------------------|--------------------|----------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Modul pružnosti | Bez požadavků | Bez požadavků | ≥ 15 GPa | ≥ 20 GPa |
| Odolnost proti karbonataci | Bez požadavků | Bez požadavků | $d_k \leq$ kontrolní beton (MC(0,45)) | $d_k \leq$ kontrolní beton (MC(0,45)) |
| Tepelná slučitelnost | Vizuální prohlídka | $\geq 0,8$ MPa | $\geq 1,5$ MPa | $\geq 2,0$ MPa |

Kompatibilita správkové hmoty a podkladního betonu je rovnováha fyzikálních, chemických, elektrochemických a reologických vlastností mezi správkovým a podkladním materiálem, která vytváří předpoklady pro vznik systému schopného bez porušení přenášet napětí, vyplývající ze zatížení a objemových změn v průběhu plánované životnosti konstrukce. Rozměrová kompatibilita zahrnuje problematiku objemových změn, které jsou často zodpovědné za příčinu poruch sanovaných konstrukcí. S problematikou rozměrové kompatibility úzce souvisí modul pružnosti, teplotní roztažnost, dotvarování a smršťování a její nedodržení nepříznivě ovlivňuje použitelnost i dlouhodobou trvanlivost sanací [11]. Za účelem dosažení úspěšné sanace by měla být zaručena kompatibilita mezi správkovou hmotou a podkladním betonem. Fyzikální a chemická kompatibilita jsou jedna z kritérií, které jsou brána v úvahu při výběru správkové hmoty [12].

Značné úsilí bylo vynaloženo na vývoj a použití polymerbetonu (PC) jako správkové hmoty pro sanaci železobetonu (ŽB). Jeho rychlé vytvrzení, výborná soudržnost s betonem a ocelovou výztuží, vynikající pevnosti a dlouhodobá trvanlivost z něj činí velmi atraktivní správkovou hmotu. Dokonce může být použit jako správková malta v tloušťkách menších než 10 mm. Nicméně, PC nebyl tak široce používán k reprofilaci, jak se původně předpokládalo, kvůli vysoké ceně, nedostatku poznatků dodavatele a konkurenci jiných dostupnějších správkových hmot, jako jsou např. rychle tuhnutí polymercementové hmoty [13].



Obr. 11: Reprofilace poškozeného železobetonu polymercementovou správkovou hmotou [14]



Obr. 12: Sanace zdegradovaného betonu epoxidovou správkovou hmotou [15]

2.5. Zálivkové hmoty

Zálivkové hmoty se používají především k dokonalému vyplnění prostoru mezi základovým betonem a ocelovou konstrukcí nebo jiným železobetonovým prvkem. Výběr kvalitní zálivky se požaduje hlavně při podlévání rozsáhlých technologických celků, jejichž odstávka je v případě špatně provedeného podlití finančně velmi náročná. Některé aplikace zálivkových hmot jsou uvedeny na *Obr. 13* až *Obr. 16*. Mezi hlavní požadavky na zálivkové hmoty se řadí:

- požadovaná viskozita, aby zálivka vyplnila požadovaný prostor,
- výsledné pevnosti,
- minimální smrštění,
- chemická odolnost,
- rychle vytvrzení a dosažení provozních parametrů,
- odolnost proti případnému dynamickému zatížení [16].



Obr. 13: Podlití ocelové základové desky polymercementovou hmotou [16]



Obr. 14: Podlití ocelové základové desky (po vytvrzení zálivky) [16]



Obr. 15: Zalévání patky ocelového nosného sloupu polymercementovou zálivkou [17]



Obr. 16: Zalévání trhliny v betonu epoxidovou zálivkou [18]

Zálivkové hmoty musí většinou vyhovovat normě ČSN EN 1504-3, která je výchozí normou pro sanace železobetonových konstrukcí. Zálivky lze většinou používat také jako kotevní materiály splňující požadavky vyplývající z normy ČSN EN 1504-6, a to především požadovanou kotvicí sílu. Uplatnění zálivek je tedy možné najít taky při kotvení prvků do vodorovných konstrukcí, kde není potřeba žádné opatření pro únik zálivky z vrtaných otvorů [16].

2.6. Kotvicí hmoty

Jako kotvicí hmoty se v současnosti používají především polymerní kotvicí hmoty, tzv. chemické kotvy. Tyto se dělí z hlediska typu použitého polymeru na polyesterové (UPR), vinylesterové (VER), epoxidové (EP) a polyuretanové (PUR) a každá tato chemická kotva je vhodná pro určitý druh kotvení. Ty nejkvalitnější kotvicí hmoty lze použít pro kotvení do veškerých materiálů. Při kotvení v interiéru je vhodné používat takové kotvicí hmoty, které neobsahují styren, protože ten se řadí mezi karcinogenní látku. Příklady použití chemických kotev lze vidět na *Obr. 17* až *Obr. 20*.



Obr. 17: Betonářské výztuže zakotvené do podkladní betonové desky pomocí rychle tvrdnoucí epoxidové chemické kotvy [19]



Obr. 18: Detail zakotvení ocelové závitové tyče pomocí chemické kotvy na bázi EP vysoce plněné křemičitým pískem [20]

Chemické kotvy nebo chemické hmoždinky jsou většinou dvousložková lepidla na bázi epoxidových nebo jiných pryskyřic a různých vylepšujících přísad. Chemické kotvy se používají pro těžká kotvení strojů, ocelových konstrukcí nebo pro obyčejné kotvení do děrovaných cihel, kde ostatní hmoždinky selhaly. Podle použité pryskyřice mají chemické malty určité vlastnosti, které je limitují v použití [21].

Použití chemických kotev aplikovaných na železobetonové konstrukce se datuje do šedesátých let, kdy byly pomocí nich lepeny ocelové plechové výztuže. Zvláště studie o chemických kotvách, které se často používají při zesilování prvků a zařízení, jsou relativně nové a kvůli rozmanitosti aplikačních materiálů je jich na trhu celá řada. Zatím nebyla vydána směrnice, která by poukazovala na limitující faktory ohledně použití chemických kotev na různých typech konstrukcí. Vzhledem k vývoji v posledních několika desetiletích, především po 90. letech, je použití chemických kotev na bázi polymerních

adheziv, jako např. vysokopevnostní polyester, vinylester a epoxid, hodně rozšířeno [23].

- **Kotvení do plných materiálů**

Před samotnou aplikací se doporučuje vyvrtat všechny otvory, do kterých se budou kotvit šrouby a svorníky. Kotvené prvky se musí důkladně vyčistit ocelovým kartáčem a je zapotřebí vyfoukat prach z vyvrtané díry. Při nedodržení montážního postupu se zvyšuje riziko nekvalitního ukotvení prvku. Prach v otvoru vytvoří vrstvu mezi hmotou a základním materiálem a nedojde ke spojení lepidla, šroubu a betonu. Na zvlášť namáhaných ocelových konstrukcích, zábradlích nebo sloupech se po zatvrdnutí provádí kontrola únosnosti pomocí trhacího zařízení na předepsanou únosnost [22].



Obr. 19: Závitové tyče zakotvené pomocí chemické kotvy na bázi EP, připravené pro uchycení těžkých zařízení [24]



Obr. 20: Vinylesterová kotva bez styrenu pro kotvení konstrukcí a tyčí do betonu – princip uchycení v betonu [25]

- **Kotvení do dutých materiálů**

V dnešní době je ve stavebnictví trend stavět z děrovaných cihel nebo tvárnic s příčkami kvůli dobrým tepelně izolačním vlastnostem. Důležité je vrtat díry bez použití příklepu, aby se neporušily komůrky v materiálu, a bylo možno do čeho kotvit. Pevnost kotevního prvku zde závisí na pevnosti materiálu, protože v tomto případě vždy dojde k vytržení nebo vylomení kotvy s kusem zdiva. Pro úsporu množství kotvicí hmoty se do vyvrtaného a řádně vyčištěného otvoru vloží plastová nebo kovová síťka, která zajistí zvětšení únosnosti lepeného spoje po celé své délce a pomáhá regulovat množství kotvicí hmoty vtlačené do otvoru [22]. Příklady kotvení do dutých materiálů lze vidět na *Obr. 21* a *Obr. 22*.



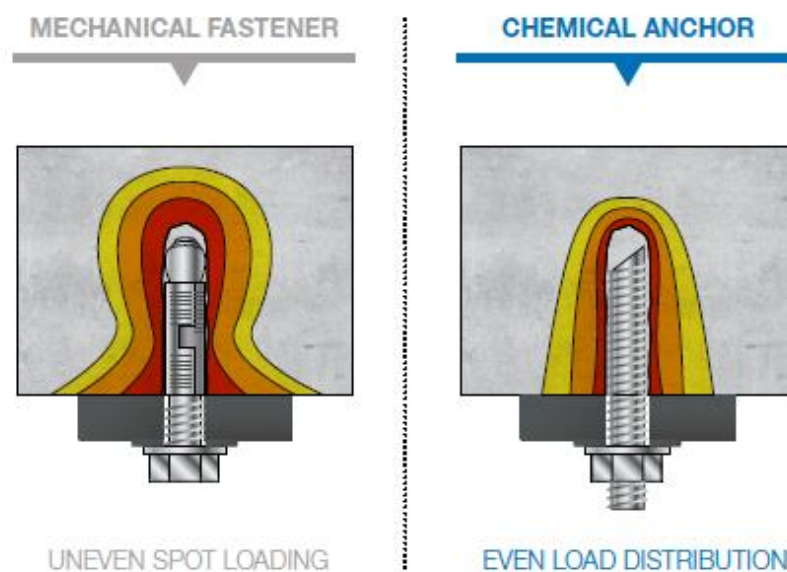
Obr. 21: Příklad kotvení pomocí chemické kotvy do duté cihly [28]



Obr. 22: Příklad kotvení pomocí chemické kotvy do duté betonové tvárnice [29]

- **Výhody kotvení pomocí chemických kotev**

Mechanické upevňovací systémy používané ve stavebnictví se obecně skládají ze závitového dílu uvnitř válcového tělesa s pohyblivými částmi. Když se závitová část otáčí, způsobuje roztažení pohyblivých částí válcového tělesa a tím, že vytváří tření, zabrání uklouznutí upevňovacího prvku. Zatížení v podkladu jsou proto jednostranně lokalizované a nepravidelné. Chemické kotvy však umožňují rovnoměrnější rozložení zatížení po celé ploše stěny otvoru, což znamená, že parametry jako rozteč mezi každou kotvou, hloubka každého otvoru a vzdálenost kotev od okrajů mohou být velmi nápomocné, pokud se požaduje vyšší účinnost a spolehlivost v průběhu řady let. Vzhledem k tomu, že chemické kotvy jsou kompatibilní se všemi použitými typy podkladů a způsoby vrtání, jejich použití zjednodušuje plánování a provádění ve všech směrech [26]. Na Obr. 23 lze pozorovat rozdíl v rozložení napětí při mechanickém kotvení pomocí hmoždinky a při kotvení pomocí chemické kotvy.



Obr. 23: Rozdíl v rozložení napětí při kotvení vysokopevnostního šroubu mechanicky pomocí hmoždinky (vlevo) a pomocí chemické kotvy (vpravo) [26]



































































• Přehled nepoužívanějších chemických kotev

Některé typy v současnosti nepoužívanějších druhů chemických kotev lze vidět v Tab.2. Je zde vidět, že se používají tři hlavní polymerní pryskyřice:

- epoxyakrylátové (vinylesterové) (VE),
- nenasycené polyesterové pryskyřice (UP),
- Epoxidové pryskyřice (EP).

Z Tab. 2 je zřejmé, že nejkratší dobu vytvrzení mají epoxyakrylátové – vinylesterové (VE) a polyesterové (UP) pryskyřice, a to přibližně 30 minut. Tato doba se liší od typu těchto pryskyřic a samozřejmě od okolních podmínek při aplikaci hmoty. Vliv teploty na dobu tuhnutí a možnost počátečního zatížení kotvy je uveden v Tab. 3. Největší možné maximální zatížení lze aplikovat na chemickou kotvu na bázi EP.

Tab. 2: Přehled některých používaných chemických kotev a jejich vlastností [27]

| |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Item No. | FX-V280 | FX-V360 | FX-V380 | FX-HP360 | FX-HP380 | FX-E280 | FX-E360 | FX-E400 | FX-QE400 | FX-QE650 | FX-WE400 |
| Volume | 280ml | 360ml | 380ml | 360ml | 380ml | 280ml | 360ml | 400ml | 400ml | 650ml | 400ml |
| Ratio | 10 : 1 | 10 : 1 | 10 : 1 | 10 : 1 | 10 : 1 | 10 : 1 | 6 : 1 | 3 : 1 | 1 : 1 | 1 : 1 | 3 : 1 |
| Material | Epoxy Acrylate | | | Polyester resin | | Pure epoxy | | | | | |
| Installation temperature |  -5°C ~ 40°C 23°F ~ 104°F | | | | |  10°C ~ 45°C 50°F ~ 113°F | | | | | |
| Gel time | 3 minutes | | | | | 30 minutes | 30 minutes | 15 minutes | 10 minutes | 10 minutes | 15 minutes |
| Curing time | 30 minutes | 30 minutes | 30 minutes | 30 minutes | 30 minutes | 10 hours | 10 hours | 7 hours | 5 hours | 5 hours | 7 hours |
| Shelf life |  12 months | | | | |  24 months | | | | | |
| Max Loads @D10(kgf) | 2586 | 2586 | 2586 | 1535 | 1535 | 3000 | 3233 | 3600 | 3242 | 3242 | 2311 (concrete in water) |
| Metal |  |  |  | | |  |  |  |  |  |  |
| Brick |  |  |  | | |  |  |  |  |  |  |
| Concrete |  |  |  | | |  |  |  |  |  |  |
| Marble |  |  |  | | |  |  |  |  |  |  |
| Stone |  |  |  | | |  |  |  |  |  |  |
| Hollow |  |  |  |  |  | | | | | | |
| Water | | | | | | | | | | |  |
| Case Q'ty | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 10 | 20 |
| Pallet Q'ty | 1400 | 1200 | 1200 | 1200 | 1200 | 1400 | 1200 | 1200 | 1200 | 850 | 1200 |
| CTN Size (cm) | 31x21x27 | 35.8x25x28.5 | 36.2x31.6x28 | 35.8x25x28.5 | 36.2x31.6x28 | 31x21x27 | 35.8x25x28.5 | 36x25x27.5 | 43.3x28x27 | 28x23x30 | 36x25x27.5 |

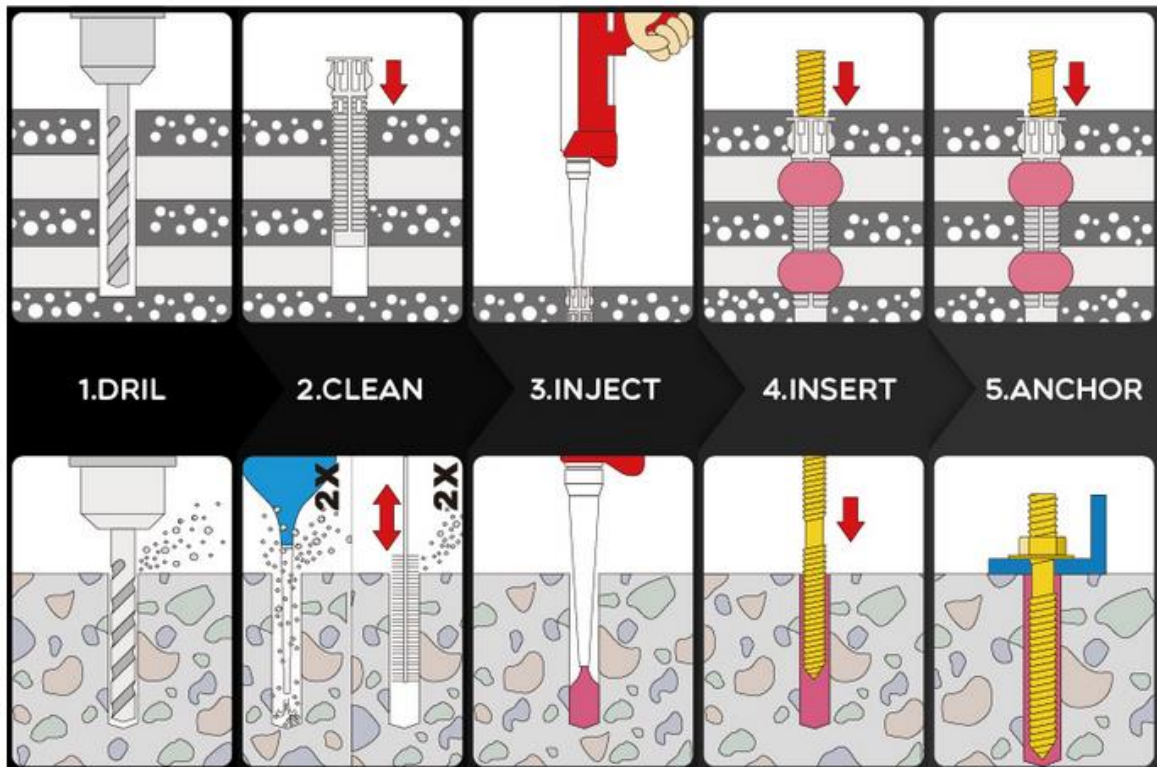
Tab. 3: Vliv teploty na zatuhnutí chemické kotvy a na počátek zatížení [27]

| Teplota při aplikaci (°C) | Čas tuhnutí (min.) | Čas do zatížení kotvy |
|---------------------------|--------------------|-----------------------|
| 40 | 14 | 5 |
| 30 | 28 | 10 |
| 20 | 60 | 18 |
| 10 | 240 | 40 |

- **Princip aplikace chemických kotev do betonového podkladu**

Aplikace polymerních kotevních hmot (chemických kotev) do betonu probíhá v následujících krocích:

1. Vyvrtání otvoru požadovaného průměru a hloubky. Průměr otvoru musí být volen s ohledem na velikost kotevního prvku.
2. Vyčištění vyvrtaného otvoru pomocí vysokotlakého vzduchu, přičemž čištění začíná od dna otvoru (*Obr. 24*). Následně se provede důkladné čištění pomocí ocelového kartáče. Po kartáčování se otvor znova vyfouká vysokotlakým vzduchem, tak aby tam nezůstaly jakékoliv nečistoty.
3. Vtlačení lepidla do vyčištěného otvoru, počínaje od spodní části, za současného pomalého vytahování statického směšovače chemické kotvy. V každém případě je potřeba zabránit uzavření vzduchu ve hmotě. Pro otvory se značnou hloubkou lze použít nástavec.
4. Vložení kotvícího prvku pomalým rotačním pohybem do otvoru vyplněného kotevní hmotou. Část hmoty by měla vycházet z díry.
5. Po dobu vytvrzování pryskyřice se nesmí s kotvou žádným způsobem pohnout a ani nesmí být zatížena [27].



Obr. 24: Znárodnění principu kotvení ocelových prvků do betonu pomocí chemických kotev [27]

- **Požadavky na kotvící hmoty**

Mezi nejdůležitější požadavky, které by měly kotvící hmoty splňovat, se řadí:

- žádný vznik smršťovacích trhlin,
- rychlá doba vytvrzení,
- vysoká soudržnost s podkladem,
- minimální objemové změny vlivem teplotních a vlhkostních změn,
- chemická odolnost,
- vhodná konzistence v čerstvém stavu,
- odolnost proti dynamickým zatížením a rázům,
- odolnost vůči vysokým teplotám,
- vysoká pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu,
- vysoká pevnost v tahu a pevnost ve smyku,
- odolnost proti vytržení při minimálním posunutí,
- mrazuvzdornost [30].

Další požadavky pro kotvící hmoty určené pro kotvení ocelových prutů jsou uvedeny v normě ČSN EN 1504-6, kde jsou tyto požadavky rozděleny na identifikační (Tab. 4) a požadavky na funkční vlastnosti (Tab. 5). Identifikační zkoušky mohou být kdykoliv použity pro potvrzení složení výrobku a přípustné hodnoty jsou uvedeny v Tab. 4.

Výrobce musí taky provést počáteční zkoušky funkčních vlastností výrobků pro kotvení v souladu s Tab. 5, přičemž výrobky musí splňovat uvedené požadavky. Zatvrdlé výrobky pro kotvení nesmí uvolňovat látky, které by byly nebezpečné pro zdraví, hygienu a životní prostředí (ŽP). Zatvrdlé výrobky pro kotvení, obsahující víc než 1 hm. (obj.) % rovnoměrně rozděleného organického materiálu, musí být klasifikovány podle EN 13501-1, a musí být deklarována jejich příslušná reakce na oheň [31].

Tab. 4: Identifikační požadavky na kotvící hmoty určené pro kotvení ocelových prutů [31]

| Parametr | Zkušební postup | Tolerance hodnot zjištěných výrobcem ^a |
|--|-----------------|---|
| Granulometrie suchých složek | EN 12192-2 | Výrobcem deklarované hodnoty a tolerance |
| Infračervená analýza ^b | EN 1767 | Potvrzeno srovnáním ^d |
| Pevnost v tlaku | EN 12190 | > 80 % hodnoty deklarované výrobcem |
| Doba tuhnutí | EN 13294 | Výrobcem deklarované hodnoty a tolerance |
| Zpracovatelnost – zkouška tekutosti | EN 13395-2 | Výrobcem deklarované hodnoty a tolerance |
| Epoxidový ekvivalent ^c | EN 1877-1 | ± 5 % |
| Aminové číslo ^c | EN 1877-2 | ± 6 % |
| Doba použitelnosti ^{b NP)} | EN ISO 9514 | ± 20 % |
| ^a údaje musí dodat výrobce, ^b pouze pro výrobky ze syntetických pryskyřic (PC), ^c pouze pro výrobky z epoxidových pryskyřic (EP), ^d kontrola při známkách změny složení. | | |

Tab. 5: Požadavky na funkční vlastnosti kotevních hmot [31]

| Parametr | Zkušební postup | Tolerance hodnot zjištěných výrobcem ^a |
|---|-----------------|--|
| Vytržení | EN 1811 | Posun ≤ 0,6 mm při zatížení 75 kN |
| Obsah chloridových iontů | EN 1015-17 | ≤ 0,05 % |
| Teplota skelného přechodu T_g^a | EN 12614 | ≥ 45 °C nebo 20 °C nad maximální okolní teplotou konstrukce při provozu, té která je vyšší |
| Dotvarování při tahovém zatížení ^a | EN 1544 | Posun ≤ 0,6 mm po trvalém zatížení 50 kN po dobu 3 měsíců |
| ^a pouze pro PC výrobky | | |

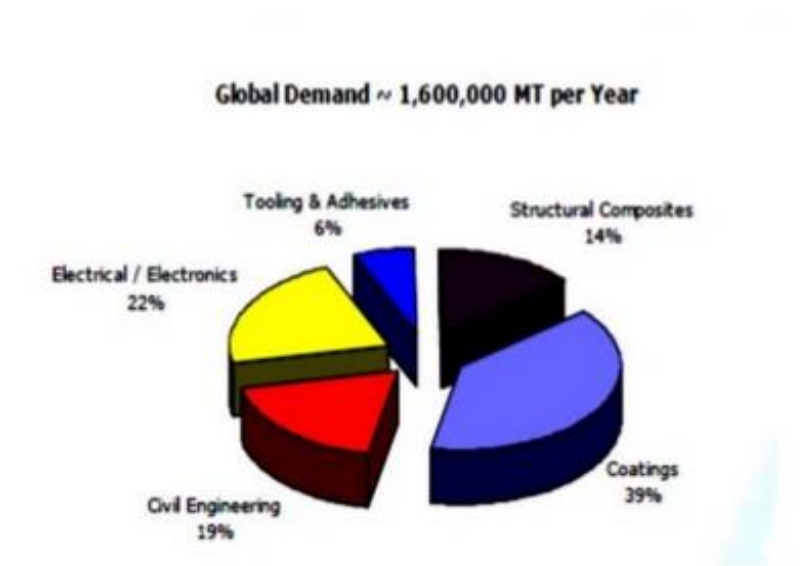
2.7. Specifikace polymerních pryskyřic pro sanační hmoty

2.7.1. Epoxidové pryskyřice (EP)

Pod pojmem epoxidové pryskyřice (EP) rozumíme sloučeniny, které obsahují více než jednu epoxidovou (oxiranovou) skupinu [32]. Nejběžnějším typem jsou produkty alkalické kondenzace epichlorhydrinu s bisfenolem A (85 % světové produkce). Epoxidové pryskyřice (EP) vykazují tyto vlastnosti:

- při vytvrzování dochází jen k minimálnímu smrštění,
- dají se velmi dobře plnit,
- výborná přilnavost na kovy, sklo, beton, dřevo, keramiku a jiné materiály,
- velmi dobré chemické a elektroizolační vlastnosti,
- většina neodolává acetonu a organickým rozpouštědlům,
- teplotní stálost přibližně do 100 °C,
- vysoké pevnosti,
- značná odolnost vůči vodě,
- dlouhodobá odolnost na silikátových a kovových podkladech, široká oblast použití [32][33].

Celková roční poptávka po EP je přibližně 1 600 000 milionů tun, přičemž jejich největší spotřeba je v oblasti nátěrových hmot a v pozemním stavitelství (Obr. 25) [38].



Obr. 25: Oblasti průmyslu, kde se nejvíce využívají epoxidové pryskyřice (EP) [38]

Epoxidové pryskyřice (EP) jsou většinou bezbarvé až nažloutlé hmoty konzistence kapalin a po vytvrzení se dostávají do stavu tvrdých až křehkých látek. Za běžných

podmínek jsou prakticky neomezeně skladovatelné. Nízkomolekulární typy jsou rozpustné v aromatických uhlovodících, vysokomolekulární hlavně v ketonech a esterech [34].

EP odolávají velmi dobře zásadám i zředěným roztokům anorganických i některým slabým organických kyselin. Jejich chemická odolnost stoupá s molekulovou hmotností a stupněm sesíťování. Značný vliv na chemickou odolnost má také druh použitého tvrdidla. Pryskyřice vytvrzené anhydridy dikarboxylových kyselin např. obsahují menší koncentraci hydroxylových skupin, a proto jsou méně navlhavé. Tvrdidla s aromatickým jádrem propůjčují EP zase větší teplotní odolnost než tvrdidla alifatická.

- **Vytvrzování EP**

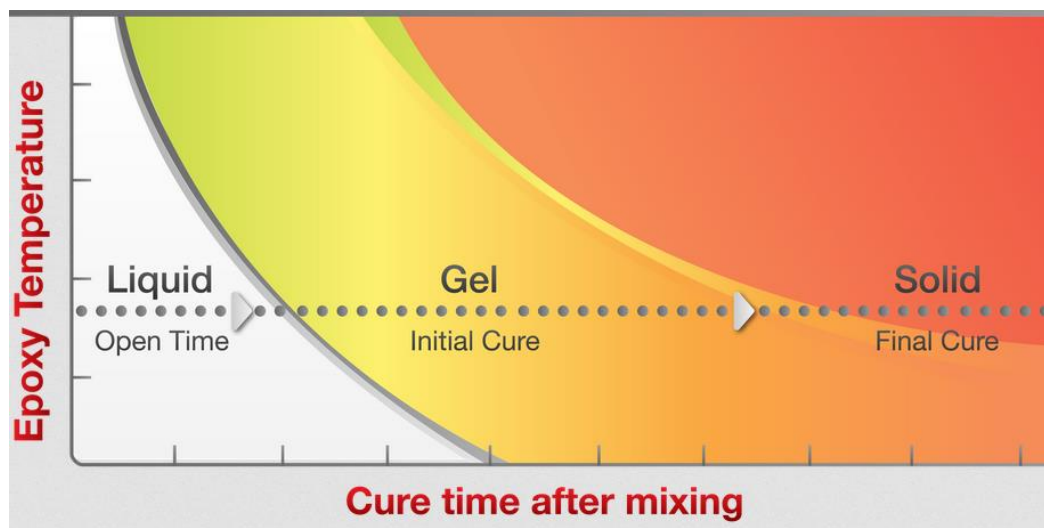
Vytvrzování epoxydových pryskyřic (EP) se provádí pomocí tvrdidel (složka B), což jsou jednak látky schopné reagovat s oxiranovými (epoxidovými), popř. hydroxylovými skupinami přítomnými v pryskyřici, takže se stávají součástí sítě, která vytvrzením vznikne, jednak látky, které pouze iniciují polymeraci epoxidových skupin a vzniklá síť je složená jen ze segmentů EP. U některých tvrdidel však oba typy polyreakcí (polyadice, homopolymerace) probíhají současně a ve vzniklé síti jsou přítomné obě struktury vedle sebe [35]. Při polymeraci zároveň dochází i k malému úniku rozpouštědel, které většinou obsahují obě složky (A, B).

Tvrdidla epoxidů lze rozdělit na polyadiční a polymerační dle toho, zda se při vytvrzování stávají nebo nestávají součástí sítě. Nicméně polymerační tvrdidla ve většině případů reagují adičním mechanismem. Polyadiční tvrdidla obsahují většinou reaktivní vodíky, které se při reakci připojují na epoxidový kyslík za tvorby OH skupiny. Vytvrzování EP probíhá zejména:

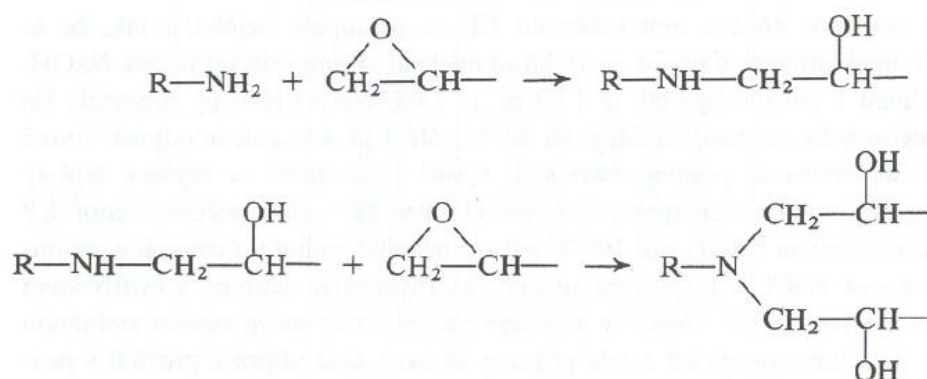
- reakcí s polyaminy,
- reakcí s polythioly,
- reakcí s anhydridy polykarboxylových kyselin,
- polymerací EP etherovými můstky,
- vytvrzování jinými pryskyřicemi [32–34].

Mezi nejčastěji používaná tvrdidla patří v současnosti polyaminy, např. diethylentriamin, m-xylene diamine a další, jejichž princip vytvrzování je na *Obr. 27*. Tyto polyaminy vytvrzující EP za normální teploty se používají zejména pro lepidla, tmely, nátěrové hmoty, lící podlahoviny a polymerbetony. Za nezvýšené teploty proběhne vytvrzení z hlavní části během několika hodin, úplné dotvrzení se dosáhne až po několika dnech. Tato doba se dá zkrátit zvýšením teploty [36]. Závislost doby vytvrzování EP po zamíchání

na teplotě je zobrazena na Obr. 26. Z uvedeného diagramu je patrné, že čímž je teplota EP po zamíchání s tvrdidly vyšší, tím se zkracuje doba pro vytvoření termosetu (reaktoplastu). V průběhu vytvrzování EP nejprve dochází ke tvorbě gelu, a následně v závěrečné fázi vznikne tvrdý epoxid – termoset s vynikajícími vlastnostmi [37].



Obr. 26: Vliv teploty na vytvrzování epoxidových pryskyřic (EP) [37]



Obr. 27: Princip vytvrzování epoxidů pomocí polyaminů [36]

Dále se používají také EP na bázi Bisfenolu F. Tyto pryskyřice mají oproti těm na bázi Bisfenolu A nižší viskozitu a vyšší střední objem epoxidových molekul na gram. Po vytvrzení vykazují vyšší chemickou odolnost [38]. Vědci se snaží zkrátit dobu vytvrzování EP, čímž by se zlepšila efektivita použití EP v praxi. V tomto ohledu Zhang a kol. ve svém výzkumu [39] navrhovali předeřátí forem a dalších přísad používaných v při výrobě kompozitních materiálů na bázi EP.

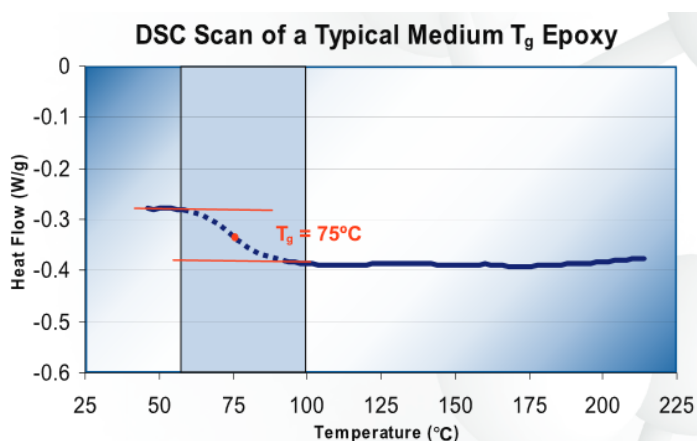
- **Teplotní odolnost**

Teplota skelného přechodu (T_g) standardních EP se pohybuje nejčastěji v rozmezí 135 až 140 °C, zatímco u nejkvalitnějších EP je T_g přibližně 170–180 °C [39]. Teplota skelného přechodu (T_g) je velmi důležitým parametrem EP a kompozitů s epoxidovou maticí

především z toho důvodu, že na základě hodnoty T_g lze stanovit podmínky pro použití těchto materiálů. Ve většině aplikací se EP používají při teplotě pod T_g (tj. ve sklovitém stavu). Obvykle, když je materiál vystaven vlhkostnímu prostředí, T_g klesá, a proto se mění provozní teplota materiálu. Tato změna v T_g úzce souvisí se stupněm plastifikace pryskyřice a případně interakcí mezi vodou a pryskyřicí, pokud se vyskytuje v materiálu. Identifikace mechanismů zodpovědných za změnu T_g a schopnost předvídat její pokles je rozhodující aplikaci materiálu a konstrukční návrhy, kde se plánuje využití materiálů na bázi EP [40]. I když je hodnota T_g EP (nebo jakéhokoli jiného materiálu na bázi termosetu) obecně uváděna jako jediná hodnota, T_g je ve skutečnosti rozmezí teplot. Uvedená hodnota je obecně středem tohoto rozsahu přechodových teplot. Při teplotách vyšších než T_g , začne materiál měknout a ztrácí určitou pevnost v tahu. Krátké teplotní odchylky nad T_g nezmění trvale fyzické vlastnosti materiálu. Když se materiál vystaví znova nižším teplotám, obnoví se jeho původní fyzikálně-mechanické vlastnosti [41]. T_g lze měřit pozorováním změn fyzikálních vlastností materiálu vlivem změny teploty. Tyto vlastnosti zahrnují tepelnou kapacitu, koeficient tepelné roztažnosti a tuhost. T_g se obecně měří pomocí jedné z následujících metod:

- Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC)
- Dynamická mechanická analýza (DMA)
- Diferenční termická analýza (DTA)

Každá z těchto metod měří jinou fyzikální vlastnost, která je charakteristická pro přechodovou teplotu. V důsledku toho každá metoda produkuje mírně odlišný výsledek s variacemi v rozmezí od 5–30 ° C [41]. Ve většině případů se T_g materiálů na bázi EP stanovuje pomocí DSC metody podle normy ASTM E1356 (Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperature by Differential Scanning Calorimetry). Princip stanovení teploty skelného přechodu T_g je uveden na *Obr. 28*, přičemž zde byla u zkoušeného materiálu zjištěna $T_g = 75$ °C. Výstup z DSC analýzy je formátem podobným kinetickému diagramu, s tou výjimkou, že se provádí s vytvrzeným vzorkem. Teplota je zobrazena na ose x a tepelný tok je na ose y [42].



Obr. 28: Princip stanovení teploty skelného přechodu (T_g) pomocí výstupu z DSC analýzy [42]

- **Vodou ředitelné EP**

Regulační iniciativy zabývající se plněním limitům pro zabezpečení čistého ovzduší jsou hlavním impulsem pro zpracovatele a uživatele, aby zvážila používání vodou ředitelných epoxidových systémů. Tato striktní regulační politika není nic nového a je to již více než 20 let od přijetí zákona o čistém ovzduší v roce 1990. V současnosti organizace jako např. agentura pro ochranu životního prostředí USA (EPA), Komise pro přepravu ozonu (OTC), Kalifornská rada pro letecké zdroje (CARB) a Jihozápadní oblast pro řízení kvality ovzduší (SCAQMD) nadále stanovují stále více omezující omezení pro obsah organických těkavých látek (VOC) v nátěrech využívaných především při architektonických a průmyslových údržbách (AIM). Vysoká poptávka po ekologických a trvale udržitelných produktech, které lze certifikovat narůstá ve všech vyspělých zemích. Už se nejedná jenom o legislativní restriktce, které prosazují změny, ale také se bere v úvahu poptávka spotřebitelů. Mezi některé z klíčových výhod používání vodou ředitelných EP se řadí:

- ultra nízký obsah VOC,
- minimální zápach,
- nezapalitelné a nehořlavé,
- rychle tuhnutí a vyschnutí nátěru – nanesení další vrstvy v krátkém čase,
- snadné čištění povrchu (bez nutnosti použití rozpouštědel),
- celkově vyvážené fyzikálně-mechanické vlastnosti.

Vodou ředitelné EP mohou být využité při různých aplikacích nátěrů, kde se v současnosti využívají EP s vysokým, nízkým nebo žádným obsahem rozpouštědel. Ve skutečnosti se tyto druhy EP stávají první volbou pro aplikaci v praxi především v oblasti dopravy, barevných podlahových nátěrů a průmyslové údržbě [43].

2.7.2. Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP)

Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP) je obecný název pro řadu výrobků na bázi termosetů, zejména těch, které jsou připravovány kondenzací (nenasycené) dikarboxylové kyseliny a dvojsytného alkoholu. Kondenzační produkty jsou rozpuštěny v reaktivním monomeru, kterým je obvykle styren. Pokud se tato směs vytvrdí, vznikne trojrozměrná síť. Rozdílných parametrů UP pryskyřic lze dosáhnout volbou dikarboxylové kyseliny (nasycené a nenasycené) a diolů a jejich rozpuštěním v různých reaktivních monomerech. Použitím vhodné kombinace výchozích látek je možné ovlivnit např. tyto vlastnosti UP pryskyřic:

- tepelná odolnost,
- odolnost vůči hydrolyze,

- pevnost v nárazu,
- pružnost,
- elektrické vlastnosti,
- samozhášecí vlastnosti.

Obecně nepoužívanějšími nenasycenými dikarboxylovými kyselinami jsou kyselina maleinová a fumarová. Nepoužívanějšími nasycenými karboxylovými kyselinami jsou kyselina ftalová, isoftalová a tereftalová. Běžně používanými dioly jsou etylenglykol, diethylenglykol, propylenglykol, butandiol, hexandiol, dipropylenglykol a neopentylglykol. Zvláštní skupinu nenasycených pryskyřic tvoří vinylestery, které jsou založeny na bisfenolu A a kyselině metakrylové [45].

- *Iniciátory a urychlovače*

Pro vytvrzení pryskyřic se používají iniciátory. Tyto iniciátory, většinou organické peroxidy, zahajují kopolymeraci monomeru a polyesteru nebo vinylesteru. Vytvrzování může probíhat při běžné teplotě (vytvrzení za studena) nebo při zvýšené teplotě (vytvrzení za tepla) nebo lze pro vytvrzení použít záření. V závislosti na vytvrzovacím mechanismu může být složení pryskyřice doplněno i o urychlovače jakými jsou: soli kobaltu nebo aminy, používané pro rozklad peroxidů za pokojové teploty, nebo mohou obsahovat fotoiniciátory [45].

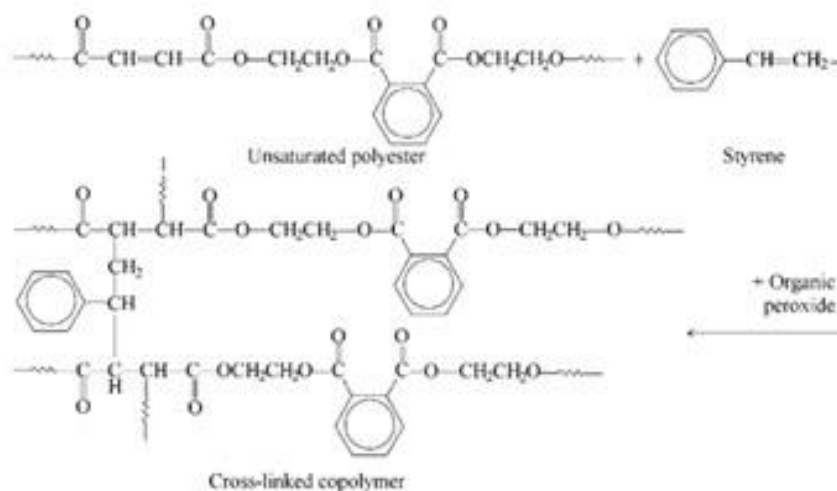
- *Aditiva a plnidla*

Mezi nejčastěji používaná aditiva a plnidla UP se řadí UV stabilizátory, které zpomalují zežloutnutí a postupnou degradaci materiálů. Dále se používá SiO_2 , který ovlivňuje chování UP během zpracování. Jako plniva se používají různé materiály, jako křemičitý písek nebo periklas (MgO). Dále se používají různá barviva, pigmenty a samozhášecí činidla [45].

V současnosti je na trhu k dispozici mnoho typů polyesterových pryskyřic (UP). Pro výrobu polymerbetonu (PC) je vhodné používat nenasycenou isofatalickou polyesterovou pryskyřici. PC vyroben z této UP je tvrdý, tuhý a vykazuje vysoké mechanické pevnosti. Použití této pryskyřice pro výrobu PC je výhodné také z cenového hlediska. Avšak, není vhodné tuto pryskyřici používat při výrobě tlustostěnných výrobků, protože se mohou vyskytnout po vytvrzení trhliny vlivem vnitřního namáhání souvisejícího se smršťováním. Bylo prokázáno, že PC na bázi této UP pryskyřice s křemičitým pískem jako plnivem lze výhodně aplikovat do podloží pod obráběcí stroje, protože je schopen účinně tlumit přenášené dynamické zatížení [45].

Nátěrové systémy obecně obsahují polyesterovou pryskyřici (UP) rozpuštěnou ve vinylovém monomeru, která se následně zasiluje a vytvrdí mícháním v katalyzátoru (iniciátoru) těsně před použitím (*Obr. 29*). Polymerizační mechanismus zahrnuje

přidávání volných radikálů přes dvojně vazby, a proto se nevyvíjejí žádné těžké vedlejší produkty [46].



Obr. 29: Mechanismus vytvrzování nenasycených polyesterových pryskyřic (UP) [46]

2.7.3. Vinylesterové (epoxy-akrylátové) pryskyřice

Vinylesterové pryskyřice (VE) se v současnosti využívají především pro výrobu chemických kotev a lze je také využít pro výrobu správkových hmot. VE se vyrábějí reakcí (esterifikací) mezi epoxidovou pryskyřicí (EP) a nenasycenou monokarboxylovou kyselinou. V podstatě jako základ obsahují polyesterovou pryskyřici zesílenou epoxidovými molekulami v hlavním molekulárním řetězci. VES používají jako iniciátory také peroxidy, přičemž oba typy pryskyřic se mohou ředit pomocí rozpouštědel jako je např. styren [47].

VE pryskyřice bývají navrhovány mnohem specifičtěji než PES pryskyřice, neboť jsou jejich hybridní formou, která byla posílena přidáním řetězce EP. Při aplikaci do konstrukcí s vysoce agresivním chemickým prostředím je jejich použití výrazně vhodnější, a to především v případech kdy je potřeba zaručit odolnost vůči organickým rozpouštědlům. Dále vykazují vyšší odolnost vůči větším vibracím, protože jsou odolnější vůči roztažení než PES pryskyřice a také vůči popraskání při zatížení. Z toho důvodu jsou schopny absorbovat větší rázy bez poškození. VES vazba je zesíťovaná podobným způsobem, jako je tomu u PES pryskyřic – zesíťování bočních skupin podél hlavního řetězce. Ačkoli VE mají menší schopnost absorbovat vodu, než je tomu u PES v důsledku těsněji vázané struktury bočních skupin, které poskytují menší oblasti pro přístup molekul vody k „napadení“ hlavního řetězce a solubilizaci bočních řetězců, i tak vykazují určitý stupeň absorpce pro vodu, která může oslabit jejich strukturu. Sesíťování bočních řetězců je důvodem, proč mají VES vynikající tepelnou stabilitu [48].

2.7.4. Polyuretanové pryskyřice (PUR)

Polyuretanové pryskyřice (PUR) se využívají především pro výrobu litých podlah, chemických kotev a zálivkových hmot.

PU mají především tu výhodu, že mají nízkou viskozitu, vynikající spojení s plnivem, bez nutnosti speciálního rozmělnění vláken, relativně nízkou cenu a rychlou dobu vytvrzení. PUR jsou důležitou a velmi univerzální třídou mezi polymerními materiály s požadovanými vlastnostmi, jako je vysoká odolnost proti otěru, odolnost proti natržení, vynikající tlumení nárazů, pružnost a elasticita. Obvykle se používají jako lepidla, nátěry, pěny a různé druhy plastů a elastomerů, ale také jako polymerní matrice pro kompozity. Atraktivita PU pramení především z jejich vynikající zpracovatelnosti (nízká viskozita), vynikajícího spojení s různými podklady, nepřítomnosti těkavých látek (VOC) a příznivých ekonomických nákladů. Vytvrzení systémů na bázi PU může být katalyzátory sníženo na několik minut [49].

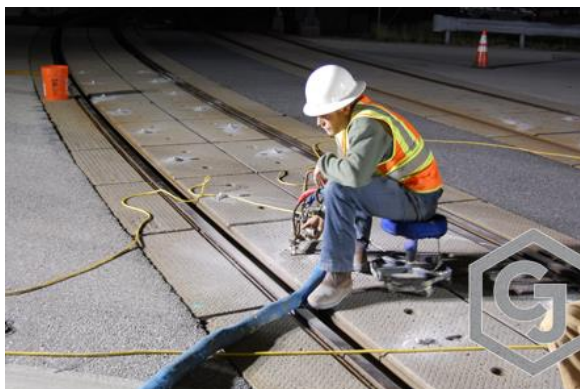
Podlahové vrstvy na bázi polyuretanových pryskyřic (PUR) nacházejí ve stavebnictví velmi široké uplatnění. Vynikají především vysokou chemickou odolností vůči koncentrovaným kyselinám (až do koncentrace 92 %), díky které se řadí mezi chemicky velice odolné polymery. Dále odolávají organickým rozpouštědlům, ropným produktům a jiným nebezpečným chemikáliím, s nimiž se lze setkat při průmyslové výrobě a skladování nebezpečných látek. V neposlední řadě se vyznačují také vynikající pružností, z čehož plyne jejich využití i pro vodotěsné povlaky [50].

PU materiály lze aplikovat na většinu nových, ale také původních podkladů, dále na silně znečištěné plochy (zaolejované prostory), na nové, strojně hlazené betonové podlahy, vyzrálé betony, zvětralé a jinak poškozené betonové plochy, staré nátěry, keramickou a teracovou dlažbu, asfaltobetonu a další podklady [51].

PUR systémy na zalévání kolejí jsou většinou tvrdě elasticky vytvrzované a 2-komponentní, přičemž neobsahují rozpouštědla. Jsou vhodné pro zhotovení tvrdého elastického podlití s vlastnostmi pro utlumení chvění v celé oblasti staveb a montáží. PUR zálivkové systémy jsou zvláště vhodné pro upevňování kolejnic v oblasti ocelových a betonových mostů, v pracovních jamách, u jeřábových drah s vysokými tlaky kol a jako výškové vyrovnání při použití pružného systému. V zesíťovaném stavu jsou tyto materiály tvrdě elastické a při zalévání kolejnic mohou být zatěžovány již po 24 hodinách. Většinou vytváří vrstvy podobné tvrdé gumě a má vysokou odolnost vůči otěru a lze je použít pro nejvyšší zatížení při bezpražcovém pokládání kolejnic, při plošných tlacích > 20 MPa [52].

PUR injektáž je rychlý a ekonomický sanační proces pro regeneraci sednutého a nestabilního betonu. Vzhledem k malé velikosti otvoru a schopnosti zvedat větší plochy

přes otvor, je PUR injektáž mnohem rychlejší než zvedání a oprava desek. Vzhledem ke konstrukci zařízení používaného při injektážích lze zvedat desky během 10 minut od příjezdu. PUR s vysokou hustotou je vodotěsný, takže opravené desky jsou důkladně podchyceny. PUR může být také instalován ve vodě, takže průtokové zkoušky nebo zkouška nepropustnosti s aktivním prouděním nejsou problémem. Díky téměř okamžitému vytvrzení jsou práce, pomocí nichž lze zastavit úniky vody velice rychlé a testy pro zajištění kvality provedené práce na místě jsou velice snadné a lehce vyhodnotitelné. Některé aplikace použití PU záливок jsou vidět na *Obr. 30* a *Obr. 31* [53].



Obr. 30: PUR injektáž při opravě úrovnňového přejezdu [53]



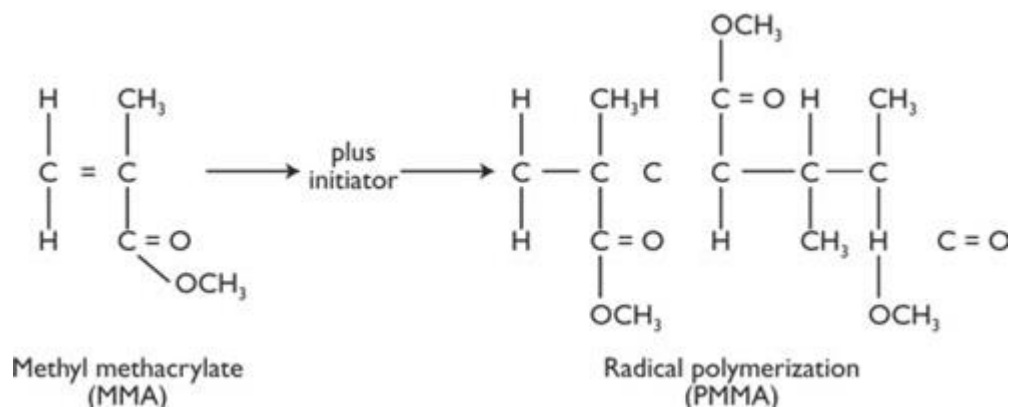
Obr. 31: PUR injektáž parní tunelové hydroizolace [53]

2.7.5. Methylmetakryláty

Methylmetakryláty (MMA) se používají především pro výrobu polymerních správkových a záливоkových hmot. Jedná se většinou o polymerbetony (PC) a polymermalty (PM) s optimálním plnivem využitelné v oblasti sanace betonových ploch.

MMA pryskyřice jsou vytvrzované radikálovou polymerací (*Obr. 32*). Mají nízkou viskozitu, která není ovlivněna teplotou. MMA krystalizuje při teplotě $-48\text{ }^{\circ}\text{C}$ a plného vytvrzení může být dosaženo během několika hodin i při $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$. Přídavkem „radikálních donorů“ ve formě 50% granulovaného prášku benzoyl peroxidu se iniciuje proces vytvrzování. Akrylové molekuly, které jsou odpovědné požadované vlastnosti těchto reaktivních pryskyřic, jsou již přítomné a nemusí vzniknout další chemickou reakcí. Jedinou funkcí iniciátoru je potlačit inhibitor v pryskyřici, který je tam přidán pro skladování a přepravu, a iniciovat radikálovou polymerizační reakci. Iniciátor tedy nemá žádný vliv na výsledné fyzikálně-mechanické vlastnosti vytvrzeného materiálu. Tvorba chemického řetězce polymerované pryskyřice jasně poukazuje na to, že hlavní řetězec je obklopen a chráněn rozvětvenými skupinami. To je hlavní důvod, proč akryláty na bázi MMA mají tak vynikající odolnost vůči povětrnostním vlivům a vysokou chemickou odolnost. Iniciátor se téměř okamžitě rozpouští, což poskytuje vytvrzenému materiálu jeho konzistentní a předpokládané vlastnosti. Jakmile začne iniciátor působit,

vytvrzovací proces je nezastavitelný a z 99 % je kompletní za jednu až dvě hodiny. V té době už v systému nezůstává žádný nezreagovaný monomer. Výsledkem je systém, který má konstantní fyzikální vlastnosti. Rychlý proces vytvrzení umožňuje rychlé provedení sanace a povrchových úprav za o mnoho kratší čas, než je tomu u ostatních používaných materiálů [54].



Obr. 32: Radikálová polymerační reakce MMA akrylátových reaktivních pryskyřic [54]

Mezi hlavní výhody PC a PM na bázi MMA patří:

- široký rozsah teplot pro aplikaci (-10 °C – 38 °C),
- rychlé vytvrzení: 45 min. při 21 °C a 90 min. při -10 °C,
- vysoké počáteční pevnosti,
- silné chemické spojení (bez studených spojů),
- chemická odolnost,
- odolnost vůči UV záření,
- mrazuvzdornost,
- voděnepropustnost,
- snadná aplikovatelnost [55].

Polymerbetony (PC) a polymermalty (PM) na bázi MMA jsou určeny pro použití při nové výstavbě a rekonstrukci mostovek, dilatačních spár, opěrných výstupků, letištních ploch a dalších betonových konstrukcí. Tyto materiály jsou určeny pro novou výstavbu i sanaci, a jednoduše se aplikují ve všech pracovních podmínkách, přičemž se nevyžaduje mít žádné speciální vybavení. Použití PC na MMA bázi při sanaci betonových ploch lze vidět na Obr. 33 a Obr. 34. Lze ho také plnit speciálními plnivý a používá se při částečné nebo hloubkové sanaci v jediném pracovním kroku u většiny aplikacích. Tento systém se používá na betonovém vodorovném povrchu, na stupních, nad a pod úrovní terénu a může být také čerpán [55].



Obr. 33: Aplikace MMA polymerbetonu při sanaci mostovky [55]



Obr. 34: Aplikace MMA polymerbetonu při sanaci mostovky [55]

2.8. Plniva

Plniva jsou definována jako materiály, které jsou přidávány do polymerních materiálů za účelem snížení výrobních nákladů nebo pro zlepšení požadovaných vlastností. Takové materiály jsou nejčastěji ve formě pevného skupenství, ale mohou být i v tekuté nebo plynné podobě. Vhodným výběrem těchto plniv lze zlepšit nejen ekonomické aspekty, ale i další vlastnosti jako je zpracovatelnost a mechanické parametry. Přestože si plniva zachovávají i po zamíchání svých specifických vlastností, často se vyskytují významné rozdíly, v závislosti na molekulové hmotnosti, míchacím procesu a přítomnosti dalších aditiv v polymerním systému. Z toho důvodu, jakmile jsou stanoveny základní požadavky na vlastnosti hmoty, musí být zvolen optimální typ plniva při současném zabezpečení vyváženosti mezi náklady a výslednými vlastnostmi. Plniva jsou klasifikována různými způsoby, od jejich tvaru až po specifické vlastnosti. Obecně lze plniva využitelná do polymerních matric rozdělit na dvě kategorie, a to:

- „extender fillers“ – plniva, které především zlevňují výrobu materiálu (výplňové),
- „functional fillers“ – kromě snížení ceny výrazně zlepšují některé vlastnosti (funkční).

První typ plniv, které se používají především pro snížení ceny by měly vykazovat tyto vlastnosti:

- kulovitý tvar za účelem zachování anizotropních vlastností,
- vhodná distribuce velikosti částic v balení,
- nezpůsobovat žádnou chemickou reakci s polymerem nebo přísadami,
- nízká měrná hmotnost,
- vhodný index lomu a požadovanou barvu,
- nízké náklady na pořízení [56].

Avšak pokud jsou některé z těchto typů plniv upraveny na jemnější částice a/nebo povrchově upraveny mohly by fungovat také jako funkční plniva. Plniva, která jsou funkční v jednom polymeru, mohou být pouze výplňovými plnivými v jiném polymeru. Tyto skutečnosti komplikují úlohu vytvoření jasných hranic mezi výplňovými a funkčními plnivými z pohledu jejich obecného složení [56].

2.8.1. Vliv typu a množství plniva na mechanické vlastnosti PC a PM

Doposud bylo vypracováno velké množství studií, zabývajících se vlivem typu a množství plniva na některé výsledné fyzikálně-mechanické vlastnosti polymerbetonů (PC) a polymermalt (PM). Jednotlivá zjištění jsou uvedena v následující Tab. 6.

Tab. 6: Shrnutí vlivu typu a množství plniva na mechanické vlastnosti PC [59]

| Typ pryskyřice | Použité kamenivo a mikroplnivo | Proměnné | Hodnocené vlastnosti | Stručné zjištění |
|----------------|---|---|--|---|
| UP | drcené kamenivo, říční písek, CaCO ₃ | Obsah pryskyřice 10–15 %, obsah plniva 10–15 %, teplota 5–60 °C | Pevnost v tlaku, pevnost v tahu | Pevnost v tlaku a pevnost v tahu se snižují s teplotou vytvrzování. |
| UP | Drcené kamenivo, jemný písek | Silanová úprava, obsah pryskyřice 9–13 % | Pevnost v tlaku, únavová pevnost | Obsah pryskyřice neměl výrazný efekt na pevnost v tlaku. Nárůst teploty byl zaznamenán při frekvenčním rozsahu 200–400 Hz. 1% přídavek silanového činidla zvyšuje úroveň odolávání zátěže 2 milionů cyklů z 59 % až na 64 % konečné pevnosti. |
| EP, UP | Drcený křemenec, křemičitý písek, CaCO ₃ | typ polymeru, silanová úprava a přídavek mikroplniva | Pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, pevnost v příčném tahu | PC na bázi EP má mnohem lepší vlastnosti než UP-polymerbeton. Pevnost v tlaku stoupá o 30 % u UP-PC a o 36 % u EP-PC zabudováním |

| | | | | |
|--------|-----------------------------------|--|--|---|
| | | | | silanového vazebního činidla. Pevnost v tlaku a tahu za ohybu UP-PC se výrazně zvýšila použitím mikroplniva. |
| UP | Ottawa písek | Teplota, rychlost deformace, obsah pórů, metoda přípravy, obsah pryskyřice | Pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu | Maximální hodnota modulu pružnosti v ohybu a v tlaku je pozorována při obsahu pryskyřice mezi 14 až 16 % hm. Rychlost deformace má minimální vliv na ohybové vlastnosti. Hutnění PC lisováním má pozitivnější vliv na výsledné vlastnosti než hutnění vibrováním. |
| EP, UP | Ottawa písek, písek z otruskávání | Obsah pryskyřice, úprava silanem, zhutnění, obsah skleněných vláken | Pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, pevnost v příčném tahu | Max. pevnost v tlaku a v tahu za ohybu byla zaznamenána při 14% obsahu pryskyřice. Přidání skelných vláken zvyšuje pevnost v tahu za ohybu i v tlaku. Úprava silanem zvyšuje pevnost v tahu za ohybu o 25 %. |
| EP, UP | Ottawa písek, písek z otruskávání | Teplota, rychlost deformace, typ kameniva, podmínky vytvrzování | Pevnost v tlaku, pevnost v příčném tahu | Pevnost v tlaku se zvyšuje s teplotou vytvrzování. Maximální pevnost byla dosažena po jednodenním vytvrzováním při pokojové teplotě a následném jednodenním |

| | | | | |
|--------|--|--|--|---|
| | | | | vytvrzováním při 80 °C. Použitím kameniva různých frakcí bylo dosaženo nejvyšší pevnosti v tlaku. |
| UP | Granitové kamenivo (ASTM č. 5-50), říční písek, popílek | Obsah popíku a říčního písku byl měněn v plném rozsahu (0-100 %) jemného kameniva za účelem sledování substituce písku za popílek. | Pevnost v tahu za ohybu | Jemné kamenivo v podobě kombinace popílku a říčního písku vykazuje synergický efekt, co se týče pevnosti a také nasákavosti až do 75% hm. obsahu popílku. Při vyšším obsahu popílku se výsledné vlastnosti zhoršují, jelikož směs se nedá pořádně zhomogenizovat – popílek má vysoký měrný povrch a nelze ho pořádně zamíchat s pryskyřicí. |
| UP | 58 % drcená žula, 21,8 % písek, 10,4 % CaCO ₃ | – | Pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu | Byla zaznamenána pevnost v tlaku v rozmezí 90–108 MPa |
| EP, UP | Čistý písek, slévárenský písek, CaCO ₃ | Obsah pryskyřice a mikroplniva, typ písku, perioda vytvrzování (7dní při 23 °C a 3 hod. při 80 °C) | 3-bodový ohyb na vzorcích 40 x 40 x 160 mm | 3-hodinové vytvrzování při 80 °C poskytuje téměř stejné výsledky jako 7denní vytvrzování při 23 °C. EP vykazuje lepší vlastnosti se slévárenským pískem jako plnivem, zatímco UP má lepší vlastnosti s čistým pískem, kvůli vyšší kapacitě EP k nasáknutí plniva. |

| | | | | |
|----------------|---|--|--|---|
| UP | Drobný štěrk jako hrubé kamenivo a písek jako jemné plnivo, popílek | Obsah popílku | Pevnost v tlaku | Nahrazením 15 % hm. písku popílkem má za následek 30% zvýšení pevnosti v tlaku. Avšak je potřeba být opatrný při použití vyššího množství popílku, protože vysoký měrný povrch popílku může způsobit, že hmota se stane příliš lepkavá a nebude se dít zpracovat. |
| EP | Říční štěrk (0–4 mm, 4–8 mm), mikrosilika | Obsah pryskyřice, obsah mikroplniva | Pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, pevnost v příčném tahu | Pevnost v tlaku se pohybovala od 43,4 do 65,3 MPa a pevnost v tahu za ohybu od 12,3 do 17,5 MPa. 15,6% obsah pryskyřice byl nejvhodnější z pohledu vlastností polymerbetonu. |
| PES z odp. PET | Drobný štěrk, říční písek, popílek | Čas vytvrzování | Pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu | Autoři jako optimální recepturu pro další studium navrhli: 10 % pryskyřice, 45 % štěrku, 32 % písku a 13 % popílku. PC dosahuje po 1 dni 80 % 7d pevnosti. |
| UP | Křemičitý písek, CaCO ₃ | Použití recyklovaných plniv (prášková pryž, guma z pneumatik atd.) | Tlumení, ztrátový modul | Přidání práškové pryže, gum z pneumatik atd. zvyšuje tlumení v širokém rozmezí teplot. PC obsahující organická plniva může být použit pro zhotovení základů obráběcích strojů. |

Přidáním různých druhů vláken, jako jsou skleněná, ocelová a uhlíková vlákna do polymer betonu (PC) se zvýší jeho mechanické vlastnosti, jako je houževnatost, pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu a únavová pevnost. Obvyklá dávka vláken v PC činí až 6 hm. % z celkové hmotnosti PC. Bylo zjištěno, že silanová úprava vláken před jejich přidáním do PC ještě více zlepšuje jeho mechanické vlastnosti. Přídavkem mikroplniv, jako je popílek, mikrosilika, vápenec a další do PC se prokázalo nejen zlepšení mechanických vlastností, ale také zpracovatelnosti čerstvé směsi. Přidáním 15 % popílku do PC se zaznamenalo zvýšení pevnosti v tlaku až o 30 % [59].

2.8.2. Primární plniva

V současnosti se ještě stále jako plniv do polymerních sanačních hmot nejčastěji využívá primárních plniv, jako např. křemičitý písek, korund, mastek, jíly, grafit. Dále je snaha využívat i nanoplniv pro zlepšení některých fyzikálně-mechanických vlastností polymerních sanačních hmot a polymer betonu jako např. lomovou houževnatost. Dále jsou popsány nejvíce využívány primární plniva do polymerních hmot.

- **Křemičitý písek**

V oblasti průmyslových epoxidových podlah je jedním z nejčastěji používaných plniv právě křemičitý písek (*Obr. 35*). Křemen je notoricky tvrdý minerál, což z něho dělá ideální plnivo do průmyslových podlah.

Zabezpečení protiskluznosti – účelem použití křemičitého písku je dosažení hrubé struktury na podlaze, což poskytne podlaze protiskluzné vlastnosti. Písek se aplikuje na ještě nevytvrzený povrch vrchní vrstvy. Čím je použito větší zrno písku, tím je dosažen vyšší koeficient protiskluznosti.

Plnivo pro samonivelační systémy – křemičitý písek je většinou jako třetí složka polymerních samonivelačních podlah, kde má dvě hlavní funkce. Zvyšuje tvrdost podlahového potěru a snížení spotřeby epoxidové pryskyřice, aniž by došlo ke zhoršení výsledných fyzikálně-mechanických vlastností. V takových systémech písek nezůstane viditelný po vytvrzení a výsledný povrch podlahy je hladký a bez poruch.

Plnivo pro injektáže a zálivky – velké množství písku v epoxidové matrici může způsobit, že výsledný produkt bude sloužit jako správková malta a zálivka ve větších tloušťkách. Tyto materiály mohou být použity injektáže různých otvorů, opravu trhlin vytvářejících značné poškození kolem okrajů podlahy. Avšak, ne všechny EP jsou vhodné pro takovou aplikaci (např. epoxidové systémy s vysokým obsahem rozpouštědla by neměly být míchány s křemičitým pískem) [57].



Obr. 35: Ruční stěrkování sanované podlahy pomocí epoxidové stěrky plněné křemičitým pískem [58]

- **Žula a gabro**

Epoxidová žula (epoxy granite) je vyztužený kompozitní materiál na bázi epoxidové pryskyřice (EP) a plniv ve formě drtě a jemného prášku vyrobeného z vysokopevnostní žuly nebo gabra a diabasu. Patří do kategorie polymerbetonu (PC) a vykazuje vynikající mechanické vlastnosti. Epoxidová žula se používá v různých oblastech, jako je strojírenství, konstrukční a stavební materiály, kde je vyžadováno vysoké tlumení rázů, chemická a tepelná odolnost spolu s jednoduchou a efektivní přípravou. V současnosti se epoxidová žula řadí mezi jeden z nejslibnějších kompozitních materiálů díky svým fyzikálním, mechanickým a chemickým vlastnostem při současné efektivitě její přípravy a aplikace.

- **Negativní aspekty využívání primárních plniv**

Vzhledem ke stále rostoucí poptávce po využívání přírodních zdrojů, se písek a štěrk staly nejvíce vytěženou skupinou materiálů po celém světě. Vědci zároveň varují, že je velice těžké tuto činnost v globálním měřítku kontrolovat. Nekontrolovatelná těžba těchto surovin může vézt k významným socio-politickým, ekonomickým a environmentálním dopadům. Podle vědců totiž písek a štěrk představují v celosvětovém měřítku 68–85 % z 59 miliard tun materiálu, který je každoročně vytěžen z povrchu Země a tento podíl stále narůstá. Studie přitom prokázala, že nadměrná těžba písku může mít velice negativní vlivy na prostředí ve kterém žijeme. V některých oblastech již vedla ke ztrátě zvířecích i rostlinných druhů a k degradaci přírodního prostředí nebo nadměrné erozi. Zpráva Organizace spojených národů (OSN) z roku 2014 uvádí, že lidé vytěží více než 40 miliard tun štěrku a písku ročně – z lomů, řek a pobřežních oblastí. Zarážející přitom je,

že toto množství představuje dvojnásobek sedimentu, které vyprodukuje všechny řeky světa. Problém je zejména v tom, že spotřeba několikrát převyšuje přirozenou schopnost obnovy a dochází tak k destabilizaci přirozeného povrchového prostředí. Z toho důvodu je potřeba se více zabývat využíváním odpadních a druhotných surovin [62].

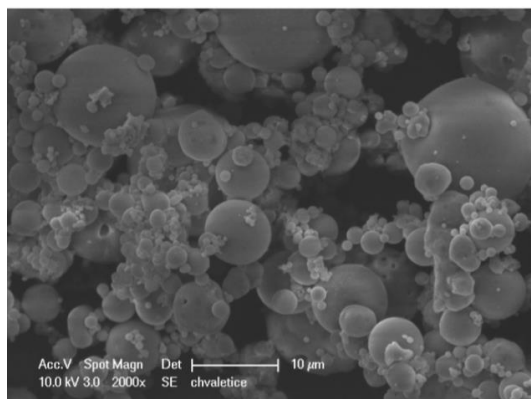
2.8.3. Sekundární plniva

2.8.3.1. Popílek

Bylo prokázáno, že 15% nahrazením písku popílkem se zlepší pevnost v tlaku nevyztuženého polymerbetonu (PC) přibližně o 30 % a pevnost v tahu za ohybu vyztužených nosníků vzroste o asi 15 %. Zlepšení ostatních mechanických vlastností, jako je soudržnost s podkladem po teplotním zatěžování a dotvarování vlivem trvalého zatížení není až tak výrazné. Substituce písku za popílek však nemá vliv na smykovou pevnost PC. Potenciálních aplikací PC s obsahem popílku je velké množství, včetně tenkých povlaků na mosty a podlahy, opravy betonových mostů a chodníků a výroba prefabrikovaných dílů, jako jsou stěnové panely, podlahové bloky a podzemní klenby [65].

- **Vysokoteplotní popílek**

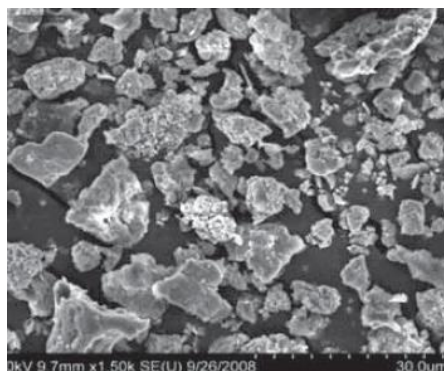
Popílký z vysokoteplotního spalování, tzv. klasické popílký (KP), vznikají při spalování tuhých paliv v tepelných elektrárnách při teplotách přibližně 1300°C. Takto vysoké teploty způsobují kulovitý a uzavřený povrch částic, neboť oxidy železa způsobí, že dojde k natavení hmoty, kterou nadýmají oxidy uhlíku, avšak dostatečně slinutý povrch zabrání úniku těchto plynů ven ze struktury. Ukázka mikrostruktury vysokoteplotního popílku z elektrárny Chvaletice je uvedena na *Obr.36*. Mimo plných slinutých kuliček se mohou v KP také vyskytovat duté kuličky (cenosféry), a vyplněné kuličky, které nazýváme plerosféry. Obsahují 60 až 85 hm.% sklovité fáze a z mineralogického hlediska především β -křemen a mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$). Z pohledu chemického složení je tedy tvoří především oxid křemičitý (SiO_2), oxid hlinitý (Al_2O_3) a oxid železitý (Fe_2O_3). Vykazují pucolánovou aktivitu, čehož se využívá při hydrataci hydraulických pojiv, jelikož po smíchání s hydroxidem vápenatým ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) reagují a vytváří obdobné hydratační produkty jako při reakci samotného cementového slínku s vodou. Popílký ze spalování černého uhlí obsahují oproti těm z hnědého uhlí méně CaO a síranů, a naopak více SiO_2 , a tedy jsou vhodnější jako náhrada cementu do betonu díky vyšší reaktivnosti. Avšak v České republice (ČR) se černé uhlí spaluje ve velmi malém množství [61].



Obr. 36: SEM snímek vysokoteplotního popílku (KP) z elektrárny Chvaletice před zavedením technologie denitrifikace spalin (zvětšení 2000 x) [61]

• Fluidní popílek

Popílký z fluidního spalování vznikají, oproti klasickým popílkům, při nižších teplotách (850 °C) ve vznosu. Jemné podíly jsou při procesu spalování unášeny spalinami do komínové části, kde jsou zachycovány na elektrických odlučovačích [61]. Fluidní spalování se stává stále běžnější technologií pro „čistší“ produkci elektrické energie. Tato technologie je používána v několika evropských státech, v Indii, Japonsku a USA. Hlavním přínosem je možnost snížení obsahu SO_2 a NO_x (oxidy dusíku) ve spalinách. V případě fluidního popílku částice nemají kulový tvar a ani nejsou z větší části skelné (Obr. 37). Z Obr. 36 a Obr. 37 je patrná značná rozdílnost mezi klasickým a fluidním popílkem zejména ve tvaru částic a od něj se odvíjející měrný povrch. Složení fluidních popílků je ovlivněno druhem použitého sorpčního činidla – vápence nebo dolomitu. Z toho také plyne poměr obsahu CaO a MgO . Hodnota ztráty žháním (ZŽ) je zvýšena v důsledku obsahu zbytků uhlíku a vázané vody a CO_2 v CaCO_3 , resp. MgCO_3 . Fluidní popílek (FP) není ve většině zemí brán v úvahu jako příměs do betonu, protože nesplňuje požadavky na chemické složení (obsah síranů a CaO) [63]. FP, jak ložový, tak filtrový, byl úspěšně použit při přípravě geopolymérů, kdy byla dosažena pevnost v tlaku až 44 MPa [64].



Obr. 37: REM snímek fluidního popílku (FP) [63]

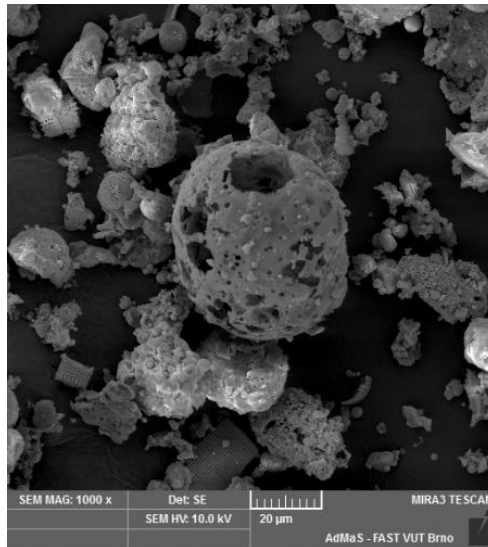
- **Popílký kontaminované vlivem denitrifikace spalin**

Ačkoliv existuje několik způsobů nových ekologizačních technologií v rámci zkvalitnění redukce oxidů dusíku (NO_x), většina tepelných elektráren a spaloven na území České republiky se ubírá cestou SNCR, tedy selektivní nekatalytické redukce, a to zejména z ekonomických důvodů. Zmíněná metoda je založená na redukcí oxidů dusíku pomocí nástřiku roztoku močoviny nebo čpavkové vody do spalovací komory agregátu, kde dochází k redukcí škodlivých NO_x až na dusík a vodu [71].

Je jisté, že při tomto procesu úletový vysokoteplotní popílek (KP) přichází do přímého styku se vstřikovaným médiem. Téměř všechny studie i producenti popílků, které prošly popsáním mechanismem SNCR, se poté shodují, že takové popílký obsahují zvýšené množství amonných solí. Tyto amonné soli poté velice rychle reagují s látkou alkalické povahy, jako je například vápno nebo cement za úniku NH₃, který je spojen s velice nepříjemným zápachem [71].

KP je téměř vždy spojen s pozitivním dopadem na reologii cementové pasty vyrobené za jeho použití. Tato skutečnost je dána vhodnou morfologií zrn, které jsou téměř kulovité povahy a disponují z velké části zesklenným povrchem. Je-li však do systému spalování aplikována navíc technologie redukce oxidů dusíku SNCR, během které je redukční činidlo nejčastěji vstřikováno přímo do prostor spalovací komory při teplotě 900 až 1100 °C, lze očekávat změnu morfologie popílku unášeného spalinami během náhlého teplotního šoku. Náhlý teplotní šok by mohl způsobit až explozi a rozpadavost zrn popílku a následné shlukování těchto drobných částic [71].

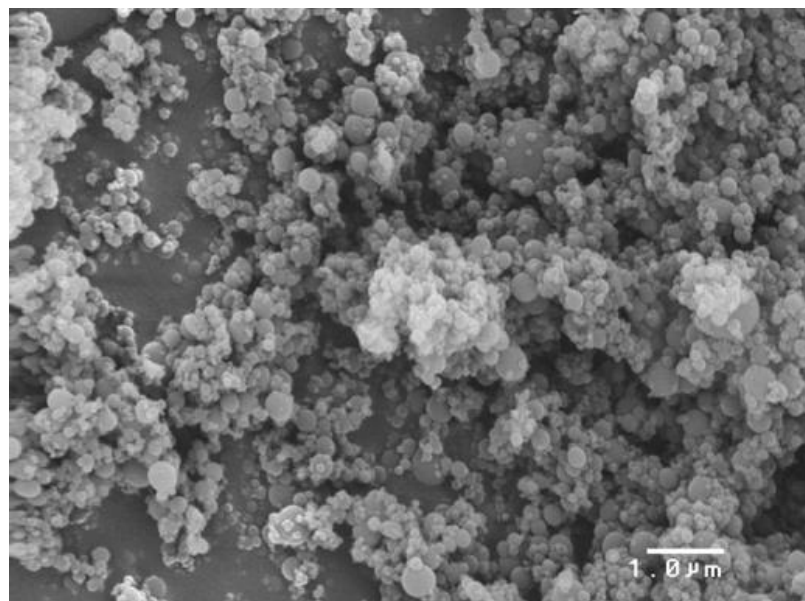
Přiložený snímek zrn popílků po SNCR (*Obr. 38*) poukazuje na rozdílnost jejich tvaru oproti zrnům popílku neovlivněných technologií SNCR. Zrna jsou značně nestejnorodá, přičemž původ těchto zrn by mohl být spojen s rozpadavostí zrn původních. Z tohoto hlediska je patrné, že SNCR, tedy selektivní nekatalytická redukce oxidů dusíku, má negativní dopad na morfologii zrn. Pomocí několika metod bylo prokázáno, že SNCR má negativní dopad na morfologii zrn produkovaných popílků, což sebou přináší zároveň ovlivnění reologie čerstvých cementových past [71].



Obr. 38: Zrna popílku ovlivněného SNCR technologií [71]

2.8.3.2. Mikrosilika

Většina částic mikrosiliky je menší než 1 μm , obecně 50 až 100krát jemnější než částice portlandského cementu nebo popílku. Snímek mikrosiliky s kulovitým tvarem částic z elektronového mikroskopu je uveden na Obr. 39. Mikrosilika se většinou skládá z kulatých částic o průměrné velikosti 150 nm, přičemž měrný povrch se pohybuje kolem 20 m^2/g . Vykazuje vyšší podíl SiO_2 než křemičité úlety, které se běžně používají k výrobě vysokopevnostního betonu na bázi cementu [66]. Na Obr. 40 lze pozorovat kloubové spojení betonových bloků pomocí vodou ředitelné zálivkové epoxidové hmoty plněné mikrosilikou.



Obr. 39: SEM snímek mikrosiliky s kulatým tvarem zrna [66]



Obr. 40: Kloubové spojení betonových bloků pomocí silně adhezivní vodou ředitelné epoxidové hmoty s obsahem mikrosiliky [66]

2.8.3.3. Vysokopecní struska

Vysokopecní struska vzniká jako vedlejší produkt při výrobě surového železa. Hlavními složkami vysokopecní strusky jsou SiO_2 , CaO , MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 v různých modifikacích, dále může obsahovat P_2O_5 , S v různých formách, TiO_2 , MnO , Cr a další těžké kovy. Používá se jako surovina pro výrobu některých typů cementů, stavební materiál pro výplně, záspy, pro stavbu silničních a železničních těles. Strusková drť se využívá jako kamenivo, izolační materiál a zemina při rekultivacích [67]. Vysokopecní struska o velikosti zrna 8–25 mm byla použita pro výrobu vegetačního polymerbetonu, kde bylo jako pojivo použito styren butadienový latex (Obr. 41) [68].



Obr. 41: Porézní vegetační polymerbeton tvořen z vysokopecní strusky, jutových vláken a styren butadienového latexu [68]

2.8.4. Přílnavost plniva k polymerní matrici

Ke správnému spolupůsobení plniva a polymeru přispívá přílnavost těchto dvou látek. Uchycení polymerního řetězce na povrchu plniva je dosaženo především prostřednictvím procesu smáčení. Kompatibilita, smáčivost a vazba mezi polymerem a plnivem jsou důležitými faktory podílejícími se na zlepšení vlastností výsledného kompozitu. Vlastnosti plniva určují stav obklopujícího polymeru v průběhu polymerizace, a proto silně ovlivňují fyzikálně-mechanické vlastnosti kompozitu. Vazba mezi polymerem a plnivem může vzniknout na základě různých faktorů. Mechanickým propojením díky drsnosti povrchů, vytvořením elektrostatické přitažlivosti mezi opačně nabitými povrchy, nebo povrchovým ukotvením dlouhých molekulových řetězců. Čím je viskozita směsi vyšší, tím se zvyšuje spolupůsobení plniva a pryskyřice [69].

2.8.5. Legislativní předpisy pro využívání odpadů do výrobků

V případě použití odpadů z průmyslové výroby pro výrobu kotvících a záливkových hmot, musí tyto odpady vyhovovat nařízením a vyhláškám o používání odpadů ve stavebnictví, jejich klasifikaci a zdravotní a hygienické nezávadnosti, která by mohla mít nepříznivý dopad na životní prostředí. Mezi ty nejdůležitější předpisy vyplývající z legislativy se řadí:

- Nařízení (ES) 1907/2006 (REACH), novela přílohy II Nařízení 453/2010, kterým se mění nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1907/2006 o registraci, hodnocení, povolování a omezování chemických látek,
- Nařízení (ES) č.1272/2008 o klasifikaci a označování látek a směsí,
- Zákon č. 185/2001 Sb. – o odpadech,
- Vyhláška č. 381/2001 Sb. – Katalog odpadů,
- Vyhláška č. 383/2001 Sb. – o podrobnostech nakládání s odpady,
- Vyhláška č. 294/2005 Sb. – o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady,
- Vyhláška č. 376/2001 Sb. – o hodnocení nebezpečných vlastností odpadů,
- Zákon č. 22/1997 Sb. – o technických požadavcích na výrobky ve znění zákona č. 71/2000 Sb.,
- Nařízení vlády č. 163/2002 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na vybrané stavební výrobky [70].

3. 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), záливkové 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.

4. METODIKA

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 reprofilační 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.

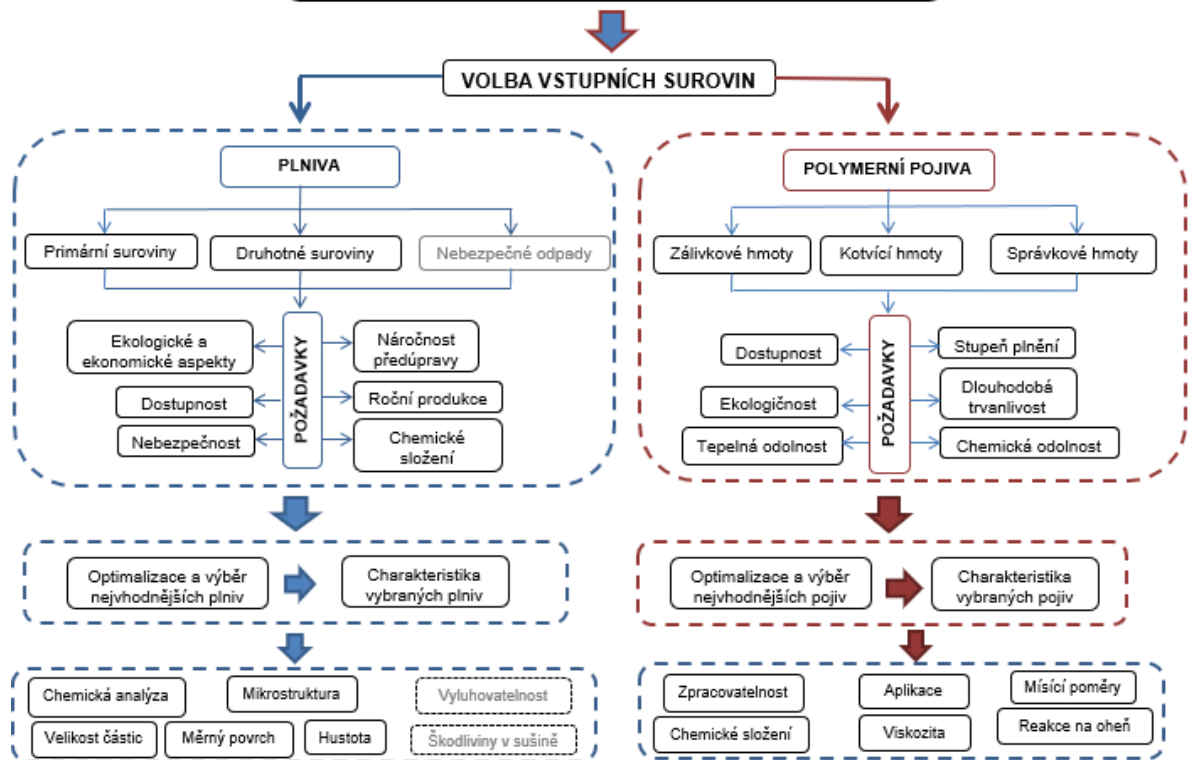
4.1. ETAPA 1 – Identifikace vstupních surovin, návrh receptur speciálních sanačních hmot na beton a aplikační test

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.

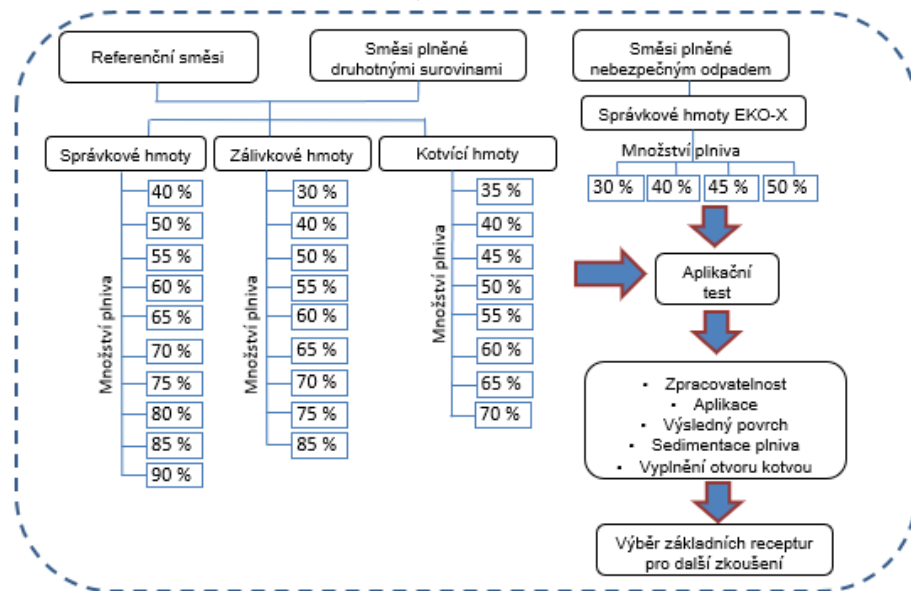
Jako polymerní pojiva jsou vybrány a blíže identifikovány ty pryskyřice, které svými vlastnostmi nejvíce vyhovují požadavkům vztahujícím se na vyvíjené speciální sanační hmoty. Obecně se požaduje, aby se zvolené polymerní pojivo dalo velice dobře plnit, vykazovalo zvýšenou tepelnou a chemickou odolnost, 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.

ETAPA I.

IDENTIFIKACE VSTUPNÍCH SUROVIN, NÁVRH RECEPTUR SPECIÁLNÍCH SANAČNÍCH HMOT NA BETON A APLIKAČNÍ TEST



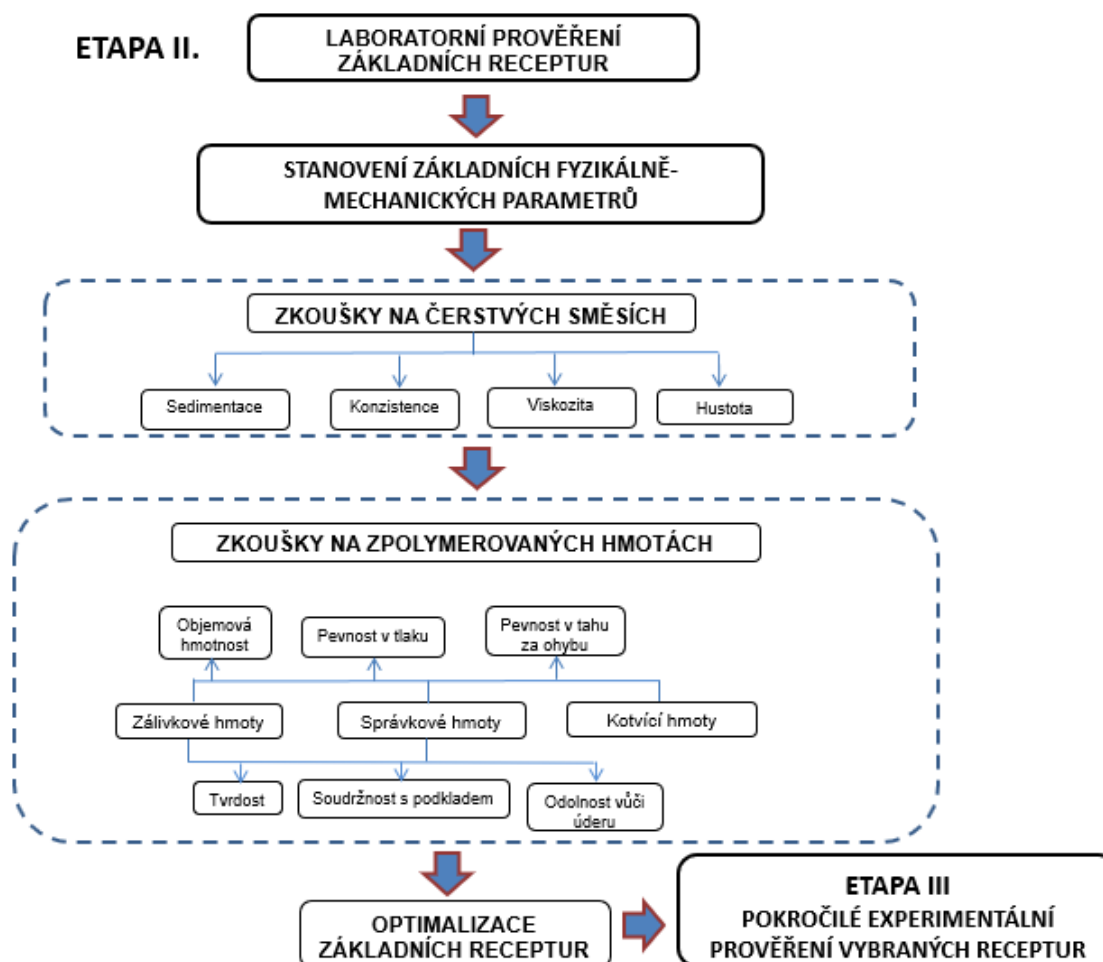
NÁVRH RECEPTUR SPECIÁLNÍCH SPRÁVKOVÝCH, ZÁLIVKOVÝCH A KOTVICÍCH HMOT



ETAPA II
LABORATORNÍ PROVĚŘENÍ ZÁKLADNÍCH RECEPTUR

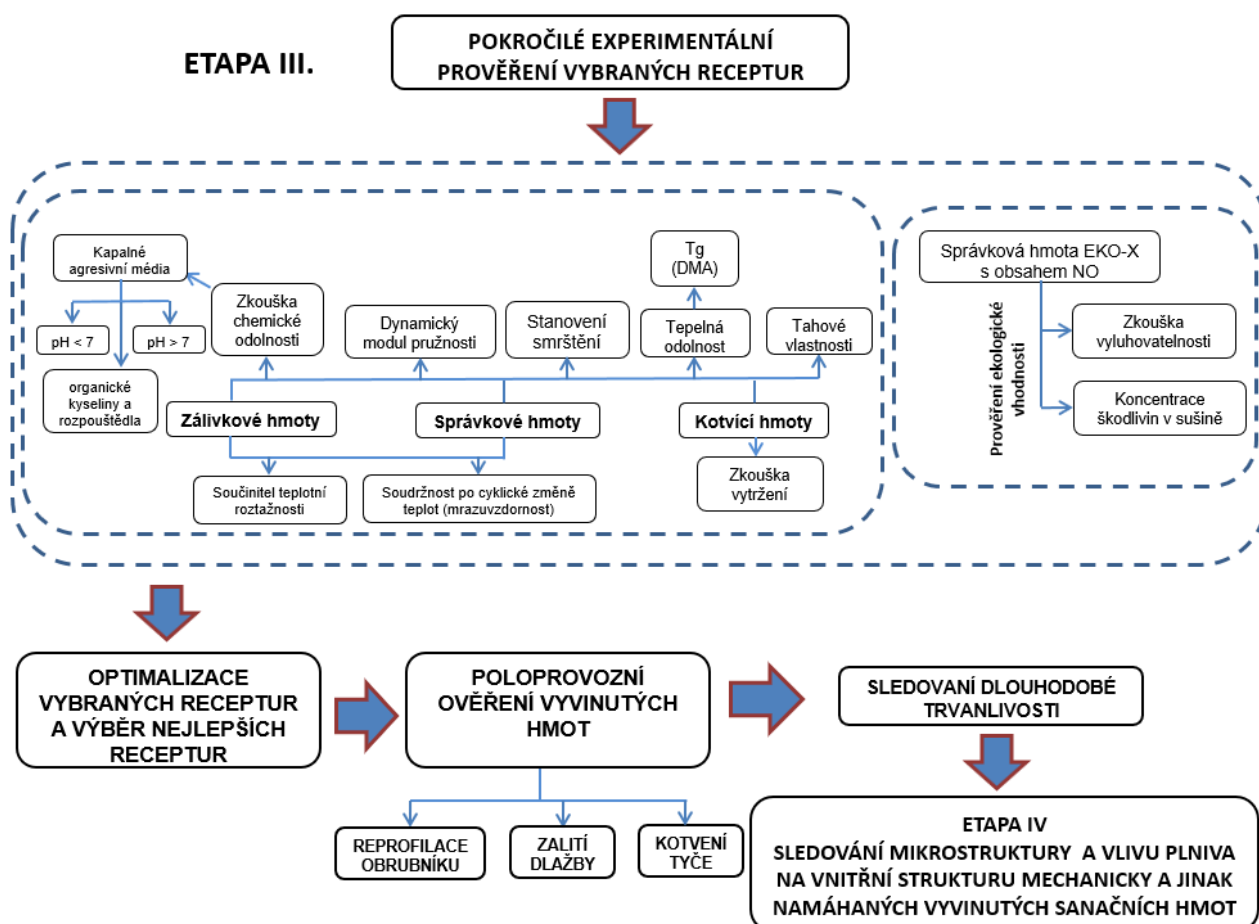
4.2. ETAPA 2 – Laboratorní prověření základních receptur

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.



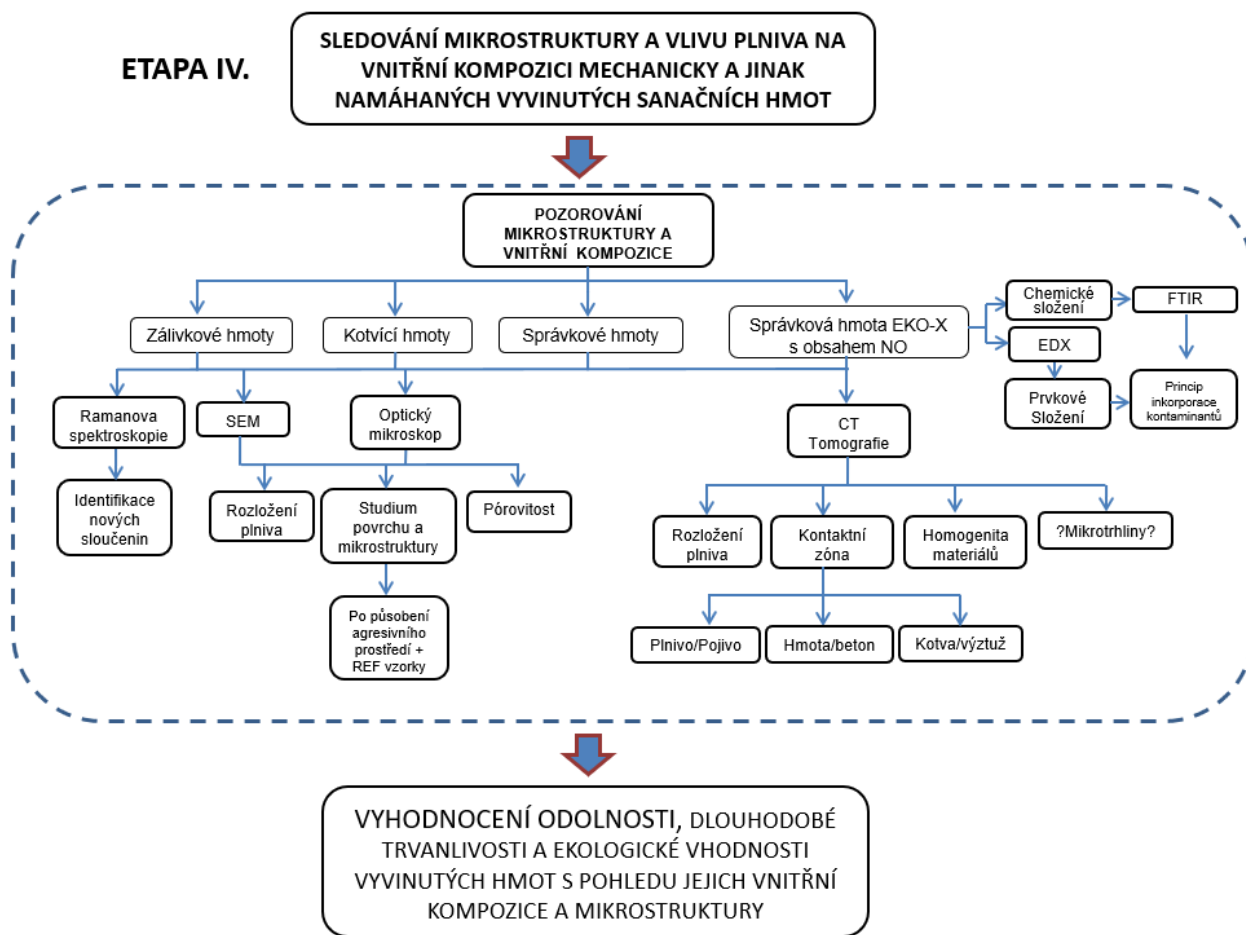
4.3. ETAPA 3 – Pokročilé experimentální prověření vybraných receptur

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 (reprofiláčnická) 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 poloprovozně 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.



4.4. 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 taky analýza chemického složení vyvinuté sanační hmoty EKO-X. Pomocí CT a SEM je sledováno hlavně rozložení plniva v polymerní matrici, jeho zakomponování v mikrostrukturu, celková 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 vyvinutých 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, křemičitý písek vhodné zrnitosti.



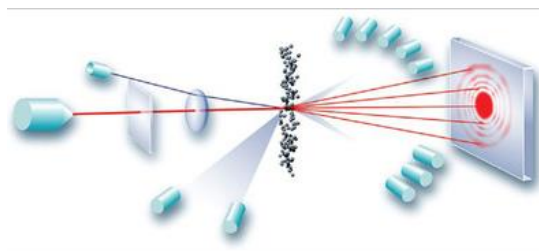
5. POPIS PROVÁDĚNÝCH ZKOUŠEK

5.1. ZKOUŠKY PRO BLIŽŠÍ CHARAKTERIZACI PLNIV

5.1.1. Stanovení velikosti částic

Velikost částic patří mezi jeden z nejdůležitějších parametrů používaných plniv, protože ovlivňuje jak konzistenci čerstvé směsi, tak i výsledné fyzikálně-mechanické parametry polymerní sanační hmoty. Ideální práškový materiál obsahuje pouze částice stejné velikosti. Naproti tomu reálný materiál se skládá z částic o určitém velikostním rozpětí – velikostním intervalu. V praxi se proto při popisu velikosti používá pojem distribuce velikosti částic. V současnosti měření distribuce velikosti částic probíhá obrazovou analýzou snímků ze světelného nebo elektronového mikroskopu (SEM) a laserovou difrakcí [72].

Měření velikosti částic bylo prováděno pomocí metody laserové difrakce na přístroji MALVERN Mastersizer 2000. Plniva použita v této práci byla měřena pouze suchou cestou. Na *Obr. 42* lze vidět princip měření velikosti částic pomocí laserové difrakce. Větší částice odrážejí laserové paprsky v menším úhlu a o větší laserové intenzitě a menší částice mají větší úhel odrazu a nižší intenzitu odraženého paprsku.



Obr. 42: Princip fungování laserového difrakčního analyzátoru Mastersizer 2000, který zahrnuje světelné zdroje, jednotku zpracování paprsku, Fourierové čočky a vícečásticový detektor [73]

5.1.2. Chemické složení

Stanovení chemického složení použitých plniv probíhalo v akreditované zkušební laboratoři ALS Czech Republic, s.r.o. a LABTECH s.r.o. V rámci chemického složení se stanovovaly fyzikální parametry jako sušina při 105 °C, ztráta žiháním, dále anorganické parametry jako např. chloridy a sírany a nejdůležitějším stanovením bylo zjištění celkových kovů (hlavních kationtů), které se stanovovalo v % sušiny. Stanovení chemického složení vybraných plniv a některých vyvinutých hmot bylo prováděno taky za účelem přesnějšího vyhodnocení Ramanovy spektroskopie a FTIR analýzy.

5.1.3. Stanovení měrné hmotnosti

Měrná hmotnost vzorků byla stanovena pomocí přístroje AccuPyc II 1340 Pycnometer (Obr. 43). Jedná se o automatický plynový pyknometr, kdy výpočet hustoty spočívá v měření objemu hélia v komoře se vzorkem se známou hmotností [74].



Obr. 43: Integrovaný modul pro řízení a analýzu měrné hmotnosti

5.1.4. Stanovení měrného povrchu

Zjišťování měrného povrchu použitých plniv probíhalo pomocí permeabilní metody dle Blaina, na přístroji ZEB MAXAM PC Blain Star. Výpočet měrného povrchu je založen na základě času průtoku vzduchu přes vzorek o definované hmotnosti, jeho měrné hmotnosti a porozity.

5.1.5. Stanovení množství amoniaku

U popílků kontaminovaných vlivem denitrifikace spalin se stanovovalo také množství amoniaku (NH_3), přičemž toto stanovení probíhalo na chemické fakultě Vysokého učení technického v Brně. Stanovení množství NH_3 probíhalo dle mezinárodní normy *ISO 7150-1 „Water quality – Determination of ammonium – Part 1 : Manual spectrometric method“*. Popílek se po následném měření musel nejprve smíchat s vodou, pro vytvoření roztoku s obsahem NH_3 . Stanovení je založeno na spektrometrickém měření modré sloučeniny při vlnové délce přibližně 655 nm vzniklé reakci NH_3 se salicylátem a chlornanovými ionty v přítomnosti nitroprusidu sodného. Maximální objem vzorku, který lze použít pro toto stanovení je 40 ml [101].

5.2. Aplikační test

Aplikační test, který byl realizován jako prvotní zkouška základních navržených receptur není normován, vychází z požadavků kladených na zpracovatelnost materiálů pro požadované použití. V rámci této práce byla navržena specifická metoda aplikačního testu pro polymerní sanační hmoty s různým obsahem a typem plniva. V rámci uvedeného testu se pozorují a následně vyhodnocují tři základní požadavky u vyvíjených správkových a zálivkových hmot – zpracovatelnost, aplikovatelnost, výsledný povrch. Při testování kotvicích hmot se sleduje především stupeň vyplnění otvoru kotvou při různém plnění hmoty. Výsledky aplikačního testu následně ovlivní výběr receptur pro další základní testování. Princip hodnocení parametrů sledovaných v rámci aplikačního testu uvádí *Tab. 7*.

Zpracovatelnost zkoušené hmoty se sledovala v okamžiku smíchání plniva a pojivové složky. Hodnotilo se, zda je možné materiál snadno a dobře zpracovávat (homogenizovat) a jestli dochází k promísení jednotlivých složek materiálu plniva, pojiva i tvrdidla, a zda toto zpracování nevyžaduje zvýšenou časovou či technickou náročnost. Měla by být co nejvíce podobná zpracovatelnosti referenční srovnávací směsi.

V rámci testování **aplikovatelnosti** správkových a zálivkových hmot se čerstvá směs v okamžiku namíchání aplikovala na CETRIS desku o rozměrech 300 x 300 mm plastovou ruční zubovou stěrkou. Při aplikaci materiálu bylo sledováno a hodnoceno, zda lze materiál nanášet požadovanou technologií, jaké jsou reologické vlastnosti hmoty, kompatibilita pojivové složky a plniva, a jestli dochází k celkovému slití a finálnímu vyrovnání povrchu hmoty.

Hodnocení výsledného povrchu probíhalo na plně vytvrzené (zpolymerované) směsi a je nedílnou součástí celého aplikačního testu. Hodnotí se zde, zda materiál splňuje požadované vlastnosti na kvalitu výsledného povrchu, který by měl být rovný, bez trhlin, neměly by vznikat důlky, fleky a také nesmí docházet k separaci plniva od pojivové

složky. Jedná se pouze o vizuální posouzení porovnáním s referenčním srovnávacím materiálem obsahujícím křemičitý písek Dorsilit.

V případě vyvíjených kotevních hmot bylo sledováno **vyplnění předvrtaného otvoru s osazenou kotvou** – ocelovou závitovou tyčí. Zde byl kladen důraz na podstatné aspekty, jako je bezproblémový průnik směsi do prostoru vymezeném předvrtaným otvorem (cca 26 mm) a ocelovou závitovou tyčí o průměru 8 mm, tj. šířky v rádech milimetrů tak, aby nedocházelo k odlučování pryskyřice, segregaci plniva apod. V tomto ohledu bylo podstatné také důkladné očištění stěny předvrtaného otvoru právě z důvodu porézности kontaktní plochy, aby se pryskyřice mohla dostat i do nejmenších pórů v betonu.

Tab. 7: Systém hodnocení aplikačního testu pro vyvíjené polymerní správkové a zálivkové hmoty

| Parametr | Hodnocení | Popis hodnocení |
|--------------------------------|------------------|---|
| Zpracovatelnost | Vyhovující (✓) | Hmota je dobře zpracovatelná, snadno se promíchává a dochází k dokonalému promísení všech složek. |
| | Nevyhovující (✗) | Hmota vyžaduje vyšší technologickou náročnost pro promíchání, nedochází k dokonalé homogenizaci všech složek systému. |
| Aplikovatelnost | Vyhovující (✓) | Hmota vykazuje požadované reologické vlastnosti, je dobře aplikovatelná vhodnou zubovou stěrkou, došlo k rovnoměrnému slinutí povrchu, byl vyplněn vymezený prostor. |
| | Nevyhovující (✗) | Materiál vykazuje nevyhovující reologické vlastnosti, je špatně aplikovatelný, nedochází k rovnoměrnému slinutí povrchu, vymezený prostor není vyplněn. |
| Výsledný povrch | Vyhovující (✓) | Výsledný povrch je rovný, bez známek trhlin, nebyla zde patrná segregace jednotlivých složek pojivové složky. |
| | Nevyhovující (✗) | Výsledný povrch je nerovný, nedochází ke slinutí, patrné známky segregace pojivových složek, důlky, popř. tmavé fleky. |
| Vyplnění otvoru kotvící hmotou | Vyhovující (✓) | Vynikající zpracovatelnost, bezproblémový průnik kotvící hmoty do prostoru vymezeném předvrtaným otvorem a ocelovou závitovou tyčí, bez segregace pojivové složky a bez výrazné sedimentace plniva, zatečení hmoty do všech pórů v betonu tvořícího stěny vyvrtané díry, velmi rychlé ukotvení závitové tyče. |

| | | |
|--|------------------|--|
| | Nevyhovující (✖) | Špatná zpracovatelnost, problematický průnik kotvící hmoty do prostoru vymezeném předvrtaným otvorem a ocelovou závitovou tyčí, segregace pojivové složky, výrazná sedimentace plniva, nezbytné jsou podpůrné prostředky pro zachycení tyče ve svislé poloze až do úplného zatvrdnutí hmoty. |
|--|------------------|--|

5.3. Zkoušky na čerstvých hmotách

5.3.1. Stanovení sedimentace

Tato zkouška vycházela z podnikové zkoušky firmy Lena Chemical s.r.o. zabývající se taky vývojem a výzkumem polymerních sanačních systémů. Výsledkem této zkoušky bylo zjištění rychlosti sedimentace, která je důležitým faktorem pro reálné použití materiálu ve výrobě. Tato zkouška určuje, jak se chovají plniva v matrici, kde je sledováno, zda by plniva nadměrně nesedimentovala ve finálním produktu, a tím by docházelo k jeho rychlému znehodnocení. Pro stanovení sedimentace hmot byly využity zkumavky o průměru 20 mm a objemu 50 ml, které se naplnili zkoušeným materiálem, tedy směsí pojiva a plniva z druhotných surovin. Při použití epoxidových pryskyřic (EP) jako pojiva lze zamíchat pouze A složku a daný typ a množství plniva, protože při zakomponování složky B (tvrdidla) by docházelo k relativně rychlému zatvrdnutí hmoty ve zkumavce. Takto připravené vzorky byly uloženy do vhodného stojanu při ustáleném prostředí o teplotě 21 ± 3 °C, přičemž zkumavky nesmí být vystaveno přímému slunečnímu záření. Vzorky byly kontrolovány po dobu jednoho měsíce každé 3 dny, kdy byly zaznamenávány změny na jednotlivých vzorcích a tyto byly zatříděny dle hodnotícího systému (Tab. 8) s rozsahem hodnot od 1 do 5, který se jevil pro porovnání vyvíjených materiálů dostatečně vyhovující.

Tab. 8: Hodnotící tabulka pro posouzení a vyhodnocení zkoušky sedimentace

| Stupeň sedimentace | Popis hodnocení |
|--------------------|---|
| 1 | Vzorek zůstal bez pozorovatelných změn, žádná známka sedimentace |
| 2 | Počátky sedimentace – náznak separace vrstev |
| 3 | Lehce pozorovatelné známky sedimentace plniva pouhým okem |
| 4 | Jasně pozorovatelná sedimentace – jasné hranice jednotlivých vrstev (pojivo/plnivo), možnost určení hranice separovaných vrstev |
| 5 | Výrazná sedimentace, separování jednotlivých složek disperze |

5.3.2. Stanovení hustoty

Stanovení hustoty vyvíjených hmot v čerstvém stavu probíhalo dle české harmonizované normy ČSN EN ISO 2811-1 *Nátěrové hmoty – Stanovení hustoty – Pyknometrická metoda*. Tato zkouška probíhala tak, že nejprve se pyknometr (50 ml) zvážil s maximální přesností na analytických vahách, naplnil se vzorkem zkoušeného materiálu tak, aby byl vyloučen vznik a obsah bublin a důkladně se uzavřel tak, aby zábrus zcela dosednul [102].

5.3.3. Stanovení viskozity

Viskozita byla zjišťována na vyvíjených zálivkových hmotách v čerstvém stavu v okamžiku zamíchání všech složek. Zkouška probíhala dle normy ČSN EN ISO 2431 *Nátěrové hmoty – Stanovení výtokové doby výtokovými pohárky pomocí Fordova výtokového pohárku*. V rámci této disertační práce byl kvůli vysoké viskozitě vyvíjených sanačních hmot použit Fordův výtokový kelímeček, který měl průměr výtokové trysky 12 mm (Obr. 44, Obr. 45) [103]. Jako výsledek stanovení viskozity byla brána výtoková doba zkoušené hmoty.



Obr. 44: Fordův výtokový kelímeček o průměru výtokové trysky 12 mm



Obr. 45: Průběh stanovení viskozity pomocí Fordova výtokového kelímku

5.3.4. Stanovení konzistence malt pomocí střešacího stolku

Stanovení zpracovatelnosti vyvíjených hmot byla prováděno podle normy ČSN EN 1015-3 *Zkušební metody malt pro zdivo – Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)*. Kovový komolý kužel o výšce 60 mm, vnitřním průměru 100 mm ve spodní části a vnitřním průměru 70 mm v horní části, byl naplněn až po okraj zkoušenou hmotou ve dvou vrstvách, přičemž každá vrstva byla zhutněna 10 lehkými ranami dusadla (Obr. 46). Po 15 vteřinách byl kužel zvednut kolmo vzhůru a následně se hmota na desce rozlila pomocí 15 nárazů s konstantní frekvencí 1 zdvih za sekundu. Výsledný koláč byl změřen ve dvou navzájem kolmých směrech. Podkladní deska byla před samotnou zkouškou opatřena hliníkovou fólií z důvodu vysoké přidržnosti EP ke většině materiálů (Obr. 47).



Obr. 46: Kužel naplněn správkovou hmotou s kontaminovaným popílkem



Obr. 47: Měření rozlivu vyvíjené správkové hmoty s obsahem popílku

5.3.5. Stanovení smrštění

Smrštění je především u kotvících hmot velice důležitým hodnotícím parametrem. Cílem je dosáhnout co nejmenšího smrštění hmot, aby nedocházelo k uvolňování kotvených prvků v otvorech. V rámci této disertační práce se smrštění stanovovalo na speciálním přístroji – Tensograf TGF 02 (Obr. 48, Obr. 49), který funguje na principu měření hodnoty napjatosti zjištěním velikosti síly potřebné k tomu, aby relativní podélná deformace měřeného zkušební tělesa vzhledem k přístroji zůstala nulová. Navržená zkušební metoda uvažuje skutečné reologické vlastnosti hmoty a odpovídá tak co nejblíže reálnému stavu. Program přístroje nabízí dva základní režimy zkoušky. Při přípravě nového zkušební tělesa se zvolí režim konstantní délky vzorku, přičemž režim konstantního napětí se používá např. pro zjištění zbytkového smrštění, kdy je zvoleno žádané napětí rovné nule a Tensograf změří délkovou změnu. Přístroj je vhodný pro zjišťování napjatosti licích a stěrkových epoxidových podlahovin [120].



Obr. 48: Přístroj Tensograf TGF 02 pro stanovení smrštění vyvíjených sanačních hmot



Obr. 49: Vyvíjená kotvící hmota s obsahem odpadního obalového skla při stanovování smrštění

5.4. Zkoušky na zpolymerovaných hmotách

5.4.1. Stanovení objemové hmotnosti

Objemová hmotnost vyvíjených sanačních hmot v zatvrdlém stavu byla stanovována dle normy ČSN EN ISO 845 na trámčích o rozměrech 20x20x100 mm, vyrobených pro zjištění pevnosti v tahu za ohybu. Jedná se o poměr hmotnosti tělesa ku objemu tělesa (stanovený z vnějších rozměrů) [105]. Objemová hmotnost ρ zkušebního tělesa se vypočítala dle vzorce:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

kde: ρ je objemová hmotnost [kg/m^3], m je hmotnost vzorku [kg], V objem vzorku [m^3]

5.4.2. Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku probíhalo dle normy ČSN EN 13892 – Zkušební metody potěrových materiálů – Část 2: stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku [106]. Stanovení pevnosti v tahu za ohybu (Obr. 50) probíhalo na trámčích o rozměrech 20 x 20 x 100 mm ve stáří 28 dní, přičemž rozpětí podpor bylo 80 mm. Pevnost v tlaku (Obr. 51) se následně stanovila na zlomcích těles po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu, přičemž plocha zatěžovacích destiček z tvrzené oceli byla 400 mm^2 . Pevnost v tahu za ohybu se vypočítá dle následujícího vzorce:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b \times h^2}$$

kde: R_f je pevnost v tahu za ohybu v [N/mm^2], vypočtená z výsledků zkoušky, F_f je zatížení v [N], které vede k porušení při zkoušce v tahu za ohybu, l je vzdálenost v [mm] mezi válcovými podpěrami, b je šířka zkušebního tělesa v [mm] pod středovým válcem při zkoušení pevnosti v tahu za ohybu, h je tloušťka zkušebního tělesa v [mm]

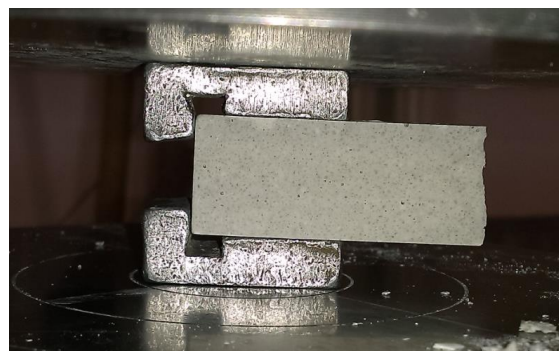
Pevnost v tlaku se vypočítá dle vzorce:

$$R_c = \frac{F_c}{A}$$

kde: R_c je pevnost v tlaku v [N/mm^2], vypočtená z výsledku zkoušky, F_c je zatížení v [N], které vede k porušení vzorku při zkoušce v tlaku, A je plocha zkušebního tělesa, která je při zkoušce v tlaku ve styku s tlačnými destičkami (400 mm^2).



Obr. 50: Stanovení pevnosti v tahu za ohybu polymerní správkové hmoty s vysokým obsahem plniva



Obr. 51: Stanovení pevnosti v tlaku na zlomcích po stanovení pevnosti v tahu za ohybu vyvíjené správkové hmoty

5.4.3. Stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou

Přidrženost k podkladnímu materiálu je velice důležitým parametrem správkových a zálivkových hmot. Tato zkouška se prováděla dle normy ČSN EN 1542 – *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou*. Tato norma určuje postup pro měření soudržnosti s podkladem u správkových a zálivkových malt a prostředků pro povrchovou ochranu, používaných pro ochranu a opravy betonu. Po dostatečném zatvrdnutí se po 7 dnech uložení v laboratorním prostředí přilepili na zkoušený povrch vyvinuté sanační hmoty odtrhové terče. Na očištěný a odmaštěný kovový terč o průměru 50 mm se nanasla tenká vrstva lepidla a terč se pak přitlačil na povrch zkoušeného materiálu [107]. V rámci této práce se pro lepení terčů používalo lepidlo Sikadur 31 CF, které je na epoxidové bázi. Po zatvrdnutí lepidla (24 hod.) se terč ořezal do osmiúhelníku pomocí úhlové brusky (Obr. 52) a následně se odtrhoměrem značky DYNA Proceq (Obr. 53) zkoušela soudržnost hmot s betonovým podkladem. Dle normy by se měl terč oříznout pomocí jádrové vrtačky, aby byla vymezená zkoušená plocha kruhová, avšak pro zjednodušení lze použít i úhlovou brusku – bez zásadního vlivu na výsledky. Zatížení při porušení se zaznamenalo a stanovil se střední průměr plochy porušení. Typ plochy porušení zkušebního tělesa se stanoví vizuálním posouzením, přičemž existují tyto typy porušení:

- A: kohezní porušení uvnitř betonového podkladu,
- A/B: adhezní porušení mezi podkladem a první vrstvou,
- B: kohezní porušení v první vrstvě,
- B/C: adhezní porušení mezi první a druhou vrstvou,
- C: kohezní porušení ve druhé vrstvě,
- -/Y: adhezní porušení mezi poslední vrstvou a lepidlem,
- Y: kohezní porušení v lepidle,
- Y/Z: adhezní porušení mezi lepidlem a kruhovým terčem, který je Z.

Pro každé zkušební místo, kde došlo k normálnímu porušení, se vypočítala soudržnost se zaokrouhlením na nejbližší 0,1 MPa dle následující vztahu:

$$f_h = \frac{4 \cdot F_h}{\pi \cdot D^2}$$

kde: f_h je soudržnost v [MPa], F_h je síla při porušení v [N], D je střední průměr plochy porušení zkušebního tělesa v [mm].

Průměrná hodnota soudržnosti se pak stanovila ze tří normálních zkušebních výsledků.



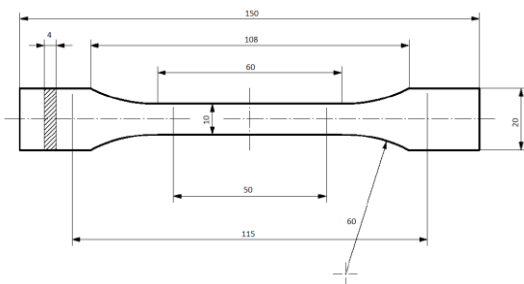
Obr. 52: Ořezané terče připravené pro zkoušku soudržnosti s betonovou dlažbou – správková hmota s odpadním sklem



Obr. 53: Zkouška přídržnosti pomocí odtrhoměru DYNA Proceq

5.4.4. Stanovení tahových vlastností

V rámci zkoušky tahových vlastností dle norem ČSN EN ISO 527-1 – Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 1: Obecné principy a ČSN EN ISO 527-2 – Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty se zjišťovaly dva základní parametry, a to poměrné prodloužení při přetržení (ϵ_b) a napětí při přetržení (σ_b) [108][109]. Pro tuto zkoušku se použily zkušební tělesa ve tvaru oboustranných lopatek typu 1B o délce 150 mm (Obr. 54 a Obr. 55). Pro každou zkoušku se použili tři zkušební tělesa a nejvyšší síla včetně prodloužení při přetržení se odečítali z pracovních diagramů charakterizujících průběh zkoušky. Zkušební rychlost v průběhu zatěžování byla 5 mm/min až do přetržení vzorku.



Obr. 54: Zkušební těleso pro zkoušení tahových vlastností – typ 1B [109]



Obr. 55: Zkušební tělesa pro stanovení tahových vlastností od vyvíjené polymerní zálivkové hmoty

Podstatou této zkoušky je, že zkušební těleso je protahováno ve směru své osy konstantní zkušební rychlostí do jeho porušení. Pevnost v tahu při přetržení se pak vypočítá dle vzorce:

$$\sigma_b = \frac{F}{A}$$

kde: σ_b je hodnota napětí v tahu při přetržení vzorku v [MPa], F je síla odečtená z pracovního diagramu při přetržení vzorku v [N], A je počáteční průřez zkušebního tělesa v pracovní části v [mm]

Poměrné prodloužení při přetržení stanovené pomocí průtahoměru se pak vypočítalo dle vzorce:

$$\varepsilon_b = \frac{\Delta L_0}{L_0} \times 100$$

kde: ε_b je poměrné prodloužení při přetržení v [%], L_0 je počáteční měřená délka dle průtahoměru (50 mm), ΔL_0 je zvětšení počáteční měřené délky v [mm]

5.4.5. Stanovení tvrdosti Shore D

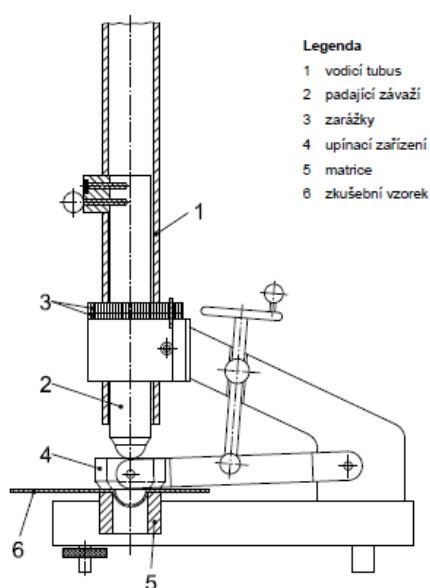
Hodnota tvrdosti je nepřímo úměrná hloubce vtlačení hrotu a závisí na modulu pružnosti a na viskoelastických vlastnostech materiálu. Pro zjištění hodnoty tvrdosti vyvíjených polymerních sanačních materiálů se použila norma ČSN EN ISO 868 – *Plasty a ebonit – Stanovení tvrdosti vtlačováním hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore)*. Norma specifikuje metodu stanovení tvrdosti vtlačováním hrotu tvrdoměru dvou typů, přičemž tvrdoměr Shore A se používá pro měkčí materiály a tvrdoměr Shore typu D se používá pro tvrdší materiály [110]. V rámci této práce byl použit tvrdoměr typu D značky TQC řady LD0550, protože byla stanovována tvrdost materiálů na bázi epoxidových pryskyřic (EP) vykazujících vysokou tvrdost.



Obr. 56: Stanovení tvrdosti Shore D (H_D) polymerní správkové hmoty

5.4.6. Odolnost vůči úderu

Stanovení odolnosti vyvíjených správkových a zálivkových hmot vůči úderu probíhalo podle normy ČSN EN ISO 6272-1 pomocí padajícího závaží s velkou plochou úderníku. Jedná se o metodu pro zjištění odolnosti výrobku proti praskání nebo odlupování od podkladu v důsledku deformace vyvolané padajícím závažím zakončeným kulovým úderníkem o průměru 20 mm, které je spuštěno za normalizovaných podmínek (Obr. 57 a Obr. 58). Výška pádu padajícího zařízení se zvětšovala postupně o 25 mm. Výsledkem zkoušky byla výška, při které byly poprvé zjištěny praskliny a/nebo odloupenutí [111]. Zkoušená hmota se nejprve nanasla na cementotřískovou desku, pak se nechala polymerovat a po 28 dnech probíhalo samotné stanovení odolnosti hmoty vůči úderu.



Obr. 57: Boční pohled na zkušební zařízení pro stanovení odolnosti vůči úderu [111]



Obr. 58: Stanovování odolnosti vůči úderu vyvíjené polymerní správkové hmoty

5.4.7. Zkouška vytržení

Zkouška vytržení byla prováděna pouze u kotvicích hmot, podle postupu stanoveného normou ČSN EN 1881 *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Zkoušení výrobků pro kotvení vytrhávací zkouškou*. Podstata zkoušky spočívá v tom, že výztužný prut, zakotvený v betonovém bloku zkoušenou kotvicí hmotou, se zatíží tahovou silou a měří se síla a posun prutu vzhledem ke zkušebnímu tělesu. Pro více zkoušek se používají betonové bloky v násobcích 400 mm, přičemž pro jednu zkoušku je potřeba aby měl vymezený prostor 400 x 400 x 250 mm [112]. Pro tuto zkoušku byly nejprve vytvořeny betonové zkušební bloky z betonu třídy C 40/50. Po 28 dnech byly do betonu vyvrtány otvory o průměru 20 mm do hloubky 150 mm. Pro kotvení byly vybrány ocelové závitové tyče o průměru 16 mm, které byly kotveny do

řádně vyčištěných otvorů. Vytrhávací zkouška se prováděla po 7 dnech pomocí speciálního vytrhávacího zařízení od firmy KGF a průběh vytrhávací zkoušky byl zaznamenáván elektronickým systémem od firmy HBM.



Obr. 59: Zakotvené závitové tyče připravené pro zkoušku vytržení



Obr. 60: Vytrhávací zařízení od společnosti KGF

5.4.8. Stanovení dynamického modulu pružnosti UZ metodou

Dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu ($E_{dyn,U}$) lze stanovit několika metodami. Nejčastěji využívanými jsou ultrazvuková (UZ) a rezonanční metoda. Jedná se o nedestruktivní a jednoduché metody, z nichž UZ metoda se velice často využívá přímo na konstrukci. Pro stanovení dynamických modulů pružnosti jsou využívány metody ultrazvuková a rezonanční, popsané v ČSN 73 1371, ČSN EN 12504-4 a ČSN 73 1372. Hodnoty statických modulů pružnosti vycházejí vždy nižší než je tomu u dynamických [75]. V rámci této práce byl $E_{dyn,U}$ stanoven pomocí ultrazvukového (UZ) měření. Hodnota dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu ($E_{dyn,U}$) se vypočetla z naměřené rychlosti šíření UZ impulsů jako:

$$E_{dyn,U} = D \times v_L^2 \times \frac{1}{k^2} \times 10^{-6}$$

kde: $E_{dyn,U}$ je dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu v [N/mm²], D je objemová hmotnost materiálu v [kg/m³], v_L je rychlost šíření UZ impulsu v [m/s], k je koeficient rozměrnosti prostředí

5.4.9. Stanovení tepelné odolnosti

Stanovení tepelné odolnosti polymerů probíhá většinou stanovením teploty skelného přechodu (T_g) pomocí diferenční kompenzanční kalorimetrie (DSC) nebo dynamickou mechanickou analýzou (DMA). V rámci této práce byla T_g stanovována metodou DMA. Tato metoda testuje viskoelastické vlastnosti materiálů při zvolené teplotě, která leží

typicky v rozmezí od přibližně od $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tímto způsobem lze stanovit fázové přeměny jako je skelný přechod, tání a krystalizace materiálů, body měknutí, viskozitu tavenin. Vzorky pro stanovení T_g byly testovány pomocí zařízení DMA 2980 (TA Instruments) na chemické fakultě VUT v Brně (Obr. 61). Jednalo se o analýzu, kdy díky nucené periodické sinusové deformaci vzorku upnutého v systému čelistí (Obr. 62) byla měřena síla potřebná k této deformaci. Z průběhu deformace a síly (následně přepočteného na deformační napětí) a jejich fázového posuvu byl pak určen dynamický modul pružnosti a jeho složky: elastický (Storage) a ztrátový (Loss) modul. Tyto dvě veličiny včetně tangentu zmíněného fázového posuvu (ztrátového činitele $\tan \delta$) byly pak měřeny v závislosti na teplotě. Oba moduly včetně fázového posuvu popisují viskoelastické chování polymeru. V teplotě skelného přechodu se tyto vlastnosti razantně mění. DMA T_g se stanovovala třemi metodami:

- z elastického modulu – strmý pokles se odečítal v bodě zvratu (onset),
- ze ztrátového modulu – v oblasti T_g došlo k jeho maximu,
- ze ztrátového činitele – v oblasti T_g došlo k jeho maximu.

Měření se provádělo v rozsahu teplot 40 až $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ při rychlosti ohřevu $5\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{min}$, amplitudě $10\text{ }\mu\text{m}$ a frekvenci 1 Hz . Rozměry vzorků byly 35 (aktivní $17,6$) \times $3,3$ \times $12,0\text{ mm}$, přičemž od každého materiálu byly měřeny dva vzorky.



Obr. 61: Zařízení DMA 2980 (TA Instruments) pro stanovení T_g



Obr. 62: Uchycení vzorku v testovacím zařízení

5.4.10. Stanovení chemické odolnosti

Chemická odolnost je důležitým parametrem vyvíjených sanačních hmot, kvůli jejich plánovanému využití v náročných průmyslových a energetických provozech, kde se často používají různé, především agresivní kapalné média, jak silně zásaditého, tak silně kyselého charakteru. Tato zkouška není normována, vycházelo se z podnikové zkoušky firmy Lena Chemical s.r.o. Při působení různých chemikálií na polymery může docházet ke změně fyzikálních vlastností jako je bobtnání nebo barevná změna, dále může dojít k chemickému odbourávání polymerů a nastává roztržení řetězců, sesítování a další

poruchy. Veškeré změny vlastností byly ovlivňovány druhem a koncentrací chemikálie a v neposlední řadě dobou působení chemikálií na povrch polymerů. Dle stanovených receptur se připravily vzorky vybraných polymerních sanačních hmot. Aplikace se prováděla vhodným prostředkem v silnější vrstvě na acetonem očištěném a osušeném podložním laboratorním sklíčku. Vzorky se nechaly polymerovat po dobu 7 dní na čisté podložce při teplotě 20 ± 2 °C a poté se ponořily do uzavíratelné skleněné květy s příslušnou chemikálií. Vzorky se kontrolovaly a fotografovaly po 7 až 30 dnech po ponoření do agresivních kapalných roztoků. Hodnocení výsledku probíhalo především vizuálně, a následně byla hmota dle reakce na chemikálii zatříděna dle hodnotícího systému uvedeného v Tab.9 níže.

Tab. 9: Hodnotící systém pro zrychlenou zkoušku chemické odolnosti navržen s ohledem na předpokládané chování vyvíjených sanačních hmot ve vybraných agresivních médiích

| | |
|-------|---|
| ***** | Hmota nevykazuje žádné změny |
| ***** | Barevné změny |
| ***** | Nabobtnávání + barevné změny |
| **** | Odlepení hmoty od sklíčka |
| *** | Odlepení hmoty od sklíčka + nabobtnávání +barevné změny |
| ** | Odlepení hmoty od sklíčka + změknutí |
| * | Úplné rozložení hmoty |

5.4.11. Stanovení soudržnosti po cyklické změně teplot

Tato zkouška vycházela z normy ČSN EN 13 687-4 „Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Stanovení tepelné slučitelnosti – Část 4: Teplotní cyklování za sucha.“ Avšak v rámci této práce zkouška probíhala v jiném rozmezí teplot a časové změně, než uvádí daná norma. Vyvíjené záливkové a správkové hmoty se v tloušťce 5 mm nanosly na vibrolisovanou betonovou dlažbu, a následně polymerovaly po dobu 14 dní v laboratorních podmínkách. Takto připravené vzorky se umístily do mrazícího zařízení určeného pro zkoušky mrazuvzdornosti betonových výrobků. Hmoty prošly celkem 50 cykly zmrazování a rozmrazování (T50). Poté došlo k vizuálnímu posouzení a k provedení odtrhové zkoušce soudržnosti. Na základě výsledků této zkoušky bylo možné předvídat také dlouhodobou trvanlivost vyvinutých sanačních hmot a jejich chování v extrémních povětrnostních podmínkách, které mohou nastávat taky v místě jejich aplikace.

5.4.12. Stanovení teplotní délkové roztažnosti

Stanovení součinitele délkové teplotní roztažnosti (α) probíhalo pomocí dilatometru CLASIC (Obr. 63), přičemž pro zkoušku byly použity vzorky správkových a záливkových hmot o rozměrech stejných jako při stanovení pevnosti v tahu za ohybu (20 x 20 x 100 mm). Součinitel délkové teplotní roztažnosti (α) se určil dle následujícího vzorce:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \times \Delta t}$$

Kde: α je součinitel délkové teplotní roztažnosti v $[\text{K}^{-1}]$, L_0 je původní délka vzorku v $[\text{mm}]$, Δt je změna teploty v $[\text{K}]$, ΔL je změna délky vzorku.



Obr. 63: Zařízení pro stanovení součinitele teplotní délkové roztažnosti α

5.5. Zkoušky zabývající se sledováním mikrostruktury

5.5.1. Pozorování povrchu optickým mikroskopem a pořízením fotek povrchu s vysokým rozlišením

Sledování mikrostruktury vzorků probíhalo pomocí optického mikroskopu typu Leica DFC450C s vysokým rozlišením, a povrch některých vzorků byl navíc vyfocen digitálním fotoaparátem s vysokým rozlišením. Pro sledování pomocí optického mikroskopu byly použity vzorky vyřezané z trámečků pro stanovení pevností a vzorky, které byly podrobeny zkoušce chemické odolnosti. U vyvíjených kotvících hmot se pozorovalo taky rozhraní mezi kotvou a kotvenou ocelovou tyčí pro zjištění stavu kontaktní zóny v této oblasti.

5.5.2. Skenovací elektronový mikroskop (SEM) s podporou EDX analýzy

Jako skenovací elektronový mikroskop (SEM) pro sledování vnitřní struktury a mikrostruktury byl použit přístroj TESCAN MIRA3 XMU, který umožňuje zkoumat materiály se zvětšením až 1 000 000 x. Pomocí uvedeného mikroskopu byly vzorky sanačních hmot pozorovány při rozlišení do 5000x. SEM série MIRA jsou navrženy s ohledem na široké spektrum aplikací a potřeb dnešního výzkumu a průmyslu. Pomocí všech MIRA komor lze výhodně umístit vzorky v 5-ti osově motorizované vzorkovnici. Dále je vybaven detektory SE, BSE, CL a LVSTD pro práci ve vysokém a nízkém vakuu a je doplněn o EDX analyzátor Bruker pro stanovení prvkového složení [75]. EDX analýza byla použita především pro stanovení rozložení jednotlivých prvků, nacházejících se v plnivech, uvnitř epoxidové matrici.

5.5.3. CT Tomografie

Pro stanovení detailu zakotvení ocelové závitové tyče polymerní kotvící hmotou v betonu a reprofilované části obrubníku vyvinutou polymerní správkovou hmotou je použit výpočetní (CT) Tomograf Phoenix v|tome|x m 300. Jedná se o víceúčelový tomograf pro analýzu a 3D zobrazení velkého spektra materiálu, který pracuje s napětím až 300 kV/ 500 W. Systém nabízí špičkové zvětšení a pracovní napětí 300 kV bez ohledu na to, jestli je pozorovaný objekt menší než 1 μm . Digitální detektorové pole nové generace umožňuje 2–3krát rychlejší CT snímání nebo dvojnásobné rozlišení a automatizaci většiny funkcí. Technologický pokrok v podobě GE přelomového rozptylu a přesné funkce automaticky odstraňuje nežádoucí umělé rozptyly ze skenovacího objemu, což umožňuje dosáhnout výrazně lepších výsledků v porovnání s klasickými CT tomografy s kuželovým paprskem [76].

5.5.4. Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací (FITR)

Za účelem posouzení mikrostruktury vyvinutých speciálních sanačních hmot, především z pohledu zjištění možné reakce epoxidové pryskyřice (EP) s použitými plnivy (popílek, upravený kal), byla v rámci disertační práce použita taky Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací (FTIR). Pomocí této metody lze identifikovat především organické sloučeniny, které mají oblast spektra v rozmezí vlnočtů 400 až 4000 cm^{-1} . V rozsahu 4000–2500 cm^{-1} se nacházejí valenční vibrace vodíku a volná vazba O-H absorbuje při nejvyšších vlnočtech kolem 3600 cm^{-1} . Pro stanovení infračerveného spektra byl použit spektrometr typu Frontier PerkinElmer IR/NIR s ATR diamantovým krystalem, jako nástavcem. Malé množství vzorku (10 mg) o velikosti části < 100 μm se homogenizovalo s 300–400 mg KBr a následně se vylisovala tableta, která byla vložena do FTIR spektrometru za účelem stanovení složení. Pomocí FTIR bylo zjištěno taky spektrum použitého upraveného nebezpečného odpadu (NK), popílku, aby bylo možné jednotlivá spektra porovnat.

5.5.5. Ramanova spektroskopie

Na disperzním Ramanském mikroskopu, který má v tomto ohledu lepší možnosti (různé lasery, lepší variabilita intenzit atd.) než FT-Ramanský modul, byly sledovány vzorky vyvinuté správkové hmoty EKO-X za účelem zjištění inkorporace kontaminantů z použitého NO, jako plniva do polymerní matrice. Dále byly pomocí disperzního Ramanského mikroskopu účelově zjišťovány také spektra vybrané zálivkové a správkové hmoty s obsahem kontaminovaného popílku. V rámci této práce byl použit Ramanský mikroskop na chemické fakultě VUT v Brně.

Ramanova spektrometrie je moderní analytická metoda podobná IR spektrometrii, ale založená na tzv. Ramanově jevu (Ramanově rozptylu). Ramanova spektrometrie je

metodou vibrační molekulové spektroskopie. Kombinací s dalšími metodami jako konfokální, elektronovou mikroskopií či mikroskopií atomárních sil se dostává nových možností identifikací vzorků s řadou výhod. Spojením s konfokální mikroskopií se dospělo k možnosti měření i při prostorovém rozlišení pod μm , vysokým spektrálním rozlišením a široké možnosti v oblasti volby podmínek měření Ramanských spekter [77].

5.6. Prověřování ekologické vhodnosti hmoty EKO-X

5.6.1. Zkouška vyluhovatelnosti

Zkouška vyluhovatelnosti byla prováděna u neutralizačního kalu (NO), který byl použit jako plnivo do speciální polymerní správkové hmoty EKO-X, a taky na samotné vyvinuté hmotě EKO-X. Provádění zkoušky vyluhovatelnosti vyplývalo z vyhlášky č. 294/2005 Sb. o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady. Vyluhovatelnost odpadů a jednotlivé třídy vyluhovatelnosti (I, IIa, IIb, III) jsou uvedeny v příloze č. 2 této vyhlášky – Tabulka č. 2.1. nejvýše přípustné hodnoty ukazatelů pro jednotlivé třídy vyluhovatelnosti. Postup hodnocení vyluhovatelnosti odpadů je stanoven v metodickém pokynu Ministerstva životního prostředí (MŽP) k hodnocení vyluhovatelnosti odpadů zveřejněném ve Věstníku MŽP, ročník XII, částka 12, prosinec 2002. Zkouška vyluhovatelnosti byla provedena v akreditované zkušební laboratoři ALS Czech Republic, s.r.o. dle normy ČSN EN 12457-4: *Charakterizace odpadů – Vyluhování – Ověřovací zkouška vyluhovatelnosti zrnitých odpadů a kalů – Část 4: Jednostupňová vsádková zkouška při poměru kapalné a pevné fáze 10 l/kg pro materiály se zrnitostí menší než 10 mm (bez zmenšení velikosti částic, nebo s ním)*. V případě odpadů obsahujících anorganická pojiva (vápno, hydraulické vápno, cement apod.) může být pH výluhu upraveno na hodnotu ležící v intervalu $7,8 \pm 0,2$ [78].

5.6.2. Koncentrace škodlivin v sušině

Stanovování koncentrace škodlivin v sušině bylo prováděno u použitého nebezpečného odpadu (NO), neutralizačního kalu (NK), který byl použit jako plnivo do speciální polymerní správkové hmoty EKO-X, a taky na samotné vyvinuté hmotě. Stanovení koncentrace škodlivin v sušině vyplývalo ze stejné vyhlášky, jako zkouška vyluhovatelnosti. Limitní hodnoty koncentrace škodlivin a biologických činitelů vybraných na základě znalosti technologie vzniku odpadu se řadí mezi kritické ukazatele. Požadavky na obsah škodlivin v odpadech využívaných na povrchu terénu stanovuje Tabulka č. 10 uvedené vyhlášky, jako limitní koncentrace škodlivin v sušině odpadů [78].

5.6.3. Ekotoxicita

V rámci hodnocení ekotoxikologických vlastností materiálů patří mezi běžně používané testy, stanovení akutní toxicity. Tyto zkoušky jsou zaměřeny na toxické účinky látek, které se projevují v krátké době po jednorázovém podání látky, přičemž je účinkům látky vystaven testovací organismus přímo. Zkoušky akutní toxicity se prováděly s neředěným vodným výluhem odpadu a doba jejich trvání se pohybovala v rozmezí 48 až 96 hodin – dle druhu organismu. V rámci požadavků pro využití odpadů na povrchu terénu, vyhláška č. 294/2005 Sb. v příloze č. 10 (Tabulka č. 10.2) uvádí požadavky na výsledky ekotoxikologických testů, podle kterých bylo možno sledovaný odpad zařadit do kategorie I nebo II. Příloha č. 11 pak definuje podmínky pro využívání odpadů na povrchu terénu, kde pro různé způsoby využití odpadu na povrchu terénu jsou definovány požadavky na výsledky ekotoxikologických testů. Technické normy pro analytická stanovení ekotoxikologických testů uvádí příloha č. 12 této vyhlášky. Zkouška se prováděla na čtyřech druzích organismů a řídila se normami:

- ČSN EN ISO 7346-2 – Stanovení akutní letální toxicity látek pro sladkovodní ryby.
- ČSN EN ISO 6341 – Zkouška inhibice pohyblivosti *Daphnia magna* Straus (Cladocera, Crustacea) – Zkouška akutní toxicity.
- ČSN EN ISO 8692 – Zkouška inhibice růstu sladkovodních zelených řas.
- Metodický pokyn Ministerstva životního prostředí ke stanovení ekotoxicity odpadů uveřejněný ve Věstníku MŽP č. 4/2007, dále vyhláškou č. 294/2005 Sb. a vyhláškou č. 376/2001 Sb. – Test inhibice růstu kořene hořčice [78].

6. REALIZACE, VYHODNOCENÍ A DISKUSE PRÁCE JEDNOTLIVÝCH ETAP

6.1. 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. Pro každý typ vyvíjené sanační hmoty (správkové, zálivkové, kotvící) bylo potřeba zvolit optimální typ druhotné suroviny o vhodné granulometrii za účelem nahrazení primárních současně využívaných surovin, jako je např. křemičitý písek. Plniva byly charakterizované především na základě jejich chemického složení, velikosti částic a potřebnou předúpravou. Vybraný nebezpečný odpad (NO) – neutralizační kal (NK), byl charakterizován taky stanovením koncentrace škodlivin v sušině a třídou vyluhovatelnosti. U polymerních pojiv bylo důležité popsat

typ pryskyřice, zpracovatelnost, dobu tuhnutí a podmínky pro použití. Po identifikaci všech plniv a pojiv následoval návrh základních receptur, dle kterých se realizovalo prvotní zkoušení – aplikační test. Na závěr této etapy byl na základě zhodnocení výsledků aplikačního testu proveden výběr receptur pro další zkoušení, realizované v další etapě.

6.1.1. Plniva

Vhodná plniva do vyvíjených speciálních sanačních hmot, uvedená v *Tab. 10*, byla vybrána na základě optimalizačního výpočtu, který byl proveden metodou kvantitativního párového srovnání. Tento výpočet zde není uveden z důvodu rozsahu této disertační práce – bylo by potřeba charakterizovat ještě dalších 50 druhotných a odpadních surovin, které do optimalizačního výpočtu vstupovaly. 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 (6.1.1.1–6.1.1.9), kde jsou uvedeny všechny důležité parametry k danému materiálu.

Tab. 10: Vybraná vhodná plniva pro jednotlivé vyvíjené speciální sanační hmoty na beton

| Typ plniva a označení | Vyvíjená polymerní sanační hmota | | |
|--|----------------------------------|-----------|---------|
| | správková | zálivková | kotvící |
| 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 | - |
| 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 | - | - |

6.1.1.1. Primární – referenční plnivo (REF)

Jako primární plnivo do referenčních hmot byl použit křemičitý písek Dorsilit typu ISG. Směsi křemičitých písků Dorsilit ISG jsou připravovány ze sušených křemičitých písků v odstupňovaných zrnitostech. Tyto písky umožňují v systémech s polymerními pryskyřicemi dosažení vyšší hustoty než jednotlivé frakce a tím se snižuje spotřeba pryskyřice za současného zvýšení pevnosti výsledného produktu. Jsou prosté nečistot a mají optimální kulatý tvar zrna, přičemž pro jejich dokonalé obalení stačí pouze 8–10 % pryskyřice. Požívají se především jako plnivo do polymerbetonu (PC), plnivo do pryskyřic, malt, stěrek a zásypů. Podle potřebné tloušťky vrstvy a tím potřebného největšího zrna dodává společnost Chejn, spol. s r.o. různé typy směsí, a to směs A1 (0,06–1,5 mm) pro optimální tloušťku cca 5 mm, směs B1 (0,06–2,5 mm) pro tloušťku cca 8 mm a směs C1 (0,06–3,5 mm) pro tloušťku cca 11 mm [79].

Cena použitých Dorsilit písků se pohybuje kolem 15–20 Kč / kg.

V rámci této práce byla pro referenční správkovou hmotu použita směs ISG A1, pro referenční zálivkovou hmotu směs ISG A2 a pro vyvíjenou kotvící hmotu se použila frakce 0–0,63 mm jako referenční plnivo pro srovnání s odpadním sklem a frakce 0–0,1 mm pro srovnání s hmotami obsahujícími kontaminovanou popílky. Jednotlivé distribuční křivky rozložení velikosti částic pro jednotlivé vyvíjené hmoty jsou uvedeny v *Tab. 11*.

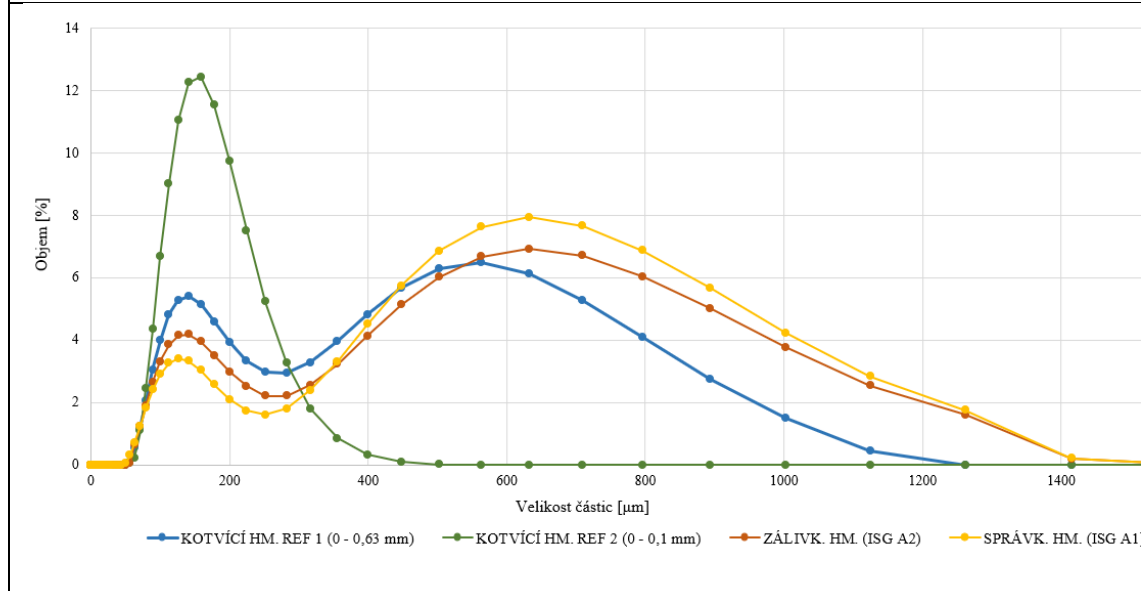
Tab. 11: Identifikace primárního referenčního plniva – křemičitého písku Dorsilit ISG

| | |
|-------------------------------------|--|
| Výrobce | chejn spol.s.r.o. Pražská 1194 342 01 Sušice |
| Měrná hmotnost | 2662 kg/m ³ |
| Tvrdość | 7 dle Mohse |
| Sypná hmotnost volně sypaného písku | 1450 kg/m ³ |
| Ztráta sušením | 0 % |
| Ztráta žiháním (1100 °C) | 0,29 % suš. |

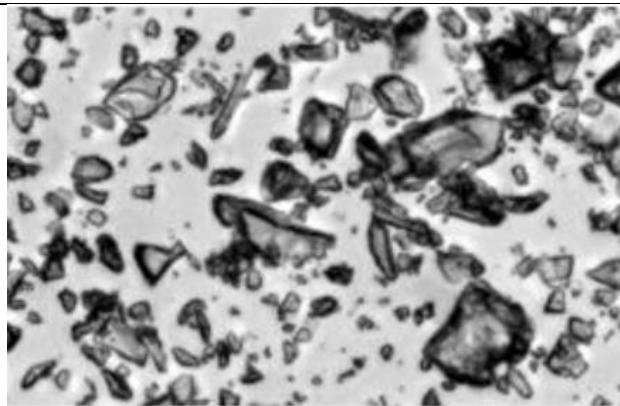
Chemické složení [% suš.]:

| | | | | | |
|---------|-----------|-----------|-----------|---------|-------|
| SiO_2 | Al_2O_3 | Fe_2O_3 | Na_2O | Li_2O | CaO |
| 99,5 | 0,41 | 0,028 | 0,029 | <0,001 | 0,038 |
| K_2O | BaO | TiO_2 | Cr_2O_3 | ZnO | PbO |
| 0,222 | 0,013 | 0,031 | <0,004 | 0,01 | 0,02 |

Distribuce velikosti částic Dorsilit písku pro jednotlivé vyvíjené hmoty:



Tvar částic (optický mikroskop – zvětšení 20x) – nepravidelný, většina hran zakulacených



Fotodokumentace (frakce ISG A1 (0–1,5 mm))



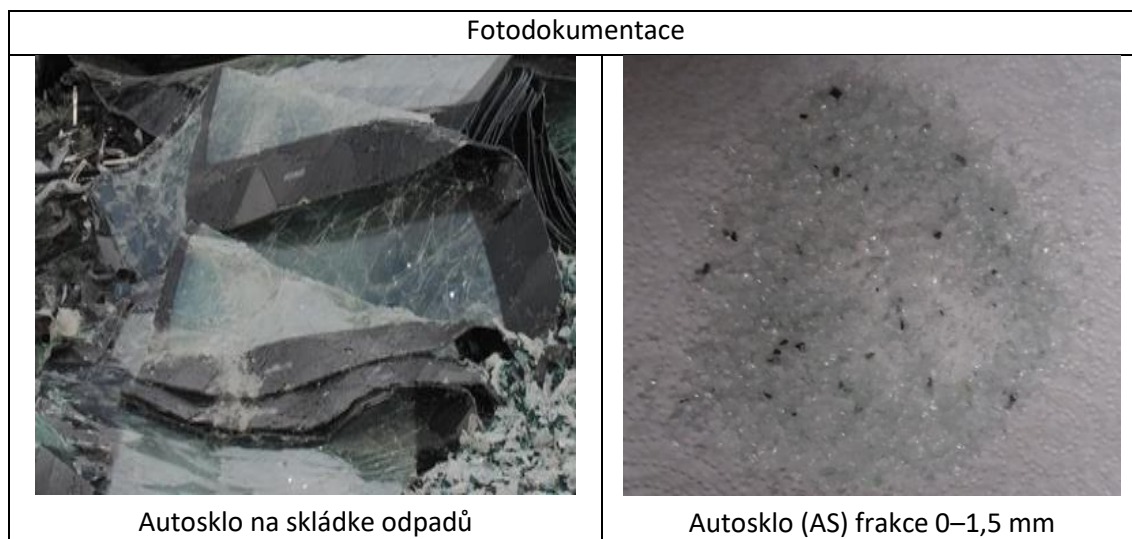
6.1.1.2. Odpadní autosklo (AS)

Před samotným použitím muselo být odpadní autosklo (AS) nejprve předupraveno drcením, odstraněním bezpečnostní folie, mletím a vytríděním na požadovanou granulometrii v závislosti od typu vyvíjené hmoty.

Obyčejné sklo, používané především pro výrobu obalů, se značně odlišuje od autoskel, zejména složením. Autoskla obsahují navíc pryskyřice, tónovací pokovení, a hlavně vloženou bezpečnostní polyvinyl butyralovou (PVB) fólii, chránící řidiče. Znehodnocená autoskla není možné vhadzovat do tříděného odpadu, protože běžná dotřídňovací linka na obalové sklo nedokáže automobilová skla vytrdit ani upravit a také sklárny nemají na zpracování autoskla potřebnou výbavu. Ve většině případů bývají bezpečnostní fólií vybavena pouze čelní skla, přičemž cena recyklace skel s bezpečnostní fólií je zhruba 2,5krát vyšší než cena recyklace ostatních autoskel [80]. Bližší charakteristika použitého AS je uvedena v Tab. 12.

Tab. 12: Identifikace použitého odpadního autoskla

| | | | | | |
|---|--------------------------------|--|-------------------|-------------------|------|
| Původce | | Frýdecká skládka, a.s. Panské Nové Dvory 3559 738 01 Frýdek-Místek | | | |
| Požadavky na předúpravu | | Drcení, mletí, čištění, třídění | | | |
| Měrná hmotnost | | 2540 kg/m ³ | | | |
| Ztráta žiháním (1100 °C) | | 0,65 % suš. | | | |
| Chemické složení [% suš.]: | | | | | |
| SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | Na ₂ O | Li ₂ O | CaO |
| 69,16 | 0,69 | 0,14 | 12,00 | 0,004 | 9,19 |
| MgO | BaO | K ₂ O | ZnO | TiO ₂ | PbO |
| 3,71 | 0,17 | 0,32 | 0,01 | 0,03 | 0,02 |
| Distribuce velikosti částic odpadního autoskla pro jednotlivé vyvíjené hmoty: | | | | | |
| | | | | | |



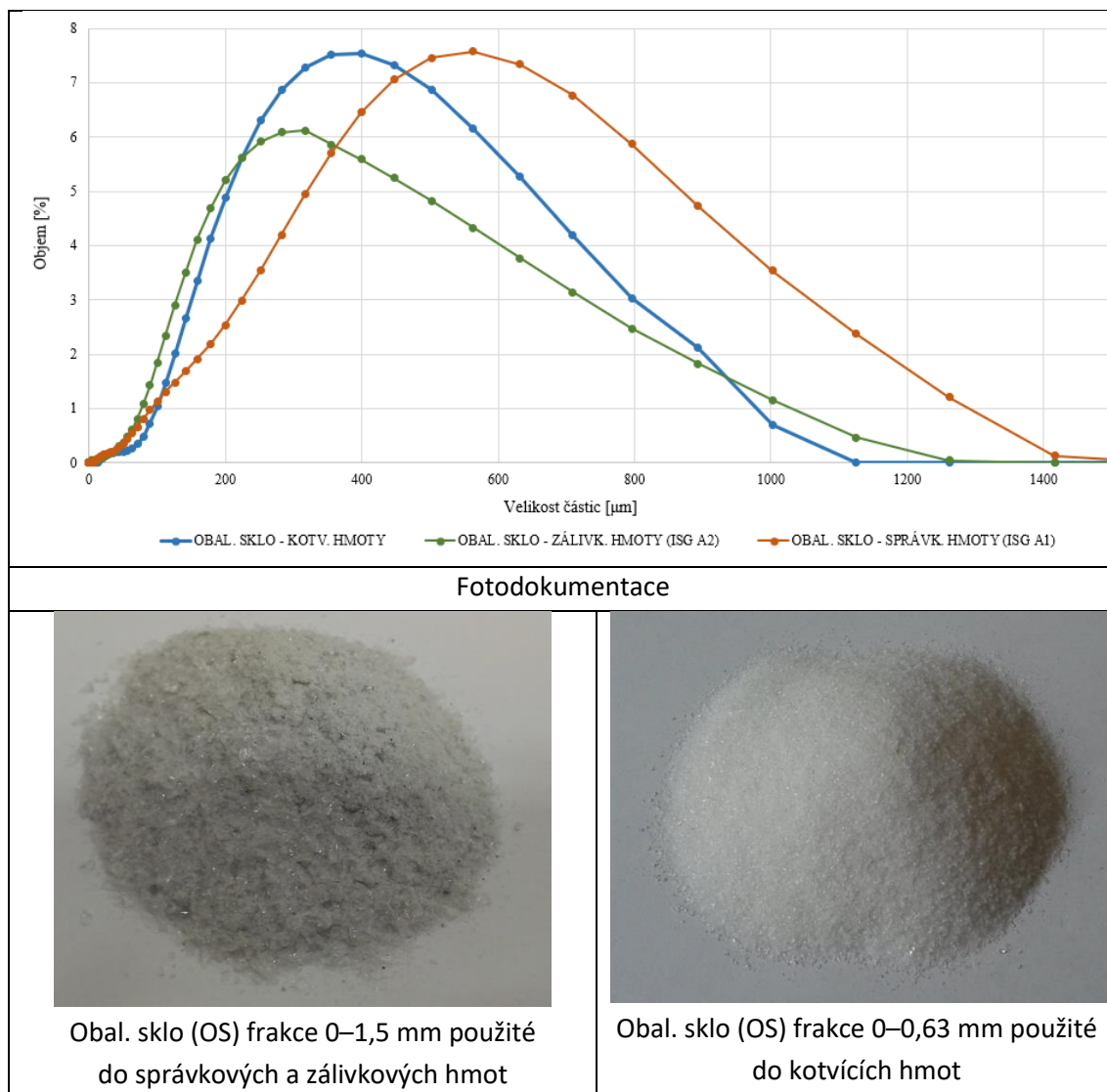
6.1.1.3. Odpadní obalové sklo (OS)

V České republice připadá průměrně na jednoho obyvatele přibližně 13 kg vyříděného obalového skla ročně. Pokud se ze starého obalového skla nestane přetavením sklo nové, použije se skelná drť do izolačních materiálů, brusiv nebo betonových směsí. Evropská federace výrobců skla (FEVE) konstatuje, že průměrná míra recyklace obalového skla na území EU je kolem 68 %. Za rok 2010 se v celé EU odevzdalo k recyklaci něco kolem 25 miliard lahví a dalších skleněných obalů. Základní surovinou pro výrobu skla jsou tzv. sklářské písky s obsahem SiO_2 60–80 %, dále to jsou CaO , K_2O a Na_2O [81].

Jako progresivní druhotná surovina bylo v rámci této práce použito odpadní transparentní obalové sklo od společnosti Vetropack Moravia Glass, a.s., přičemž toto sklo již bylo na místě odběru nadrcené na velikost přibližně 3–5 mm. Bližší informace o tomto odpadním skle jsou uvedeny v Tab. 13.

Tab. 13: Identifikace použitého odpadního obalového skla

| | | | | | |
|---|-------------------------|---|-----------------------|-------------------------|--------------|
| Původce | | VETROPACK MORAVIA GLASS, a.s. Havličkova 180 CZ-69701 Kyjov | | | |
| Roční produkce | | 10 000 tun | | | |
| Požadavky na předúpravu | | Mletí, třídění | | | |
| Měrná hmotnost | | 2534 kg/m ³ | | | |
| Chemické složení [% suš.]: | | | | | |
| SiO_2 | Al_2O_3 | Fe_2O_3 | Na_2O | Cr_2O_3 | CaO |
| 74,54 | 0,55 | 0,17 | 11,91 | 0,072 | 7,69 |
| MgO | BaO | K_2O | ZrO_2 | MnO | Org. látky |
| 4,27 | 0,24 | 0,19 | 0,005 | 0,02 | 0,13 |
| Distribuce velikosti částic odpadního obalového skla pro jednotlivé vyvíjené hmoty: | | | | | |



6.1.1.4. Odpadní sklo ze solárních panelů QS solar

Solární (fotovoltaické – FV) panely typu QS, které byly použity v rámci této práce, jsou vyráběny společností QS Solar v Číně. Jedná se o tenkovrstvý modul, který je na bázi amorfního křemíku (SiO_2) a není znečištěn jinými materiály.

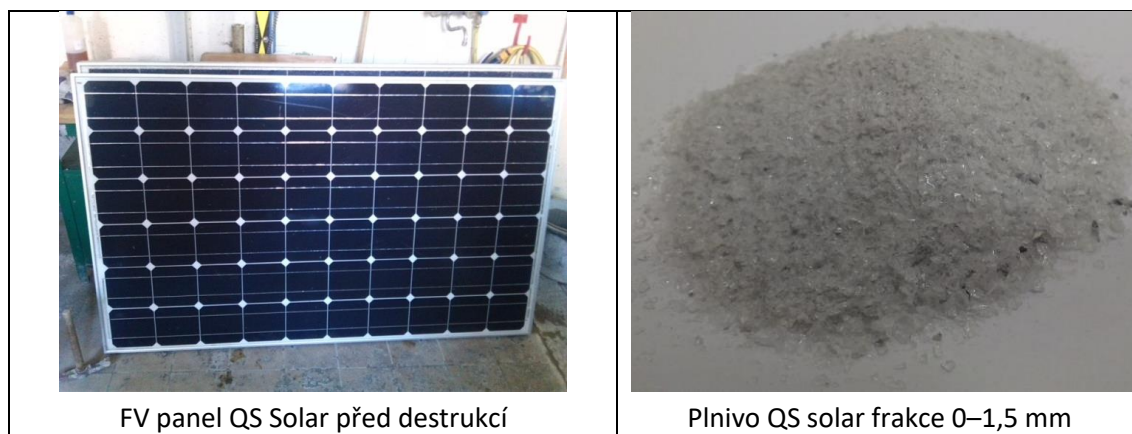
V současnosti se předpokládá, že životnost FV panelů definovaná poklesem účinnosti o 20 % bude u kvalitních panelů minimálně 30 až 40 let od jejich instalace. Avšak u většiny případů je hlavním důvodem pro vyřazení panelu jeho mechanické poškození při dopravě nebo instalaci. Hlavním problémem u méně kvalitních panelů bývá delaminace – sendvičová struktura FV panelu se vlivem teploty a UV záření „rozlepi“. K recyklaci FV panelů byl vytvořen systém PV Cycle. Jedná se o celoevropskou aktivitu výrobců a dodavatelů fotovoltaických (FV) panelů založenou na dobrovolné zodpovědnosti za výrobek v průběhu celého životního cyklu. Jeden kontejner je určen na krystalické křemíkové panely, druhý na panely tenkovrstvé, pro jejichž recyklaci je používána jiná

technologie. Největší podíl na hmotnosti krystalických FV panelů připadá na sklo (60–70 %) a hliníkový rám (kolem 20 %), přičemž u tenkovrstvých panelů je podíl skla a hliníku přes 95 %. V roce 2010 bylo instalováno nejvíc, a to 160 000 tun FV panelů, u kterých se předpokládá konec životnosti v roce 2040 [82].

Z dodaných již nefunkčních FV panelů musel být nejprve odstraněn hliníkový rám. Vrchní sklo bylo velice těžké odstranit od polymerního podkladu, a proto musel být panel po odstranění všech kovových částic hozen do kulového mlýnu na přibližně 20 minut, kdy došlo k oddělení skla od houževnatého polymerního podkladu. Následně byly jednotlivé kusy domílány na požadovanou frakci po dobu přibližně dalších 10 minut. Chemické složení a další vlastnosti tohoto typu odpadního skla jsou uvedeny v Tab.14.

Tab. 14: Identifikace použitého odpadního skla z již nefunkčních FV panelů typu QS Solar

| Původce | | iSolar s.r.o. Hronovická 663 530 02 Pardubice | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|------------------------------------|---|--------------------------------|------------------|-------|----------------------|------------------------------------|---|---|---|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|
| Požadavky na předúpravu | | Demontáž, drcení, mletí, třídění | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Měrná hmotnost | | 2509 kg/m ³ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ztráta sušením (105 °C) | | 0,65 % | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ztráta žiháním (1100 °C) | | 0,65 % suš. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Chemické složení [% suš.]: | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | Na ₂ O | K ₂ O | CaO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 71,00 | 0,499 | 0,110 | 12,40 | 0,171 | 8,45 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MgO | BaO | MnO | Cr ₂ O ₃ | TiO ₂ | SrO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4,04 | 0,009 | 0,006 | 0,005 | 0,023 | 0,005 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Distribuce velikosti částic odpadního skla z FV panelů QS Solar pro jednotlivé vyvíjené hmoty: | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <table border="1"> <caption>Estimated data from the particle size distribution graph</caption> <thead> <tr> <th>Velikost částic [µm]</th> <th>Objem [%] - QS SOLAR - KOTV. HMOTY</th> <th>Objem [%] - QS SOLAR - ZÁLIVK. HMOTY (ISG A2)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>100</td><td>0.5</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>200</td><td>3.5</td><td>3.5</td></tr> <tr><td>300</td><td>6.0</td><td>4.5</td></tr> <tr><td>400</td><td>6.8</td><td>5.0</td></tr> <tr><td>500</td><td>7.0</td><td>5.5</td></tr> <tr><td>600</td><td>6.5</td><td>5.5</td></tr> <tr><td>700</td><td>5.0</td><td>5.0</td></tr> <tr><td>800</td><td>3.5</td><td>4.5</td></tr> <tr><td>900</td><td>2.5</td><td>4.0</td></tr> <tr><td>1000</td><td>1.5</td><td>3.5</td></tr> <tr><td>1100</td><td>0.5</td><td>3.0</td></tr> <tr><td>1200</td><td>0.2</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>1300</td><td>0.1</td><td>2.0</td></tr> <tr><td>1400</td><td>0.1</td><td>1.5</td></tr> <tr><td>1500</td><td>0.1</td><td>1.0</td></tr> <tr><td>1600</td><td>0.1</td><td>0.8</td></tr> <tr><td>1700</td><td>0.1</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>1800</td><td>0.1</td><td>0.2</td></tr> </tbody> </table> | | | | | | Velikost částic [µm] | Objem [%] - QS SOLAR - KOTV. HMOTY | Objem [%] - QS SOLAR - ZÁLIVK. HMOTY (ISG A2) | 0 | 0 | 0 | 100 | 0.5 | 0.5 | 200 | 3.5 | 3.5 | 300 | 6.0 | 4.5 | 400 | 6.8 | 5.0 | 500 | 7.0 | 5.5 | 600 | 6.5 | 5.5 | 700 | 5.0 | 5.0 | 800 | 3.5 | 4.5 | 900 | 2.5 | 4.0 | 1000 | 1.5 | 3.5 | 1100 | 0.5 | 3.0 | 1200 | 0.2 | 2.5 | 1300 | 0.1 | 2.0 | 1400 | 0.1 | 1.5 | 1500 | 0.1 | 1.0 | 1600 | 0.1 | 0.8 | 1700 | 0.1 | 0.5 | 1800 | 0.1 | 0.2 |
| Velikost částic [µm] | Objem [%] - QS SOLAR - KOTV. HMOTY | Objem [%] - QS SOLAR - ZÁLIVK. HMOTY (ISG A2) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 100 | 0.5 | 0.5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 200 | 3.5 | 3.5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 300 | 6.0 | 4.5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 400 | 6.8 | 5.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 500 | 7.0 | 5.5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 600 | 6.5 | 5.5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 700 | 5.0 | 5.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 800 | 3.5 | 4.5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 900 | 2.5 | 4.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1000 | 1.5 | 3.5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1100 | 0.5 | 3.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1200 | 0.2 | 2.5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1300 | 0.1 | 2.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1400 | 0.1 | 1.5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1500 | 0.1 | 1.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1600 | 0.1 | 0.8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1700 | 0.1 | 0.5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1800 | 0.1 | 0.2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fotodokumentace | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

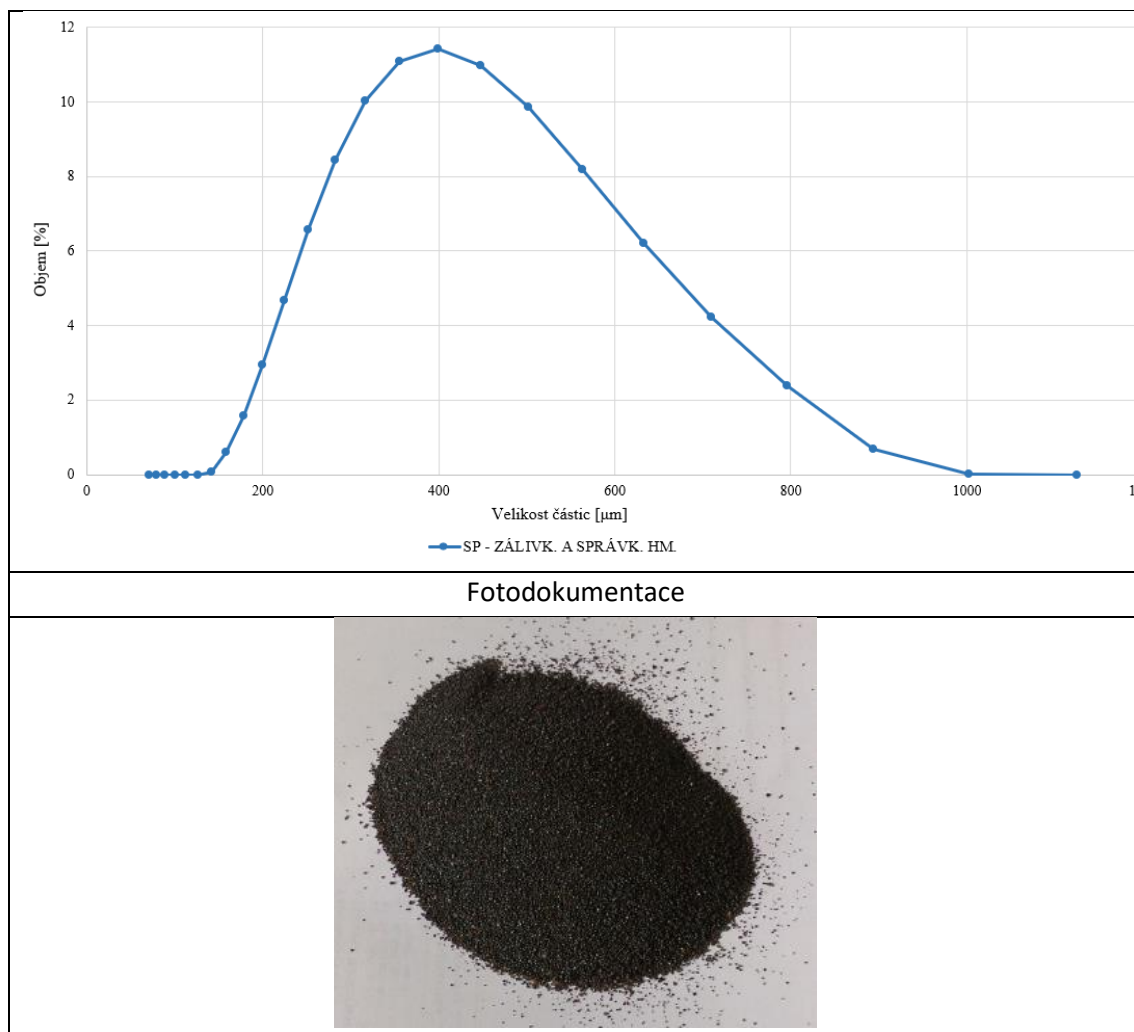


6.1.1.5. Odpadní slévárenský písek (SP)

Jako další plnivo na bázi druhotných surovin byl vybrán již dále nevyužitelný přírodní slévárenský písek ze Slovenské republiky, ze sléváren ZLH Plus, a.s., kde je roční produkce tohoto odpadního produktu přibližně 6600 tun (1100 kg písku na tunu odlitků, cca 6000 odlitků ročně). Přírodní slévárenské písky jsou vzhledem ke své variabilitě stále častěji nahrazovány syntetickými písky, tj. písky křemennými, do kterých se vmíchává stanovené množství vazné příměsi (většinou bentonit) [83]. V ČR činí roční spotřeba slévárenských písků (SP) zhruba 800 000 tun, z tohoto množství je recyklováno pouze necelých 10 %. Písky pojené bentonitem nebo cementem a směsi s vodním sklem jsou z hlediska životního prostředí prakticky nezávadné [84]. Tento odpadní písek byl upraven ve slévárnách na frakci menší než 1,0 mm, aby se nemusel pro další využití náročně předupravovat. Bližší specifikace použitého odpadního SP je uvedena v *Tab. 15*.

Tab. 15: Identifikace použitého odpadního slévárenského písku (SP)

| | | | | | |
|---|--|------------------------------------|------------------------------------|------------------------|------------------------|
| <i>Původce</i> | ZLH Plus, a.s. Zlievarenská 533 976 45 Hronec Slovenská republika | | | | |
| <i>Roční produkce</i> | 6600 tun | | | | |
| <i>Požadavky na předúpravu</i> | Třídění | | | | |
| <i>Měrná hmotnost</i> | 2680 kg/m ³ | | | | |
| <i>Ztráta sušením (105 °C)</i> | 0,07 % | | | | |
| <i>Ztráta žiháním (1100 °C)</i> | 0,36 % suš. | | | | |
| <i>Chemické složení [% suš.]:</i> | | | | | |
| <i>SiO₂</i> | <i>Al₂O₃</i> | <i>Fe₂O₃</i> | <i>Na₂O</i> | <i>K₂O</i> | <i>CaO</i> |
| 94,00 | 1,72 | 0,387 | 1,99 | 0,726 | 0,174 |
| <i>MgO</i> | <i>BaO</i> | <i>MnO</i> | <i>Cr₂O₃</i> | <i>TiO₂</i> | <i>ZrO₂</i> |
| 0,057 | 0,019 | 0,011 | 0,081 | 0,037 | 0,019 |
| <i>Distribuce velikosti částic odpadního slévárenského písku pro jednotlivé vyvíjené hmoty:</i> | | | | | |



6.1.1.6. Odpadní struska (SS)

Použitá slévárenská struska (SS) je také odpadním produktem sléváren ZLH Plus, a.s., kde vzniká tak, že na hladině roztaveného kovu v peci se shromažďují lehčí nekovové tekuté složky tavícího procesu, což představuje strusku, kterou je potřeba odstranit. Tato struska je kontinuálně odváděna přes struskový sifon, umístěný vůči odpichovému sifonu ve vyšší poloze. Struska se ochlazuje v granulačním žlabu vodou a ve směsi s ní je dopravována na úložiště [85]. Při mletí a třídění strusky byl zjištěn také nepatrný obsah kovových částí, které musely být před použitím odstraněny, aby nezpůsobovaly problémy s konzistencí a nezneškodnocovaly další vlastnosti. Charakteristické vlastnosti SS uvádí Tab. 16.

Tab. 16: Identifikace použitého odpadního slévárenského písku

| | |
|----------------|--|
| Původce | ZLH Plus, a.s. Zlievarenská 533 976 45 Hronec Slovenská republika |
| Roční produkce | 540 tun |

| | | | | | |
|---|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------------------|
| Požadavky na předúpravu | | | Mletí, třídění | | |
| Měrná hmotnost | | | 2890 kg/m ³ | | |
| Ztráta sušením (105 °C) | | | 0,12 % | | |
| Ztráta žiháním (1100 °C) | | | 2,36 % suš. | | |
| Chemické složení [% suš.]: | | | | | |
| SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | Na ₂ O | K ₂ O | CaO |
| 41,50 | 11,60 | 9,89 | 0,27 | 0,44 | 24,80 |
| MgO | BaO | MnO | Cr ₂ O ₃ | TiO ₂ | ZrO ₂ |
| 7,23 | 0,122 | 0,499 | 0,061 | 0,460 | 0,023 |
| Distribuce velikosti částic odpadního slévárenské strusky pro vyvíjené správkové hmoty: | | | | | |
| <p>Objem [%]</p> <p>Velikost částic [µm]</p> <p>— STRUSKA - SPRÁVK. HMOTY</p> | | | | | |
| Fotodokumentace | | | | | |
| | | | | | |

6.1.1.7. Opad z výroby minerálních izolačních desek (OIDM)

Opad z výroby izolačních desek z minerální vlny (OIDM) s vysokým podílem skelného recyklátu (> 80 %), byl vybrán jako další vynikající plnivo v podobě druhotné suroviny do vyvíjených sanačních hmot. Jedná se o suchý vedlejší produkt výroby, který na technologické lince odpadáva zpod rozvláknovacího stroje před vytvrzovací komorou, a proto neobsahuje žádnou organickou složku, a lze ho označit jako skelný recyklát bez organiky (OIDM). Chemické složení této druhotné suroviny je spolu s dalšími parametry uvedeno v Tab. 17.

Tab. 17: Identifikace použité druhotné suroviny z výroby minerálních izolačních desek

| | | | | | |
|--|------------------------------------|---|------------------------|------------------------|------------------------|
| Původce | | Saint-Gobain Isover CZ s.r.o. Smrčkova 4 180 00 Praha 8 | | | |
| Požadavky na předúpravu | | Není potřeba nijak upravovat | | | |
| Měrná hmotnost | | 2620 kg/m ³ | | | |
| Měrný povrch | | 90 m ² /kg | | | |
| Ztráta sušením (105 °C) | | 0,00 % | | | |
| Ztráta žiháním (1100 °C) | | 0,07 % suš. | | | |
| Chemické složení [% suš.]: | | | | | |
| <i>SiO₂</i> | <i>Al₂O₃</i> | <i>Fe₂O₃</i> | <i>Na₂O</i> | <i>K₂O</i> | <i>CaO</i> |
| 50,60 | 13,50 | 0,33 | 0,35 | 0,58 | 21,20 |
| <i>MgO</i> | <i>BaO</i> | <i>SrO</i> | <i>Li₂O</i> | <i>TiO₂</i> | <i>ZrO₂</i> |
| 0,45 | 0,02 | 0,11 | 0,01 | 0,32 | 0,011 |
| Distribuce velikosti částic odpadu z výroby minerálních izolačních desek pro vyvíjené zálivk. hmoty: | | | | | |
| <p>Objem [%]</p> <p>Velikost částic [μm]</p> <p>— ODPAD Z VÝROBY MIN. DESEK</p> | | | | | |
| Fotodokumentace | | | | | |
| | | | | | |



6.1.1.8. Popílký kontaminované vlivem denitrifikace spalin

Pro tuto práci byly vybrány některé typy filtrových popílků, které byly kontaminovány vlivem denitrifikace spalin (DeNO_x) selektivní nekatalytickou redukcí (SNCR), kdy se do kotle při vysokých teplotách vstřikuje roztok močoviny (CH₄N₂O). Do vyvíjených polymerních správkových hmot byl použit denitrifikovaný popílek z tepelné elektrárny Třebovice (KP-TŘ) a do kotvicích hmot byly použity popílký z tepelných elektráren Opatovice (KP-OPAT), Kladno (FP-KLAD) a Nováky (KP-NOV). Bližší popis těchto popílků je uveden v *Tab. 18*. V tepelné elektrárně Třebovice se spaluje většinou černé uhlí, v Opatovicích hnědé uhlí, v Kladnu hnědé, černé a biomasa, a v Novácké elektrárně se spaluje hnědé uhlí. U jednotlivých popílků byl stanovován také obsah amoniaku (NH₃), přičemž jak je patrné z *Tab. 18*, tato hodnota se liší v závislosti od typu popílků.

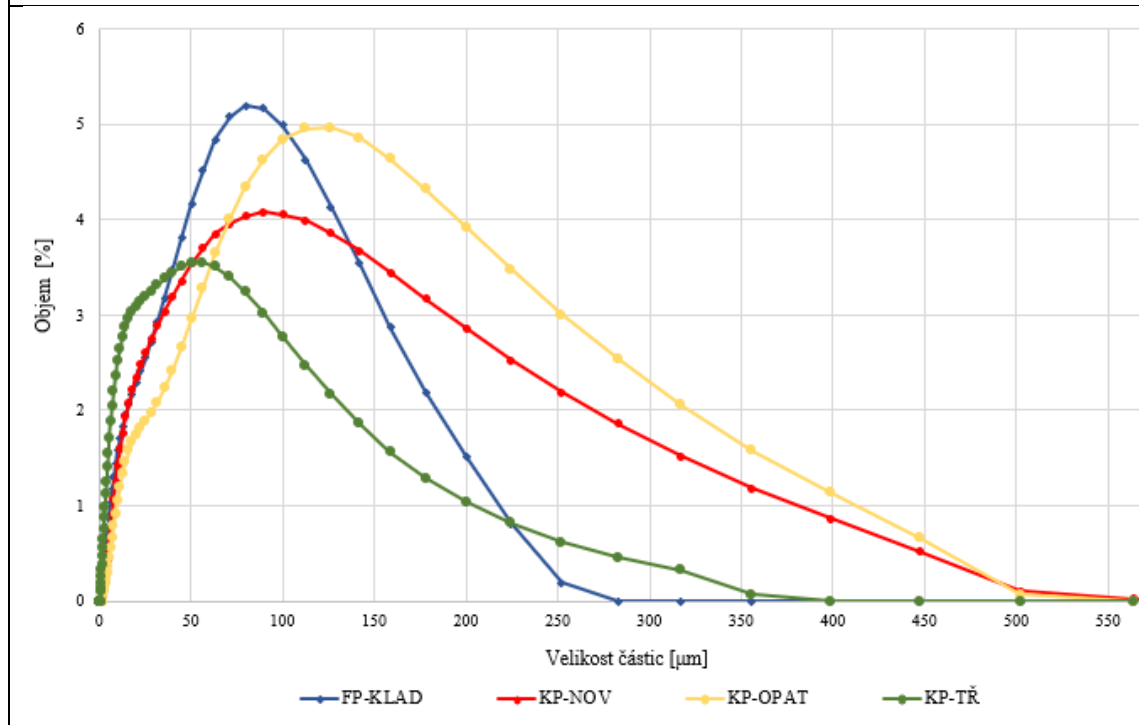
Tab. 18: Identifikace použitých filtrových popílků kontaminovaných vlivem DeNO_x technologie

| | |
|--|---|
| <i>Původce vysokoteplotního filtrového popílků Třebovice (KP-TŘ)</i> | Veolia Energie ČR, a.s. Tepelná elektrárna Třebovice Elektrárenská ul. 5562/17 Ostrava-Třebovice |
| <i>Původce vysokoteplotního filtrového popílků Opatovice (KP-OP)</i> | Elektrárny Opatovice, a.s. Tepelná elektrárna Opatovice Opatovice nad Labem |
| <i>Původce fluidního filtrového popílků Kladno (FP-KLAD)</i> | Alpiq Generation (CZ) s.r.o. Tepelná elektrárna Kladno Dubská 257 272 03 Kladno |
| <i>Původce vysokoteplotního filtrového popílků Nováky (KP-NOV)</i> | Slovenské elektrárne, a.s. 972 43 Zemianske Kostolany Slovensko |

| | | | | | |
|--|--|--------------------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Požadavky na předúpravu | Ani jeden z popílků není potřeba před použitím upravovat | | | | |
| Specifikace vysokoteplotního filtrového popílku Třebovice (KP-TŘ) | | | | | |
| Měrná hmotnost | 2390 kg/m ³ | | | | |
| Měrný povrch | 341 m ² /kg | | | | |
| Ztráta sušením (105 °C) [%] | 0,05 | | | | |
| Amonné ionty [mg/kg suš.] | 3,79 | | | | |
| Chemické složení [% suš.]: | | | | | |
| SiO ₂ | CaO | SO ₃ | TOC | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ |
| 53,40 | 4,13 | 0,25 | 5,20 | 18,34 | 10,57 |
| Specifikace vysokoteplotního filtrového popílku Opatovice (KP-OPAT) | | | | | |
| Měrná hmotnost | 2420 kg/m ³ | | | | |
| Měrný povrch | 278 m ² /kg | | | | |
| Ztráta sušením (105 °C) [%] | 0,25 | | | | |
| Ztráta žiháním (1100 °C) [% suš.] | 2,32 | | | | |
| Chloridy [mg/kg suš.] | 57 | | | | |
| Koncentrace NH ₃ | 97 ppm | | | | |
| Chemické složení [% suš.]: | | | | | |
| SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | Na ₂ O | K ₂ O | CaO |
| 49,60 | 25,90 | 11,50 | 0,414 | 1,52 | 2,16 |
| MgO | MnO | P ₂ O ₅ | SO ₃ | TiO ₂ | Li ₂ O |
| 1,34 | 0,086 | 0,225 | 0,25 | 1,06 | 0,005 |
| Specifikace vysokoteplotního filtrového popílku Nováky (KP-NOV) | | | | | |
| Měrná hmotnost | 2140 kg/m ³ | | | | |
| Měrný povrch | 440 m ² /kg | | | | |
| Ztráta sušením (105 °C) [%] | 0,25 | | | | |
| Ztráta žiháním (1100 °C) [% suš.] | 3,48 | | | | |
| Chloridy [mg/kg suš.] | 266 | | | | |
| Koncentrace NH ₃ | 20,05 ppm | | | | |
| Chemické složení [% suš.]: | | | | | |
| SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | Na ₂ O | K ₂ O | CaO |
| 50,10 | 18,60 | 9,77 | 0,682 | 1,72 | 4,79 |
| MgO | MnO | P ₂ O ₅ | SO ₃ | TiO ₂ | Li ₂ O |
| 1,95 | 0,152 | 0,183 | 0,69 | 0,572 | 0,003 |
| Specifikace fluidního filtrového popílku Kladno (FP-KLAD) | | | | | |
| Měrná hmotnost | 2672 kg/m ³ | | | | |
| Měrný povrch | 627 m ² /kg | | | | |
| Ztráta sušením (105 °C) [%] | 0,2 | | | | |
| Chloridy [mg/kg suš.] | 76 | | | | |
| Amoniak jako amonné ionty NH ₄ [mg/kg suš.] | 25,5 | | | | |
| Amoniakální dusík [mg/kg suš.] | 19,8 | | | | |

| | | | | | | |
|----------------------------|-----------|-----------|---------|---------|-------------|--|
| Koncentrace NH_3 | | | | | 30,11 ppm | |
| Chemické složení [% suš.]: | | | | | | |
| SiO_2 | Al_2O_3 | Fe_2O_3 | Na_2O | K_2O | CaO | |
| 35,20 | 19,80 | 5,80 | 0,307 | 0,629 | 18,5 | |
| MgO | MnO | P_2O_5 | SO_4 | TiO_2 | volné CaO | |
| 1,05 | 0,033 | 0,180 | 5,88 | 2,27 | 8,74 | |

Distribuce velikosti částic jednotlivých popílků kontaminovaných vlivem SNCR DeNOx technologií:



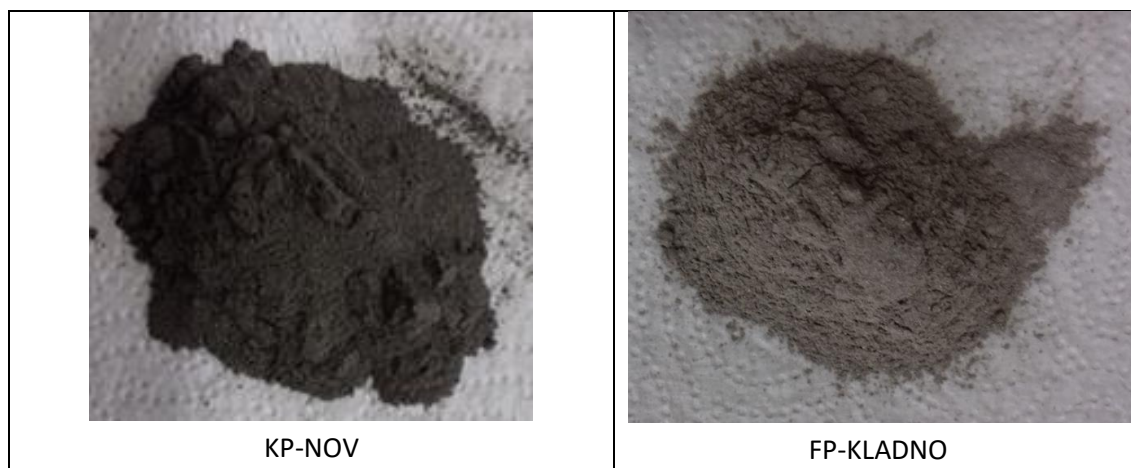
Fotodokumentace



KP-TŘ



KP-OPAT



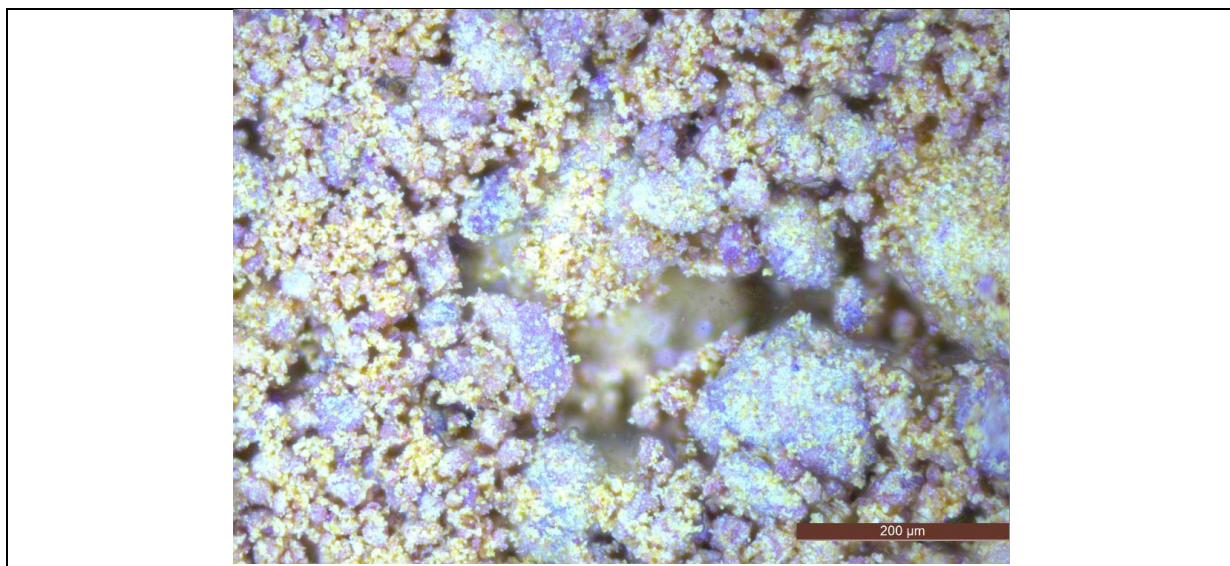
6.1.1.9. Nebezpečný odpad – Neutralizační kal (NK)

V rámci experimentálního prověření využití nebezpečných odpadů (NO) do polymerních správkových hmot byl vybrán neutralizační kal (NK), jako vedlejší produkt vznikající při povrchové úpravě kovových prvků ve společnosti ŽDB GROUP, a.s. Cílem galvanického pokovení je vytváření kovových povlaků na převážně kovových základních materiálech. Vytváří se ochranná protikorozní vrstva, která výrobky chrání během jejich používání před vlivy okolního prostředí a prodlužuje tak jejich životnost. Při galvanickém pokovování vzniká řada odpadních produktů. Jedná se například o kaly a filtrační koláče z neutralizační stanice obsahující nebezpečné látky [86]. Dle Katalogu odpadů bylo možné vybraný nebezpečný odpad (NO) zařadit do skupiny 19 02 05 Kaly z fyzikálně-chemického zpracování obsahující nebezpečné látky. Tyto typy kalů lze charakterizovat několika nebezpečnými vlastnostmi jako je např. HP5 (Toxicita pro specifické cílové orgány, Toxicita při vdechnutí), HP14 (Ekotoxický), HP15 (Odpad schopný vykazovat při nakládání s ním některou z jiných nebezpečných vlastností uvedených v Příloze III směrnice 2008/98/ES, kterou v době vzniku neměl). Tento kal musel být před samotným použitím upraven nejprve sušením a následně pomletím na vhodnou frakci. Bližší identifikace tohoto NK je uvedena v *Tab. 19*, včetně výsledků zkoušky vyluhovatelnosti a koncentrace škodlivin v sušině. Na základě limitů uvedených ve vyhlášce č. 294/2005 Sb. lze z výsledků koncentrace škodlivin v sušině usoudit, že tento kal překračuje přibližně 20krát limit pro maximální povolené množství olova (Pb) (limit – 100 mg/kg suš.) a taky je překročena hodnota u niklu (Ni) (limit – 80 mg/kg suš.) Limit pro třídu vyluhovatelnosti IIa u rozpuštěných látek – RL (8000 mg/l) nebyl překročen, překročen byl pouze limit pro obsah chloridů, který je pro tuto třídu 1500 mg/l.

Tab. 19: Identifikace neutralizačního kalu (NK)

| | |
|---------|---|
| Původce | ŽDB DRÁTOVNA a.s. Jeremenkova 66 735 51 Bohumín |
|---------|---|

| | | | | | | | |
|---|----------------|--------------------------------|-----------------|--------------------------------|--------|-------------|-------------------------------|
| Požadavky na předúpravu | | | | Sušení, mletí, třídění | | | |
| Měrná hmotnost | | | | 2960 kg/m ³ | | | |
| Měrný povrch | | | | 880 m ² /kg | | | |
| Ztráta sušením (105 °C) [%] | | | | 34,7 | | | |
| pH | | | | 11,6 | | | |
| Chemické složení [mg/kg suš.] | | | | | | | |
| As ₂ O ₃ | CaO | Cr ₂ O ₃ | CuO | Fe ₂ O ₃ | NiO | PbO | V ₂ O ₅ |
| < 7,0 | 155 000 | 232 | 3260 | 566 000 | 140 | 2620 | 1,43 |
| Koncentrace škodlivin v sušině [mg / kg suš.]: | | | | | | | |
| As | Cd | Cr celk. | Ni | Pb | V | | |
| 1,51 | 0,37 | 171 | 112 | 2110 | 8,36 | | |
| Výsledky zkoušky vyluhovatelnosti [mg/l]: | | | | | | | |
| DOC | chloridy | fluoridy | SO ₄ | RL sušené | Ba | | |
| 19,7 | 2950 | 0,2 | 5,82 | 6340 | 0,0265 | | |
| Cr | Cu | As | Cd | Mo | Pb | | |
| 0,0089 | 0,0710 | 0,0014 | <0,0005 | 0,019 | <0,001 | | |
| Distribuce velikosti částic neutralizačního kalu (NK) pro vyvíjenou správkovou hmotu EKO-X: | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| Fotodokumentace | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| NK před další úpravou | | | | Vysušený a pomletý NK | | | |
| Mikrostruktura předupraveného kalu (opt. mikroskop – zv. 100 x) | | | | | | | |



6.1.2. 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. Jak již bylo popsáno v teoretické části této práce, EP se dají také velmi dobře plnit nejen primárními, ale i druhotnými a odpadními surovinami. Všechny použité EP jsou na bázi bezrozpouštědlových pryskyřic, kdy se v malém množství používají tzv. reaktivní rozpouštědla, jež jsou schopná se zabudovat do makromolekulární sítě během vytvrzování. Tato rozpouštědla zůstávají zakomponována během vytvrzení v EP a netěkají, jako je to u těch nereaktivních. Ve všech případech se jedná o dvoukomponentní EP, kdy se do samotné pryskyřice přidává pro vytvrzení tvrdidlo na polyaminové bázi. Chemické složení použitých epoxidových pojiv je uvedeno v *Tab. 20* a jejich bližší specifikace je uvedena v *Tab. 21*. U všech hmot 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. Hmota EP-Z je brousitelná při 20 °C po přibližně 4 hodinách a při 30 °C po 2 hodinách, kdy nabývá dostatečně vysokých pevností a tvrdosti. Složka A je hořlavá kapalina tř. IV, složka B (tvrdidlo) je hořlavá kapalina tř. III a během aplikace v uzavřených prostorech musí být zajištěna dostatečná výměna vzduchu. Použité pracovní nástroje a případně pokožku nutno od nevytvrzené EP očistit čističem na acetonové bázi. Hmoty nesmí být zpracovávány při teplotě okolí a podkladu pod +5 °C a nad +30 °C, přičemž při teplotě pod +12 °C zvyšuje viskozitu. Doporučená teplota pro aplikaci všech vybraných hmot (EP-S, EP-Z, EP-K) je +20 °C a optimální vlhkost vzduchu 65 %. Během aplikace a polymerizace nesmí hmoty přijít do styku s vodou či jinými chemickými látkami.

Tab. 20: Chemické složení použitých epoxidových pryskyřic (EP)

| Typ vyvíjené sanační hmoty na beton | Označení polymerního pojiva | Složka A | Složka B (tvrdidlo) | Mísící poměry A:B |
|-------------------------------------|-----------------------------|--|---|-------------------|
| Správkové hmoty | EP-S | Epoxidová pryskyřice, (alkoxymethyl)oxiran (alkyl C12-C14), solventní nafta (ropná) lehká aromatická | Benzylalkohol, polymer s benzenaminem, hydrogenovaný formaldehyd, 2,4,6-tris (dimethylaminomethyl) fenol, 4,4'-metylenbis (cyklohexylamin) | 3,2:1 |
| Zálivkové hmoty | EP-Z | Epoxidová pryskyřice, (alkoxymethyl)oxiran (alkyl C12-C14), solventní nafta (ropná) lehká aromatická | Benzylalkohol, mastné kyseliny, reakční produkt s triethylentetraminem, 3-(aminomethyl)-3,5,5-trimethylcyklohexan-1-amin, bisfenol Am-fenolenbis (methylamin), N,N-dimethylpropan-1,3-diamin, 2,4,6-tris(dimethylaminomethyl) fenol | 1,8:1 |
| Kotvicí hmoty | EP-K | Epoxidová pryskyřice, (alkoxymethyl)oxiran (alkyl C12-C14), solventní nafta (ropná) lehká aromatická | Benzylalkohol, polymer s benzenaminem, hydrogenovaný formaldehyd, 2,4,6-tris (dimethylaminomethyl) fenol, 4,4'-metylenbis (cyklohexylamin), N,N-dimethylpropan-1,3-diamin | 1,9:1 |

Tab. 21: Parametry použitých epoxidových pryskyřic (EP)

| Parametr | EP-S | EP-Z | EP-K |
|--|-------------|-------------------|--------------|
| Specifická hmotnost při 20 °C | 1,10 kg/l | 1,11 kg/l | 1,15 kg/l |
| Zpracovatelnost při 20 °C | 15–20 minut | cca 25 minut | cca 13 minut |
| Povrch | pololesk | hladký, lesk, mat | pololesk |
| Teplotní stabilita při tloušťce 9 mm (15 kg / m ²) – suché prostředí | 110 °C | - | - |

| | | | |
|---|-----------|-----------------|-----------|
| Teplotní stabilita při tloušťce 9 mm – vlhké prostředí | 105 °C | - | - |
| Teplotní stabilita dle Martense | - | 46 °C | 40 °C |
| Viskozita při 20 °C (sl. A) | - | 400 ± 100 MPa·s | - |
| Viskozita při 20 °C (sl. B) | - | 900 ± 250 MPa·s | - |
| Reakce na oheň | B fl – S1 | B fl – S1 | B fl – S1 |

6.1.3. Návrh základních receptur pro prvotní zkoušení

Receptury, které byly podrobeny prvotnímu zkoušení, v rámci kterého byl prováděn aplikační test, jsou uvedeny v metodice práce v etapě 1. U vyvíjených zálivkových hmot se začínalo s plněním 30 % a jako maximální bylo zkoušeno 85% plnění, přičemž po překročení 50% množství se množství plniva zvyšovalo postupně o 5 %, protože od této hranice se výrazněji mění vlastnosti polymerních zálivkových hmot. Množství plniva je udáváno v hmotnostních procentech z celkové hmotnosti čerstvé směsi. U vyvíjených správkových hmot se začíná plnit 40% množstvím, protože u těchto materiálů se nepožaduje tak nízká viskozita, jako je tomu u zálivkových hmot. Jako maximální plnění zde bylo zvoleno 90% množství plniva. U kotvících hmot se dávka plniva mění v rozmezí od 40 % do 70 %. Nejméně prvotních receptur bylo navrženo u správkové hmoty využívající jako plnivo nebezpečný odpad (NO) v podobě předupraveného neutralizačního kalu (NK) – plnění bylo zvoleno v závislosti na velikost částic NK. Na základě výsledků aplikačního testu jsou následně vybrány ty receptury, které vykazují požadovanou zpracovatelnost, vhodnou konzistenci a rovný povrch bez imperfekcí.

6.1.4. Prvotní zkoušení navržených receptur

6.1.4.1. Aplikační test

Před samotným prováděním aplikačního testu se nejprve cementotřískové (cetris) desky napenetrovaly vhodným primerem, který se nechal následně zaschnout, a až pak na vytvrzenou plochu byly nanášeny jednotlivé receptury s různým typem a obsahem druhotných a odpadních surovin. Aplikační test byl prováděn pouze u správkových a zálivkových hmot, protože u kotvících hmot neměla tato prvotní zkouška opodstatnění. Výsledky byly srovnávány s referenčními hmotami obsahujícími křemičitý písek Dorsilit. Jednotlivé dílčí výsledky aplikačního testu jsou uvedeny v *Tab. 22* a *Tab. 23*, ve kterých je hodnocena zpracovatelnost, aplikovatelnost a výsledný povrch, přičemž v *Tab. 22* je vyhodnocen aplikační test také pro vyvíjenou správkovou hmotu EKO-X s obsahem NO, neutralizačním kalem (NK). Na *Obr. 64* lze vidět aplikaci správkové hmoty EP-S 80 % SP a na *Obr. 65* je zobrazen povrch REF hmoty s plněním 70 % a 75 % po vytvrzení.



Obr. 64: Nanášení hmoty EP-S 80% SP na cementotřískovou desku pomocí zubové stěrky



Obr. 65: Referenční hmota po vytvrzení

Tab. 22: Vyhodnocení aplikačního testu – správkové hmoty (EP-S + plnivo)

| Obsah plniva [%] | REF A1 | AS | OS | OIDM | SS | SP | KP-TŘ | KP NOV | FP Klad | KP OPAT | NK |
|------------------|--------|----|----|------|----|----|-------|--------|---------|---------|----|
| 40 | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | ✓ |
| 45 | x | x | x | x | x | x | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 50 | x | x | x | ✓ | x | x | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | x |
| 55 | x | x | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | x |
| 60 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | x |
| 65 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | - |
| 70 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | x | x | x | - |
| 75 | ✓ | ✓ | ✓ | x | ✓ | ✓ | x | x | x | x | - |
| 80 | ✓ | ✓ | ✓ | x | ✓ | ✓ | x | - | - | - | - |
| 85 | ✓ | ✓ | ✓ | x | ✓ | ✓ | - | - | - | - | - |
| 90 | x | x | x | - | x | x | - | - | - | - | - |



Obr. 66: Detail vytvrzeného vzorku EP-S + 75 % OS



Obr. 67: Detail vytvrzeného vzorku EP-S + 75 % AS

Tab. 23: Vyhodnocení aplikačního testu – zálivkové hmoty (EP-Z + plnivo)

| Obsah plniva [%] | REF A2 | AS | OS | QS | OIDM | SP |
|------------------|--------|----|----|----|------|----|
| 30 | x | x | x | x | x | - |
| 40 | x | x | x | x | x | x |
| 50 | x | x | x | x | x | x |

| | | | | | | |
|----|---|---|---|---|---|---|
| 55 | x | x | x | x | x | x |
| 60 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | x |
| 65 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | x |
| 70 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 75 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | x | ✓ |
| 80 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | x | ✓ |
| 85 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | - | ✓ |

U správkových hmot s obsahem hrubozrnného plniva docházelo při plnění nižším než 60 % k výrazné sedimentaci plniva, a vytvrzený materiál byl značně nehomogenní. Při plnění vyšším než 85 % nebylo možné materiál pořádně promíchat, z čehož vyplývá, že jednotlivé částice plniva nebyly dostatečně obaleny pryskyřicí, výsledný povrch byl značně nerovnoměrný a docházelo ke snadnému uvolňování plniva. U jemnozrnného plniva, kontaminovaných filtrových popílků, byla čerstvá směs s obsahem plniva vyšším než 65 % prakticky nezhomogenizovatelná. Především z tohoto důvodu a v souvislosti s nesplněním požadavků na vytvrzenou hmotu do dalšího zkoušení nepostoupily receptury s vyšším plněním než 65 %. Při 40% plnění měla směs příliš nízkou viskozitu a také z ekonomických důvodů je tak nízké plnění nerentabilní v praxi. Na *Obr. 66* lze vidět vytvrzenou hmotu EP-S s 75% množstvím obalového skla, a na *Obr. 67* hmotu EP-S s 75% obsahem autoskla – je vidět rovnoměrné rozložení plniva ve hmotě a rovný hladký povrch bez nežádoucích defektů.

U zálivkových hmot bylo zkoušeno méně typů druhotných surovin a plnění začínalo u většiny už při 30 %. Pomocí aplikačního testu však bylo prokázáno, že takto nízké plnění bylo nevhodné, protože docházelo k sedimentaci plniva a výsledné nehomogenitě materiálu, stejně jako tomu bylo při zkoušení správkových hmot. Plnivo v podobě odpadního produktu z výroby minerálních izolačních desek (OIDM) mělo nejjemnější granulometrii, a proto při plnění větším než 70 % byla už směs nerozmíchatelná a výsledný povrch nesplňoval stanovené požadavky. Z toho důvodu byly u tohoto jemnějšího plniva pro další zkoušení vybrány receptury s obsahem plniva 60–70 %. U hrubozrnnějších plniv vyhověly stanoveným požadavkům týkajících se zpracovatelnosti, aplikovatelnosti a výsledného povrchu receptury s obsahem plniva 60–85 %. U odpadního slévárenského písku (SP) docházelo k výrazné sedimentaci i při plnění menším než 70 %, a proto tyto do dalšího zkoušení nepostoupily.

6.1.4.2. Sledování vyplnění otvoru kotvící hmotou

Pro stanovení správné konzistence vyvíjené kotvící hmoty bylo provedeno sledování vyplnění otvoru vyvrtaného do betonového obrubníku namíchanou hmotou. Jednotlivé díry byly vrtány do hloubky přibližně 120 mm a jejich průměr byl 22 mm. Zakotvené ocelové tyče jsou zobrazeny na *Obr. 68*.



Obr. 68: Ocelové tyče zalité vyvíjenou kotvicí hmotou.

Výsledky této prvotní zkoušky pro výběr vhodných receptur pro další zkoušení vyvíjených kotvicích hmot jsou uvedeny v Tab. 24. Receptury 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 receptury s 40–55% obsahem plniva, přičemž stejně jako při míchání správkových hmot nebylo možné do EP-K zamíchat větší množství FP-KLAD než 55 %, protože toto plnivo je charakteristické vyšším měrným povrchem.

Tab. 24: Vyhodnocení zkoušky sledování vyplnění otvoru kotvicí hmotou (EP-K + plnivo)

| Obsah plniva [%] | REF 0,63 | REF 0,063 | AS | OS | QS | KP-NOV | FP-KLAD |
|------------------|----------|-----------|----|----|----|--------|---------|
| 35 | - | x | - | - | - | - | - |
| 40 | x | ✓ | x | x | x | ✓ | ✓ |
| 45 | x | ✓ | x | x | x | ✓ | ✓ |
| 50 | x | ✓ | x | x | x | ✓ | ✓ |
| 55 | x | ✓ | x | x | x | ✓ | ✓ |
| 60 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | x |
| 65 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | x |
| 70 | ✓ | x | ✓ | ✓ | ✓ | x | - |

6.1.5. ZÁVĚR ETAPY 1

Na základě vyhodnocení aplikačního testu byly vybrány receptury, které vykazovaly vhodnou zpracovatelnost, reologické vlastnosti a zároveň požadovaný výsledný povrch materiálů. Aplikační test byl proveden u vyvíjených správkových a zálivkových hmot, přičemž do dalšího zkoušení byly vybrány jak hrubozrnná plniva (odpadní sklo (OS), odpadní slévárenský písek (SP) atd.), tak jemnozrnná plniva (KP, FP, OIDM). Na základě provedeného počátečního 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. Za účelem stanovení optimálního množství plniva do vyvíjených kotvicích hmot bylo sledováno vyplnění a zakotvení ocelové tyče hmotou s různým množstvím a typem plniva. Dospělo se nicméně v podstatě ke stejným závěrům, jako při vyhodnocování aplikačního testu.

6.2. ETAPA 2 – Laboratorní prověření základních receptur

- Realizace a vyhodnocení základního zkoušení

V rámci druhé etapy bylo provedeno základní zkoušení receptur, které vyhověly požadavkům aplikačního testu. V první části bylo provedeno stanovení parametrů čerstvých směsí, kdy se sledovala především sedimentace a viskozita vyvíjených speciálních sanačních hmot. Následně byly na vytvrzených vzorcích požadovaných rozměrů stanovovány pevnostní charakteristiky, což jsou jedny z nejdůležitějších parametrů sanačních hmot na beton. V závěru etapy byla provedena optimalizace receptur pomocí metody kvantitativního párového srovnání a byly vybrány optimální receptury, které postoupily do pokročilého zkoušení.

6.2.1. Zkoušky hmot v čerstvém stavu

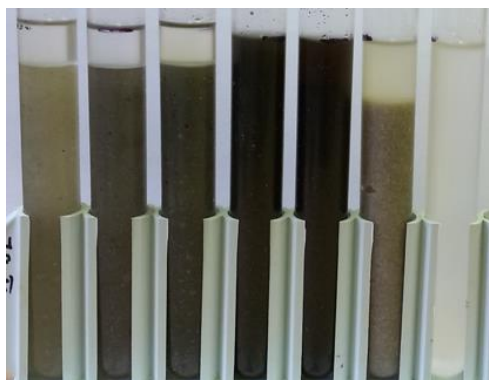
6.2.1.1. Stanovení sedimentace

Vyhodnocení zkoušky sedimentace po 30 dnech uvádí *Tab. 25 až Tab. 27*. V podstatě bylo prokázáno obecně platné tvrzení, že hrubozrnnější plniva o vyšší měrné hmotnosti (sklo, písek) sedimentují výrazněji než jemné plnivo v podobě popílků. Nejvýraznější sedimentace (5) tedy 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) – viz *Obr. 69 a Obr. 70*. Nejlépe této zkoušce vyhověly receptury obsahující kontaminované popílků, kdy při 60% plnění nebylo možné volným okem pozorovat sedimentaci plniva v pryskyřici. Sledování sedimentace je důležité především u kotvících hmot. Z toho důvodu, že pokud je plnivo v kotvící hmotě nerovnoměrně rozloženo po výšce kotvícího prvku, tak tahová síla působící na kotvený prvek, např. při zkoušce vytržení, je nerovnoměrně rozložena a k porušení pak dochází v nejslabším místě. Jak je patrné z výsledků zkoušky, tak tato nežádoucí sedimentace může nastat především při použití hrubozrnnějších plniv, jako je odpadní sklo (viz *Obr. 71 a Obr. 72*) a odpadní slévárenský písek (SP). Ve vyvinutých kotvících hmotách se především z toho důvodu doporučuje používat popílků nebo jiná vhodná jemnozrnná plniva.

Tab. 25: Vyhodnocení zkoušky sedimentace – správkové hmoty (EP-S + plnivo)

| Obsah plniva [%] | REF A1 | AS | OS | OIDM | SS | SP | KP-TŘ | KP NOV | FP Klad | KP OPAT | NK |
|------------------|--------|----|----|------|----|----|-------|--------|---------|---------|----|
| 40 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 4 |
| 45 | - | - | - | - | - | - | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 |
| 50 | - | - | - | 4 | - | - | 3 | 3 | 2 | 3 | - |
| 55 | - | - | - | 4 | - | - | 2 | 2 | 2 | 2 | - |
| 60 | 5 | 5 | 5 | 3 | 5 | 5 | 2 | 1 | 1 | 1 | - |
| 65 | 5 | 5 | 5 | 2 | 5 | 5 | 1 | 1 | - | 1 | - |
| 70 | 5 | 5 | 5 | 2 | 5 | 5 | 1 | - | - | - | - |

| | | | | | | | | | | | |
|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 75 | 5 | 5 | 5 | - | 5 | 5 | - | - | - | - | - |
| 80 | 5 | 5 | 5 | - | 5 | 5 | - | - | - | - | - |
| 85 | 5 | 4 | 4 | - | 4 | 5 | - | - | - | - | - |



Obr. 69: Sedimentace plniva po 30 dnech ve hmotě EP-Z (zleva: 70% OS, 70% QS, 75% AS, 80% SS, 80% SP, 70% REF, nepl.)



Obr. 70: Sedimentace plniva ve hmotě EP-S (zleva: 60% KP-TŘ, 75% AS, 80% SS, 80% SP, 75% REF, nepl.)



Obr. 71: Sedimentace plniva na dně otvoru, kde byla zakotvěná ocelová závitová tyč (EP-K + 60% OS)



Obr. 72: Detail sedimentovaného plniva na dně otvoru, kde byla zakotvěná ocelová závitová tyč (EP-K + 60% OS)

Tab. 26: Vyhodnocení zkoušky sedimentace závitkových hmot (EP-Z + plnivo)

| Obsah plniva [%] | REF A2 | AS | OS | QS | OIDM | SP |
|------------------|--------|----|----|----|------|----|
| 60 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 |
| 65 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 5 |
| 70 | 5 | 5 | 5 | 5 | 2 | 5 |
| 75 | 5 | 5 | 5 | 5 | - | 5 |
| 80 | 5 | 5 | 5 | 5 | - | 5 |
| 85 | 5 | 4 | 4 | 4 | - | 5 |

Tab. 27: Vyhodnocení zkoušky sedimentace kotvících hmot (EP-K + plnivo)

| Obsah plniva [%] | REF 0,63 | REF 0,063 | AS | OS | QS | KP-NOV | FP-KLAD |
|------------------|----------|-----------|----|----|----|--------|---------|
| 40 | - | 5 | - | - | - | 4 | 3 |
| 45 | - | 5 | - | - | - | 3 | 2 |
| 50 | - | 5 | - | - | - | 2 | 2 |
| 55 | - | 5 | - | - | - | 2 | 1 |
| 60 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 1 | × |
| 65 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 1 | × |
| 70 | 5 | - | 5 | 5 | 5 | × | - |

6.2.1.2. Stanovení viskozity

Stanovení viskozity probíhalo pouze u zálivkových a kotvících hmot. U těchto materiálů je viskozita důležitým parametrem, protože je potřeba, aby hmota vykazovala ideální reologické vlastnosti pro splnění požadavků na vyplnění všech mezer, nerovností, prvků a případně trhlin. Dále je důležité, aby se hmota dostala do otevřené pórové struktury betonu za účelem silnější přidrženosti a dosažení lepší trvanlivosti. Stejně jako u předešlých zkoušek, tak i viskozita vyvíjených hmot úzce souvisela s typem plniva a jeho množstvím v epoxidové pryskyřici (EP). Výsledkem této zkoušky nebyla samotná hodnota kinematické viskozity (ν [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$]), ale výtoková doba v [s], protože byl použit výtokový otvor o průměru 12 mm (Obr. 73, Obr. 74). Zjištěné výsledky jsou uvedeny v Tab. 28 a Tab. 29, přičemž u některých receptur nebylo možné určit výtokovou dobu (N/A), protože hmota z Fordova kelímku úplně nevytekla ani po 34 minutách.



Obr. 73: Měření výtokové doby hmoty EP-S + 65% OS



Obr. 74: Měření výtokové doby hmoty EP-K + 45% KP-NOV

Tab. 28: Výsledky stanovení viskozity (výtokové doby) v [s] – EP-Z + plnivo

| Obsah plniva [%] | REF A2 | AS | OS | QS | OIDM | SP |
|------------------|--------|-----|-----|-----|------|-----|
| 60 | 60 | 110 | 100 | 130 | 370 | 50 |
| 65 | 100 | 230 | 240 | 290 | 480 | 100 |
| 70 | 120 | 750 | 700 | 810 | 1590 | 110 |

| | | | | | | |
|----|------|------|------|------|---|------|
| 75 | 900 | 1750 | 1680 | 1890 | - | 810 |
| 80 | 1800 | N/A | N/A | N/A | - | 1740 |
| 85 | N/A | N/A | N/A | N/A | - | N/A |

Tab. 29: Výsledky stanovení viskozity (výtokové doby) v [s] – EP-K + plnivo

| Obsah plniva [%] | REF 0,63 | REF 0,063 | AS | OS | QS | KP-NOV | FP-KLAD |
|------------------|----------|-----------|-----|-----|-----|--------|---------|
| 40 | - | 10 | - | - | - | 200 | 150 |
| 45 | - | 20 | - | - | - | 330 | 280 |
| 50 | - | 45 | - | - | - | 590 | 680 |
| 55 | - | 70 | - | - | - | 1580 | 1900 |
| 60 | 75 | 130 | 90 | 85 | 90 | N/A | - |
| 65 | 140 | 200 | 180 | 180 | 175 | N/A | - |
| 70 | 280 | - | 310 | 300 | 320 | - | - |

6.2.1.3. Stanovení konzistence pomocí střešovacího stolku

Stanovení konzistence pomocí střešovacího stolku probíhalo pouze u vyvíjených správkových hmot. Na Obr. 75 a Obr. 76 lze vidět rozlití koláče správkové hmoty. U receptur, které obsahovaly malé množství hrubozrnného plniva bylo rozlití větší než 300 mm (N/A), protože vykazovaly nízkou viskozitu. Výsledky průměrného rozlití zaokrouhlené na 5 mm uvádí Tab. 30. Z výsledků je patrné, že čím je plnivo jemnější a jeho obsah v EP vyšší, rozlití se snižuje.



Obr. 75: Měření rozlití (EP-S + 60% KP-TŘ)



Obr. 76: Rozlití (EP-S + 75 % REF)

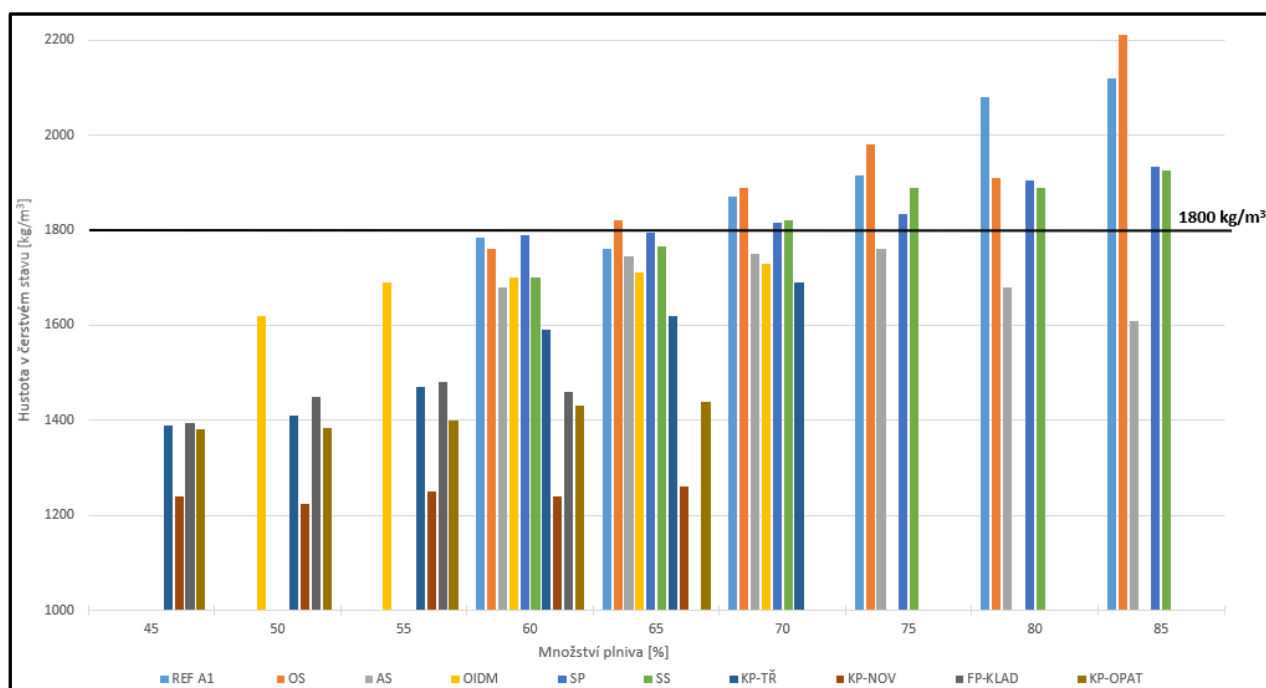
Tab. 30: Výsledky stanovení konzistence (rozlití koláče) – hmota EP-S + plnivo v [mm]

| Obsah plniva [%] | REF A1 | AS | OS | OIDM | SS | SP | KP-TŘ | KP NOV | FP KLAD | KP OPAT |
|------------------|--------|-----|-----|------|-----|-----|-------|--------|---------|---------|
| 40 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 45 | - | - | - | - | - | - | - | N/A | 290 | N/A |
| 50 | - | - | - | 265 | - | - | 255 | 265 | 250 | 260 |
| 55 | - | - | - | 240 | - | - | 225 | 225 | 200 | 230 |
| 60 | N/A | N/A | N/A | 185 | 290 | N/A | 175 | 180 | 165 | 170 |
| 65 | 250 | 240 | 240 | 165 | 240 | 260 | 145 | 150 | - | 135 |

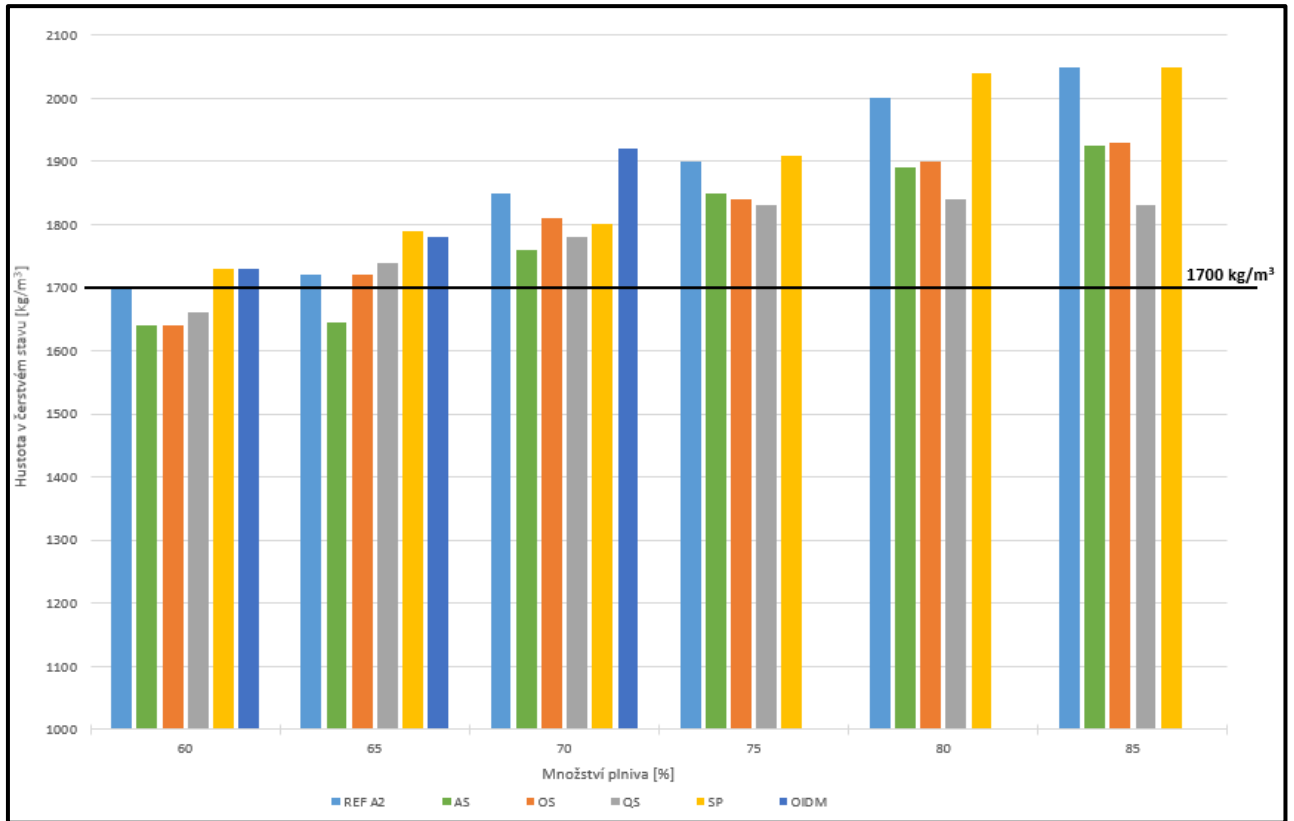
| | | | | | | | | | | |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|---|---|
| 70 | 220 | 215 | 220 | 145 | 200 | 220 | 125 | - | - | - |
| 75 | 195 | 170 | 170 | - | 180 | 195 | - | - | - | - |
| 80 | 165 | 145 | 150 | - | 145 | 170 | - | - | - | - |
| 85 | 150 | 130 | 140 | - | 125 | 145 | - | - | - | - |

6.2.1.4. Stanovení hustoty

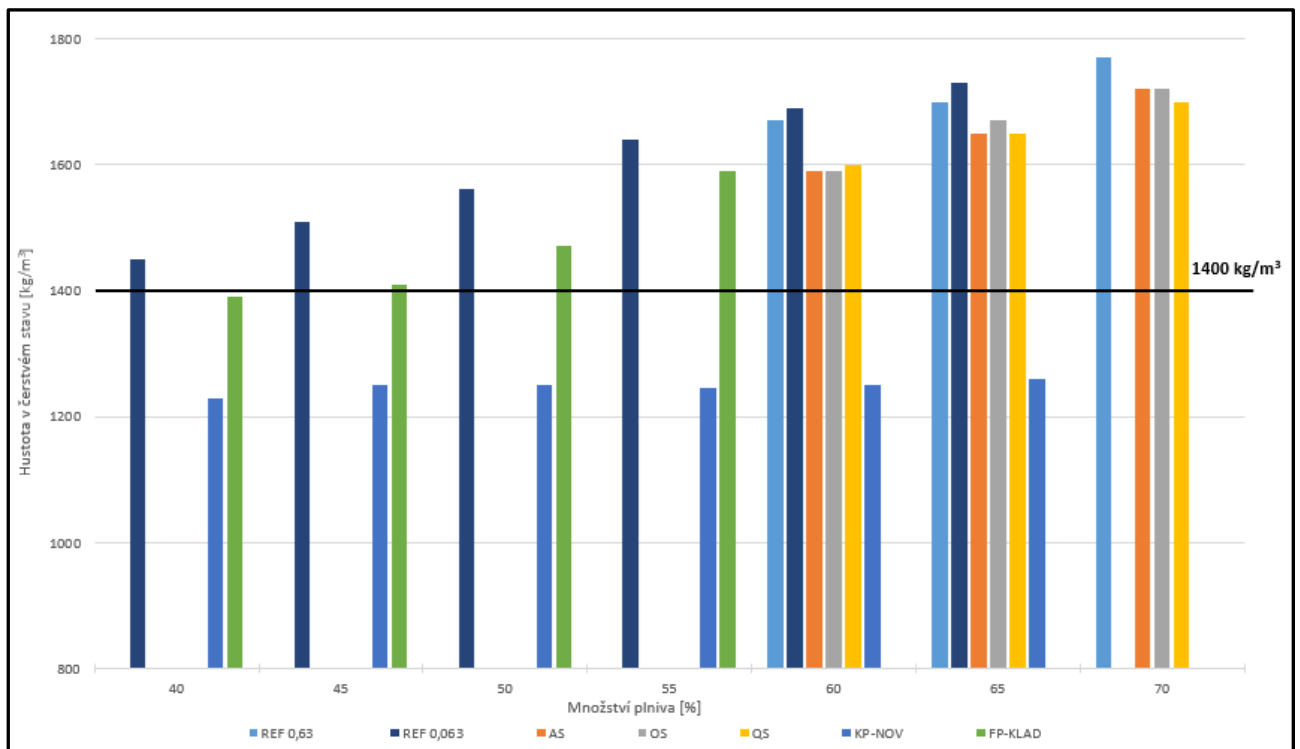
Hustota v čerstvém stavu byla stanovována u všech vyvíjených sanačních hmot. Obecně by měla být hustota v čerstvém stavu vyšší než v zatvrdlém stavu, protože během polymerizace se odpaří část rozpouštědel, která jsou těkavá a část jich reaguje s pryskyřicí. Hustota také závisí na typu a množství použitého plniva. Čím je vyšší hustota plniva, tím by měla být vyšší i hustota celé směsi. Výsledky zaokrouhleny na 5 kg/m^3 jsou uvedeny na *Obr. 77* až *Obr. 79*. Hustota použitých pryskyřic bez obsahu plniva byla následující: EP-S = 1030 kg/m^3 , EP-Z = 1010 kg/m^3 , EP-K = 990 kg/m^3 . Přidáním 85% množství hrubozrnných plniv se zvýšila v některých případech hustota až o 1100 kg/m^3 . Referenční polymerní správkové hmoty vykazovaly hustotu v čerstvém stavu ve většině případů kolem 1800 kg/m^3 , přičemž tato hodnota byla překročena pouze u receptur s vyšším plněním hrubozrnných plniv. U polymerních zálivkových hmot na epoxidové bázi se hustota v čerstvém stavu pohybovala kolem 1700 kg/m^3 . Tato hodnota byla dosažena u všech referenčních receptur a u ostatních při plnění vyšším než 65 %. Nejvyšší hustota byla dosažena u hmoty obsahující 85% množství odpadního slévárenského písku (SP). U kotvících hmot vykazovaly nejnižší hustotu hmoty s popílkem. Receptury obsahující jako plnivo fluidní popílek vykazovaly pravděpodobně kvůli vyšší měrné hmotnosti popílku vyšší hustotu než receptury s klasickým vysokoteplotním popílkem (*Obr. 79*).



Obr. 77: Hustota v čerstvém stavu správkových hmot (EP-S) v závislosti na různém typu a množství plniva



Obr. 78: Hustota v čerstvém stavu zálivkových hmot (EP-Z) v závislosti na různém typu a množství plniva



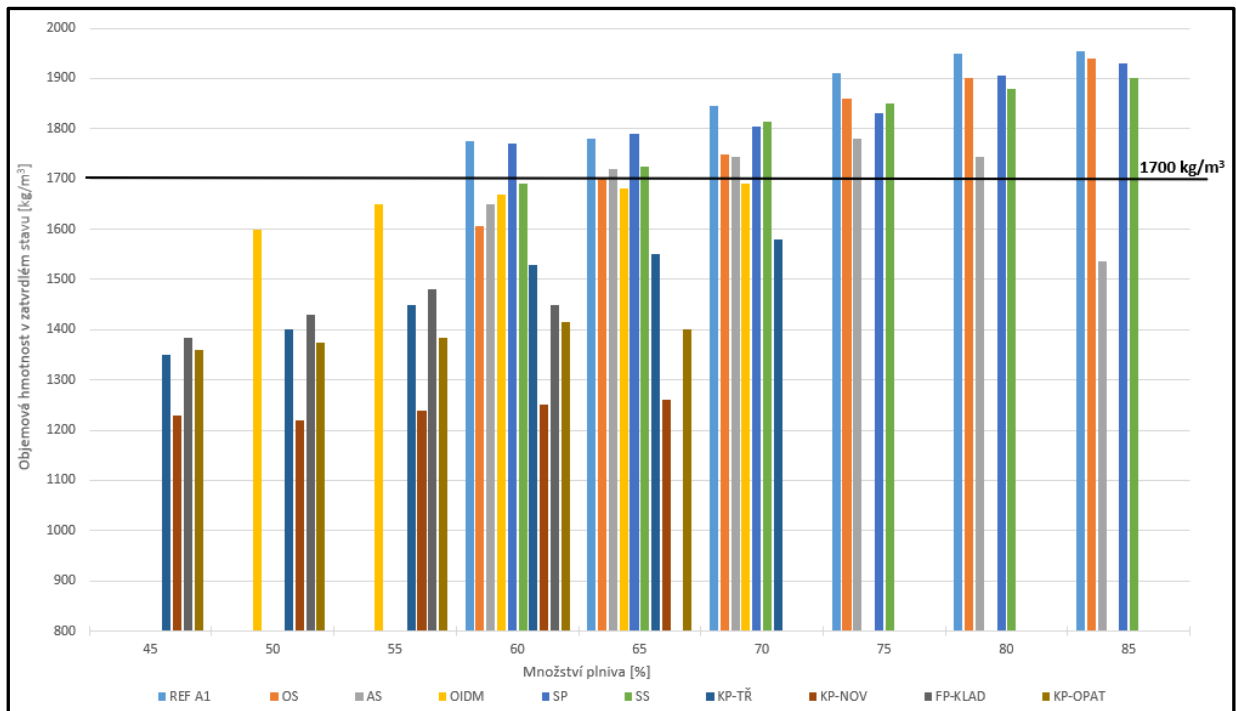
Obr. 79: Hustota v čerstvém stavu kotvících hmot (EP-K) v závislosti na různém typu a množství plniva

6.2.2. Zkoušky hmot v zatvrdlém stavu

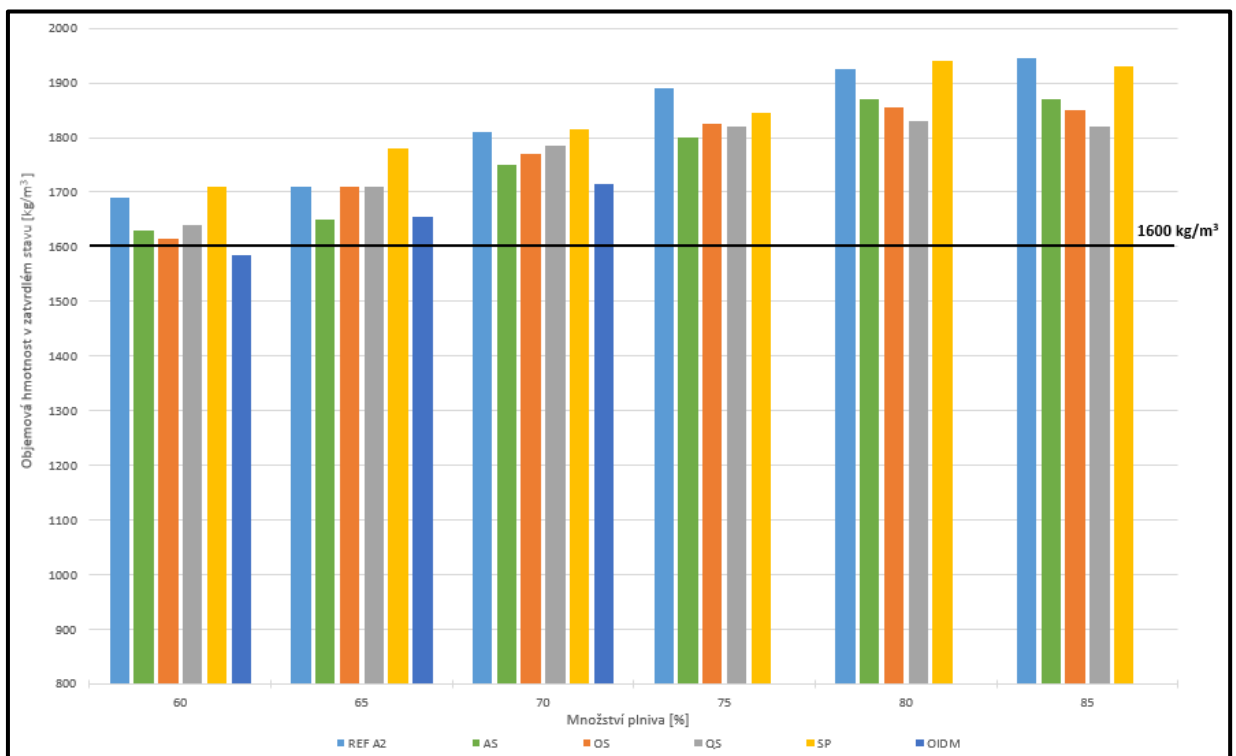
Výsledky zkoušek vyvíjených sanačních hmot na beton v zatvrdlém (ve zpolymerovaném) stavu jsou uvedeny v přehledných grafech a tabulkách, ze kterých je možné jasně pozorovat vliv typu a množství plniva na fyzikálně-mechanické vlastnosti hmot. Pro přehlednost výsledků je vyhodnocování správkových hmot EKO-X s obsahem NO, neutralizačního kalu (NK) uvedeno až v závěru etapy v přehledné tabulce. Výsledky zkoušek ve zpolymerovaném stavu byly důležitými parametry při optimalizaci receptur pomocí metody kvantitativního párového srovnání.

6.2.2.1. Objemová hmotnost v zatvrdlém stavu

Výsledky objemové hmotnosti vyvíjených sanačních hmot ve zpolymerovaném stavu po 28 dnech jsou uvedeny na *Obr. 80* až *Obr. 82*. Objemová hmotnost v zatvrdlém stavu je 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, protože použité bezrozpouštědlové EP obsahují minimální množství rozpouštědel a většina z nich se naváže do epoxidové matrice v průběhu polymerizace. Obyčejný beton s cementovou matricí vykazuje objemovou hmotnost v zatvrdlém stavu většinou kolem 2200–2400 kg/m³. Této hodnoty nebylo dosaženo u žádné z receptur. U správkových hmot byla nejvyšší objemová hmotnost (OH) dosažena u referenční hmoty obsahující 85% množství křemičitého písku, a to 1950 kg/m³. Jinak stejně jako u OH v čerstvém stavu, hmoty obsahující hrubozrnější plniva s vyšší měrnou hmotností vykazovaly vyšší hodnoty než hmoty s popínkem. Výrazný pokles OH u receptury EP-S 85% AS byl pravděpodobně způsoben nedostatečnou homogenizací směsi a následným neúplným obalením částic autoskla pryskyřicí. Tento důsledek byl z největší míry způsoben tvarovým indexem částic autoskla, jejichž geometrie se liší od ostatních skel.



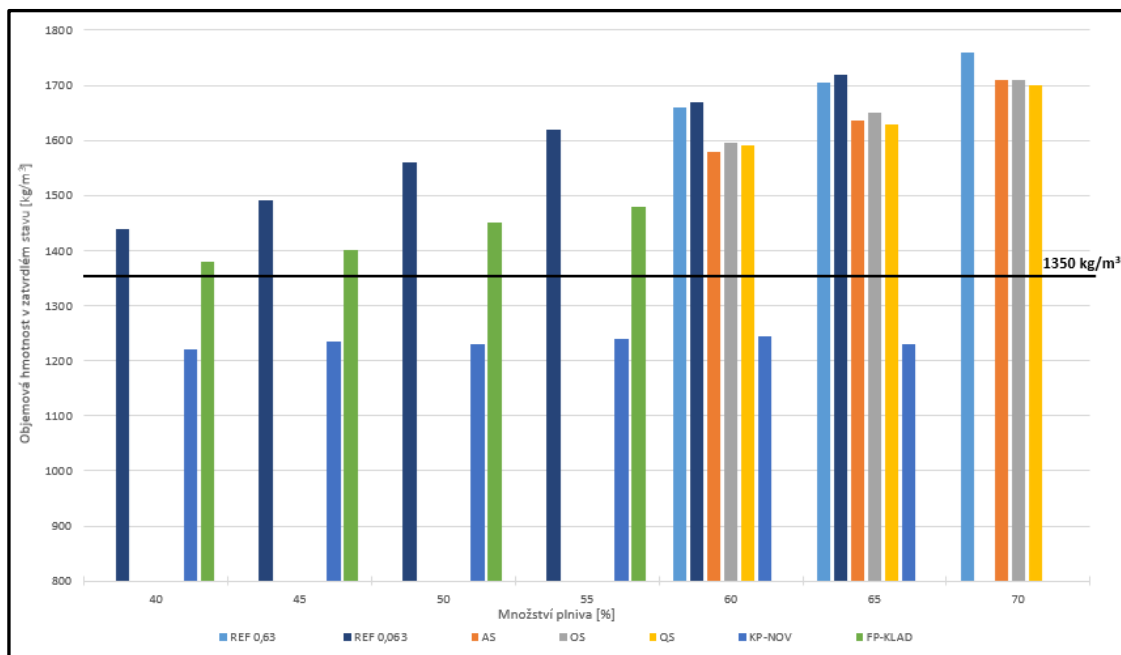
Obr. 80: Objemová hmotnost ve zpolymerovaném stavu správkových hmot (EP-S) po 28 dnech



Obr. 81: Objemová hmotnost ve zpolymerovaném stavu záливkových hmot (EP-Z) po 28 dnech

U běžně dostupných polymerních záливkových hmot obsahující většinou jako plnivo písek se pohybuje hodnota OH ve zpolymerovaném stavu po 28 dnech kolem hodnoty 1600 kg/m³. Tuto hodnotu překročily kromě receptury EP-Z 60% OI DM všechny hmoty. Nejvyšších hodnot OH bylo dosaženo u hmot s 80% a 85% obsahem písku, a to jak referenčního plniva, tak odpadního slévárenského písku (SP). U všech vyvíjených

sanačních hmot vykazovaly receptury s jemnějším plnivem nižší hodnoty OH. U kotvících hmot byla dosažena nejvyšší OH u referenčních hmot, přičemž tato hodnota byla v porovnání s hmotami obsahujícími popílek přibližně až o 250 kg/m³ vyšší. Bylo tedy jednoznačně prokázáno, že u všech sanačních hmot měl typ plniva a jeho granulometrie výrazný vliv na OH. Dále bylo potvrzeno tvrzení, že čím je vyšší měrná hmotnost plniva, tím bude vyšší i výsledná OH, a to jak v čerstvém, tak ve zpolymerovaném stavu. Tato skutečnost byla jasně pozorovatelná na dvou typech popílků, kdy KP-NOV má přibližně o 700 kg/m³ nižší měrnou hmotnost než FP-KLAD.



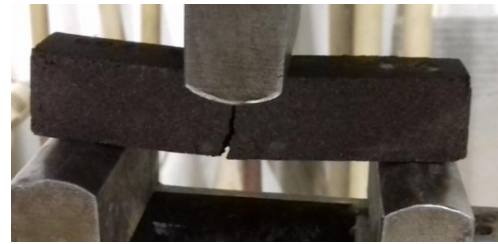
Obr. 82: Objemová hmotnost ve zpolymerovaném stavu kotvících hmot (EP-K) po 28 dnech.

6.2.2.2. Pevnost v tahu za ohybu

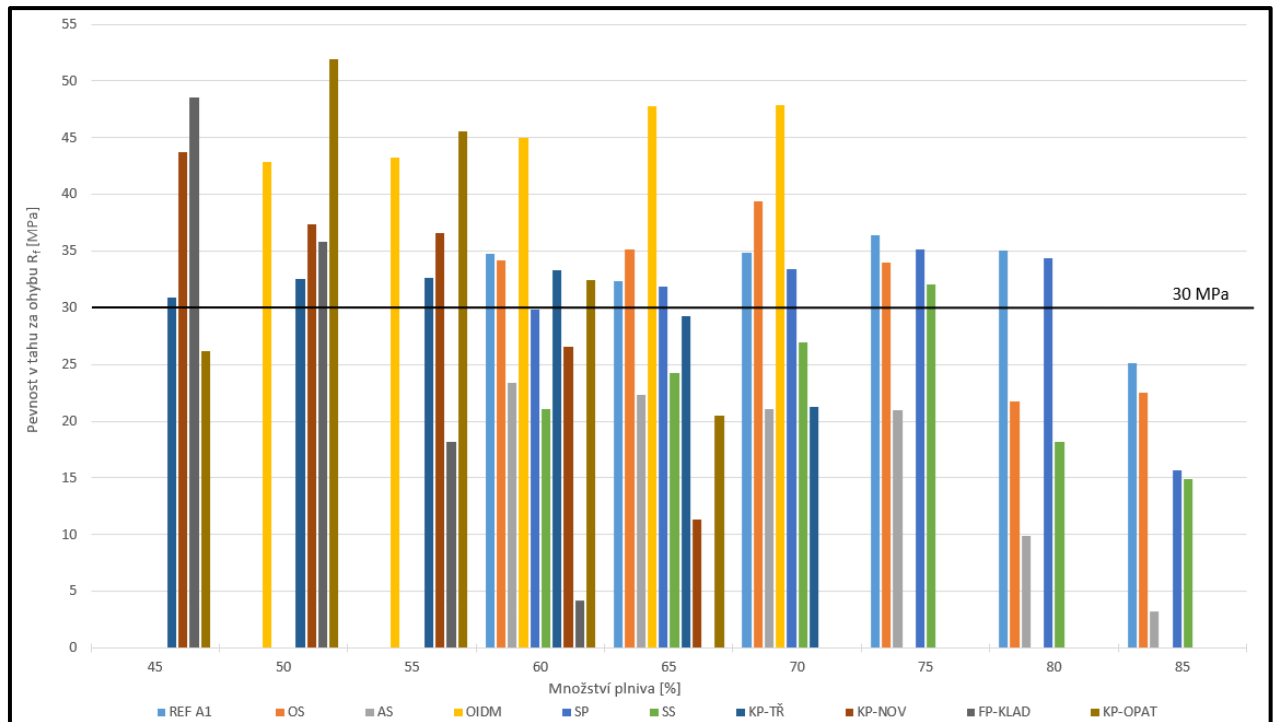
Fotodokumentace průběhu stanovování pevnosti v tahu za ohybu je uvedena na Obr. 83 a Obr. 84. Pevnost v tahu za ohybu je důležitým parametrem jak polymerních správkových hmot, tak polymerbetonu. U tříbodového uspořádání zkoušky se vždy jedná o kombinaci ohybu a smyku. V ohybu jsou namáhány zejména betony do podlahových konstrukcí, jemnozrnné betony, silniční betony apod. Pokud jsou tyto konstrukce sanovány, tak namáhány ohybem budou i samotné sanační hmoty, a ne jenom stávající konstrukce. Grafické vyhodnocení pevnosti v tahu za ohybu vyvíjených sanačních hmot po 28 dnech je zobrazeno na Obr. 85 až Obr. 87. Většinou došlo u všech vzorků k porušení ve středu, pod zatěžovacím trnem, kde působí největší síla, a tedy je v tomto místě největší ohybový moment.



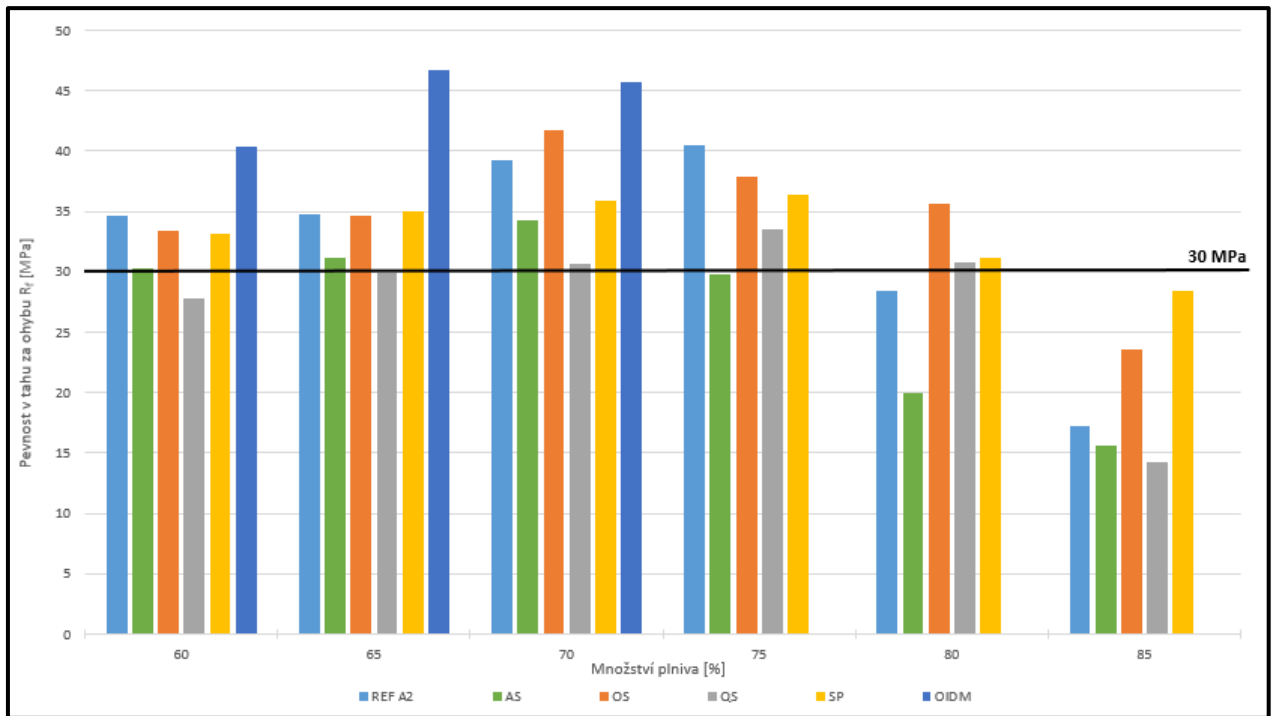
Obr. 83: Stanovování třibodové pevnosti v tahu za ohybu (EP-S+80% REF)



Obr. 84: Vzorek EP-S 60% KP-NOV porušen v tahu za ohybu



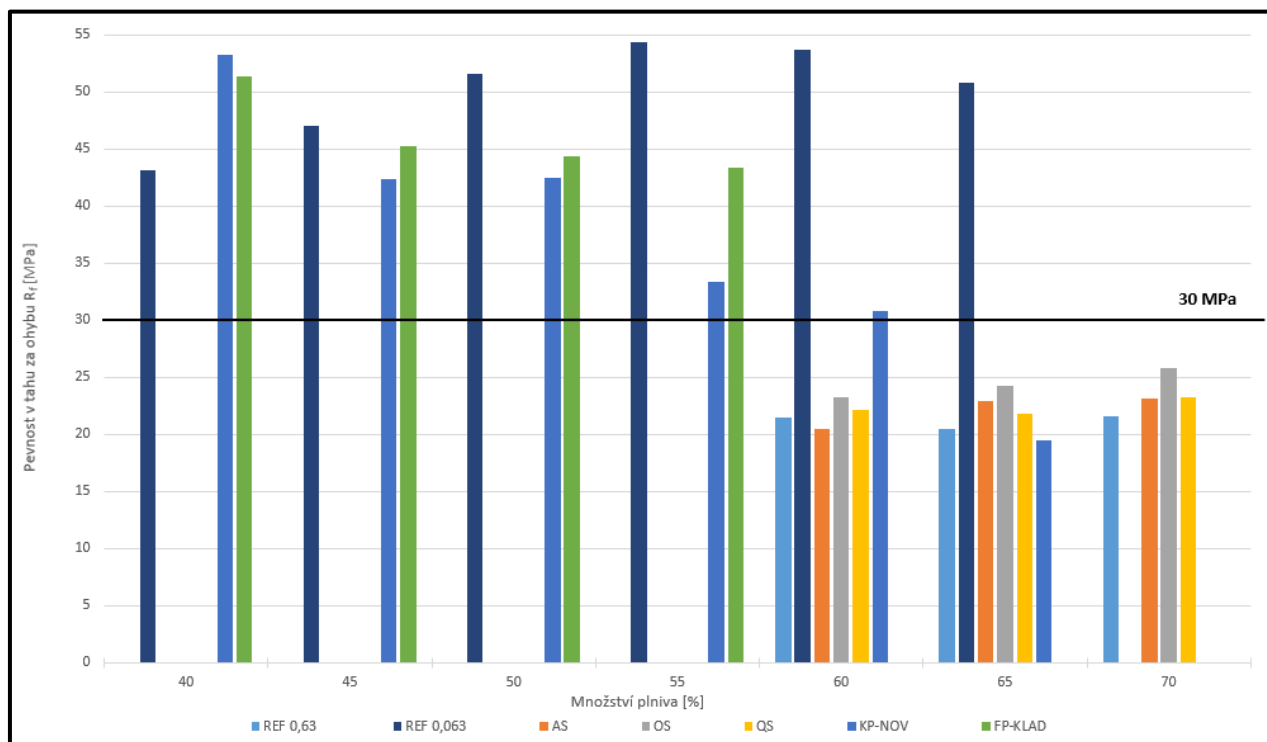
Obr. 85: Pevnost v tahu za ohybu správkových hmot (EP-S) v závislosti na typu a množství plniva po 28 dnech



Obr. 86: Pevnost v tahu za ohybu zálevkových hmot (EP-Z) v závislosti na typu a množství plniva po 28 dnech.

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. 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 zálevkových hmot se pevnost v tahu za ohybu pohybuje kolem hodnoty 30 MPa. Tato hodnota nebyla dosažena u receptur s 85% plněním, kdy byly u všech receptur dosaženy nejnižší pevnosti v tahu za ohybu. Nejvyšší pevnost byla dosažena u receptury obsahující 65 % odpadu z výroby minerálních izolačních desek (OIDM), přičemž znova se potvrdilo, že nejvyšší pevnost hmoty je s nejjemnějším plnivem. Golestanoh a kol. [87] na základě svého výzkumu zjistili, že optimální množství plniva v podobě křemičitého písku je 85 %, kdy byla dosažena nejvyšší pevnost v tahu za ohybu. Ribeiro a kol. [88] zjistili, že pevnost v tahu za ohybu malt na bázi EP je silně ovlivněna teplotou okolního prostředí. S výjimkou omezeného rozsahu teplot se pevnost v ohybu těchto materiálů výrazně snižuje s rostoucí teplotou. U polymerních kotvících hmot se požaduje pevnost v tahu za ohybu minimálně 30 MPa, tuto hodnotu splnily receptury obsahující popílky do množství 55 %, přičemž nejvyšší pevnost byla dosažena u referenční receptury obsahující 55% množství křemičitého písku s velikostí částic pod 0,063 mm (54 MPa). U hmot s hrubšími plnivými se pevnost v tahu za ohybu pohybovala

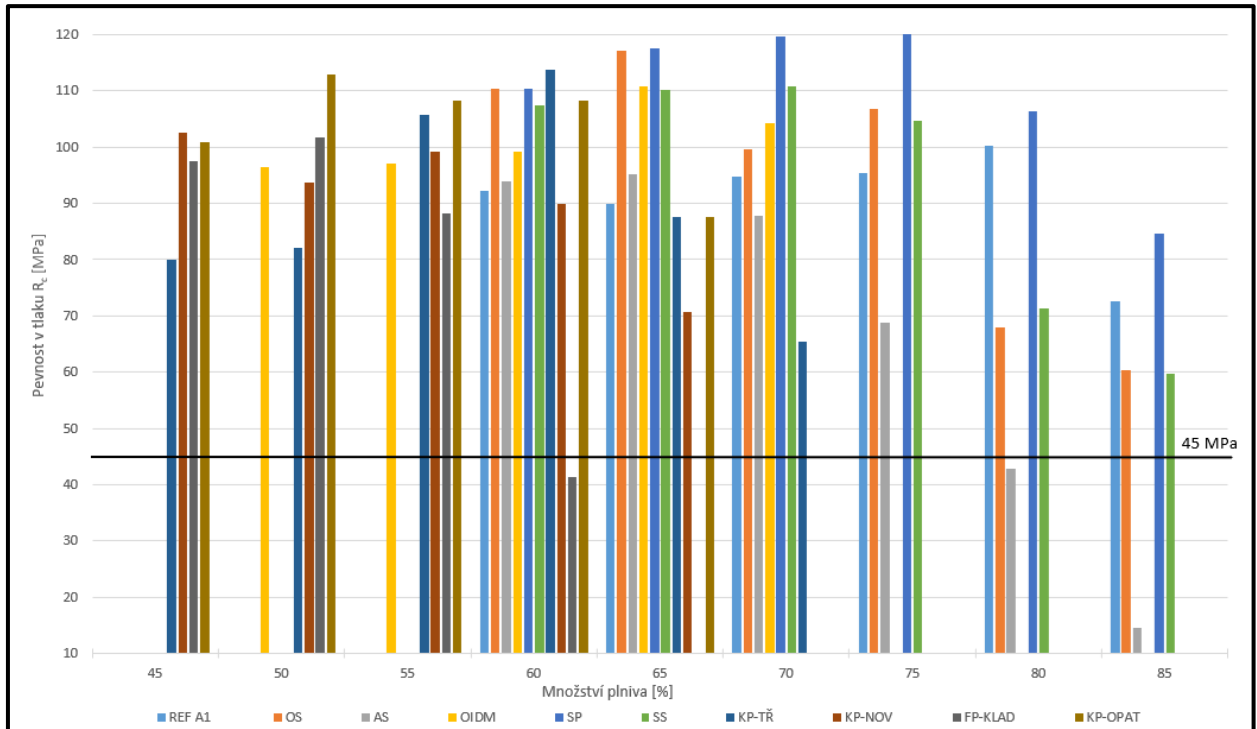
kolem 20 MPa. Nejhorší výsledky byly zaznamenány u receptur obsahujících odpadní autosklo a odpadní sklo ze solárních panelů QS (Obr. 87).



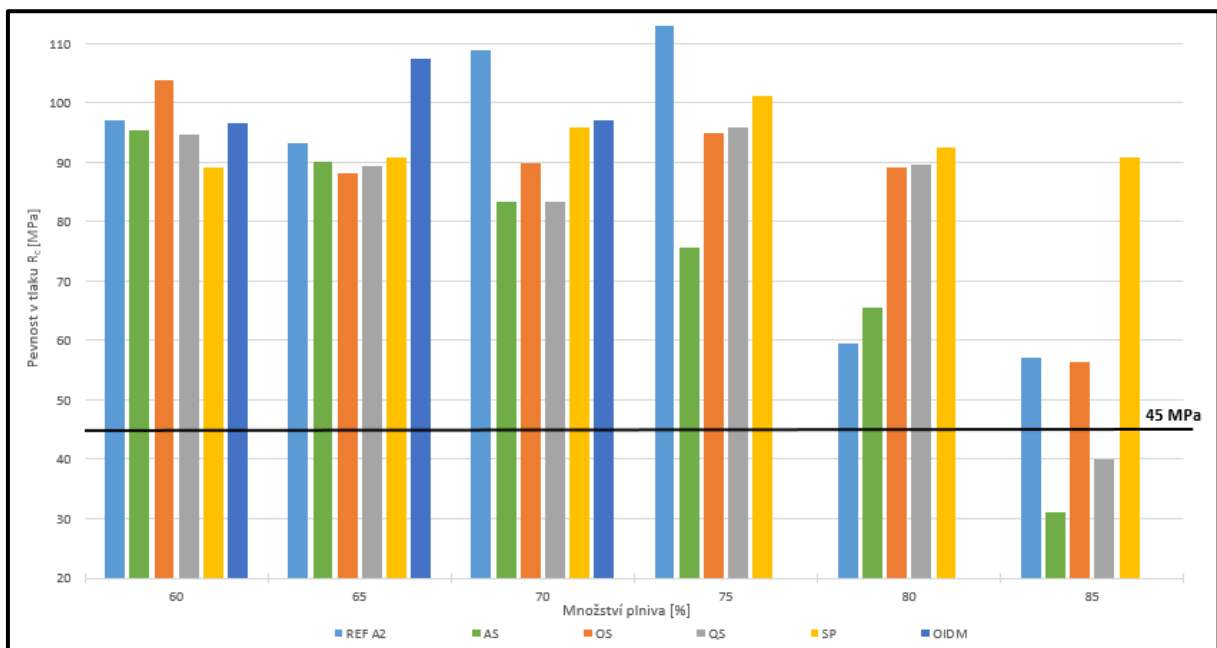
Obr. 87: Pevnost v tahu za ohybu kotvících hmot (EP-K) v závislosti na typu a množství plniva po 28 dnech.

6.2.2.3. Pevnost v tlaku

Sledování pevnosti v tlaku polymerbetonů a polymermalt na bázi epoxidových pryskyřic (EP) bylo popsáno již ve velkém množství vědeckých prací. Bylo zjištěno, že pevnost v tlaku závisí především na obsahu pryskyřice [89]. Rebeiz a kol. [90] prokázal, že přidáním 15% množství popílku do pryskyřice narůstá pevnost v tlaku až o 30 %. Dle TP SSBK III [10] 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. 88). Některé vzorky po porušení tlakovou silou jsou vidět na Obr. 90 a Obr. 91.



Obr. 88: Pevnost v tlaku správkových hmot po 28 dnech v závislosti na typu a množství plniva



Obr. 89: Pevnost v tlaku zálivkových hmot po 28 dnech v závislosti na typu a množství plniva.

U zálivkových hmot byla pevnost v tlaku u všech receptur, kromě receptury EP-Z 85% QS, vyšší než 45 MPa (Obr. 89). Nejvyšší pevnost v tlaku (112 MPa) byla dosažena u referenční hmoty se 75% obsahem křemičitého písku. Z prověřovaných receptur bylo dosaženo nejvyšší pevnosti v tlaku u hmoty s 65% obsahem plniva ODM, 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 kotvících hmot se dosahuje pevnosti v tlaku

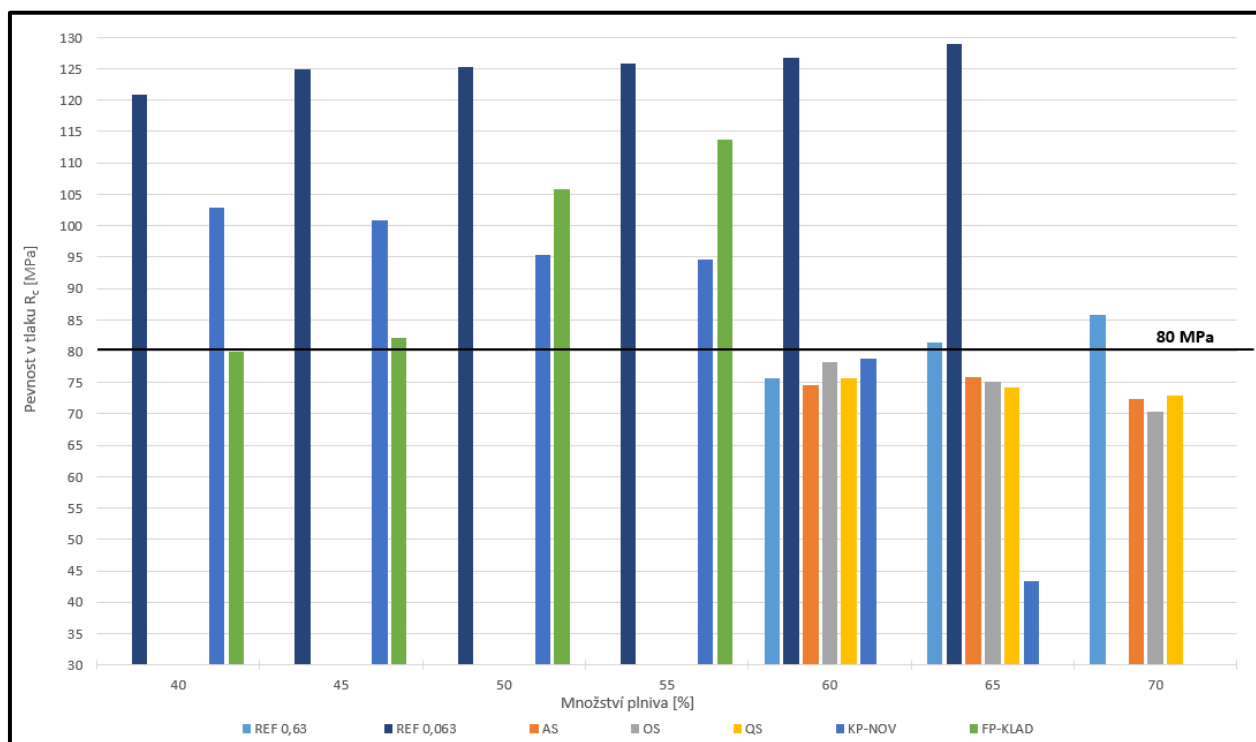
minimálně 80 MPa. Tuto hodnotu překročily hmoty s jemnými plnivými, popílkou a referenčním pískem s velikostí částic pod 63 μm . U hrubozrnnějších plniv byla pevnost v tlaku nižší. Obecně bylo pozorovatelné, že hodnoty pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku spolu úzce souvisí. Hmoty s vysokou pevností v tahu za ohybu vykazovaly taky vysokou pevnost v tlaku. Závislost mezi pevnostmi a objemovými hmotnostmi (OH) nebyla prokázána. Sanační hmoty s vyššími charakteristickými pevnostmi lépe odolávají mechanickému namáhání v konstrukci, ve které byly aplikovány.



Obr. 90: Vzorek EP-S 85% REF po zkoušce pevnosti v tlaku.



Obr. 91: Vzorek EP-S 60% KP-TŘ po zkoušce pevnosti v tlaku.



Obr. 92: Pevnost v tlaku kotvících hmot po 28 dnech v závislosti na typu a množství plniva.

6.2.2.4. Soudržnost s podkladem

V rámci dalšího zkoušení byla prověřována soudržnost vyvíjených zálivkových a správkových hmot s betonovým podkladem – betonovou vibrolisovanou dlažbou o rozměrech 30×30 cm. U všech zkoušených hmot došlo k normálnímu koheznímu porušení v betonovém podkladu (A), přičemž k porušení docházelo nejčastěji 3–6 mm

pod povrchem. Na základě vyhodnocení výsledků (viz Tab. 31, Tab. 32) lze usoudit, že vyvíjené zálivkové (EP-Z) a správkové hmoty (EP-S) mají vynikající soudržnost s betonovým podkladem. U správkových hmot se statickou funkcí třídy R4 se požaduje soudržnost $\geq 2,0$ MPa [10], přičemž tato hodnota byla splněna u všech zkoušených receptur (Tab. 31).

Tab. 31: Výsledky stanovení soudržnosti (f_h) vyvíjených správkových hmot v [MPa]

| Obsah plniva [%] | REF A1 | AS | OS | OIDM | SS | SP | KP-TŘ | KP NOV | FP KLAB | KP OPAT |
|------------------|--------|-----|-----|------|-----|-----|-------|--------|---------|---------|
| 45 | - | - | - | - | - | - | - | - | 4,9 | 5,6 |
| 50 | - | - | - | 4,6 | - | - | 4,4 | 5,6 | 4,8 | 5,6 |
| 55 | - | - | - | 6,2 | - | - | 4,2 | 6,1 | 4,5 | 5,9 |
| 60 | 5,3 | 4,2 | 5,2 | 5,9 | 4,7 | 4,6 | 4,7 | 5,8 | 5,1 | 6,1 |
| 65 | 5,2 | 4,7 | 5,0 | 4,7 | 4,6 | 4,5 | 4,9 | 5,4 | - | 6,3 |
| 70 | 5,2 | 5,5 | 4,9 | 4,5 | 4,9 | 4,9 | 4,3 | - | - | - |
| 75 | 4,8 | 5,2 | 5,2 | - | 4,3 | 4,9 | - | - | - | - |
| 80 | 4,3 | 5,4 | 5,7 | - | 5,2 | 5,2 | - | - | - | - |
| 85 | 4,3 | 4,5 | 5,1 | - | 4,4 | 4,7 | - | - | - | - |

Tab. 32: Výsledky stanovení soudržnosti (f_h) vyvíjených zálivkových hmot v [MPa]

| Obsah plniva [%] | REF A2 | AS | OS | QS | OIDM | SP |
|------------------|--------|-----|-----|-----|------|-----|
| 60 | 5,5 | 5,8 | 5,7 | 4,9 | 6,1 | 4,9 |
| 65 | 5,5 | 6,0 | 6,3 | 4,8 | 6,2 | 5,1 |
| 70 | 6,2 | 5,9 | 5,9 | 5,1 | 4,9 | 5,3 |
| 75 | 6,4 | 6,0 | 5,0 | 5,3 | - | 5,3 |
| 80 | 4,9 | 4,9 | 5,2 | 5,0 | - | 6,1 |
| 85 | 5,5 | 4,8 | 5,4 | 5,5 | - | 6,0 |

6.2.2.5. Tvrdost

Pro stanovení tvrdosti Shore D (HD) a odolnosti vůči úderu byly použity vybrané vzorky zpolymerované po hodnocení zkoušky aplikovatelnosti. Tvrdost byla zkoušena na vzorcích ve stáří 28 dní a výsledky jsou uvedeny v Tab. 33 a Tab. 34. Hodnoty tvrdosti jsou závislé na době působení cizího tělesa, na jeho geometrii a materiálových vlastnostech, velikosti zatížení, elastických vlastnostech zkoušeného materiálu a na teplotě při zkoušce. Tvrdost polymerů podléhá složitějším zákonitostem, než je tomu u látek kovového charakteru, což je dáno především vlastnostmi polymerů, jako je poměrně nízký modul pružnosti a viskoelastické chování. Bylo ověřeno, že vliv použitého druhu a množství plniva může nepatrně ovlivnit výsledky tvrdosti materiálu. Dále bylo prokázáno, že hmoty obsahující jako plnivo jemnější částice (popílek, OIDM) vykazují vyšší hodnoty tvrdosti Shore D (HD) než hmoty plněné odpadním sklem, struskou a slévárenským pískem, u kterých se velikost částic pohybovala až do velikosti 1,5 mm. Z

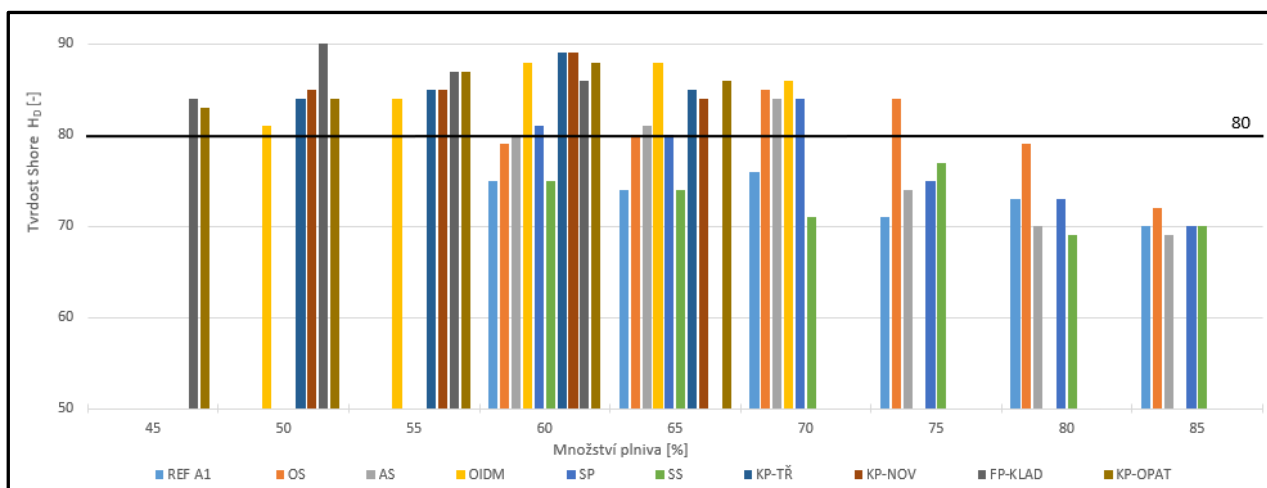
Obr. 93 je patrné, že tvrdosti HD 80 nebylo dosaženo u referenčních správkových hmot (REF) a také u hmot s odpadní slévárenskou struskou (SS). U ostatních receptur nebylo této hodnoty, kterou by měly vykazovat speciální správkové hmoty, dosaženo při plnění vyšším než 70 %. Na základě těchto výsledků lze tedy usoudit, že hlavní vliv na výslednou tvrdost má typ a množství hrubozrnného plniva v epoxidové matrici. U zálivkových hmot lze pozorovat (Obr. 94), že hodnotu tvrdosti 70 dosáhly všechny prověřované receptury, přičemž i zde je jasně patrné, že se zvyšujícím se obsahem hrubozrnných plniv v EP se začne snižovat příslušná tvrdost.

Tab. 33: Tvrdost H_D [-] vyvíjených správkových hmot (EP-S)

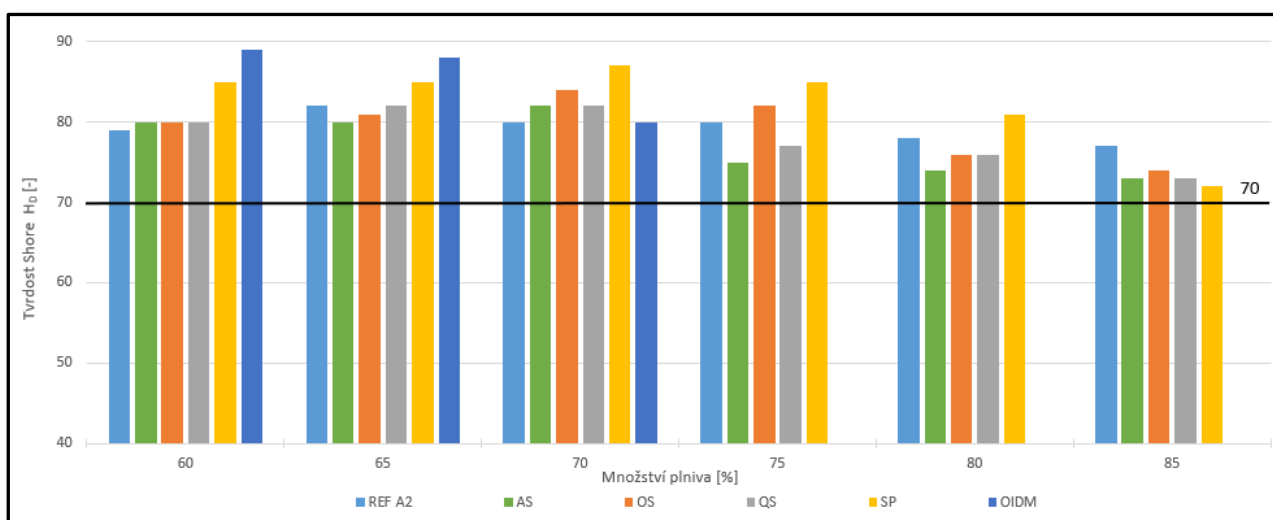
| Obsah plniva [%] | REF A1 | AS | OS | OIDM | SS | SP | KP-TŘ | KP NOV | FP Klad | KP OPAT |
|------------------|--------|----|----|------|----|----|-------|--------|---------|---------|
| 45 | - | - | - | - | - | - | | | 84 | 83 |
| 50 | - | - | - | 81 | - | - | 84 | 85 | 90 | 84 |
| 55 | - | - | - | 84 | - | - | 85 | 85 | 87 | 87 |
| 60 | 75 | 80 | 79 | 88 | 75 | 81 | 89 | 89 | 86 | 88 |
| 65 | 74 | 81 | 80 | 88 | 74 | 80 | 85 | 84 | - | 86 |
| 70 | 76 | 84 | 85 | 86 | 71 | 84 | - | - | - | - |
| 75 | 71 | 74 | 84 | - | 77 | 75 | - | - | - | - |
| 80 | 73 | 70 | 79 | - | 69 | 73 | - | - | - | - |
| 85 | 70 | 69 | 72 | - | 70 | 70 | - | - | - | - |

Tab. 34: Tvrdost H_D [-] vyvíjených zálivkových hmot (EP-Z)

| Obsah plniva [%] | REF A2 | AS | OS | QS | OIDM | SP |
|------------------|--------|----|----|----|------|----|
| 60 | 79 | 80 | 80 | 80 | 89 | 85 |
| 65 | 82 | 80 | 81 | 82 | 88 | 85 |
| 70 | 80 | 82 | 84 | 82 | 80 | 87 |
| 75 | 80 | 75 | 82 | 77 | - | 85 |
| 80 | 78 | 74 | 76 | 76 | - | 81 |
| 85 | 77 | 73 | 74 | 73 | - | 72 |



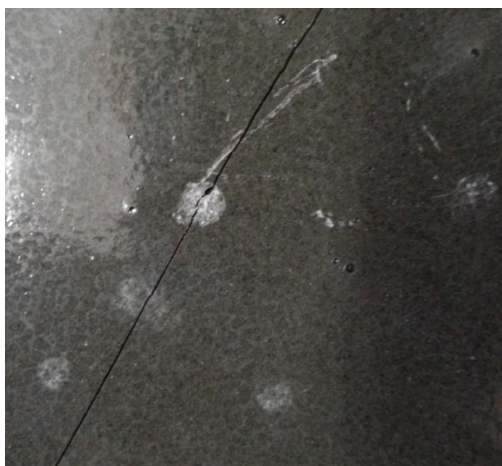
Obr. 93: Grafické vyhodnocení tvrdosti Shore H_D správkových hmot (EP-S) po 28 dnech v závislosti na typu a množství plniva



Obr. 94: Grafické vyhodnocení tvrdosti Shore H_D záливkových hmot (EP-Z) po 28 dnech v závislosti na typu a množství plniva

6.2.2.6. Odolnost vůči úderu

Výsledky stanovení odolnosti vyvíjených záливkových a správkových hmot při použití velké plochy úderníku jsou uvedeny v Tab. 34 a Tab.35, přičemž grafické vyhodnocení výsledků je uvedeno na Obr. 97 a Obr. 98. Dle normy ČSN EN 1504-2 [113] se do nejvyšší třídy I zařazují materiály pro ochranu povrchu betonu s odolností vůči úderu ≥ 4 Nm. Některé hmoty po poškození nejvyšším zatížením (maximální výškou padajícího úderníku) jsou zobrazeny na Obr. 95 a Obr. 96. Nejlepší odolnost vůči úderu vykazovaly hmoty s obsahem jemnějších plniv (popílek, OIDM), kdy nejvyšší odolnost (9,0 Nm (90 cm)) byla zaznamenána u receptury EP-S 60% KP-TŘ. Hmoty s hrubozrnnějšími plnivami byly pravděpodobně křehčí, a tedy vykazovaly nižší odolnost proti poškození úderem. K na pohled viditelnému otisku docházelo u všech hmot při výšce padajícího závaží kolem 2,0 Nm (20 cm).



Obr. 95: Trhlina způsobená dopadem úderníku (EP-S 55% KP-NOV)



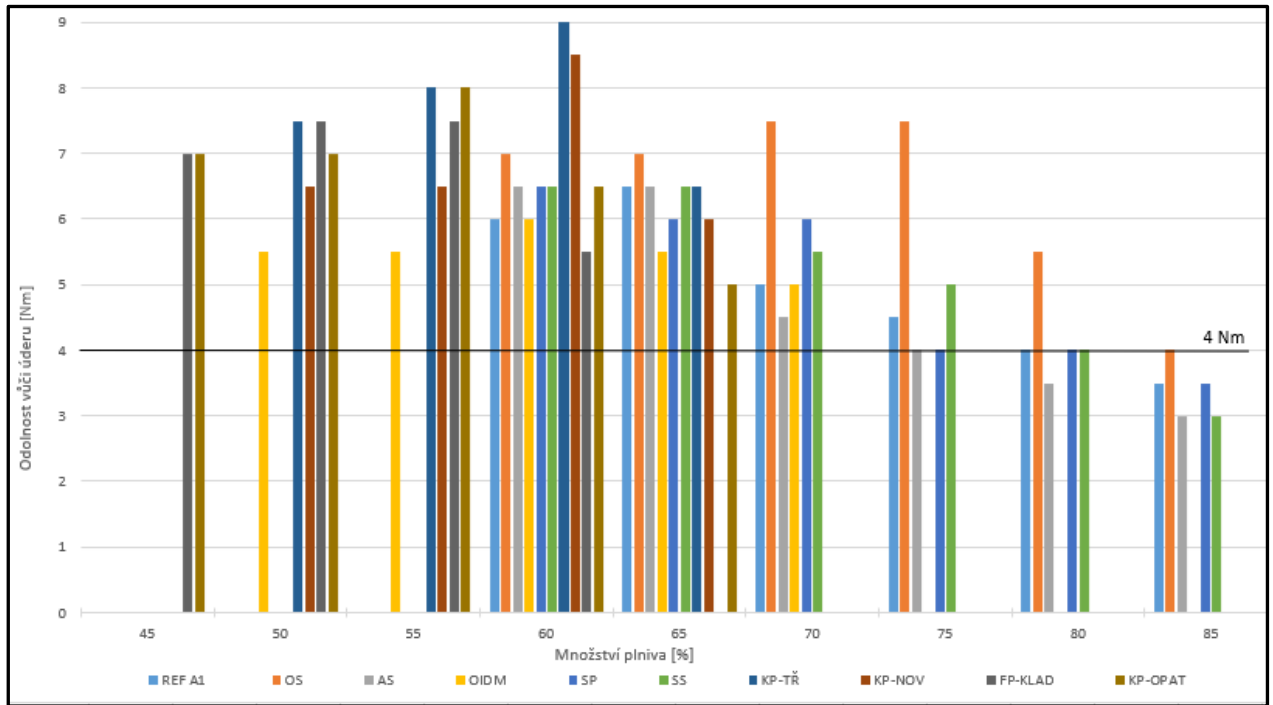
Obr. 96: Výrazná síť trhlin způsobená dopadem úderníku (EKO-X 40% NK)

Tab. 35: Výsledky stanovení odolnosti vůči úderu v [Nm] – správkové hmoty (EP-S)

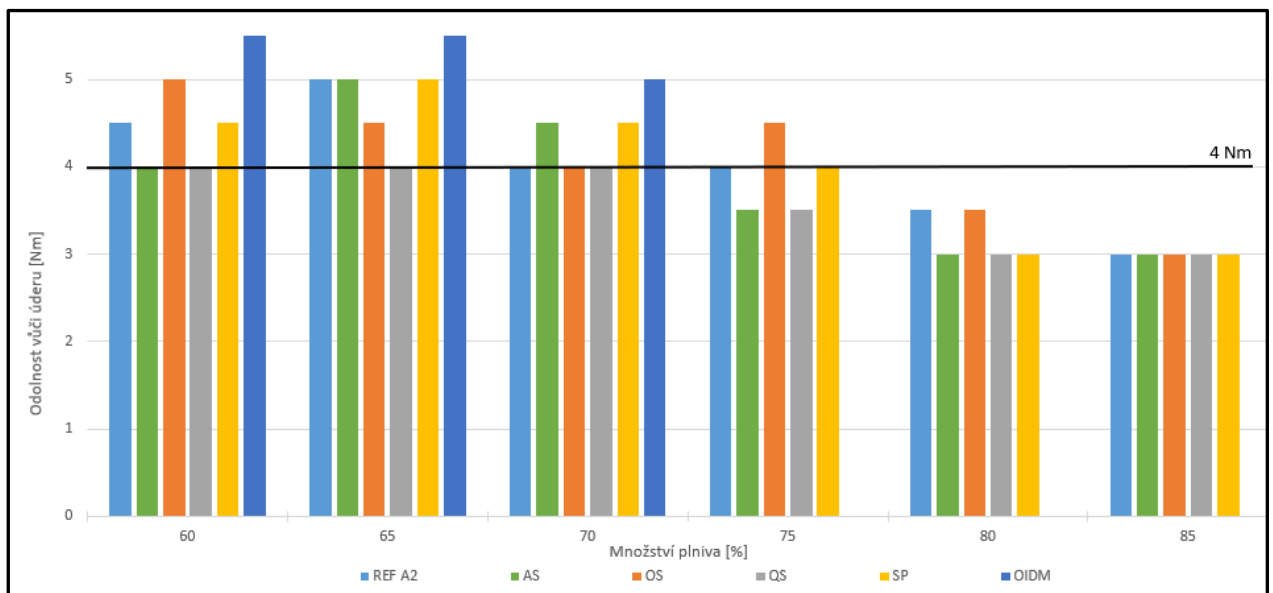
| Obsah plniva [%] | REF A1 | AS | OS | OIDM | SS | SP | KP-TŘ | KP NOV | FP Klad | KP OPAT |
|------------------|--------|-----|-----|------|-----|-----|-------|--------|---------|---------|
| 45 | - | - | - | - | - | - | | | 7,0 | 7,0 |
| 50 | - | - | - | 5,5 | - | - | 7,5 | 6,5 | 7,5 | 7,0 |
| 55 | - | - | - | 5,5 | - | - | 8,0 | 6,5 | 7,5 | 8,0 |
| 60 | 6,0 | 6,5 | 7,0 | 6,0 | 6,5 | 6,5 | 9,0 | 8,5 | 5,5 | 6,5 |
| 65 | 6,5 | 6,5 | 7,0 | 5,5 | 6,5 | 6,0 | 6,5 | 6,0 | - | 5,0 |
| 70 | 5,0 | 4,5 | 7,5 | 5,0 | 5,5 | 6,0 | - | - | - | - |
| 75 | 4,5 | 4,0 | 7,5 | - | 5,0 | 4,0 | - | - | - | - |
| 80 | 4,0 | 3,5 | 5,5 | - | 4,0 | 4,0 | - | - | - | - |
| 85 | 3,5 | 3,0 | 4,0 | - | 3,0 | 3,5 | - | - | - | - |

Tab. 36: Výsledky stanovení odolnosti vůči úderu v [Nm] – zálivkové hmoty (EP-Z)

| Obsah plniva [%] | REF A2 | AS | OS | QS | OIDM | SP |
|------------------|--------|-----|-----|-----|------|-----|
| 60 | 4,5 | 4,0 | 5,0 | 4,0 | 5,5 | 4,5 |
| 65 | 5,0 | 5,0 | 4,5 | 4,0 | 5,5 | 5,0 |
| 70 | 4,0 | 4,5 | 4,0 | 4,0 | 5,0 | 4,5 |
| 75 | 4,0 | 3,5 | 4,5 | 3,5 | - | 4,0 |
| 80 | 3,5 | 3,0 | 3,5 | 3,0 | - | 3,0 |
| 85 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | - | 3,0 |



Obr. 97: Grafické vyhodnocení odolnosti vůči úderu v [Nm] správkových hmot po 28 dnech v závislosti na typu a množství plniva



Obr. 98: Grafické vyhodnocení odolnosti vůči úderu v [Nm] zálivkových hmot po 28 dnech v závislosti na typu a množství plniva

6.2.3. 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. 37. U hmoty se 45% plněním došlo k porušení u zkoušky soudržnosti (f_n) 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 (pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu) hmoty po 28 dnech.

Tab. 37: Výsledky základních fyzikálně-mechanických vlastností vyvíjené hmoty EKO-X

| Parametr | Hustota v čerstvém stavu [kg/m ³] | OH v zatvrdlém stavu [kg/m ³] | R _f [MPa] | R _c [MPa] | f _h [MPa] | Odolnost vůči úderu [Nm] | Tvrdost H _D [-] |
|----------|---|---|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|----------------------------|
| 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 |

6.2.4. Optimalizace výsledků

Optimalizace získaných výsledků a výběr receptur pro další pokročilé zkoušení byl realizován metodou kvantitativního párového srovnání. Je zde uveden optimalizační výpočet pouze u vyvíjených zálivkových hmot – EP-Z (viz Tab. 38 až Tab. 42). U kotvicích (EP-K) a správkových hmot (EP-S) byl optimalizační výpočet proveden stejným způsobem, nicméně za účelem zpřehlednění celé disertační práce zde není uveden – jsou zde uvedeny pouze výsledky provedeného optimalizačního výpočtu, tedy optimální receptury postupující do dalšího pokročilého zkoušení.

Tab. 38: Výběr variant pro optimalizaci receptur zálivkových hmot (EP-Z)

| EP-Z | | | |
|------|---------|----|-----------|
| A | 60 % AS | O | 70 % QS |
| B | 65 % AS | P | 75 % QS |
| C | 70 % AS | Q | 80 % QS |
| D | 75 % AS | R | 85 % QS |
| E | 80 % AS | S | 60 % OIDM |
| F | 85 % AS | T | 65 % OIDM |
| G | 60 % OS | U | 70 % OIDM |
| H | 65 % OS | V | 60 % SP |
| I | 70 % OS | W | 65 % SP |
| J | 75 % OS | X | 70 % SP |
| K | 80 % OS | Y | 75 % SP |
| L | 85 % OS | Z | 80 % SP |
| M | 60 % QS | ZZ | 85 % SP |
| N | 65 % QS | | |

Tab. 39: Výběr kritérií

| Číslo | Kritérium | Jednotka |
|-------|-------------------------------------|----------------------|
| 1 | Hustota v čerstvém | [kg/m ³] |
| 2 | Objemová hmotnost v zatvrdlém stavu | [kg/m ³] |
| 3 | Pevnost v tahu za ohybu | [MPa] |
| 4 | Pevnost v tlaku | [MPa] |
| 5 | Plnění | [%] |
| 6 | Tvrdość H _D | [-] |
| 7 | Odolnost vůči úderu | [Nm] |

Tab. 40: Rozhodovací matice

| číslo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---------|------|------|------|-------|-----|-----|-----|
| optimum | MAX | MAX | MAX | MAX | MAX | MAX | MAX |
| A | 1640 | 1630 | 29,8 | 92,3 | 60 | 80 | 4 |
| B | 1645 | 1650 | 31,2 | 90 | 65 | 80 | 5 |
| C | 1760 | 1750 | 34,3 | 83,4 | 70 | 82 | 4,5 |
| D | 1850 | 1800 | 29,8 | 75,6 | 75 | 75 | 3,5 |
| E | 1890 | 1870 | 19,9 | 65,6 | 80 | 74 | 3 |
| F | 1925 | 1870 | 15,6 | 31,2 | 85 | 73 | 3 |
| G | 1640 | 1615 | 33,1 | 103,8 | 60 | 80 | 5 |
| H | 1720 | 1710 | 34,6 | 88,3 | 65 | 81 | 4,5 |
| I | 1810 | 1770 | 41,1 | 89,3 | 70 | 84 | 4 |
| J | 1840 | 1825 | 38,2 | 95,2 | 75 | 82 | 4,5 |
| K | 1900 | 1855 | 35,2 | 89,2 | 80 | 76 | 3,5 |
| L | 1930 | 1850 | 23,6 | 56,3 | 85 | 74 | 3 |
| M | 1660 | 1640 | 27,8 | 94,7 | 60 | 80 | 4 |
| N | 1740 | 1710 | 29,9 | 89,5 | 65 | 82 | 4 |
| O | 1780 | 1785 | 30,6 | 83,3 | 70 | 82 | 4 |
| P | 1830 | 1820 | 33,5 | 95,8 | 75 | 77 | 3,5 |
| Q | 1840 | 1830 | 30,8 | 89,6 | 80 | 76 | 3 |
| R | 1830 | 1820 | 14,2 | 40 | 85 | 73 | 3 |
| S | 1730 | 1585 | 40,4 | 96,7 | 60 | 89 | 5,5 |
| T | 1780 | 1655 | 46,7 | 107,5 | 65 | 88 | 5,5 |
| U | 1920 | 1715 | 45,3 | 97,1 | 70 | 80 | 5 |
| V | 1730 | 1710 | 33,2 | 89,2 | 60 | 85 | 4,5 |
| W | 1790 | 1780 | 35 | 90,8 | 65 | 85 | 5 |
| X | 1800 | 1815 | 35,9 | 95,8 | 70 | 87 | 4,5 |
| Y | 1910 | 1845 | 36,4 | 101,3 | 75 | 85 | 4 |
| Z | 2040 | 1940 | 31,1 | 92,5 | 80 | 81 | 3 |
| ZZ | 2050 | 1930 | 28,4 | 90,8 | 85 | 72 | 3 |
| MIN | 1640 | 1585 | 14,2 | 31,2 | 60 | 72 | 3 |
| MAX | 2050 | 1940 | 46,7 | 107,5 | 85 | 89 | 5,5 |

Tab. 41: Výpočet váhy (Sattyho matice)

| číslo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | S_i | R_i | F_i |
|-------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------------|-------------|-------------|
| 1 | 1 | 1/2 | 1/5 | 1/5 | 1/4 | 1/3 | 1/4 | 0,00041667 | 0,00005952 | 0,000002060 |
| 2 | 2 | 1 | 1/5 | 1/6 | 1/4 | 1/2 | 1/3 | 0,00277778 | 0,00039683 | 0,000013734 |
| 3 | 5 | 5 | 1 | 2 | 1/2 | 2 | 2 | 100,00000000 | 14,28571429 | 0,494429768 |
| 4 | 5 | 6 | 1/2 | 1 | 1/3 | 3 | 2 | 30,00000000 | 4,28571429 | 0,148328930 |
| 5 | 4 | 4 | 2 | 3 | 1 | 1 | 1/2 | 48,00000000 | 6,85714286 | 0,237326289 |
| 6 | 3 | 2 | 1/2 | 1/3 | 1 | 1 | 1/4 | 0,25000000 | 0,03571429 | 0,001236074 |
| 7 | 4 | 3 | 1/2 | 1/2 | 2 | 4 | 1 | 24,00000000 | 3,42857143 | 0,118663144 |
| SUMA | | | | | | | | 202,25319444 | 28,89331349 | 1,00000000 |

$$S_i = \prod_{j=1}^n s_{ij} \quad R_i = (S_i)^{\frac{1}{n}} \quad F_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^n R_i}$$

$$MAX \longrightarrow b_{ij} = \frac{a_{ij} - MIN(a_i)}{MAX(a_i) - MIN(a_i)}$$

$$c_{ij} = F_i \cdot b_{ij} \cdot 100$$

Tab. 42: Výpočtová matice (metoda kvantitativního párového srovnání)

| číslo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | SUMA |
|------------|------------|-------------|-------------|------------|-------------|------------|------------|--------------|
| Váha F_i | 0,00000206 | 0,000013734 | 0,494429768 | 0,14832893 | 0,237326289 | 0,00123607 | 0,11866314 | |
| optim. | MAX | MAX | MAX | MAX | MAX | MAX | MAX | |
| A | 0 | 0,0001741 | 23,7326289 | 11,87798 | 0 | 0,0581682 | 4,7465258 | 40,42 |
| B | 0,0000025 | 0,0002515 | 25,8624802 | 11,430853 | 4,7465258 | 0,0581682 | 9,4930515 | 51,59 |
| C | 0,0000603 | 0,0006383 | 30,5785795 | 10,147798 | 9,4930515 | 0,0727103 | 7,1197887 | 57,41 |
| D | 0,0001055 | 0,0008318 | 23,7326289 | 8,6314607 | 14,2395773 | 0,0218131 | 2,3732629 | 49,00 |
| E | 0,0001256 | 0,0011026 | 8,6715375 | 6,6874380 | 18,9861031 | 0,0145421 | 0 | 34,36 |
| F | 0,0001432 | 0,0011026 | 2,1298513 | 0 | 23,7326289 | 0,0072710 | 0 | 25,87 |
| G | 0 | 0,0001161 | 28,7529927 | 14,1136046 | 0 | 0,0581682 | 9,4930515 | 52,42 |
| H | 0,0000402 | 0,0004836 | 31,0349762 | 11,1003695 | 4,7465258 | 0,0654392 | 7,1197887 | 54,07 |
| I | 0,0000854 | 0,0007157 | 40,9235716 | 11,2947718 | 9,4930515 | 0,0872523 | 4,7465258 | 66,55 |
| J | 0,0001005 | 0,0009285 | 36,5117367 | 12,4417451 | 14,2395773 | 0,0727103 | 7,1197887 | 70,39 |
| K | 0,0001306 | 0,0010446 | 31,9477696 | 11,2753315 | 18,9861031 | 0,0290841 | 2,3732629 | 64,61 |
| L | 0,0001457 | 0,0010252 | 14,3004302 | 4,8794969 | 23,7326289 | 0,0145421 | 0 | 42,93 |
| M | 0,0000100 | 0,0002128 | 20,6899841 | 12,3445440 | 0 | 0,0581682 | 4,7465258 | 37,84 |
| N | 0,0000502 | 0,0004836 | 23,8847611 | 11,3336522 | 4,7465258 | 0,0727103 | 4,7465258 | 44,78 |
| O | 0,0000703 | 0,0007738 | 24,9496868 | 10,1283582 | 9,4930515 | 0,0727103 | 4,7465258 | 49,39 |
| P | 0,0000955 | 0,0009092 | 29,361521 | 12,5583865 | 14,2395773 | 0,0363551 | 2,3732629 | 58,57 |
| Q | 0,0001005 | 0,0009479 | 25,2539512 | 11,3530924 | 18,9861031 | 0,0290841 | 0 | 55,62 |
| R | 0,0000955 | 0,0009092 | 0 | 1,7107400 | 23,7326289 | 0,0072710 | 0 | 25,45 |
| S | 0,0000452 | 0 | 39,8586459 | 12,7333485 | 0 | 0,1236074 | 11,8663144 | 64,58 |
| T | 0,0000703 | 0,0002708 | 49,4429768 | 14,8328930 | 4,7465258 | 0,1163364 | 11,8663144 | 81,01 |
| U | 0,0001407 | 0,0005029 | 47,3131255 | 12,8111095 | 9,4930515 | 0,0581682 | 9,4930515 | 79,17 |

| | | | | | | | | |
|----|-----------|-----------|------------|------------|------------|-----------|-----------|--------------|
| V | 0,0000452 | 0,0004836 | 28,9051249 | 11,2753315 | 0 | 0,0945233 | 7,1197887 | 47,40 |
| W | 0,0000754 | 0,0007544 | 31,6435051 | 11,5863752 | 4,7465258 | 0,0945233 | 9,4930515 | 57,56 |
| X | 0,0000804 | 0,0008898 | 33,0126953 | 12,5583865 | 9,4930515 | 0,1090654 | 7,1197887 | 62,29 |
| Y | 0,0001357 | 0,0010059 | 33,7733565 | 13,6275990 | 14,2395773 | 0,0945233 | 4,7465258 | 66,48 |
| Z | 0,0002010 | 0,0013734 | 25,7103479 | 11,9168590 | 18,9861031 | 0,0654392 | 0 | 56,68 |
| ZZ | 0,0002060 | 0,0013347 | 21,6027776 | 11,5863752 | 23,7326289 | 0 | 0 | 56,92 |

6.2.5. Závěr Etapy II

V rámci druhé etapy bylo provedeno základní zkoušení receptur, které vyhověly požadavkům v rámci hodnocení prvotního aplikačního testu. U všech vyvíjených sanačních hmot na beton (správkové, zálivkové, kotvící) se prověřovaly základní fyzikálně-mechanické parametry, jako je stanovení objemové hmotnosti (OH), pevnosti v tlaku a tahu za ohybu. U zálivkových a správkových hmot se realizovalo také stanovení soudržnosti, tvrdosti a odolnosti vůči úderu. U kotvících hmot nejsou tyto parametry až tak důležité. Prověřována byla také správková hmota EKO-X s obsahem NO, neutralizačního kalu (NK), u které do dalšího zkoušení postoupila receptura EKO-X 40% NK vykazující poměrně vysoké pevnosti a požadovanou soudržnost s betonovým podkladem. Vybrané receptury představující výsledek této druhé etapy jsou uvedeny v Tab. 43.

Tab. 43: 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 | | |

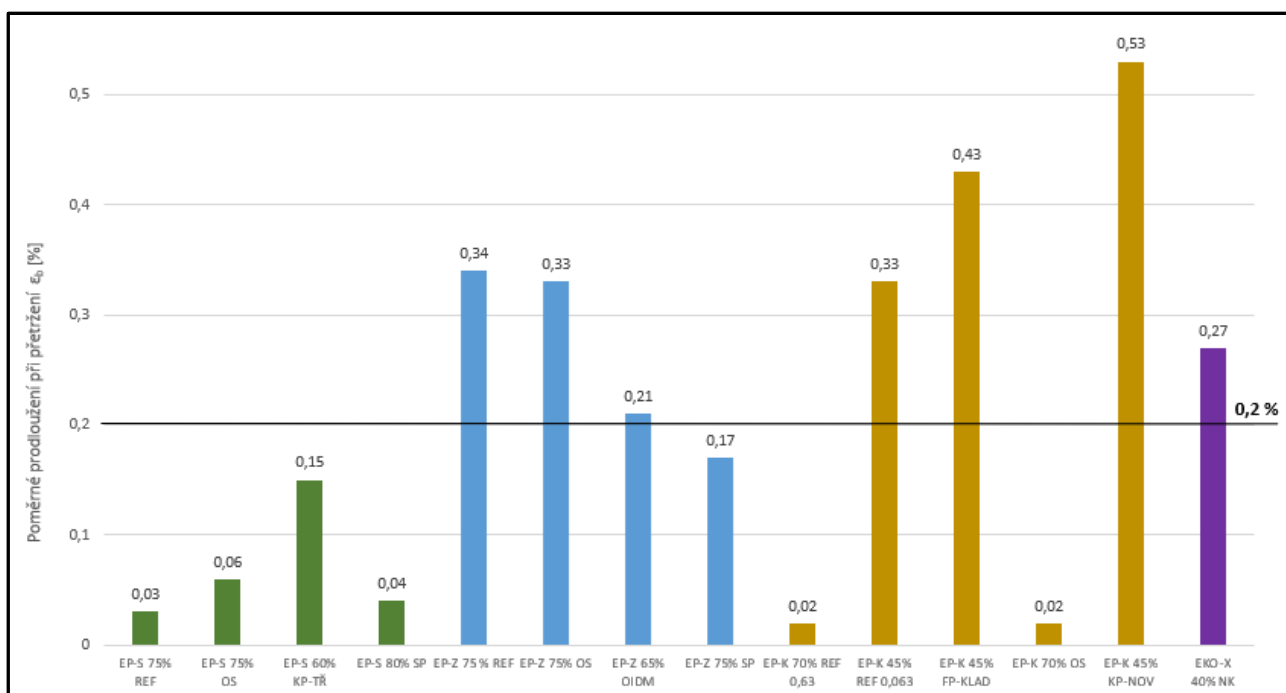
6.3. ETAPA 3 – Pokročilé experimentální prověření vybraných receptur

V rámci třetí etapy probíhalo pokročilé experimentální prověření receptur, které se v rámci vyhodnocení druhé etapy, základního zkoušení, jeví jako nejvhodnější pro přípravu speciálních sanačních hmot na beton. Speciálně u zálivkových a správkových hmot bylo provedeno stanovení dynamického modulu pružnosti v tahu a tlaku (E_{dyn}), součinitele teplotní roztažnosti a zkoušky mrazuvzdornosti v podobě zjednodušené zkoušky teplotní slučitelnosti. V důsledku toho, že se očekává využití vyvíjených hmot také do silně agresivního prostředí, byla provedena zrychlená zkouška chemické odolnosti, a to u všech vyvíjených sanačních hmot. Dále se provádělo také stanovení teploty skelného přechodu (T_g) za účelem zjištění, do kolika stupňů lze hmoty využít, tak

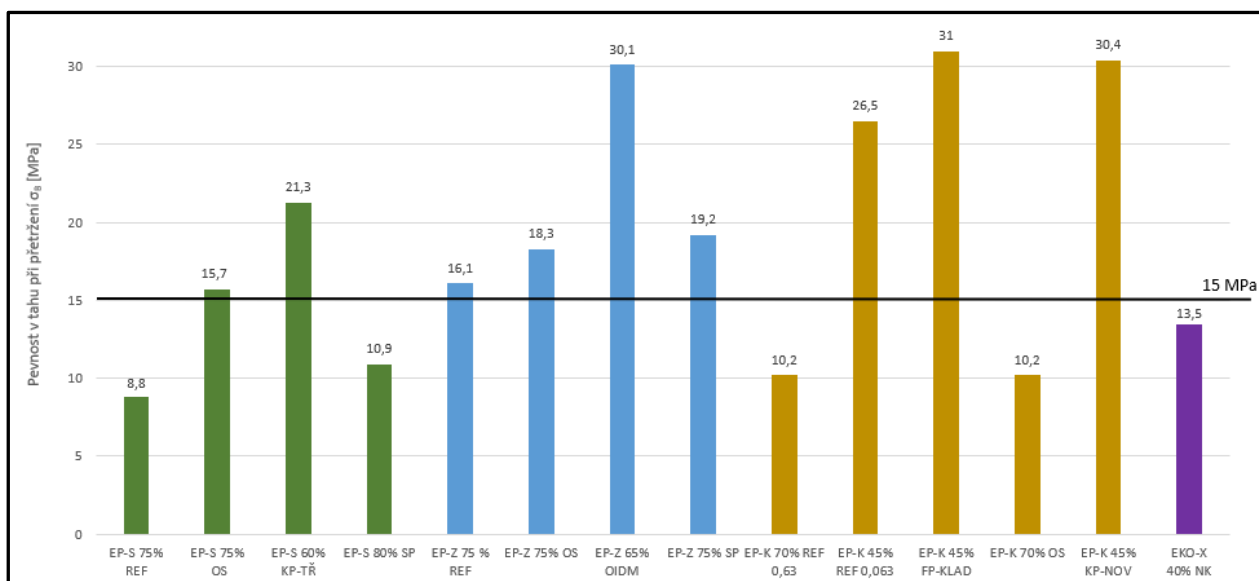
aby nedošlo k jejich degradaci a překročení meze použitelnosti vlivem zvýšené teploty. U kotvících hmot byla dále provedena zkouška vytržení, kdy bylo stanovováno maximální tahové zatížení na kotvu a příslušný posun. V neposlední řadě, dalším významným parametrem, který byl zjišťován, je smrštění, které by mělo být u vybraných sanačních hmot co nejmenší.

6.3.1. Stanovení tahových vlastností

Při zkoušce stanovení tahových vlastností se zjišťovalo poměrné prodloužení při přetržení (ϵ_b) a maximální pevnost v tahu (σ_b) vybraných speciálních sanačních hmot, přičemž σ_b korespondovalo ve všech případech s pevností v tahu při přetržení vzorku. Grafické vyhodnocení výsledků je uvedeno na *Obr. 99* a *Obr. 100*. Tahové vlastnosti jsou důležité především u kotvících hmot, kdy se požaduje maximální pevnost v tahu při minimálním poměrném prodloužení. Vyšší ϵ_b vykazovaly hmoty s jemnějším plnivem (popílky, OI DM). Nejvyšší ϵ_b bylo zjištěno u kotvící hmoty obsahující 45 % popílku KP-NOV, a to 0,53 %.



Obr. 99: Poměrné prodloužení při přetržení (ϵ_b) vybraných sanačních (správkových (EP-S), závlivkových (EP-Z) a kotvících (EP-K) hmot



Obr. 100: Pevnost v tahu při přetržení (σ_b) vybraných sanačních (správkových (EP-S), zálivkových (EP-Z) a kotvicích (EP-K) hmot

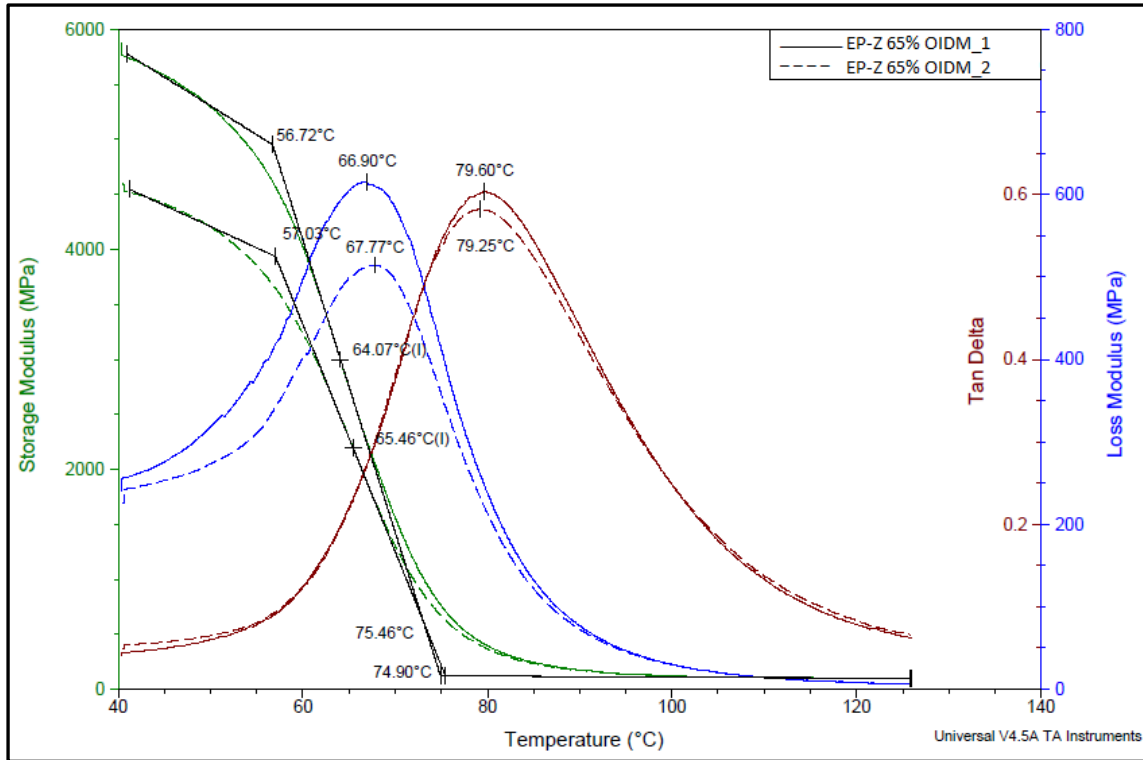
Nejvyšší pevnost v tahu při přetržení (σ_b) byla dosažena u hmoty EP-K 45% FP-KLAD, a to 31 MPa. Obecně nižší pevnost v tahu byla prokázána u vybraných hmot obsahujících hrubozrnnější plnivo. U hmot vykazujících nízké poměrné prodloužení byla dosažena nižší pevnost v tahu. U všech vyvíjených hmot dosahovaly referenční hmoty nižší pevnost v tahu než prověřované receptury. Limitní hodnotu pevnosti v tahu při přetržení (15 MPa) nedosáhly pouze 4 receptury obsahující hrubozrnné plnivo, a to EP-S 75% REF, EP-S 80% SP, EP-K 70% REF 0,63, EP-K 70% OS. Z dosažených výsledků lze usoudit, že hmoty obsahující jako plnivo použité popílky dosahovaly výrazně lepších tahových vlastností než hmoty s hrubozrnnými druhotnými surovinami. Ekologická sanační hmota EKO-X obsahující 40% množství NK vykazovala pevnost v tahu 13,5 MPa při poměrném prodloužení 0,27 %, přičemž v porovnání s ostatními recepturami se jednalo o nejhorší výsledky.

6.3.2. Stanovení tepelné odolnosti

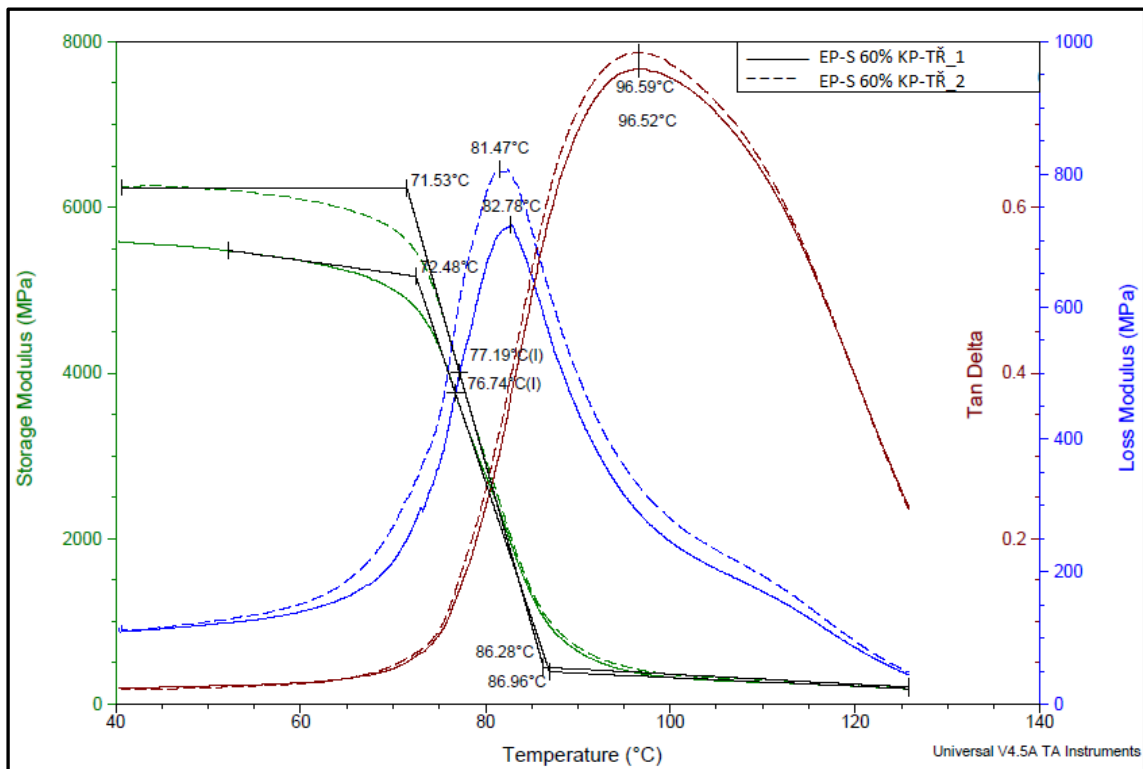
Zjištění tepelné odolnosti vyvíjených sanačních hmot bylo realizováno pomocí stanovení teploty skelného přechodu (T_g). Teplota skelného přechodu (T_g) je velmi důležitým parametrem epoxidových pryskyřic (EP) a kompozitů s epoxidovou maticí, protože T_g určuje podmínky pro použití těchto typů materiálů. Při většině aplikací se EP používají při teplotě pod T_g (ve sklovitém stavu). Rozdílné hodnoty T_g lze odůvodnit různými způsoby přípravy materiálů [91].

Výsledky stanovení T_g z dynamické mechanické analýzy (DMA) jsou zobrazeny na Obr. 101 a Obr. 102, přičemž na ose x je uvedena teplota v [°C] a na ose y jsou hodnoty elastického modulu (vlevo) a ztrátového modulu (vpravo). Nejvyšší T_g byla vypočítána z hodnoty ztrátového činitele ($\tan \delta$), kdy při dosažení T_g bylo dosaženo jeho maxima.

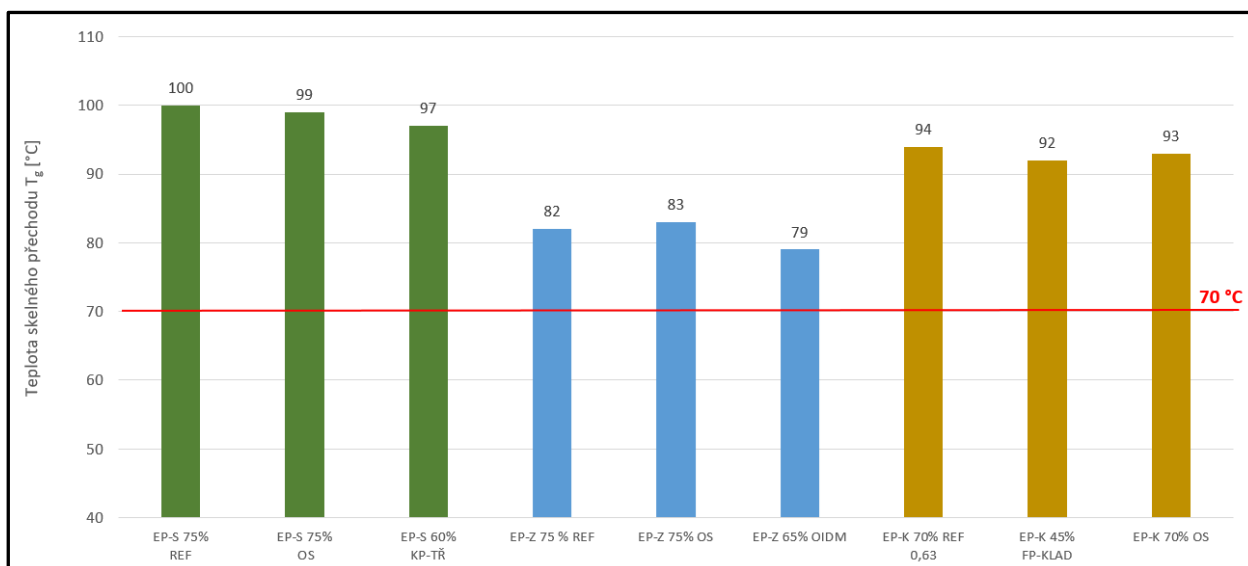
Grafické porovnání stanovených T_g lze pozorovat na Obr. 103. Z dosažených výsledků je patrné, že na T_g nemá výrazný vliv použité plnivo, ale především typ pojiva (EP) a princip jeho vytvrzení. U všech zkoušených hmot byla T_g vyšší než 70 °C, což zaručuje jejich bezpečné využití i při vyšších teplotách v náročných provozech.



Obr. 101: Výsledky stanovení T_g z výstupu DMA analýzy u hmoty EP-Z 65% OIDM



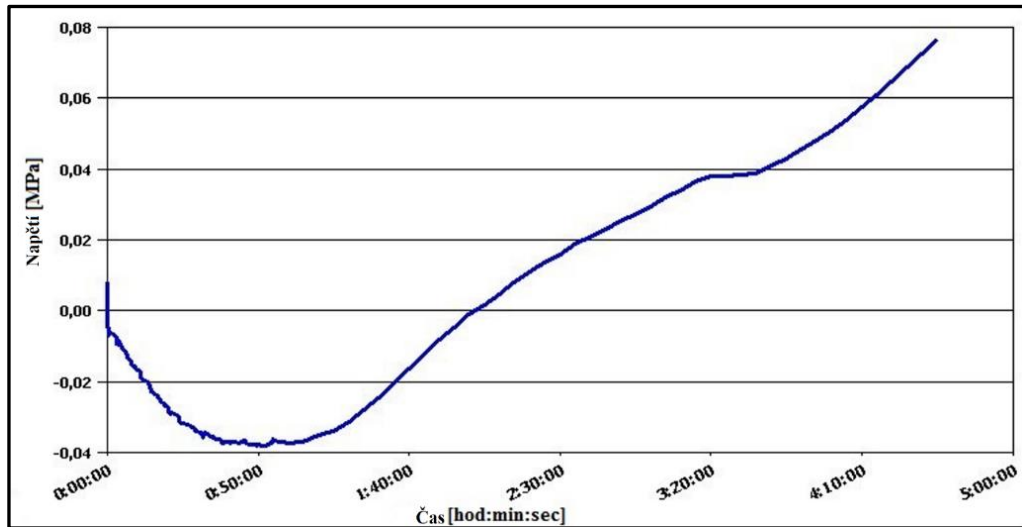
Obr. 102: Výsledky stanovení T_g z výstupu DMA analýzy u hmoty EP-S 60% KP-TŘ



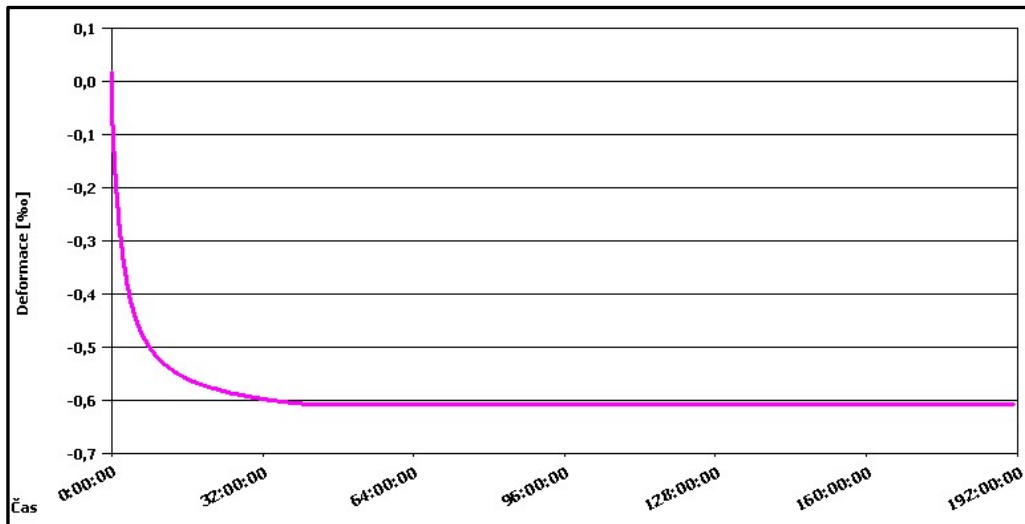
Obr. 103: Porovnání teploty skelného přechodu (T_g) vybraných sanačních hmot

6.3.3. Stanovení smrštění

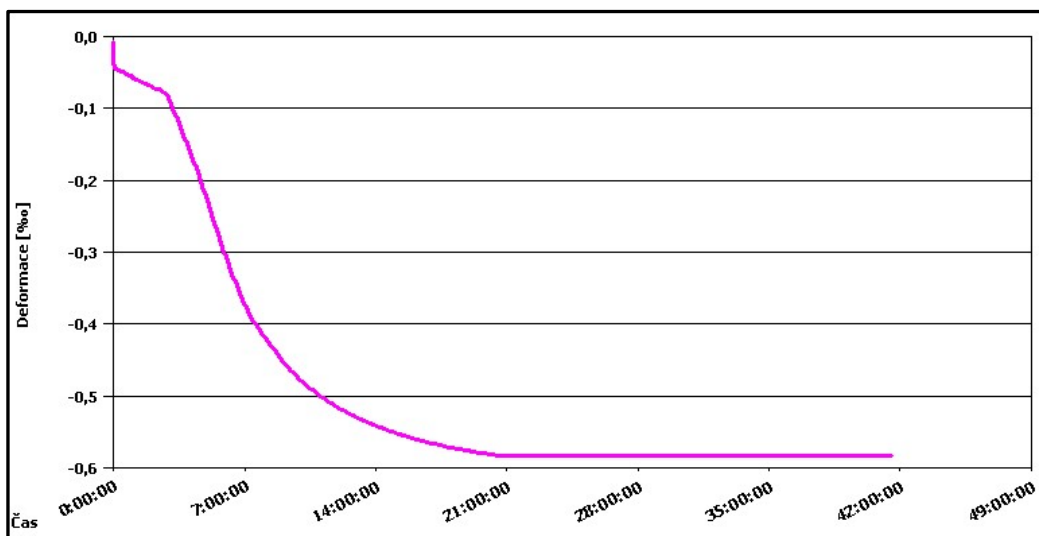
Pryskyřice, které vykazují v průběhu vytvrzování nulové smrštění nebo objemové rozpínání bez vzniku pórů jsou velice žádoucí pro různé praktické aplikace, jako jsou např. vysoce účinná lepidla, nátěry, přesné odlitky. Smrštění téměř všech komerčních pryskyřic je však dáno skutečností, že molekuly monomeru umístěné ve vzdálenosti Van der Waalsových sil od sebe se pohybují v rámci kovalentní vzdálenosti během vytvrzování. V současnosti dostupné bezrozpuštědlové polymerní pryskyřice mohou dosáhnout při dokonalé homogenizaci objemového smrštění v rozmezí 2–6 %. Problém smrštění zatím není zcela vyřešen dostupnými možnostmi [92]. Pomocí tensografu bylo nejprve zjišťováno napětí ve vzorku při konstantní deformaci, kdy byly bočnice formy pevně připevněny, a následně po zatuhnutí vzorku ve formě se bočnice povolily. Při konstantní síle byla měřena celková deformace vzorku. Na Obr. 104 je vidět průběh napětí během konstantní deformace kotvící hmoty EP-K 70% OS. Největšího napětí působícího na pevné bočnice bylo dosaženo přibližně v čase 50 minut od počátku polymerizace. Konečná hodnota smrštění u hmoty EP-K 70% byla 0,61 ‰ (0,61 mm na 1 m), což je relativně nízká hodnota. U hmoty EP-S 60% KP-TŘ (Obr. 106) byla zaznamenána deformace 0,58 ‰. Nejnižší smrštění (0,32 ‰) bylo zaznamenáno u zálivkové hmoty EP-Z (Obr. 107). Dále bylo zjištěno, že zkoušená plniva mají zanedbatelný vliv na výsledné smrštění vyvíjených sanačních hmot.



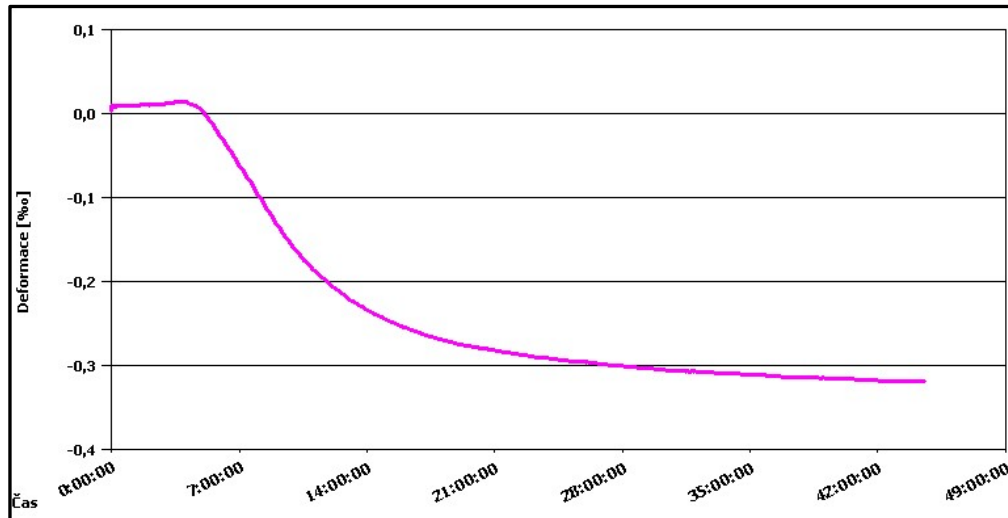
Obr. 104: Změna napětí ve vzorku v průběhu smršťování (EP-K 70% OS)



Obr. 105: Celková deformace při konstantním napětí vzorku EP-K 70% OS



Obr. 106: Celková deformace při konstantním napětí vzorku EP-S 60% KP-TR



Obr. 107: Celková deformace při konstantním napětí vzorku EP-Z 70% OS

6.3.4. Zkouška vytržení

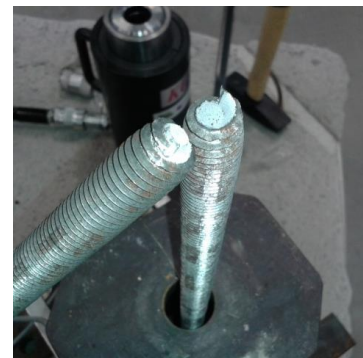
Obr. 108 zobrazuje nepatrné povytažení kotvené závitové tyče ve hmotě EP-K 70% OS, přičemž posunutí je patrné v místě povrchového napojení tyče do kotvící hmoty – vznik pórovitější struktury v důsledku působení vysoké tahové síly na osu prutu. Pro ukázkou je na Obr. 109 zobrazen také negativní výsledek po zkoušce vytržení, kdy bylo překročeno maximální povytažení a nebyla dosažena požadovaná kotvící síla – jednalo se o hmotu EP-K2, která byla zpolymerována do 15 minut, avšak byla příliš houževnatá a nedostatečně přilnula k betonovému povrchu. Obr. 110 vypovídá o tom, že vyvinutá kotvící hmota EP-K s obsahem kontaminovaného popílku a odpadního skla je tak kvalitní, že došlo k přetržení kotvené ocelové závitové tyče pevnostní třídy 4.8., které byly použity při prvotním zkoušení. Na Obr. 111 je zobrazen pracovní diagram zobrazující závislost vytrhávací síly na posunutí všech zkoušených hmot EP-K. Všechny zkoušené receptury vyhověly požadavku normy ČSN EN 1504-6 [31], která stanovuje minimální požadovanou kotvící sílu 75 kN s maximálním posunutím 0,6 mm. Kotvící hmota EP-K 45% FP-KLAD vydržela dokonce vytrhávací sílu až 120 kN (Obr. 111), přičemž odpovídající posunutí není pravděpodobně posunutí kotvící hmoty, ale protažení zakotvené tyče vlivem vysoké tahové síly. Bylo zjištěno, že využití popílků a odpadního skla jako plniv do polymerních kotev nemá negativní vliv na míru zakotvení ocelových tyčí do vysokopevnostního betonu. Po úspěšném provedení zkoušky byly odebrány jádrové vývrty přes kotvené ocelové tyče včetně kotevní hmoty (EP-K, EP-K2) a betonu pro zjištění mikrostruktury pomocí CT tomografie (viz kapitola 6.4.4.2).



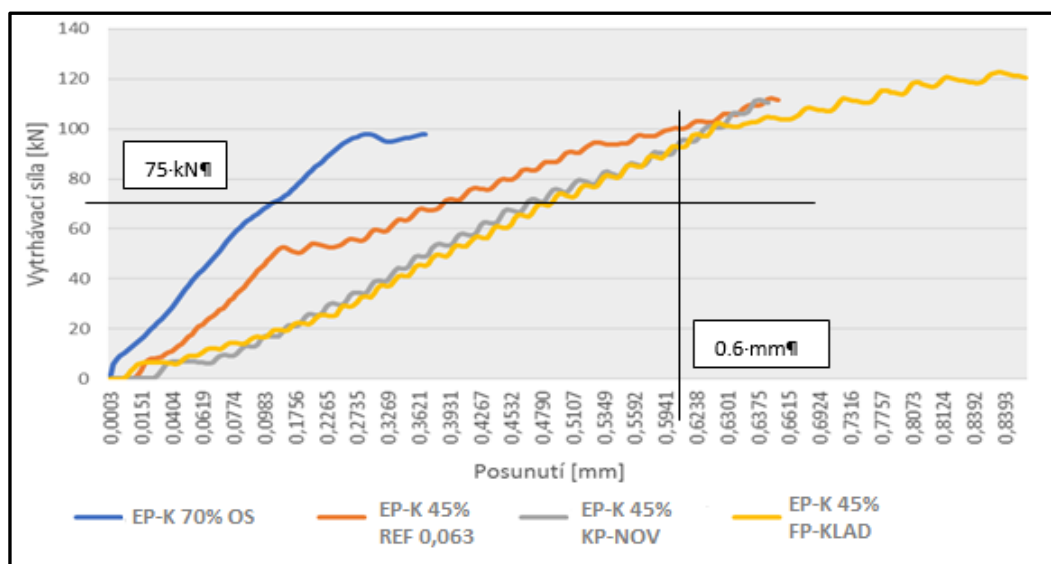
Obr. 108: Minimální povytažení kotvené závitové tyče v kotvicí hmotě EP-K 70% OS (vznik pórů v kotvicí hmotě u paty závitové tyče)



Obr. 109: Nadměrné povytažení kotvené závitové tyče současně s kotvicí hmotou EP-K2



Obr. 110: Detail přetržení kotvené ocelové závitové tyče, která byla kotvena hmotou EP-K 70% OS



Obr. 111: Pracovní diagram znázorňující závislost vytrhávací (kotvicí) síly na posunutí hmoty EP-K

6.3.5. Dynamický modul pružnosti pomocí UZ metody

Stanovení dynamického modulu pružnosti v tahu a tlaku (E_{dyn}) se provádělo u zálivkových a správkových hmot. Martínez-Barrera a Brostow [93] zkoumali vliv velikosti částic mramoru na dynamický modul pružnosti (E_{dyn}) v závislosti na měření rychlosti impulsu ultrazvuku a zjistili, že nejvyšší hodnoty vykazují polymerní kompozity se střední velikostí částic (1,4 mm a hodnoty E_{dyn} jsou v rozmezí od 9,0 do 11,3 GPa). Dále bylo zjištěno [94], že nahrazením plniva na bázi odpadní suroviny obsahující bor způsobuje snížení E_{dyn} ve srovnání s referenční epoxidovou maltou, což může být způsobeno zvýšením pórovitosti celé hmoty. Výsledky dynamického modulu pružnosti v tahu a tlaku stanoveného z UZ měření ($E_{dyn,U}$) společně s příslušnými parametry vzorků potřebnými pro výpočet jsou uvedeny v Tab. 44. Z výsledků je patrné, že typ a množství plniva měl

výrazný vliv na výsledné hodnoty $E_{dyn,U}$. Vzorky obsahující hrubozrnnější plnivo (REF, OS) dosahovaly vyšších hodnot $E_{dyn,U}$, než vzorky s popínkem a jemným plnivem OIDM. Tento fakt byl zapříčiněn především nižší objemovou hmotností vzorků s jemnými plnivem, která ovlivnila rychlost impulzu ultrazvuku a následně i hodnotu $E_{dyn,U}$.

Tab. 44: Výsledky dynamického modulu pružnosti v tahu a tlaku ($E_{dyn,U}$) zjištěného dle UZ metody

| Hmota | Objemová hmotnost (D) [kg/m ³] | Ø doba průchodu (T) [μs] | Ø rychlost šíření impulzu (v_L) [m/s] | Dynamický modul pružnosti ($E_{dyn,U}$) [MPa] |
|----------------|--|--------------------------|---|---|
| EP-S 75% OS | 1812 | 20,5 | 3,420 | 21 190 |
| EP-S 60% KP-TŘ | 1394 | 22,7 | 3,093 | 13 332 |
| EP-S 75% REF | 1852 | 20,0 | 3,489 | 22 545 |
| EP-Z 70% OS | 1820 | 21,2 | 3,354 | 20 474 |
| EP-Z 65% OIDM | 1740 | 22,1 | 3,163 | 17 408 |
| EP-Z 70% REF | 1868 | 20,8 | 3,378 | 21 313 |

6.3.6. Stanovení chemické odolnosti

Vyhodnocení chemické odolnosti vyvíjených sanačních hmot po 30 dnech působení různých agresivních médií probíhalo na základě hodnotícího systému, který je uveden v Tab. 9 u popisu této zkoušky. 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 (CH₃COOH), která představuje jednu z nejvýznamnějších průmyslových organických surovin. Ročně se této kyselině na světě vyrobí přes 5 mil. tun. Používá se v laboratořích i v chemickém průmyslu jako významné rozpouštědlo při přípravě čistých chemických sloučenin a také slouží k výrobě řady dalších organických sloučenin (vinylacetát, acetanhydrid). Dále byl použit 3% roztok kyseliny borité (H₃BO₃), což je moderátor rychlých neutronů v elektrárnách s reaktory typu VVER (používanými v ČR). Kyselina sírová (H₂SO₄) se využívá v širokém spektru oblastí, zejména při výrobě průmyslových hnojiv, chemikálií, plastů, syntetických vláken, při zpracování ropy atd. Roztok KOH se používá jako elektrolyt do různých druhů baterií (galvanických článků) a jeho korozivní vlastnosti jsou někdy používány při čištění a dezinfekci odolných vrstev na materiálech. Peroxid vodíku (H₂O₂) má silné oxidační a redukční vlastnosti a často se používá jako dezinfekce a při bělení nebo odbarvování, přičemž v minulosti se používal jako raketové palivo.

Výsledné posouzení chemické odolnosti, dle příslušného hodnotícího systému, vybraných sanačních hmot je uvedeno v Tab. 45 až Tab. 47. Bylo zjištěno, že vybrané

receptury správkových hmot odolávají silným anorganickým kyselinám a hydroxidům (viz Obr. 113 a Obr. 114). Naopak bylo prokázáno, že tyto hmoty neodolávají kyselině octové (CH_3COOH), a to už při její 10% koncentraci. Po ponoření do destilované vody a nasyceného roztoku kuchyňské soli (NaCl) nenastala ani po 30 dnech žádná změna (*****). Benzin, což je především směs alifatických uhlovodíků získávaných frakční destilací ropy, s přidavkem aromatických uhlovodíků a aditiv, také neměl žádný degradační účinek na zkoušené správkové hmoty. U vybraných zálivkových hmot vykazovala receptura EP-Z 65% OI DM o něco nižší chemickou odolnost než ostatní zkoušené receptury (viz Obr. 115 a Tab. 46). Tento rozdíl může být způsoben rozdílným plnivem – především velikostí a tvaru částic a jeho chemickým složením. Co se týče zkoušených kotvících hmot (Obr. 112 a Tab. 47), tak vzorky, které byly umístěny v 40% roztoku $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, byly zčásti odlepené od sklíčka a byly zabarvené, jinak nebyly nijak narušené. Vzorky uložené v roztoku 40% KOH nevykazovaly žádné barevné změny ani žádné porušení. U vzorků uložených v 3% H_3BO_3 došlo pouze u referenční hmoty k odlepení hmoty od sklíčka, ale jinak nevykazovaly žádné barevné změny ani známky poškození.

U vzorků uložených v roztoku 40% H_2SO_4 došlo k částečnému odlepení od sklíčka a mírnému zesvětlení vzorků, ale i přesto zůstaly vzorky viditelně neporušené.

Organické kyseliny (HCOOH , CH_3COOH a $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$) jsou poměrně slabé kyseliny a jsou tedy mnohem méně disociované. Působí převážně jako rozpouštědla, jejich účinek vede ke tvorbě puchýřů na povrchu a k oddělování segmentů makromolekulárních řetězců [95].

Kalenda a Kalendová [95] dále prokázali, že zvýšení chemické odolnosti může být docíleno zavedením plniv, které jsou schopné reagovat s difundující kyselinou. Inertní plniva nebo pigmenty (TiO_2 , grafit, saze, oxidy chromu), přítomné v EP matrici, zvyšují difuzi agresivního (korozivního) média, jelikož penetrace na rozhraní pigment/pojivo probíhá podél částic pigmentu.

Povrch některých vzorků po chemickém namáhání byl dále zkoumán pomocí optické mikroskopie za účelem pozorování vlivu agresivního média na porušení hmoty.

Tab. 45: Vyhodnocení zrychlené zkoušky chemické odolnosti vybraných správkových hmot (EP-S) po 30 dnech působení kapalných agresivních roztoků

| Agresivní medium | koncentrace | EP-S 75% REF | EP-S 75% OS | EP-S 60% KP-TŘ |
|--------------------------|-------------|--------------|-------------|----------------|
| H_2SO_4 | 40 % | ***** | ***** | ***** |
| NaOH | 40 % | ***** | ***** | ***** |
| CH_3COOH | 10 % | * | * | * |
| Benzin | - | ***** | ***** | ***** |
| NaCl | 10 % | ***** | ***** | ***** |

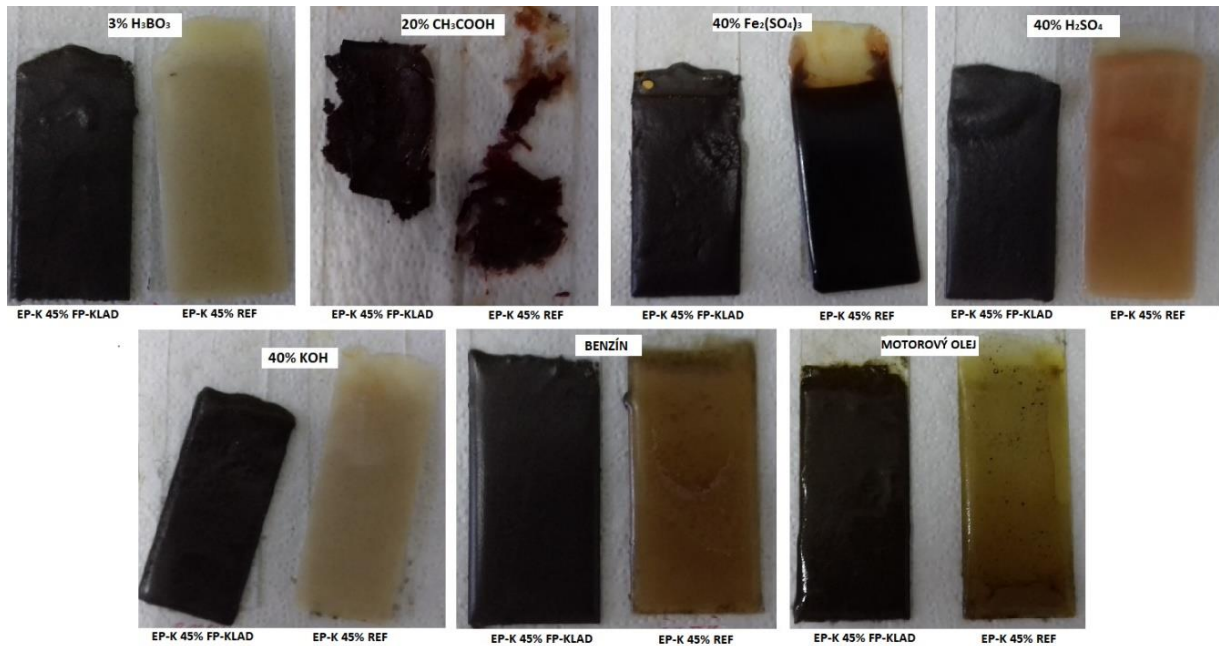
| | | | | |
|-------------------------------|------|-------|-------|-------|
| H ₂ O ₂ | 30 % | ***** | ***** | ** |
| Destilovaná voda | - | ***** | ***** | ***** |

Tab. 46: Vyhodnocení zrychlené zkoušky chemické odolnosti vybraných závlivkových hmot (EP-Z) po 30 dnech působení kapalných agresivních roztoků

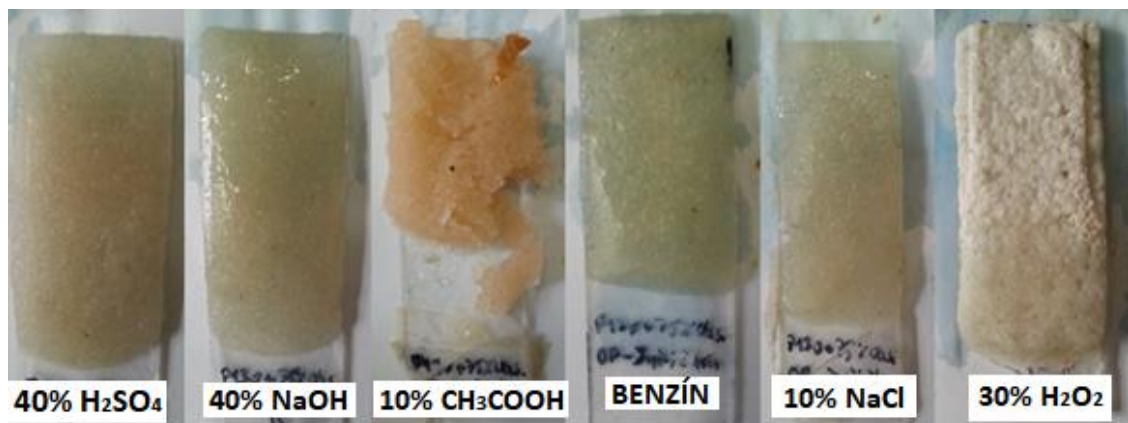
| Agresivní medium | koncentrace | EP-Z 70% REF | EP-Z 70% OS | EP-Z 65% OIDM |
|--------------------------------|-------------|--------------|-------------|---------------|
| H ₂ SO ₄ | 40 % | ***** | ***** | ***** |
| NaOH | 40 % | ***** | ***** | ***** |
| CH ₃ COOH | 10 % | *** | *** | ** |
| Benzin | - | ***** | ***** | ***** |
| NaCl | 10 % | ***** | ***** | ***** |
| H ₂ O ₂ | 30 % | ***** | ***** | ***** |
| Destilovaná voda | - | ***** | ***** | ***** |

Tab. 47: Vyhodnocení zrychlené zkoušky chemické odolnosti vybraných kotvících hmot (EP-K) po 30 dnech působení kapalných agresivních roztoků

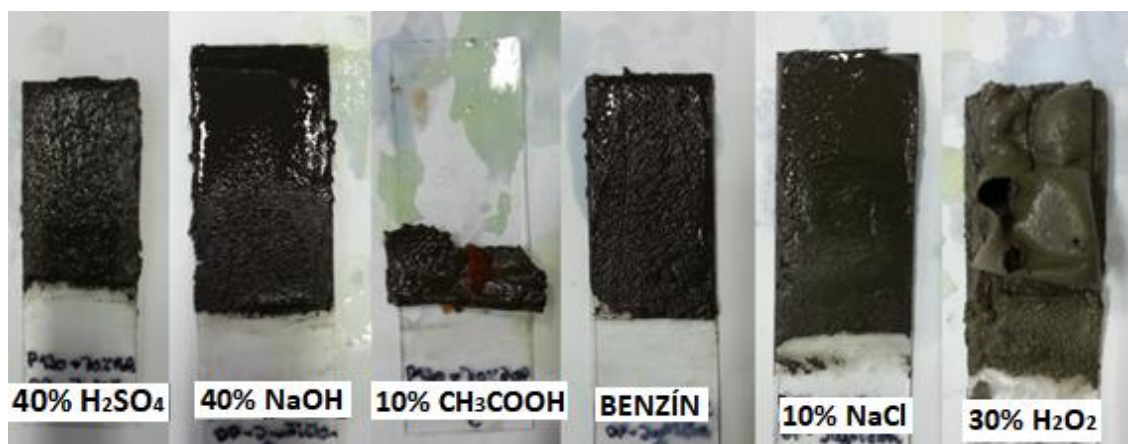
| Agresivní medium | koncentrace | EP-K 70% OS | EP-K 45% REF 0,063 | EP-K 45% FP-KLAD |
|--------------------------------|-------------|-------------|--------------------|------------------|
| H ₃ BO ₃ | 3 % | ***** | ***** | ***** |
| KOH | 40 % | **** | **** | **** |
| CH ₃ COOH | 20 % | * | * | * |
| Benzin | - | ***** | ***** | ***** |
| NaCl | 10 % | ***** | ***** | ***** |
| Motorový olej | - | ***** | ***** | ***** |
| Destilovaná voda | - | ***** | ***** | ***** |



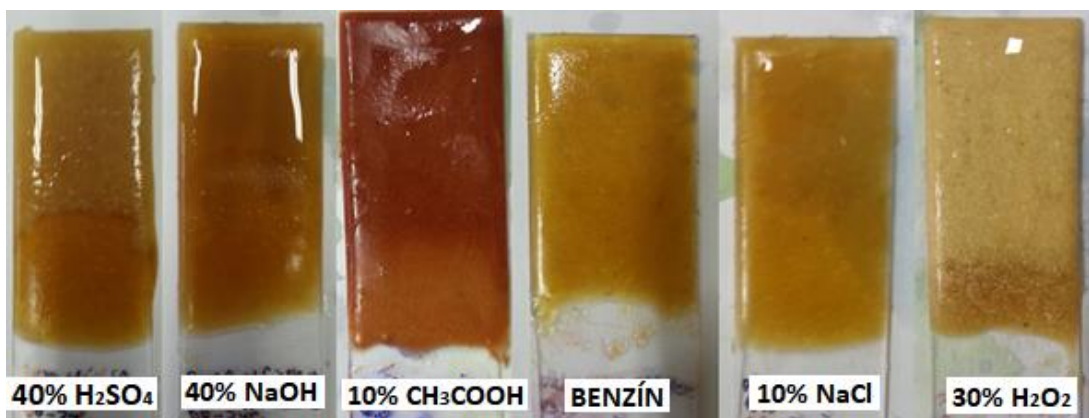
Obr. 112: Kotvící hmoty EP-K 45% FP-KLAD (vlevo) a EP-K 45% REF 0,063 (vpravo) po 30 denním uložení v kapalných agresivních médiích



Obr. 113: Hmota EP-S 75% OS po 30 denním působení agresivních kapalných roztoků



Obr. 114: Hmota EP-S 60% KP-TŘ po 30 denním působení agresivních kapalných roztoků

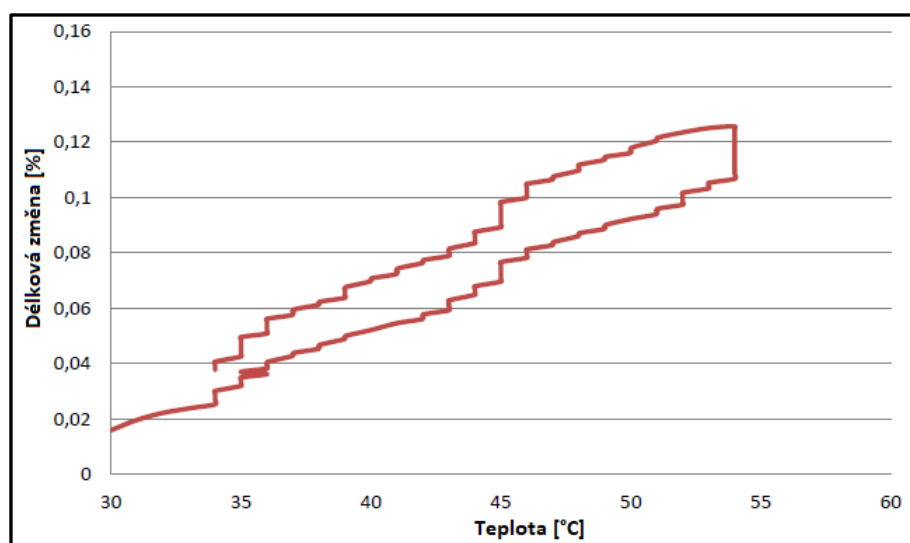


Obr. 115: Hmoty EP-Z 65% OIDM po 30 denním působení agresivních kapalných roztoků

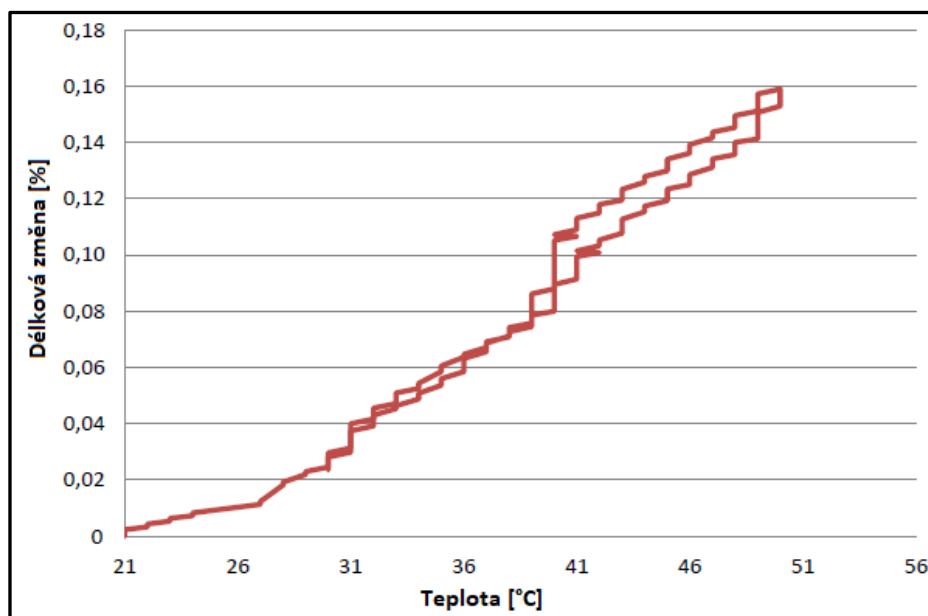
6.3.7. Koeficient lineární teplotní roztažnosti

Koeficient teplotní délkové roztažnosti (α) byl stanovován u vybraných zálivkových a správkových hmot na vzorcích o rozměrech 20×20×100 mm, přičemž měření probíhalo v rozmezí teplot 20–60 °C po dobu přibližně 18 hodin. Koeficient teplotní délkové roztažnosti (α) je velice důležitým parametrem polymerů využívaných především v inženýrských aplikacích. Nízká hodnota α je velice často žádoucí pro dosažení rozměrové stability a může být dosažena přidávkem tuhého a jemného grafitového plniva. V provedené studii [96] bylo zjištěno, že hodnota α čisté vytvrzené epoxidové pryskyřice (EP) je $60 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a přidáním 2,5 % (hm.) grafitových destiček se sníží na $36\text{--}41 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, což je přibližně o 30–40 % nižší hodnota. Za hlavní příčinu snížení hodnoty α je v tomto případě považovaná jemná disperze a tuhost grafitových destiček v EP matrici, která může inhibovat expanzi polymerních řetězců v průběhu zvyšování teploty.

Dilatometrické křivky vybraných hmot jsou uvedeny na Obr. 116 a Obr. 117. Výsledky stanovení koeficientu teplotní délkové roztažnosti (α) uvádí Tab. 48.



Obr. 116: Dilatometrická křivka správkové hmoty EP-S 60% KP-TŘ



Obr. 117: Dilatometrická křivka správkové hmoty EP-S 75% OS

Tab. 48: Výsledné hodnoty koeficientu teplotní délkové roztažnosti (α) vyvíjených správkových a zálivkových hmot

| Hmota | ΔT [K] | L_0 [mm] | α [K^{-1}] |
|----------------|----------------|------------|-----------------------|
| EP-S 75% REF | 30 | 99,1965 | $40,1 \cdot 10^{-6}$ |
| EP-S 75% OS | 29 | 99,0962 | $55,3 \cdot 10^{-6}$ |
| EP-S 60% KP-TŘ | 24 | 99,2088 | $52,8 \cdot 10^{-6}$ |
| EP-Z 70% REF | 27 | 99,1794 | $55,5 \cdot 10^{-6}$ |
| EP-Z 70% OS | 26 | 99,1856 | $55,3 \cdot 10^{-6}$ |
| EP-Z 65% OIDM | 33 | 99,1565 | $40,9 \cdot 10^{-6}$ |

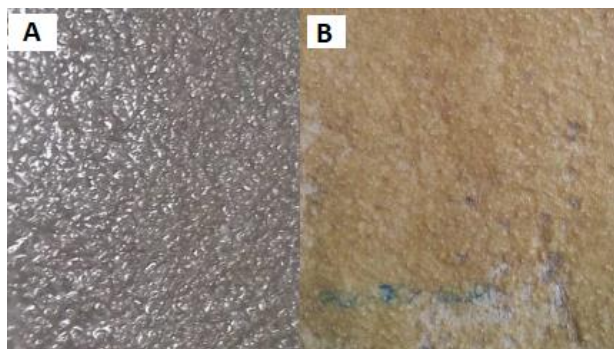
Zjištěné hodnoty koeficientu teplotní délkové roztažnosti (α) potvrdily obecně známé poznatky, že materiály na polymerní bázi vykazují vyšší hodnoty α v porovnání se silikátovými materiály. V případě správkových hmot pro sanaci betonových konstrukcí se požaduje stejný nebo podobný koeficient teplotní délkové roztažnosti (α), jaký vykazuje podkladní beton [10]. Pro běžný beton se udává $\alpha = 14 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ [97]. Vyvíjené hmoty tento požadavek úplně nesplňují, vzhledem k dosaženým hodnotám α v rozmezí $40 \cdot 10^{-6} - 58 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ (Tab. 48). 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 prokázané vysoké soudržnosti sanačních hmot s podkladem a nižšímu modulu pružnosti lze předpokládat, že by vyvinuté sanační hmoty měly být schopné účinně odolávat i střídavým změnám teplot za přítomnosti vlhkosti, tento předpoklad je však potřeba důkladně ověřit.

6.3.8. Stanovení soudržnosti po cyklické změně teplot

Barevná změna povrchu vybraných vzorků sanačních hmot v důsledku zmrazovacích cyklů byla patrná pouze u hmot EP-S 60% KP-TŘ (Obr. 118) a EP-S 75% REF (Obr. 119). U hmoty obsahující jako plnivo popílek (EP-S 60% KP-TŘ) se po teplotním zatěžování objevily trhlinky, nicméně jednalo se pouze o estetickou vadu, poněvadž tyto trhlinky neprocházely do samotné hmoty. Jednalo se pouze o narušení vzhledu povrchu vlivem cyklických změn teplot. Výsledky zkoušky soudržnosti zkoušených správkových a zálivkových hmot jsou uvedeny v Tab. 49, přičemž je vidět, že u všech vzorků došlo k normálnímu porušení v betonu (A), což dokazuje i Obr. 120. U všech zkoušených hmot byla zaznamenána soudržnost vyšší než 1 MPa. Bylo prokázáno, že nahrazením primárního plniva, křemičitého písku, vhodnými druhotnými surovinami se nezhorší soudržnost hmot s podkladem po cyklickém mrazovém namáhání (T50). Dále lze usuzovat, že z pohledu dlouhodobé trvanlivosti by měly vyvinuté sanační hmoty odolávat také silným povětrnostním vlivům, jako je náhlá změna teploty a záporné teploty.



Obr. 118: Povrch vzorku EP-S 60% KP-TŘ po 50 zmrazovacích cyklech (T50)



Obr. 119: Povrch vzorku EP-S 75% REF před zmrazovacími cykly (A) a po zmrazovacích cyklech (B)



Obr. 120: Vzorky vybraných správkových hmot namáhány zmrazovacími cykly (T50) po zkoušce soudržnosti

Tab. 49: Výsledky zkoušky soudržnosti vybraných správkových (EP-S) a zálivkových (EP-Z) hmot po zmrazovacích cyklech

| Hmota | Soudržnost (f_h) [MPa] | Místo porušení |
|----------------|----------------------------|----------------|
| EP-S 75% REF | 1,12 | A |
| EP-S 75% OS | 1,48 | A |
| EP-S 60% KP-TŘ | 1,28 | A |
| EP-Z 70% REF | 1,08 | A |
| EP-Z 70% OS | 1,76 | A |
| EP-Z 65% OIDM | 1,60 | A |

Hodnoty soudržnosti vybraných sanačních hmot po zmrazovacích cyklech jsou nižší než u hmot, které nebyly namáhány cyklickými změnami teploty (viz Tab. 30, Tab. 31), a to pravděpodobně v důsledku nižší mrazuvzdornosti betonových dlažeb, na kterých byly vyvinuté hmoty nanášeny.

6.3.9. Vyhodnocení prověření ekologické vhodnosti vyvinuté hmoty EKO-X

V rámci prověřování ekologické vhodnosti vyvinuté správkové hmoty EKO-X s obsahem NO byla provedena zkouška vyluhovatelnosti, stanovení koncentrace škodlivin v sušině a ekotoxikologické testy. Všechny zkoušky byly provedeny na vzorcích ve stáří 120 dní. Analýzy byly provedeny ve zkušební akreditované laboratoři ALS Czech Republic, s.r.o. Tato stanovení vychází z příslušné legislativy, konkrétně z Vyhlášky č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady.

6.3.9.1. Zkouška vyluhovatelnosti

V Tab. 50 jsou uvedeny výsledky zkoušky vyluhovatelnosti vzorku s 40% obsahem NO (neutralizačního kalu). Vyluhovatelnost NO se po jeho zakomponování do epoxidové matrice výrazně snížila oproti vyluhovatelnosti samotného NO – viz Tab. 50. Zvýšené množství rozpuštěného organického uhlíku (DOC) ve hmotě nepochází z NO, ale ze samotné epoxidové matrice, která je na organické bázi, a proto je zde taky zvýšené množství DOC. Vyluhovatelnost chloridů se v porovnání se samotným NO výrazně snížila. U hmoty EKO-X také došlo k výraznému poklesu rozpuštěných látek (RL), přičemž tato hodnota byla nižší o více než 40 % z RL vyluhovaných z NO. Z této skutečnosti lze usuzovat, že některé polutanty nacházející se v NO byly úspěšně inkorporovány do epoxidové matrice během polymerizace, a to jak fyzikálně, tak pravděpodobně i chemicky. Zajímavé je mírné zvýšení vyluhovatelnosti rtuti (Hg) a mědi (Cu), protože původní NO obsahoval těchto těžkých kovů méně než samotná hmota EKO-X. Červeně

jsou vyznačeny hodnoty, které překračují limit pro zatřídění vyvinuté hmoty EKO-X do výluhové třídy 1. Jedná se o parametry DOC, chloridy a rozpuštěné látky (RL), přičemž hmota by vyhověla třídě vyluhovatelnosti IIa u všech parametrů kromě DOC.

Tab. 50: Výsledky zkoušky vyluhovatelnosti hmoty EKO-X

| Parametr | LOQ ¹ | Výsledek | | Limit – výluh. tř. I (max.) |
|---|------------------|----------------|-------------|-----------------------------|
| | | EKO-X hmota | NO (NK) | |
| Hodnota pH | 1,00 | 10,0 | 11,6 | -- |
| DOC ² [mg/l] | 0,50 | 171 | 19,7 | 50 |
| Fenoly těkající [mg/l] | 0,005 | <0,005 | <0,005 | 0,1 |
| Anorganické parametry [mg/l] | | | | |
| Chloridy | 1,00 | 435 | 2950 | 80 |
| Fluoridy | 0,200 | <0,200 | <0,200 | 1 |
| sírany (SO ₄ ²⁻) | 5,00 | <5,00 | 5,82 | 100 |
| RL ³ sušené (105 °C) | 10 | 1610 | 6340 | 400 |
| Celkové kovy / hlavní kationty [mg/l] | | | | |
| Hg | 0,00100 | 0,00167 | <0,00100 | 0,001 |
| Ba | 0,00300 | 0,0468 | 0,0265 | 2 |
| Cr | 0,0010 | 0,0035 | 0,0089 | 0,005 |
| Cu | 0,0100 | 0,896 | 0,0710 | 0,2 |
| Ni | 0,0020 | <0,0020 | <0,0020 | 0,04 |
| Zn | 0,0100 | <0,0100 | <0,0100 | 0,4 |
| As | 0,0010 | <0,0010 | 0,0014 | 0,05 |
| Cd | 0,00050 | <0,00050 | <0,00050 | 0,004 |
| Mo | 0,0010 | 0,0055 | 0,0190 | 0,05 |
| Pb | 0,0010 | <0,0010 | <0,0010 | 0,05 |
| Sb | 0,0010 | <0,0010 | <0,0010 | 0,006 |
| Se | 0,0050 | <0,0050 | <0,0050 | 0,01 |

Vysvětlivky: ¹mez stanovitelnosti, ²rozpuštěný organický uhlík, ³rozpuštěné látky

6.3.9.2. Stanovení koncentrace škodlivin v sušině

V Tab. 51 jsou uvedeny výsledky stanovení koncentrace škodlivin v sušině vyvinuté ekologické správkové hmoty EKO-X s 40% obsahem neutralizačního kalu (NK). Tyto výsledky jsou zde taky porovnány s koncentrací škodlivin v sušině samotného nebezpečného odpadu (NK). Porovnáním výsledků lze pozorovat, že u hmoty EKO-X došlo ke zvýšení parametru EOX (extrahovatelné organické halogeny), tzn. součet halogenů (chlor, brom, jod), obsažených v organických sloučeninách a extrahovatelných za definovaných podmínek. Tyto látky se běžně nacházejí např. v rozpouštědlech používaných při EP. U ostatních parametrů (Pb, Cr, Ni) došlo ke jejich snížení poměrově k danému množství NO použitého jako plniva do správkové hmoty EKO-X – přibližně ke 60% úbytku.

Na základě posouzení výsledků stanovení koncentrace škodlivin v sušině lze zhodnotit, že byl překročen limit pro využívání upravených odpadů na povrchu terénu dle Vyhl. 294/2005 Sb. Při zamíchání NK do epoxidové matrice byl v podstatě tento NO solidifikován, a proto lze pracovat s Tab. 10.1, která tyto limity stanovuje. Z výsledků zkoušky vyluhovatelnosti však vyplynulo, že tyto polutanty jsou pevně vázány uvnitř polymerní matrice a při běžných povětrnostních podmínkách se nepředpokládá jejich uvolňování do okolního prostředí. Červeně jsou v Tab. 51 vyznačeny hodnoty parametrů, které překročily limitní koncentrace škodlivin v sušině odpadů využívaných na povrchu terénu.

Tab. 51: Výsledky koncentrace škodlivin v sušině

| Sledovaný Parametr | LOQ ² | NK ŽDB | Hmota EKO-X | Limit dle Vyhl. 294/2005 Sb. Tab. 10.1. |
|--|------------------|----------|-------------|---|
| | | Výsledek | Výsledek | |
| Sušina (105 °C) [%] | 0,10 | 34,7 | 99,8 | -- |
| EOX ¹ [mg/kg suš.] | 1,0 | <1,0 | 16,4 | 1 |
| <i>Extrahovatelné kovy / hlavní kationty</i> | | | | |
| As [mg/kg suš.] | 1,00 | <5,00 | 2,26 | 10 |
| Cd [mg/kg suš.] | 0,40 | <2,00 | <0,40 | 1 |
| Cr [mg/kg suš.] | 1,00 | 171 | 70,3 | 200 |
| Hg [mg/kg suš.] | 0,20 | <1,00 | <0,20 | 0,8 |
| Ni [mg/kg suš.] | 1,0 | 112 | 43,7 | 80 |
| Pb [mg/kg suš.] | 1,0 | 2110 | 766 | 100 |
| V [mg/kg suš.] | 1,00 | 8,36 | 4,25 | 180 |
| <i>Organické sloučeniny</i> | | | | |
| Suma BTEX ³ [mg/kg suš.] | 0,090 | <0,165 | 0,394 | 0,4 |
| Suma 12 PAU ⁴ [mg/kg suš.] | 0,120 | <0,120 | 0,296 | 6 |
| Suma 7 PCB ⁵ [mg/kg suš.] | 0,140 | <0,140 | <0,140 | 0,2 |
| C10–C40 ⁶ [mg/kg suš.] | 20 | <20 | 150 | 300 |

Vysvětlivky: ¹extrahovatelné organické halogeny; ²Mez stanovitelnosti; ³benzen, toluen, etylbenzen, xyleny; ⁴polycyklické aromatické uhlovodíky; ⁵polychlorované bifenyly, ⁶ropné uhlovodíky.

6.3.9.3. Ekotoxicita

Výsledky ekotoxikologických testů prováděných na 4 organizmech z vodního výluhu vyvinuté správkové hmoty EKO-X s 40% množstvím upraveného nebezpečného odpadu (NO), neutralizačního kalu (NK) jsou uvedeny v Tab. 52. Z výsledků je patrné, že zkoušená hmota nevyhověla požadavkům uvedeným ve Vyhlášce 194/2005 Sb., Tabulka 10.2. Stanovené limitní hodnoty inhibice, imobilizace a mortality nebyly splněny ani u jednoho

zkoušeného organismu – pouze u hořčice seté došlo ke 85% inhibici růstu, u ostatních organismů byl výsledek 100 %. Zkoušená hmota nevyhověla ekotoxikologickým testům s vysokou pravděpodobností z důvodu vysokého obsahu epoxidové pryskyřice (EP) jako matrice, a ne v důsledku obsahu uvedeného plniva. EP lze obecně klasifikovat dle CLP jako „H411 Toxický pro vodní organismy, s dlouhodobými účinky.“ Toto tvrzení lze potvrdit i porovnáním s literaturou [121], kde byl daný NO použitý do silikátové matrice ve stejném množství a výsledný produkt – solidifikát těmto ekotoxikologickým testům vyhověl. Posouzením těchto výsledků je tedy potřeba zamyslet se nad vlivem pojiva použitého pro inkorporaci NK na výsledky zkoušky ekotoxicity. Ekotoxikologické testy se provádí s neředěným vodným výluhem zkoušeného materiálu, který musí být upraven na zrnitost menší než 10 mm, z čeho vyplývá, že akutní toxicita hmoty EKO-X se zvyšuje se zvýšenou pravděpodobností styku této hmoty s kapalnou fází, při jejím mechanickém poškození. Avšak EP se běžně používají při různých aplikacích od nátěrů po podlahy, přičemž ve většině případech se u těchto hmot žádná zkouška akutní toxicity neprovádí a z pohledu legislativy ji není potřeba provádět.

Tab. 52: Výsledky ekotoxikologických testů prováděných na správkové hmotě EKO-X 40%NK

| Parametr | Výsledek [%] | Limit (max.) dle Vyhl. 294/2005 Sb. – Tab. 10.2 [%] | Vyhodnocení |
|---|--------------|---|-------------|
| Inhibice růstu sladkovodních řas <i>Scenedesmus (Desmodesmus) subspicatus</i> | 100 | 30 | Nevyhovuje |
| Imobilizace perlooček <i>Daphnia magna</i> | 100 | 30 | Nevyhovuje |
| Mortalita živorodky duhové (<i>Poecilia reticulata</i>) | 100 | 0 | Nevyhovuje |
| Inhibice růstu Hořčice setá (<i>Sinapsis alba</i>) | 85,1 | 30 | Nevyhovuje |

6.3.10. Poloprovozní ověření

Po experimentálním ověření všech vybraných hmot následovalo jejich poloprovozní ověření. V rámci tohoto ověření byly testovány vyvinuté správkové hmoty EP-S 60% KP-TŘ, EP-S 75% OS a zálivková hmota s označením EP-Z 65% OIDM.

6.3.10.1. Správkové hmoty

V rámci poloprovozního ověření vyvinutých správkových hmot se reprofilyvaly odštípnuté rohy vibrolisovaného silničního obrubníku o rozměrech 500×150×250 mm (Obr. 121). Před samotnou sanací byl betonový povrch zdrsňen kartáčováním pro zabezpečení požadované přídržnosti zkoušené polymerní správkové hmoty k podkladu.

Následně se aplikovalo jednoduché bednění (Obr. 122) pro dosažení požadovaného tvaru a za účelem nevytékání hmoty mimo vymezený prostor. Hmoty byla nalita do reprofilované oblasti, přičemž nijak nebyla hutněna. Polymerizace (vytvrzení) probíhala za laboratorních podmínek (Obr. 123 a Obr. 124). Po 28 dnech byl reprofilovaný obrubník vystaven vnějším povětrnostním podmínkám po dobu více než jednoho roku (400 dní). Graf srovnávací průměrné venkovní teploty v tomto období je zobrazen na Obr. 126. Na Obr. 125 lze pozorovat vizuální změnu hmoty EP-S 75% OS po tomto období, kdy byl zaznamenán rozsah teplot v rozmezí -18 až +30 °C. Následně se oba sanované rohy vyřízly pomocí úhlové brusky za účelem sledování mikrostruktury a dlouhodobé trvanlivosti vyvinutých správkových hmot.



Obr. 121: Uražený roh betonového silničního obrubníku



Obr. 122: Bednění vytvořené za účelem reprofilace betonového obrubníku



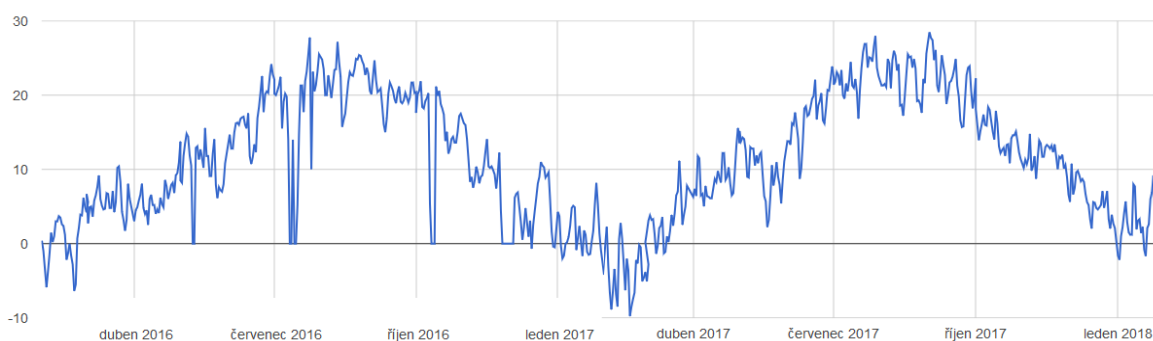
Obr. 123: Polymerizace hmoty EP-S 75% OS po aplikaci, při laboratorních podmínkách



Obr. 124: Polymerizace hmoty EP-S 60% KP-TŘ po aplikaci, při laboratorních podmínkách



Obr. 125: Reprofilovaný obrubník po 400 dnech působení povětrnostních podmínek (období 7/2016–9/2017)



Obr. 126: Průběh průměrné denní venkovní teploty ve °C v Brně [98]

6.3.10.2. Zálivková hmota

V rámci poloprovozního ověření vybrané zálivkové hmoty EP-Z 65% OIDM se provádělo zalití porušených částí vibrolisované dlažby vzniklých po zkoušce soudržnosti (Obr. 127). Následně byla tato dlažba vystavena vlivům povětrnostních podmínek ve stejnou dobu, jako reprofilovaný obrubník (viz Obr. 126). Následně po tomto období byla provedena odtrhová zkouška soudržnosti. Průměrná hodnota soudržnosti byla 2,5 MPa, přičemž došlo k normálnímu porušení v betonu (Obr. 128). Z výsledků zkoušky soudržnosti lze usuzovat, že vyvinutá zálivková hmota EP-Z 65% OIDM vykazuje výbornou dlouhodobou trvanlivost, přičemž nedošlo ke snížení její přídržnosti k betonovému podkladu ani po 400denní venkovní expozici.



Obr. 127: Poloprovozní ověření vyvinuté zálivkové hmoty EP-Z 65% OIDM (zalité poškozené místa betonu)



Obr. 128: Detail porušení v podkladním betonu po zkoušce soudržnosti (po 400 dnech)

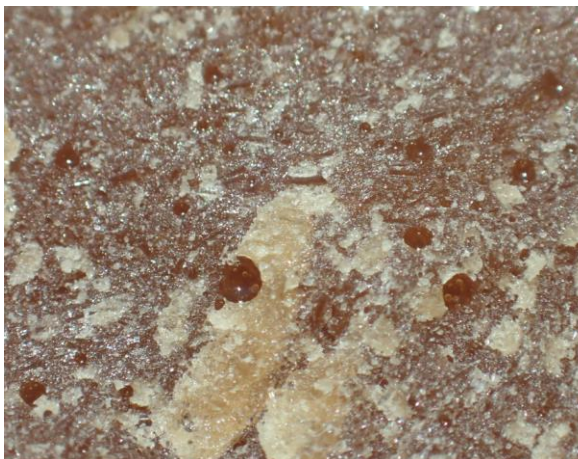
6.3.11. Závěr Etapy III

V rámci třetí etapy bylo realizováno pokročilé laboratorní testování receptur vybraných ve druhé etapě v rámci vyhodnocení optimalizačního výpočtu. U všech vyvinutých sanačních hmot bylo prováděno stanovení tahových vlastností (poměrné prodloužení při přetržení, maximální pevnost v tahu), smrštění, chemická odolnost a také teplotní odolnost stanovením teploty skelného přechodu (T_g). Nejlepší tahové vlastnosti vykazovala kotvící hmota obsahující jako plnivo 45% hm. podíl popílku KP-NOV, přičemž bylo dále prokázáno, že sanační hmoty s hrubozrnějším plnivem vykazují horší tahové vlastnosti. Nejnižší teplota skelného přechodu (T_g) byla zaznamenána u zálivkových hmot (EP-Z), a dále bylo zjištěno, že typ a množství plniva má zanedbatelný vliv na tepelnou odolnost – nejdůležitější složkou je druh použitého polymerního pojiva. Co se týče stanovení smrštění pomocí tensografu, tak nejnižší hodnota byla zaznamenána právě u zálivkových hodnot, a to pouze 0,32 ‰. Nejhorší chemickou odolnost vykazovaly vyvinuté sanační hmoty v kyselině octové (CH_3COOH), kdy došlo u většiny receptur k úplné degradaci hmoty, pravděpodobně kvůli penetraci této octové kyseliny do struktury EP a jejímu následnému rozložení. Vůči koncentrovaným anorganickým kyselinám, hydroxidům, benzínu a dalším chemicky agresivním látkám vykazovaly zkoušené hmoty většinou výbornou odolnost. Z toho vyplývá, že hmoty bude možné použít také do provozů, kde se požaduje zvýšená chemická odolnost použitých materiálů vůči většině kapalných agresivních roztoků. Nejvyšší dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku ($E_{\text{dyn,U}}$) byl zaznamenán u referenčních hmot, a to přibližně 22 GPa. Tato hodnota je nižší než u běžného betonu třídy C25/30 na bázi portlandského cementu. V rámci této byly tedy úspěšně vyvinuty správkové a zálivkové hmoty s vysokým obsahem druhotných surovin vykazující ideální poměr mezi pevností v tlaku a modulem pružnosti (za účelem přenosu zatížení). Všechny zkoušené kotvící hmoty splnily požadavek daný příslušnou normou ČSN EN 1504-6, kde se požaduje minimální kotvící síla 75 kN s maximálním posunutím 0,6 mm. Stanovením vysokých hodnot soudržnosti a porušením v podkladním betonu po zkoušce mrazuvzdornosti byla prokázána dlouhodobá trvanlivost vyvinutých správkových hmot vůči působení extrémních povětrnostních vlivů. U vyvinuté ekologické správkové hmoty EKO-X s 40% obsahem předupraveného NO (NK) bylo na základě výsledků zkoušky vyluhovatelnosti prokázáno, že použitím tohoto ekologického plniva do epoxidové matrice se dospělo nejen k vynikajícím fyzikálně-mechanickým výsledkům. Bylo potvrzeno, že došlo k výraznému snížení polutantů, především v podobě sledovaného parametru – rozpuštěných látek (RL), čímž bylo prokázáno, že došlo také k úspěšné solidifikaci předmětného nebezpečného odpadu (NO) pomocí epoxidové pryskyřice (EP) jako solidifikačního činidla. Tato etapa byla velice přínosná, protože zde byly zjištěny další velice důležité fyzikálně-mechanické a ostatní parametry, které jsou nezbytné pro navrhování

sanačních hmot do zamýšlených prostředí se zvýšenými požadavky především na odolnost a dlouhodobou trvanlivost.

6.4. ETAPA 4 – Sledování vlivu mikrostruktury vyvinutých sanačních hmot na jejich fyzikálně-mechanické parametry a dlouhodobou trvanlivost

V rámci čtvrté 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. V rámci tohoto sledování se prozkoumalo především rozložení částic použitých plniv, celková homogenita vyvinutých materiálů, kontaktní zóna mezi plnivem a pojivem, styčná plocha mezi sanační hmotou a betonovým povrchem a v neposlední řadě také vliv povětrnostních podmínek na strukturu hmoty a některé fyzikálně-mechanické parametry, jako je např. soudržnost s podkladem. Dále zde byl posuzován vliv chemického namáhání na degradaci povrchu zkoušených hmot, a to především pomocí optického mikroskopu. Sledování mikrostruktury sanačních hmot je velice důležité z hlediska pochopení jejich funkce v rámci sanované konstrukce. Povrchy některých vzorků, které byly následně pozorovány na optickém mikroskopu při vyšším rozlišení, lze vidět i na *Obr. 129 – Obr. 132*, přičemž tyto snímky byly pořízeny digitálním fotoaparátem, který se řadí mezi jeden z nejpokročilejších v současnosti. Jedná se o snímky povrchu hmot, které byly podrobeny zkoušce pevnosti v tahu za ohybu. Jak je obecně známo, tak k porušení vzorku dochází v nejslabších místech; v tomto případě lze pozorovat, že nejpórovitější struktura s většími póry představuje nejslabší místo pod největším zatěžovacím ohybovým momentem. Distribuci a velikost jednotlivých pórů lze pozorovat nejlépe na *Obr. 129 a Obr. 131*. Je zde vidět, že menší póry o velikosti 100–400 μm jsou rovnoměrně rozloženy ve hmotě, avšak větší póry o velikosti 500–1000 μm jsou rozloženy nerovnoměrně. Na *Obr. 130* lze mimo jiné pozorovat jehličkovitý tvar částic plniva OI DM, který nebylo možné identifikovat volným okem. Dále lze vidět, že lomová plocha není hladká, jako tomu bývá u neplněných EP, ale je značně profilovaná v závislosti na typu použitého plniva. Na základě posouzení lomových ploch lze přesněji předvídat místo předpokládaného porušení vybraných sanačních hmot, pokud je blíže známá pórovitost.



Obr. 129: Detail povrchu vyvinuté zálivkové hmoty EP-Z 65% OIDM – průřezová plocha vzorku po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu (viditelné vzduchové póry a rovnoměrné rozložení částic plniva)



Obr. 130: Detail povrchu vyvinuté zálivkové hmoty EP-Z 65% OIDM – průřezová plocha vzorku po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu (viditelné vzduchové póry a rovnoměrné rozložení částic plniva)



Obr. 131: Detail povrchu vyvinuté správkové hmoty EP-S 60% KP-TŘ – průřezová plocha vzorku po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu (viditelné vzduchové póry (porušení hmoty nastalo pravděpodobně v místě největšího póru) a rovnoměrné rozložení částic plniva)



Obr. 132: Detail povrchu vyvinuté správkové hmoty EP-S 60% KP-TŘ – průřezová plocha vzorku po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu (viditelné vzduchové póry a rovnoměrné rozložení částic plniva)

6.4.1. Sledování mikrostruktury pomocí optického mikroskopu

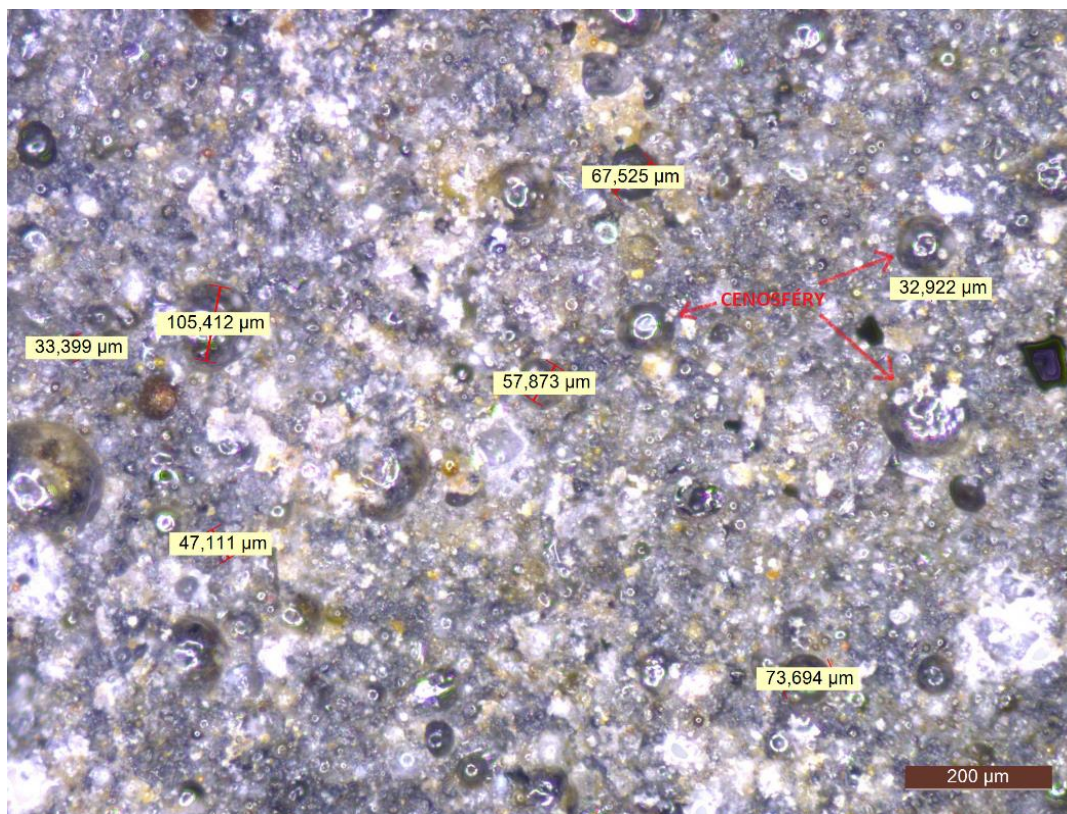
6.4.1.1. Hmoty nevystavené působení agresivního namáhání

V rámci sledování mikrostruktury byly nejprve pozorovány vyvinuté a následně vybrané sanační hmoty, které nebyly vystavené povětrnostním podmínkám, ani chemickému

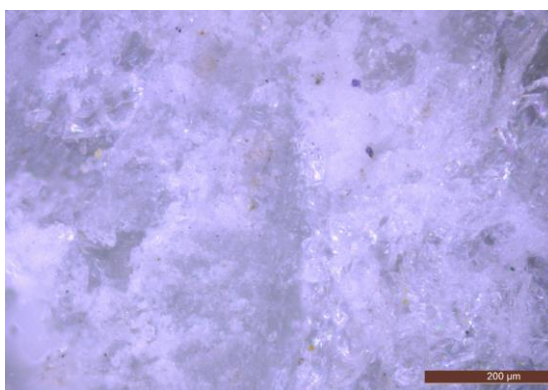
namáhání. Cílem pozorování bylo zjistit především rozložení částic plniva ve hmotě, kontaktní zónu mezi plnivem a pojivem a taky celkovou homogenitu materiálu.

- **Mikrostruktura vybraných sanačních a zálivkových hmot**

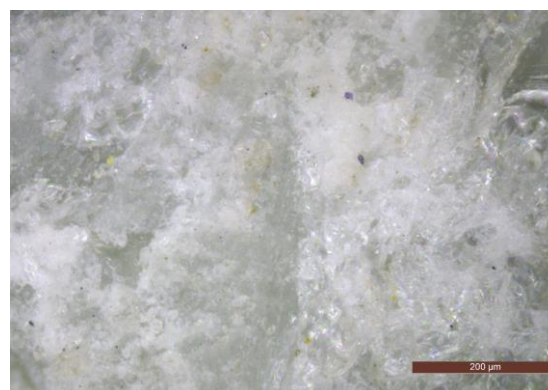
Na Obr. 133–139 jsou snímky z optického mikroskopu vzorků vybraných správkových a zálivkových hmot s vysokým obsahem druhotných surovin. Pozorované byly lomové plochy vzorků po stanovení pevnosti v tahu za ohybu (trámečků), přičemž jednotlivé vzorky se lišily použitými plnivými a jejich rozdílným množstvím.



Obr. 133: Snímek povrchu průřezové plochy vzorku EP-S 60% KP-TŘ při rozlišení 200x



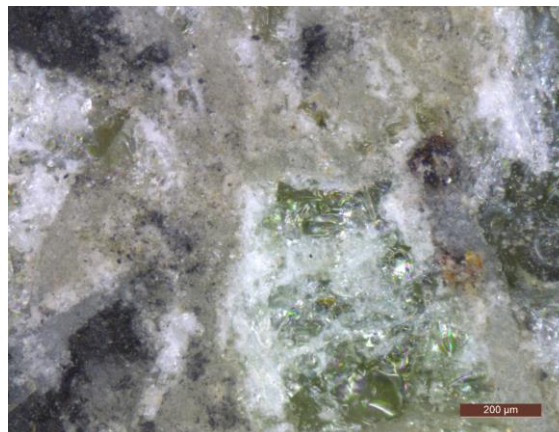
Obr. 134: Mikrostruktura referenční správkové hmoty s 75% obsahem křemičitého písku Dorsilit (EP-S 75% REF) – zv. 100x



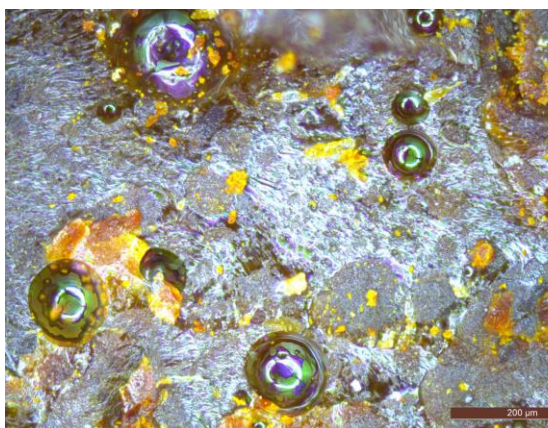
Obr. 135: Mikrostruktura správkové hmoty s 75% obsahem odpadního autoskla (EP-S 75% AS) – zv. 100x



Obr. 136: Mikrostruktura správkové hmoty s 75% obsahem odpadního slévárenského písku (EP-S 75% SP) – zv. 100x



Obr. 137: Mikrostruktura správkové hmoty s 75% obsahem odpadní slévárenské strusky (EP-S 75% SS) – zv. 100x



Obr. 138: Mikrostruktura ekologické správkové hmoty EKO-X 40 % NK – zv. 100x



Obr. 139: Mikrostruktura záливkové hmoty EP-Z 65% OIDM – zv. 200x

Na Obr. 133 lze pozorovat mikrostrukturu vzorku vyvinuté správkové hmoty s 60% obsahem popílku kontaminovaného vlivem denitrifikace spalin z tepelné elektrárny Třebovice (EP-S 60% KP-TŘ). Je zde jasně vidět, že tento filtrový popílek obsahuje velké množství cenosfér, které jsou rovnoměrně rozloženy v epoxidové matrici. Většina těchto cenosfér je docela velká, a jak je vidět z Obr. 133, tak jejich průměr dosahuje až 150 μm. Dále je patrné, že dispergovatelnost popílků v epoxidové matrici byla vynikající, protože na snímku nejsou patrné téměř žádné shluky částic. Na Obr. 134 lze pozorovat mikrostrukturu referenčního vzorku správkové hmoty s 75% množstvím křemičitého písku Dorsilit při zvětšení 100x. V porovnání s mikrostrukturou vzorku se stejným obsahem odpadního skla, autoskla (Obr. 135), se tvar a rozložení částic plniv příliš neliší. V obou případech je zřejmé, že částice plniva jsou důkladně obaleny epoxidovou matricí a je zde zabezpečena silná kontaktní zóna plnivo/pojivo. U hmot obsahujících 75% množství odpadního slévárenského písku (Obr. 136), a stejně tak u hmot se 75% obsahem odpadní slévárenské strusky (Obr. 137) jsou částice plniv rozloženy

rovnoměrněji než u vzorků s odpadním sklem. Je zde jasně vidět, že každé zrno slévárenského písku/strusky je ideálně obaleno epoxidovou pryskyřicí (EP), což zaručuje dokonalou soudržnost celé hmoty a vysvětluje se tím také fakt, že tyto hmoty mají tak vysoké pevnosti – především hmota s obsahem slévárenského písku (pevnost v tlaku až 120 MPa). Na *Obr. 138* lze pozorovat mikrostrukturu vyvinuté správkové hmoty EKO-X s 40% obsahem neutralizačního kalu (NK) při zvětšení 100×. Oranžové plochy na obrázku představují větší částice NK. Promáčknuté částice kulovitěho tvaru podobající se cenosférám představují pravděpodobně vzduchové póry. Je zde vidět, že částice kalu jsou dokonale inkorporovány v polymerní matrici, a tudíž by nemělo docházet k vyluhování nebezpečných látek do okolního prostředí.

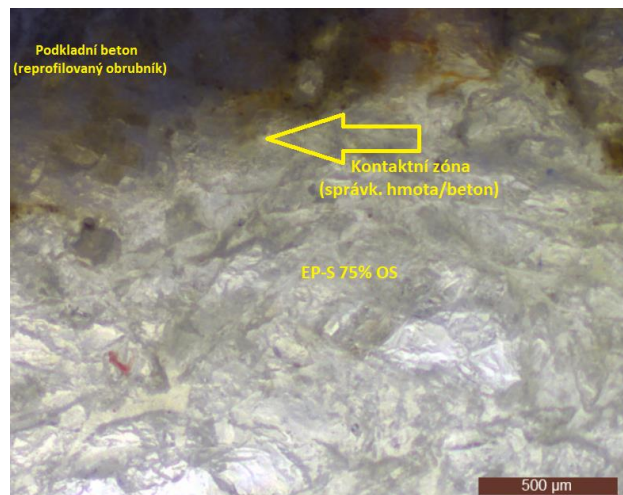
Snímek z optického mikroskopu zobrazen na *Obr. 139* byl proveden na vyvinuté zálivkové hmotě s 65% obsahem odpadu z výroby minerálních izolačních desek (OIDM). Je zde jasně vidět vyvážené rozložení částic plniva, které mají tvar podélného čtyřbokého hranolu (*Tab. 17*). Tyto částice představují na obrázku světlá místa, přičemž epoxidovou matrici reprezentují tmavší plochy (zelené zbarvení). Na některých místech jsou pozorovatelné shluky OIDM plniva, které vznikly pravděpodobně nedokonalým promícháním celé hmoty. V horní části obrázku je jasně pozorovatelná kontaktní zóna mezi plnivem a pojivem, přičemž lze konstatovat, že nízkoviskózní EP představuje ideální pojivo pro dokonalé obalení částíček jemnozrnného plniva OIDM.

- **Mikrostruktura správkových hmot použitých při reprofilaci obrubníku**

Na následujících obrázcích lze pozorovat mikrostrukturu správkových hmot, které byly použity při reprofilaci poškozeného obrubníku. Sledováno bylo především rozhraní mezi podkladním betonem a správkovou hmotou. Vzorky reprofilovaných rohů obrubníku byly odebírány pomocí úhlové brusky. Za účelem zhodnocení možných negativních vlivů povětrnostních účinků po dobu 400 dní byly také hmoty vystavené degradačním účinkům srovnány s referenčními, na které nepůsobily žádné degradační vlivy.

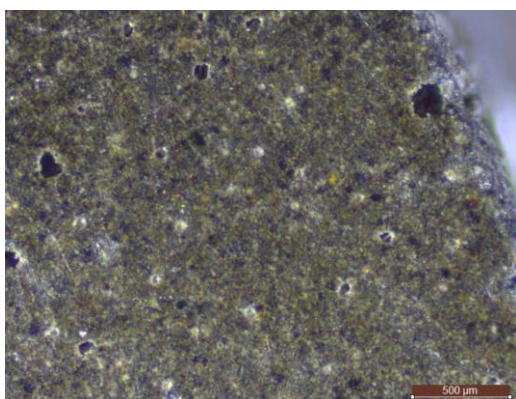


Obr. 140: Detail rozhraní správkové hmoty EP-S 60% KP-TŘ a podkladního betonu reprofilovaného obrubníku (zv. 100x)

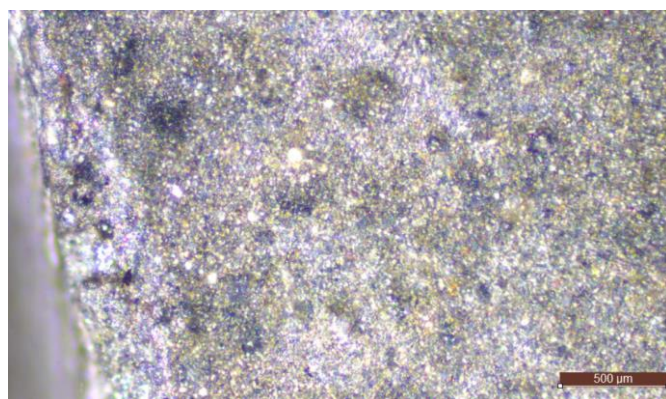


Obr. 141: Detail rozhraní správkové hmoty EP-S 75% OS a podkladního betonu reprofilovaného obrubníku (zv. 100x) – prosvíceno

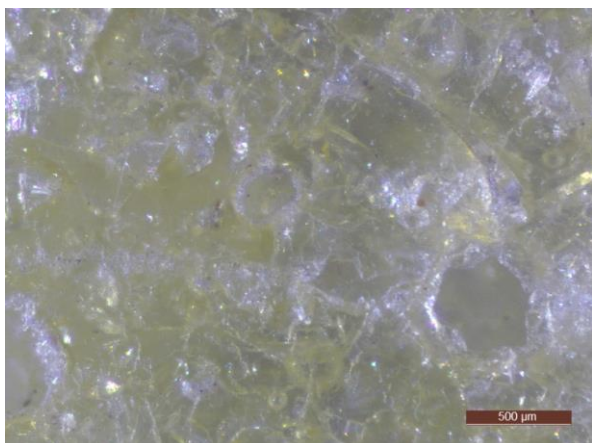
Na Obr. 140 je jasně rozeznatelné rozhraní mezi podkladním betonem (reprofilovaná část obrubníku) a aplikovanou správkovou hmotou s 60% obsahem popílku (EP-S 60% KP-TŘ) procházející po diagonále z levého horního rohu směrem do dolního pravého rohu snímku. Z obrázku lze konstatovat, že díky vhodné konzistenci směsi došlo k dokonalému zatečení EP s jemnými podíly plniva do otevřené pórovité struktury povrchu betonu, a tím je správková hmota pevně zakotvena v podkladu. Z mikrosnímku nejsou zjevné žádné známky porušení správkové hmoty a kamenivo v podkladním betonu je dokonale obaleno správkovou hmotou. Na Obr. 141 lze pozorovat detail napojení vyvinuté správkové hmoty obsahující 75% množství odpadního skla vhodné zrnitosti, přičemž vzorek byl v průběhu pozorování prosvícen světlem ve viditelném spektru.



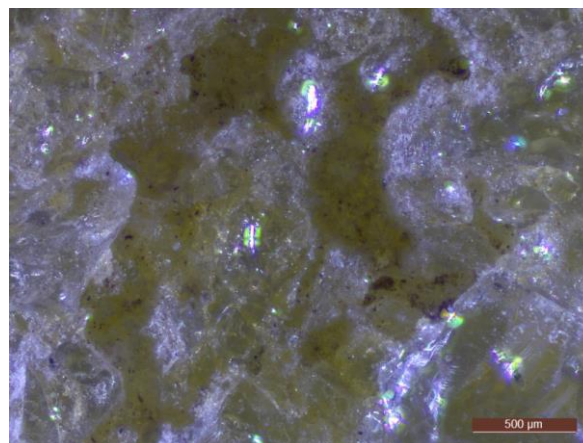
Obr. 142: Povrch správkové hmoty EP-S 60% KP-TŘ nevystaven působení povětrnostních vlivů (povrch nenarušen UV zářením) – zv. 50x



Obr. 143: Povrch správkové hmoty EP-S 60% KP-TŘ po 400 denním působení povětrnostních vlivů (degradace především UV zářením) – zv. 50x

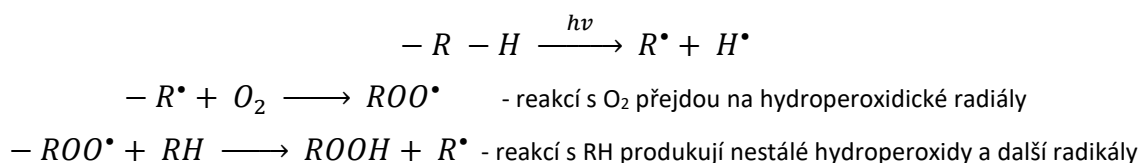


Obr. 144: Povrch vyvinuté správkové hmoty EP-S 75% OS nevystaven působení povětrnostních vlivů (povrch nenarušen UV zářením) – zv. 100x



Obr. 145: Povrch správkové hmoty EP-S 75% OS po 400 denním působením povětrnostních vlivů (degradace především UV zářením) – zv. 100x

Porovnáním snímků na Obr. 142 a Obr. 143 lze jasně vidět rozdíly mezi povrchem správkové hmoty EP-S 60% KP-TŘ, která nebyla vystavena povětrnostním vlivům (Obr. 142) a povrchem stejné hmoty, vystavené 400dennímu působení povětrnostních podmínek (Obr. 143). Podobný rozdíl je patrný také u další hmoty (EP-S 75% OS), a to na Obr. 144 a Obr. 145 (zdegradovaný povrch). Degradace povrchu správkové hmoty byla způsobena především působením UV záření, jedná se o tzv. „fotooxidační destrukci“ epoxidových pryskyřic a obecně polymerů. Tento jev je popsán v příslušné literatuře [100] jako oxidační destrukce aktivovaná zářením, nejčastěji UV (290–400 nm). Jedná se o hlavní příčinu povětrnostního stárnutí polymerů. Po zachycení energetického kvanta na řetězci může dojít k následnému rozpadu některé vazby na dva volné radikály a tím se zahájí celý řetězec následných reakcí:



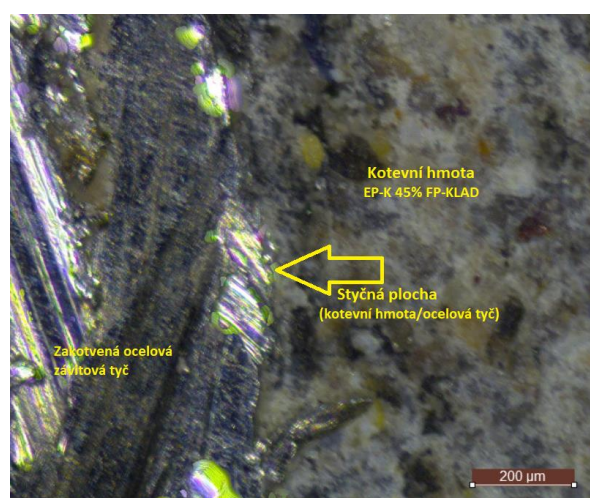
Tento proces je doprovázen buď poklesem M_r , nebo síťováním. Odolnost vůči fotooxidaci polymerů se zvyšuje pomocí přísad, které přednostně absorbují záření těch vlnových délek, které jinak narušují vazby v polymeru. Jedná se o světelné stabilizátory a patří mezi ně např. estery kyseliny salicylové, benzotriazol a benzofenony [100]. Nicméně průběh degradace fotooxidací nebyl u zkoušených hmot nějak výrazný – nejsou patrné žádné trhliny ani ztráta soudržnosti. Avšak pro zvýšení odolnosti vůči fotooxidaci by bylo vhodné do vyvinutých správkových hmot přidat taky světelné stabilizátory, aby se zvýšila jejich dlouhodobá trvanlivost v exteriéru, především vůči působení silného UV záření.

- **Mikrostruktura kotevních hmot**

Sledování mikrostruktury vyvinutých kotvících hmot probíhalo v místě napojení kotevní hmoty na kotvící prvek – ocelovou závitovou tyč. Na *Obr. 146* lze pozorovat detail napojení referenční kotvící hmoty a na *Obr. 147* detail napojení vyvinuté kotevní hmoty se 45% obsahem denitrifikovaného popílku na zakotvenou ocelovou závitovou tyč. Na těchto snímcích je patrné, že dokonce ani po zkoušce vytržení, kdy na zakotvenou tyč působila osová tahová síla až 100 kN, nedošlo ke vzniku žádných trhlin v kotevní hmotě, a dokonce nebyla nijak porušena ani kontaktní zóna mezi závitovou tyčí a kotevní hmotou. Na některých místech styčné plochy lze pozorovat zatečení kotevní hmoty až do závitů kotvené ocelové tyče, což pozitivně ovlivnilo výsledné vlastnosti celého kotevního systému.



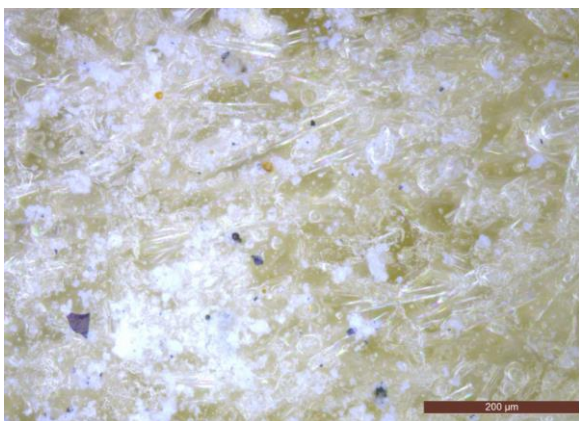
Obr. 146: Detail rozhraní ocelové závitové tyče kotvené kotvící hmotou EP-K 45% 0,063 REF (zv. 100x)



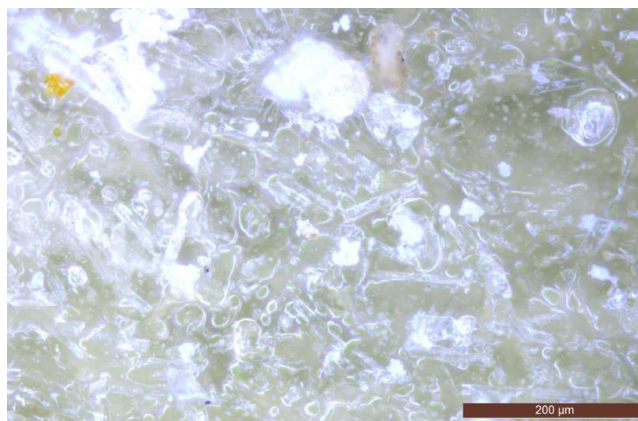
Obr. 147: Detail rozhraní ocelové závitové tyče kotvené kotvící hmotou EP-K 45% FP-KLAD (zv. 100x)

6.4.1.2. Vliv chemicky agresivního prostředí na mikrostrukturu povrchu

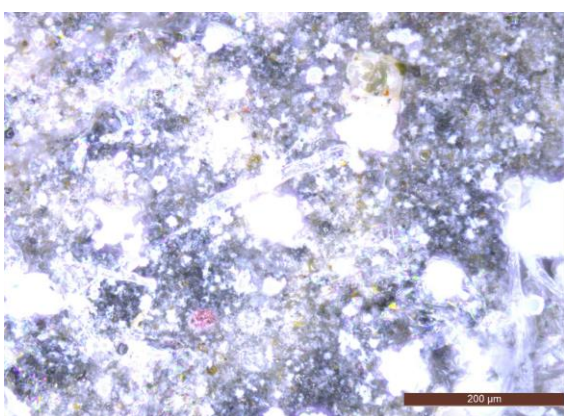
Povrch vybraných vyvinutých sanačních hmot byl po působení kapalného prostředí blíže sledován pomocí optického mikroskopu. Především byl blíže pozorován vliv některých agresivních látek na povrch zkoušených hmot za účelem podrobnějšího vysvětlení působení aplikovaných roztoků na použitou epoxidovou matici, vysoce plněnou druhotnými surovinami. Na *Obr. 148* lze pozorovat povrch hmoty EP-Z 65%, která byla po dobu 28 dní ponořena v peroxidu vodíku (H_2O_2). Lze konstatovat, že nedošlo k žádné výrazné degradaci hmoty, a ani ke vzniku trhlinek. Na *Obr. 149* lze vidět deformaci částic plniva OIDM vlivem působení agresivního roztoku H_2SO_4 . U hmoty EP-S 60% KP-TŘ také není patrná degradace povrchu vlivem roztoků H_2SO_4 (*Obr. 150*) a NaOH (*Obr. 151*). Roztoky se pouze vysrážely na povrchu hmoty (bílá místa) a nezpůsobily narušení správkové hmoty.



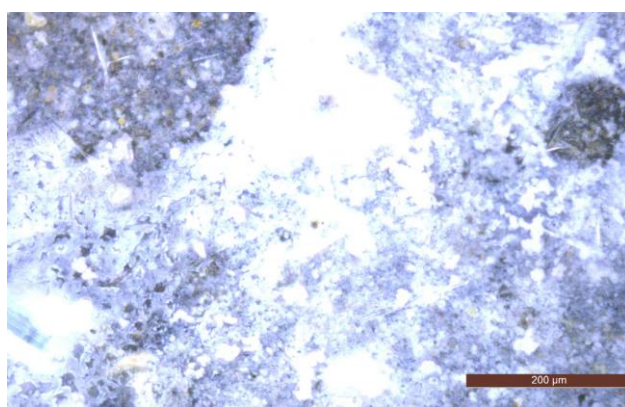
Obr. 148: Detail povrchu vyvinuté záливkové hmoty EP-Z 65% OIDM po 28denním působení roztoku H_2O_2 (zv. 100x)



Obr. 149: Povrch vyvinuté záливkové hmoty EP-Z 65% OIDM po 28 denním působení 40% roztoku H_2SO_4 (zv. 50x)



Obr. 150: Povrch správkové hmoty EP-S 60% KP-TŘ po 28denním působení 40% roztoku H_2SO_4 (zv. 100x)



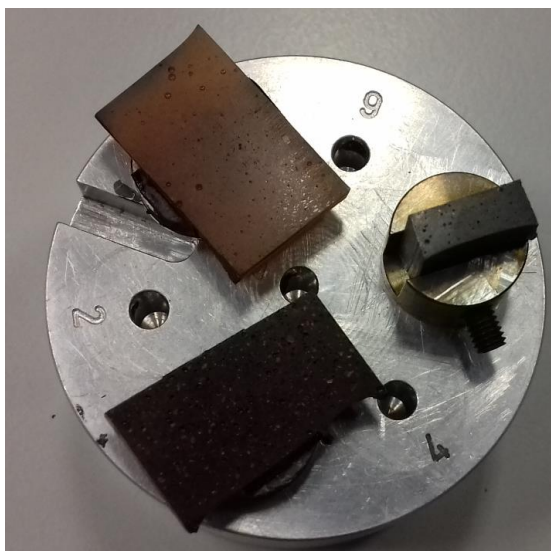
Obr. 151: Povrch správkové hmoty EP-S 60% KP-TŘ po 28denním působení 40% roztoku NaOH (zv. 100x)

6.4.2. Pozorování mikrostruktury sanačních hmot pomocí elektronového mikroskopu

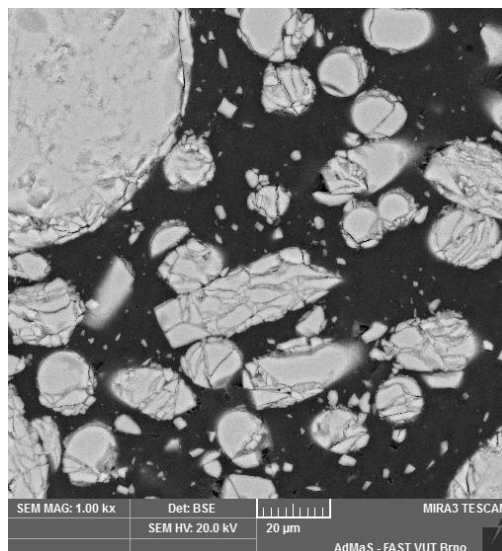
Pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM) byla sledována mikrostruktura třech vybraných vyvinutých hmot, a to záливkové hmoty s 65% obsahem odpadu z výroby minerálních izolačních desek (EP-Z 65% OIDM), správkové hmoty s 60% obsahem denitrifikovaného popílku (EP-S 60% KP-TŘ) a hmoty s 40% obsahem upraveného nebezpečného odpadu (EKO-X 40 % NK). Na Obr. 152 lze vidět vzorky, které byly upraveny a následně vloženy do SEM pro další pozorování. Na Obr. 153 a Obr. 154 lze pozorovat částice plniva OIDM, přičemž patrné jsou zde také otevřené póry kruhového tvaru. Mikrostruktura vyvinuté správkové hmoty s 60% obsahem denitrifikovaného popílku (EP-S 60% KP-TŘ) je zobrazena na Obr. 155 až Obr. 157. Na všech třech mikrosnímčích jsou jasně viditelné cenosféry nacházející se v popílku. V důsledku přibližně dvakrát tak vyšší hustoty popílku oproti epoxidové pryskyřici (EP) se zrna

popílku při leštění vzorku otevřely, a proto lze na většině míst pozorovat otevřené sférické až kulovité útvary. Dále 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, charakteristická právě pro denitrifikované popílky, jak již bylo zmíněno v teoretické části této práce. *Obr. 158* a *Obr. 159* poukazují na mikrostrukturu vyvinuté ekologické správkové hmoty s 40% obsahem upraveného neutralizačního kalu (NK). Částice nebezpečného opadu, které vykazují docela nerovnoměrnou distribuci velikosti částic, jsou dokonale inkorporovány v epoxidové matrici. Kulaté útvary na snímcích představují vzduchové póry, které vznikly v důsledku nedokonalé přípravy vzorků.

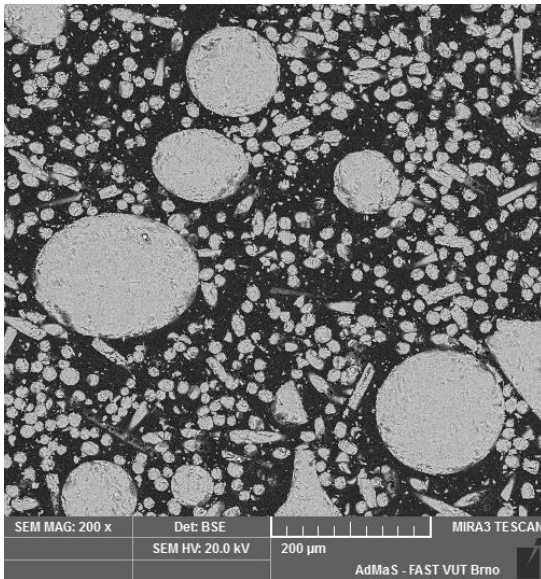
Energiově disperzní spektroskopie (EDX), což je podpora použitého elektronového mikroskopu (SEM), byla využita pro zjištění kvalitativního a kvantitativního zastoupení některých majoritních prvků a jejich rozložení ve vyvinutých správkových hmotách (EP-S 60% KP-TŘ, EKO-X 40 % NK). Technologie EDX detekuje rentgenové záření emitované ze vzorku během jeho ozařování elektronovým paprskem, za účelem charakterizování prvkového složení analyzované hmoty. Analyzovány mohou být fáze a plochy o velikosti 1 μm nebo méně. Energie rentgenového záření je charakteristická pro daný prvek, ze kterého byla emitována. EDX detektor měří relativní nadbytek emitovaného rentgenového záření ve srovnání s jejich energií. Pro předmětné vzorky byla použita také metoda EDX mapování. Avšak nevýhodou této metody je to, že při malém obsahu daného prvku ve vzorku se tento prvek ve výsledku nevykreslí. Z toho důvodu je možné ve výsledném obrazci pozorovat jenom nejvíce zastoupené prvky, a tedy těžké kovy (Cr, Co, As, Cd, atd.) se při jejich malém množství ve vzorku nedají stanovit.



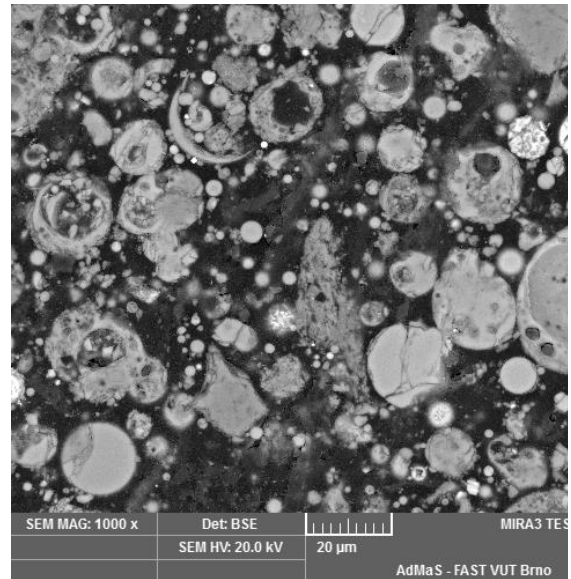
Obr. 152: Vyleštěné a pozlacené vzorky pro stanovení mikrostruktury pomocí SEM+EDX



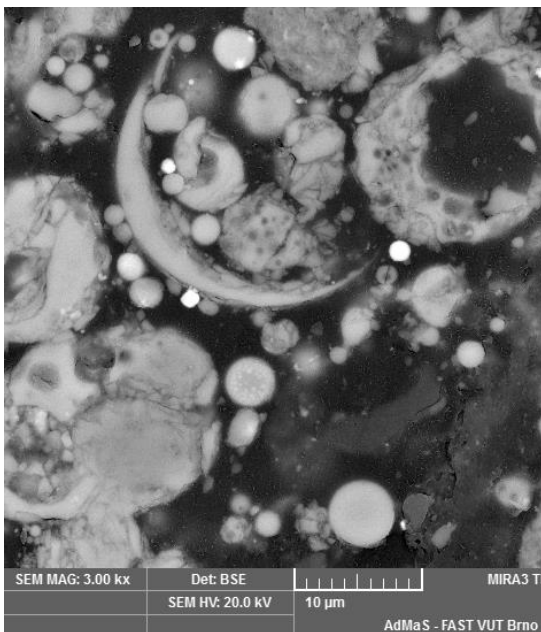
Obr. 153: Mikrostruktura zálivkové hmoty EP-Z 65% OIDM (zv. 1000x)



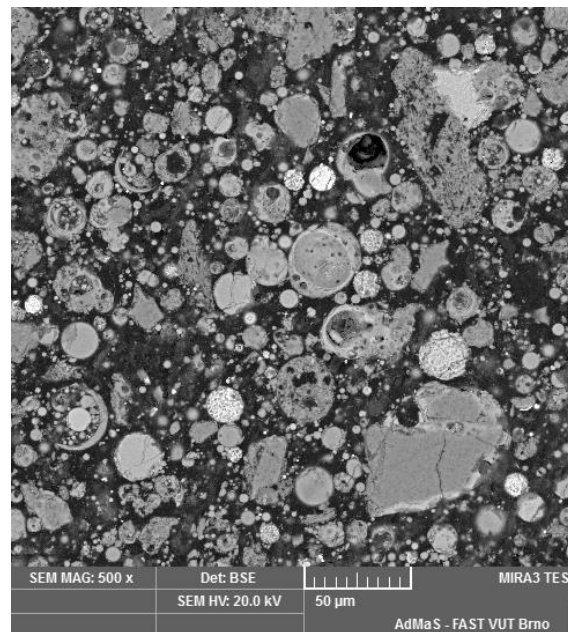
Obr. 154: Mikrostruktura záливkové hmoty EP-Z 65% OIDM (zv. 200x)



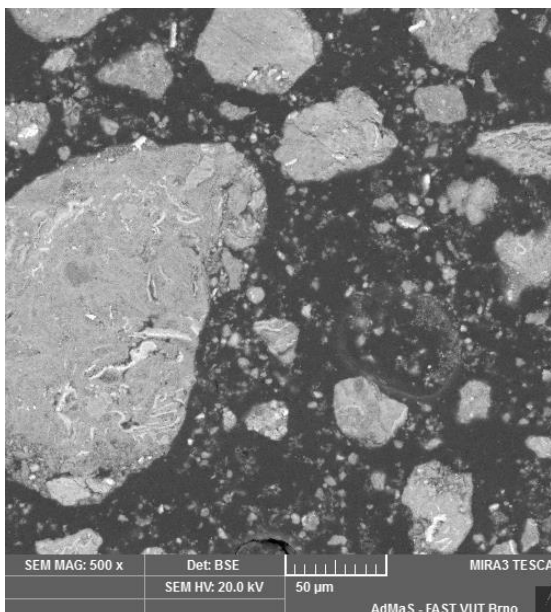
Obr. 155: Mikrostruktura správkové hmoty EP-S 60% KP-TŘ (viditelné kulaté zrna popílku (cenosféry) – zv. 1000x



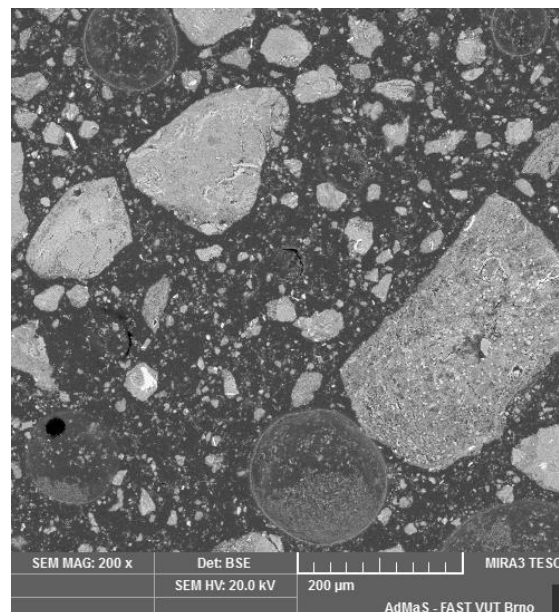
Obr. 156: Mikrostruktura správkové hmoty EP-S 60% KP-TŘ (viditelné kulaté zrna popílku (cenosféry) – zv. 3000x



Obr. 157: Mikrostruktura správkové hmoty EP-S 60% KP-TŘ (viditelné kulaté zrna popílku (cenosféry) – zv. 500x

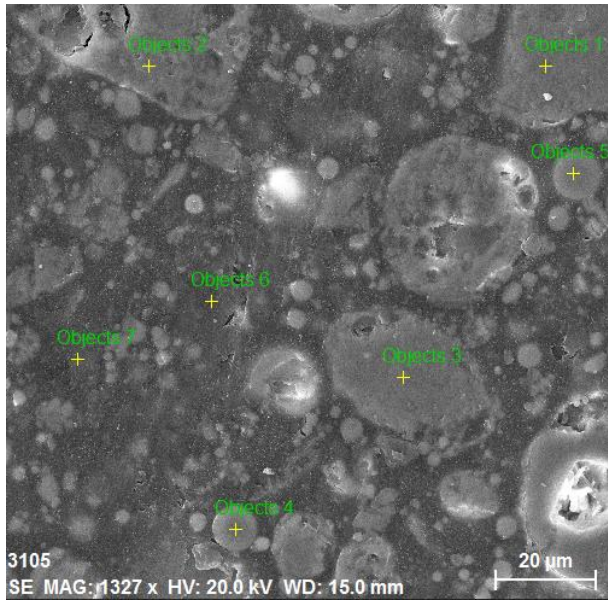


Obr. 158: Mikrostruktura správkové hmoty EKO-X s 40% obsahem NO – zv. 500x

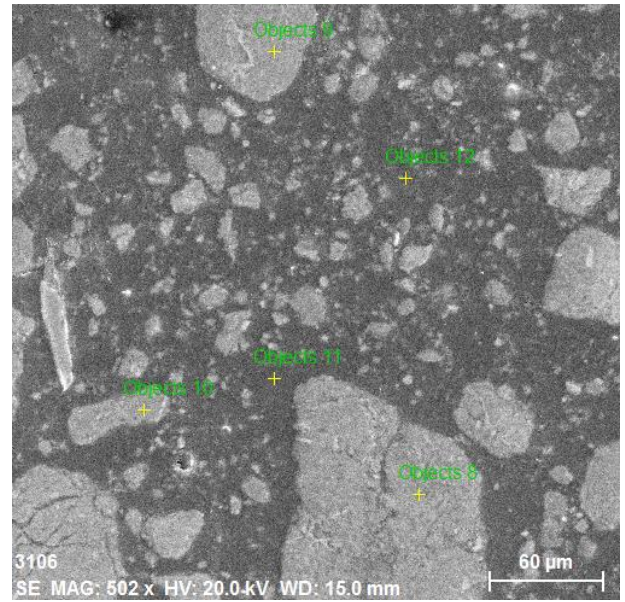


Obr. 159: Mikrostruktura správkové hmoty EKO-X s 40% obsahem NO – zv. 200x

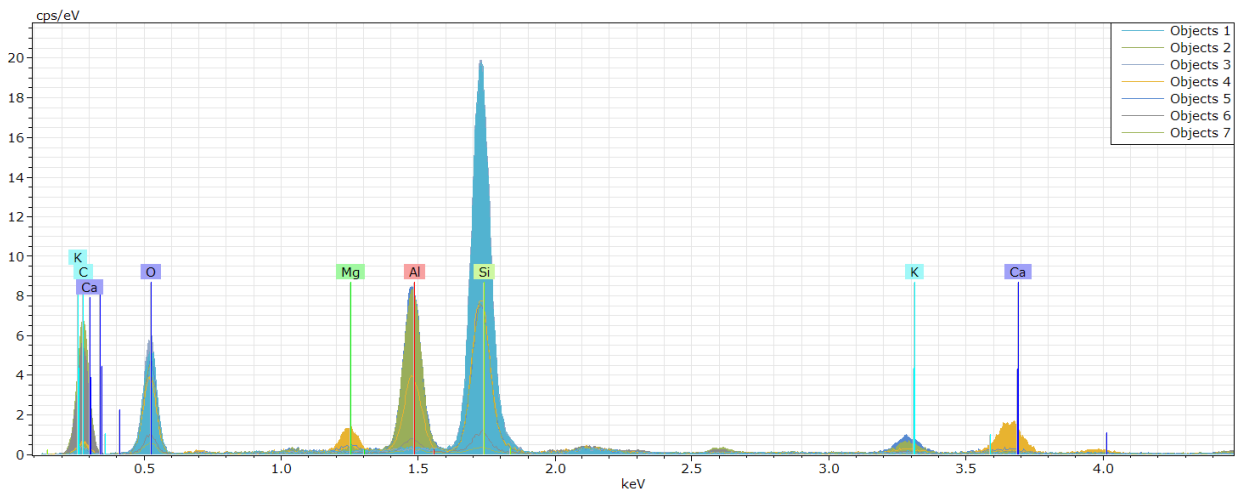
Na *Obr. 160* a *Obr. 161* jsou vyznačeny body, ve kterých probíhala EDX prvková analýza – objekty jsou rozloženy rovnoměrně ve vzorku. *Obr. 162* znázorňuje vyhodnocené spektrum EDX analýzy vzorku EP-S 60% KP-TŘ a na *Obr. 163* je uvedeno spektrum vzorku vyvinuté ekologické hmoty EKO-X 40 %NK. Bylo zjištěno, že vzorek s NK obsahuje také nepatrné množství molybdenu (Mo), železa (Fe) a chloridů (Cl⁻), které se nachází v použitém NO. Oba vzorky obsahují prvky uhlík (C) a kyslík (O) reprezentující epoxidovou pryskyřici (EP), která představuje pojivovou složku. Vzorek EP-S 60% KP-TŘ se dále vyznačuje obsahem prvků charakterizujících vysokoteplotní popílek (Mg, Al, Si, Ca). Na *Obr. 164* lze pozorovat rozložení vápníku (Ca) v jednotlivých částicích neutralizačního kalu (NK) a na *Obr. 165* je vidět rozložení železa (Fe) v částicích NK. Vysoká přítomnost vápníku (Ca) v použitém NO je způsobena neutralizací odpadních galvanických roztoků pomocí Ca(OH)₂. Přítomnost těžkých kovů nebylo možné pomocí EDX analýzy prokázat, protože jejich množství bylo v porovnání s ostatními prvky zanedbatelné, a pro stanovení jejich rozložení by bylo potřeba použít citlivější EDX analýzu. Nicméně bylo prokázáno, že rozložení jednotlivých prvků je v epoxidové matrici rovnoměrné a částice nebezpečného odpadu byly úspěšně inkorporovány v uzavřené struktuře hmoty při současném zamezení jejich vyluhování.



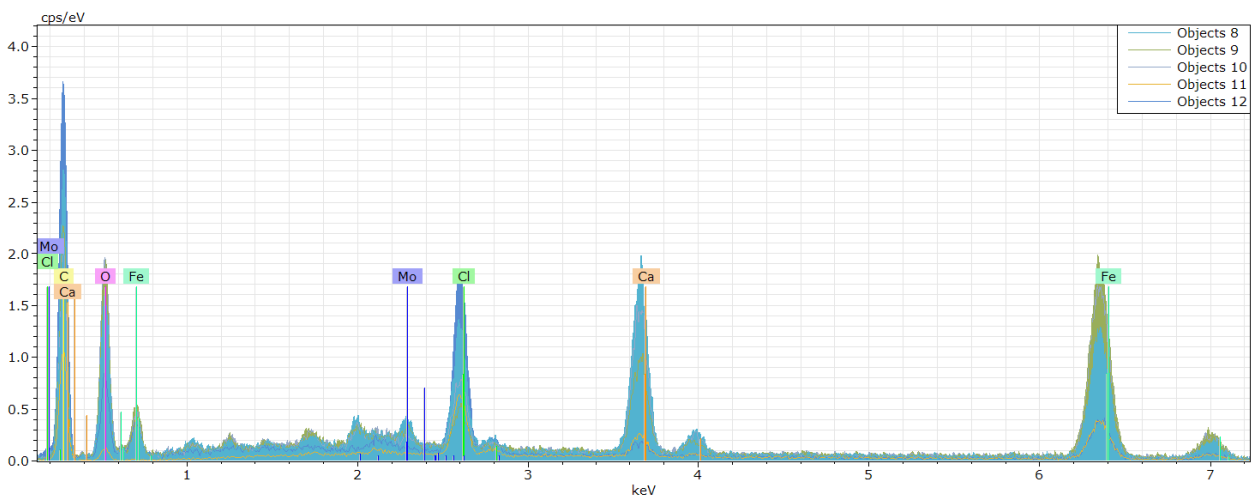
Obr. 160: Vyznačení bodů, kde probíhalo prvkové složení pomocí EDX analýzy u vzorku s denitrifikovaným popílkem



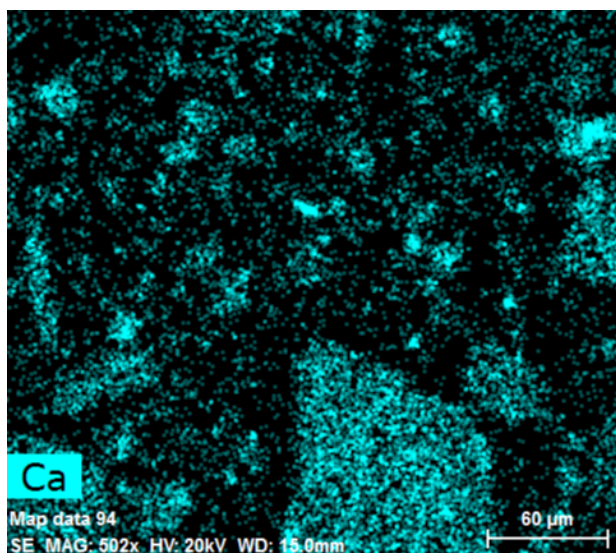
Obr. 161: Vyznačení bodů, kde probíhalo prvkové složení pomocí EDX analýzy u vzorku s upraveným nebezpečným odpadem (NK)



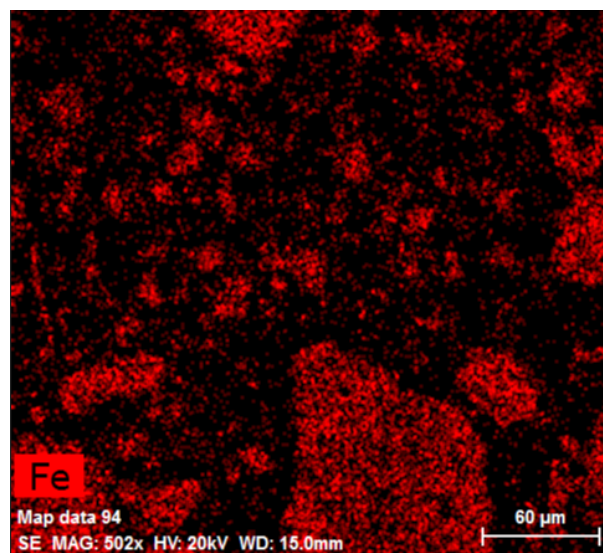
Obr. 162: Vyhodnocení charakteristického spektra EDX vzorku EP-S 60% KP-TŘ



Obr. 163: Vyhodnocení charakteristického spektra EDX vzorku EKO-X 40% NK



Obr. 164: Rozložení vápníku (Ca) v jednotlivých částicích plniva (neutralizačního kalu) – vzorek EKO-X 40 % NK



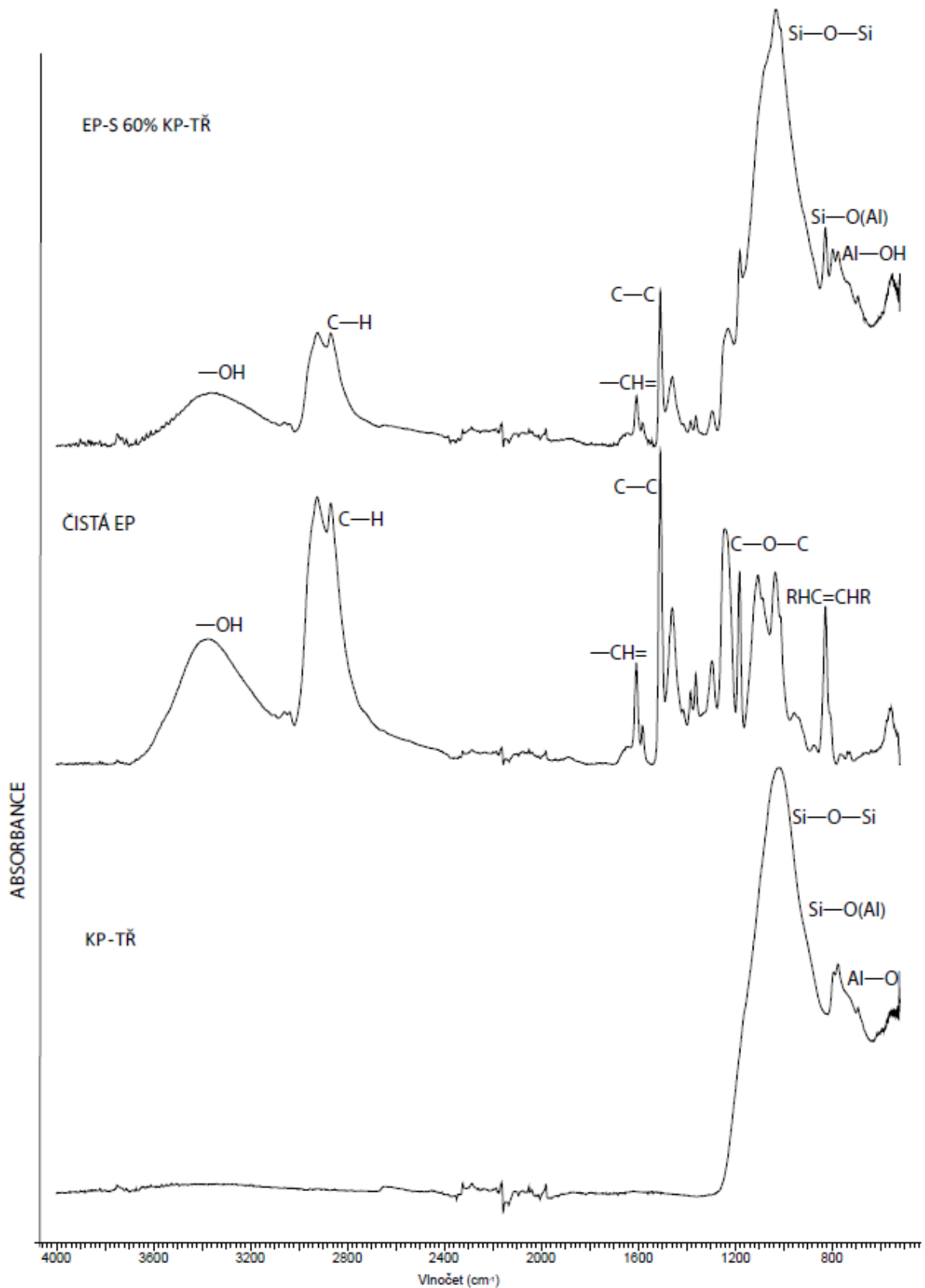
Obr. 165: Rozložení železa (Fe) v jednotlivých částicích plniva (neutralizačního kalu) – vzorek EKO-X 40 % NK

6.4.3. Infračervená (FTIR) a Ramanova spektroskopie

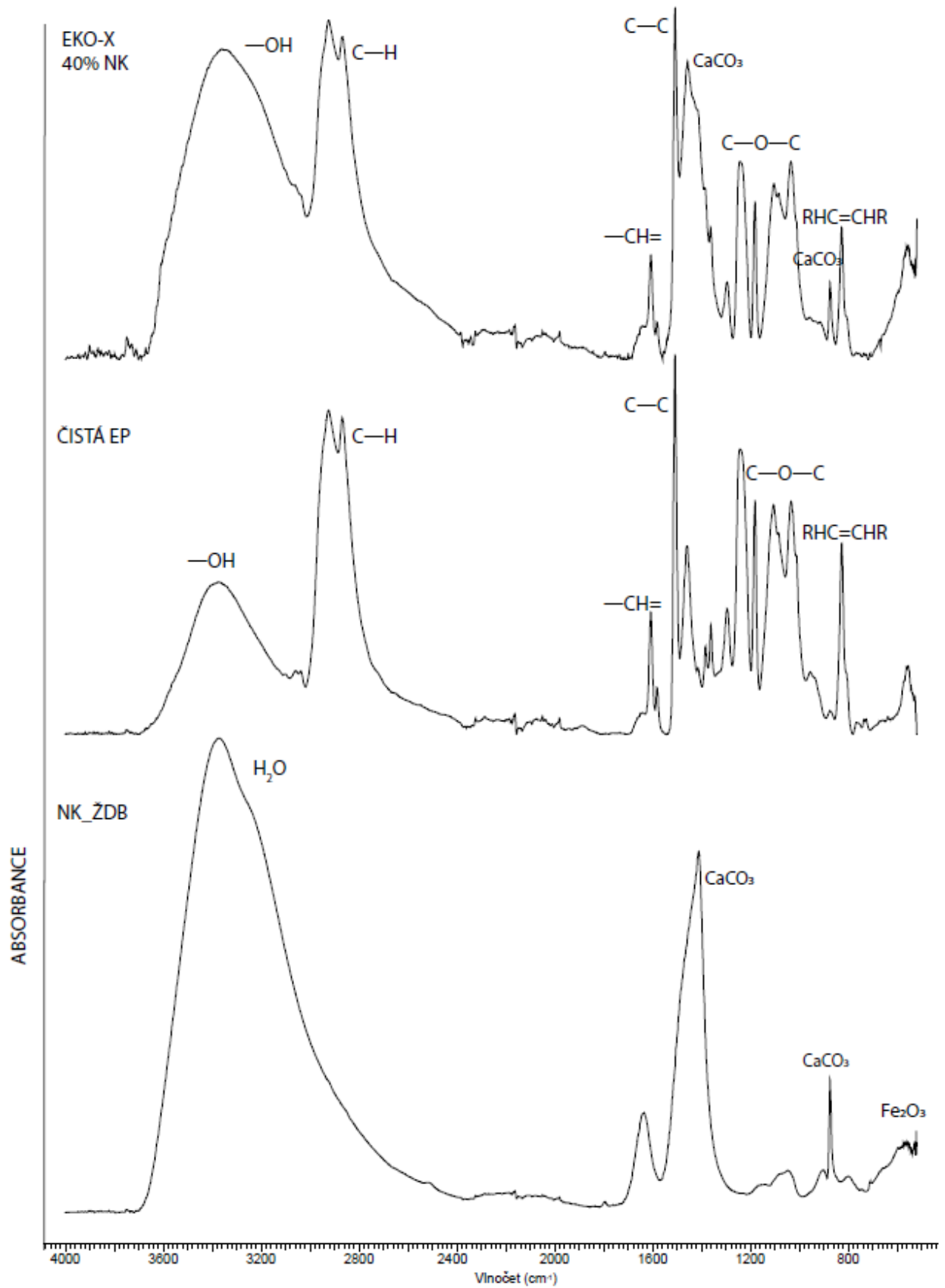
Na Obr. 166 a Obr. 167 lze pozorovat identifikaci sloučenin nacházejících se ve vybraných hmotách EP-S 60% KP-TŘ s obsahem kontaminovaného popílku jako plniva a EKO-X 40% NK s obsahem upraveného nebezpečného odpadu (NO) – neutralizačního kalu (NK) provedenou pomocí infračervené spektroskopie s Fourierovou transformací (FTIR). Porovnáním FTIR spekter plniv, pojiv a samotných hmot lze konstatovat, že s vysokou pravděpodobností nedošlo ke vzájemným chemickým reakcím mezi částicemi plniva 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 vázány jenom fyzikálně. Z pohledu známých chemických principů není ani pravděpodobné, že by těžké kovy nacházející se v NO mohly reagovat s EP.

Co se týče samotného vyhodnocování spekter, tak 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 cm^{-1} . Co se týče hmoty EKO-X 40% NK, tak u této byly pozorovány pásy uhličitánů (CaCO_3) a na začátku střední oblasti IR byly s největší pravděpodobností identifikovány oxidy železa, které byly ve značné míře zjištěny taky v rámci chemické analýzy samotného kalu. Za účelem zjištění přítomnosti těžkých kovů by bylo potřeba zajistit spektra ze vzdálené infračervené oblasti ($200\text{--}10\text{ cm}^{-1}$), což je oblast, v níž lze identifikovat těžké kovy, jako jsou Pb a Ni nacházející se v NK. Z Ramanovy spektroskopie, která byla provedena na fakultě chemické Vysokého učení technického

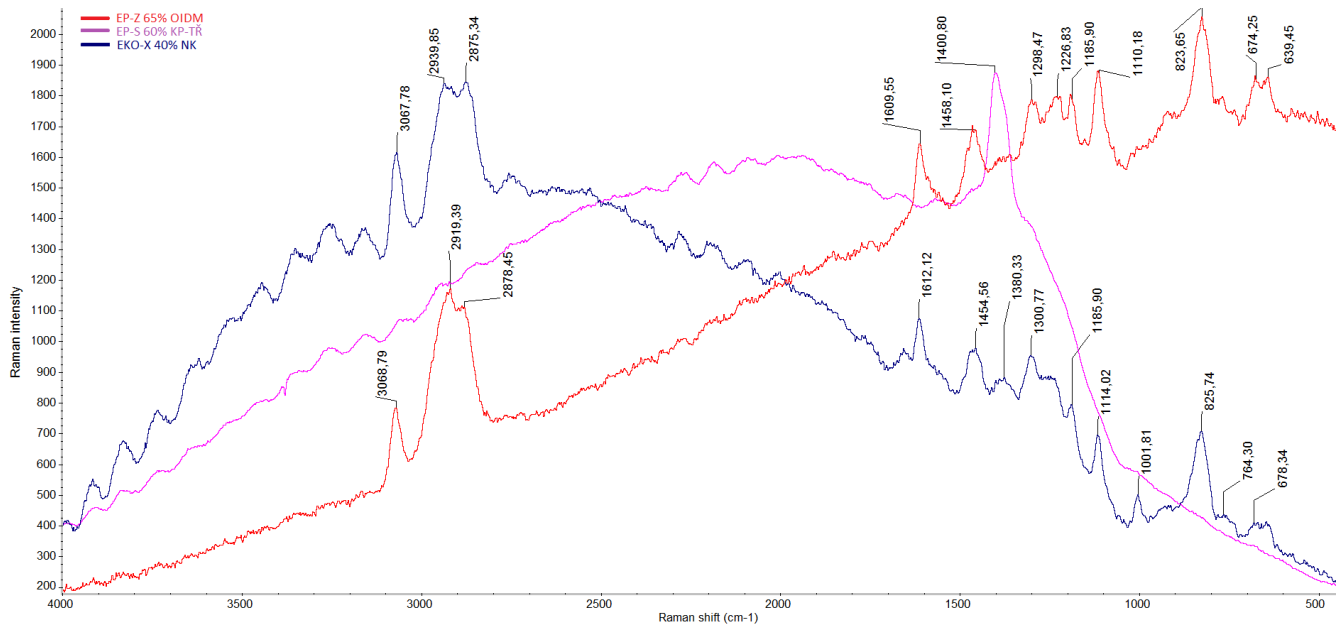
v Brně (FCH VUT), byly bohužel zjištěny jenom spektra do vlnočtu 500 cm^{-1} . Vyhodnocení Ramanovy spektroskopie je uvedeno na *Obr. 168*, přičemž na základě zjištěných spekter lze vyvozovat stejné závěry, jako v případě FTIR analýzy – neproběhly chemické reakce mezi samotnými plnivý a epoxidovou pryskyřicí (EP). Co se týče organické složky, která je lépe identifikovatelná pomocí FTIR analýzy, tak byly zjištěny pouze sloučeniny charakteristické pro epoxidy, jako např. oxiranový kruh (C–O–C), C–H vazby a další aromatické sloučeniny, které není potřeba v rámci této práce blíže identifikovat. U všech spekter byla zjištěna hydroxylová (–OH) skupina, nacházející se kolem hodnoty 3400 cm^{-1} .



Obr. 166: Porovnání jednotlivých FTIR spekter – plniva (denitrifikovaný popílek KP-TŘ), pojiva (EP) a vybrané správkové hmoty EP-S 60% KP-TŘ pro identifikaci nových sloučenin



Obr. 167: Porovnání jednotlivých FTIR spekter – plniva (upravený NO – NK), pojiva (EP) a vybrané správkové hmoty EKO-X 40% NK pro identifikaci nových sloučenin

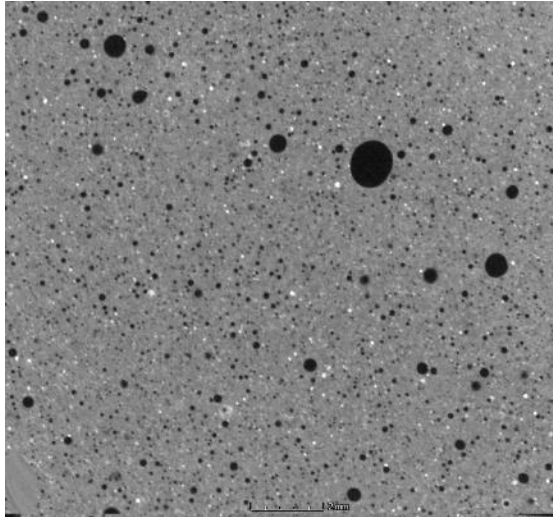


Obr. 168: Vyhodnocení Ramanovy spektroskopie třech vybraných sanačních hmot (EP-Z 65% OIDM, EP-S 60% KP-TŘ, EKO-X 40% NK)

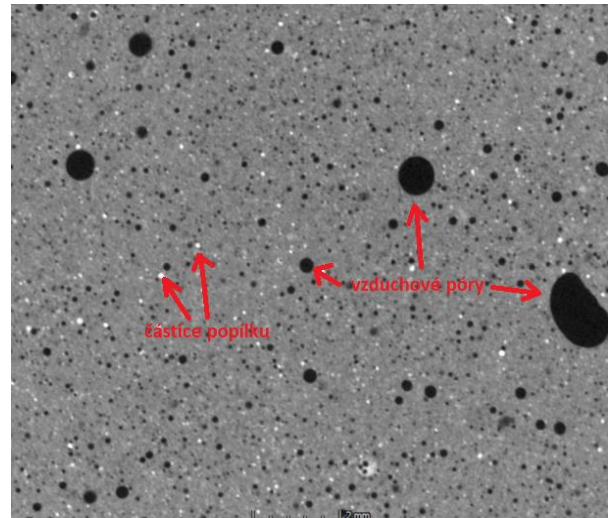
6.4.4. CT Tomografie

6.4.4.1. Správkové a zálivkové hmoty

Na snímcích z tomografu (Obr. 169 a Obr. 170) lze pozorovat porozitu, homogenitu a rozložení částic a dále celkovou vnitřní strukturu hmoty EP-S 60% KP-TŘ. Ze snímků je jasně vidět, že póry a částice popílku jsou rovnoměrně rozloženy v epoxidové matici, přičemž distribuce velikosti pórů po průřezu vzorku je nerovnoměrná – vysoký obsah pórů ve vzorku je většinou způsoben rychlejším zamícháváním čerstvé směsi, kdy se do materiálu dostává nechtěný vzduch. Tyto vzduchové póry mají pak za následek snížení pevnosti zpolymerovaného materiálu, tudíž lze tato místa považovat za nejslabší část vzorku. Jednotlivé CT snímky po délce vzorku se liší pouze rozdělením pórů a velikostí částic popílku, přičemž žádné mikrotrhliny ve vzorku nebyly zaznamenány. V práci Wanga a Daia [99], kteří také použili CT tomografii pro stanovování velikosti a rozložení pórů, bylo prokázáno, že pórovitost malt úzce souvisí se směrem odlévání čerstvé malty a jejím zpracováním.



Obr. 169: CT snímek vzorku EP-S 60% KP-TŘ

Obr. 170: CT snímek vzorku EP-S 60% KP-TŘ
(rovnoměrné rozložení částic popílku a pórů)

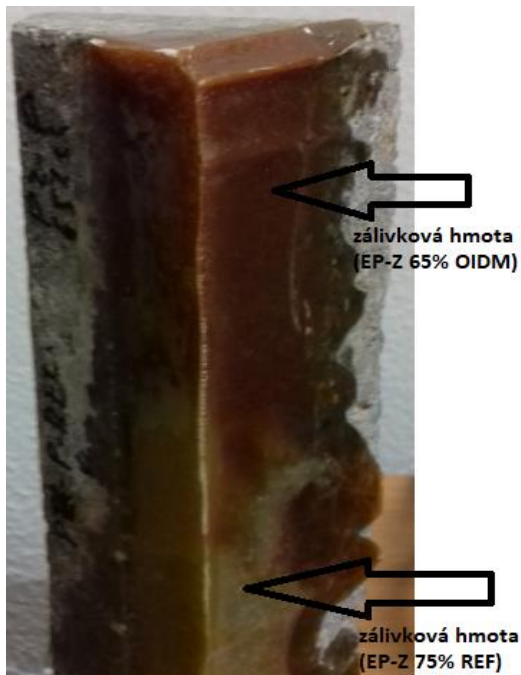
Dále byla pomocí CT tomografie sledována vnitřní struktura reprofilovaných rohů obrubníku, přičemž sledované hmoty byly vystaveny povětrnostním vlivům po dobu přibližně 400 dní. Vzorky, které byly vyříznuty z betonového obrubníku, jsou zobrazeny na Obr. 171 a Obr. 172. Pro srovnání byla sledovaná také vnitřní struktura referenčních vzorků, které nebyly vystaveny povětrnostním vlivům (Obr. 173, Obr. 174). Pozorována byla i vnitřní struktura referenční hmoty obsahující referenční plnivo (křemičitý písek).



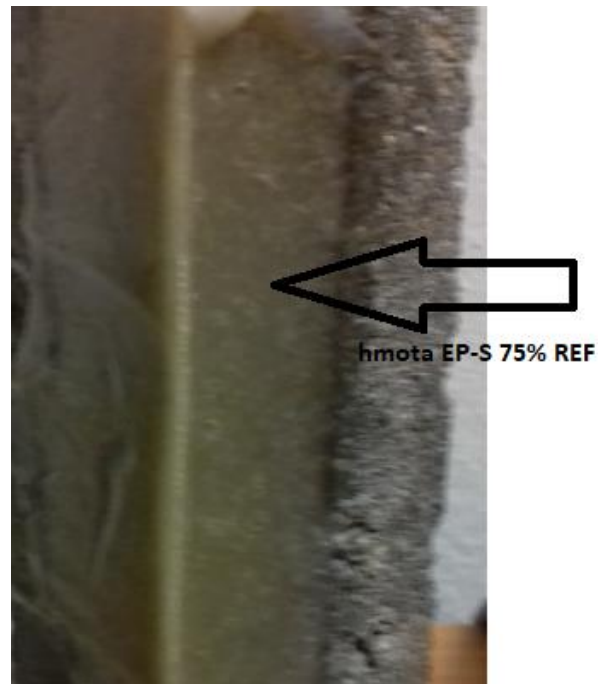
Obr. 171: Reprofilovaná část obrubníku (po působení povětrnostních vlivů), která byla vyříznuta a následně snímaná pomocí CT Tomografie (hmota EP-S 75% OS)



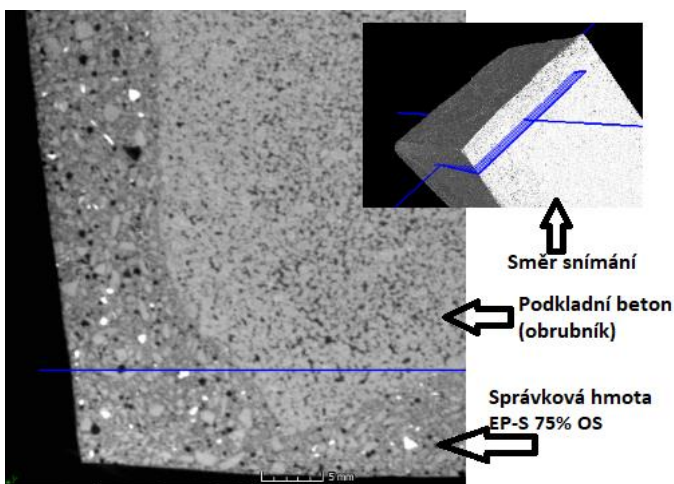
Obr. 172: Reprofilovaná část obrubníku (po působení povětrnostních vlivů), která byla vyříznuta a následně snímaná pomocí CT Tomografie (hmota EP-S 60% KP-TŘ)



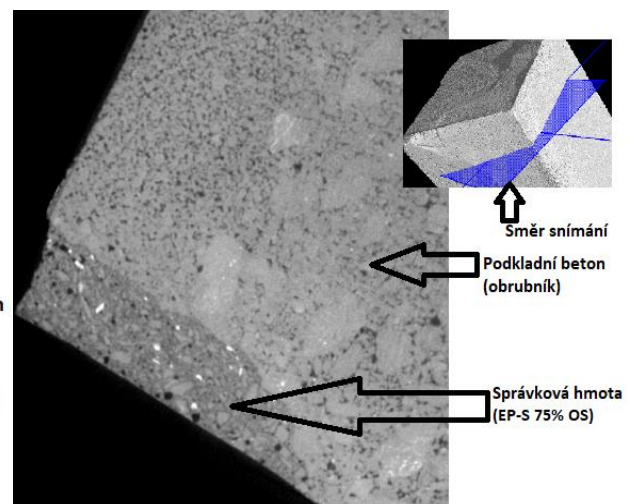
Obr. 173: Reprofilovaná část obrubníku (po 28 dnech uložení v lab. prostředí), která byla vyříznuta a následně snímaná pomocí CT Tomografie (zálivkové hmoty EP-Z 65% OIDM, EP-Z 75% REF)



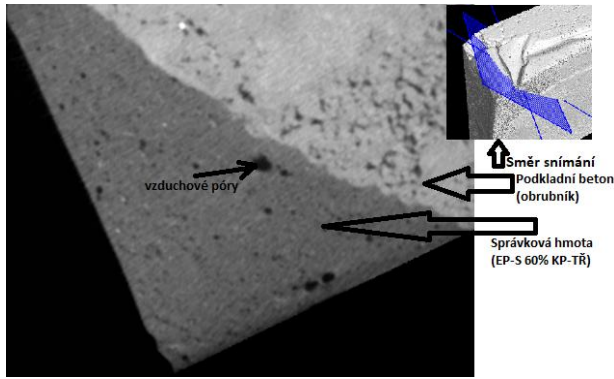
Obr. 174: Reprofilovaná část obrubníku (po 28 dnech uložení v lab. prostředí), která byla vyříznuta a následně snímaná pomocí CT Tomografie (hmota EP-S 75% REF)



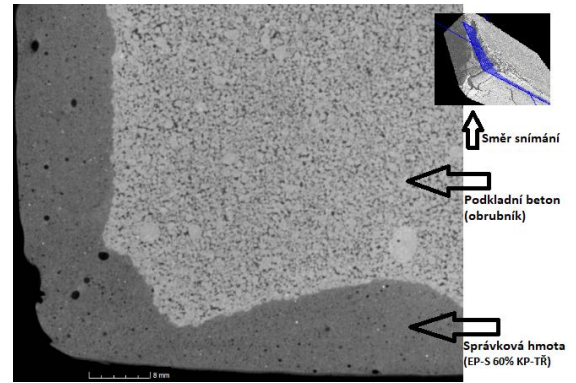
Obr. 175: CT snímek reprofilovaného rohu obrubníku (hmota EP-S 75% OS) – horizontální snímkování



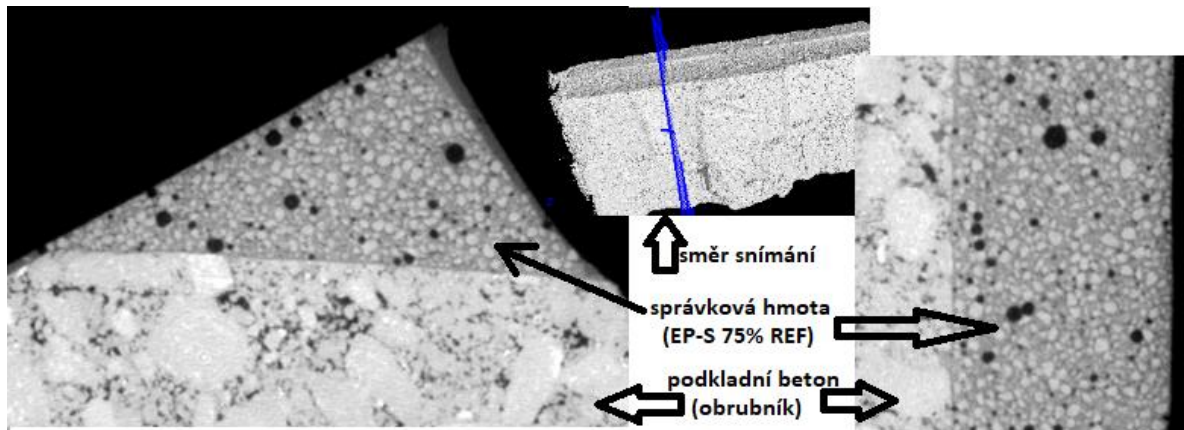
Obr. 176: CT snímek reprofilovaného rohu obrubníku (hmota EP-S 75% OS) – snímkování přes styčnou plochu



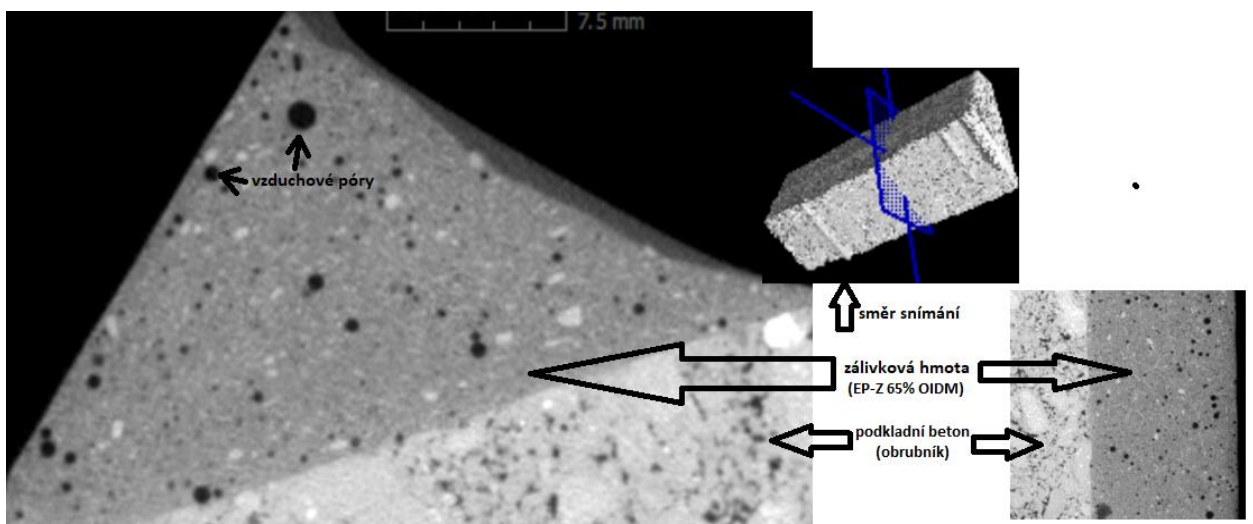
Obr. 177: CT snímek reprofilovaného rohu obrubníku (hmota EP-S 60% KP-TŘ) – snímkování přes styčnou plochu



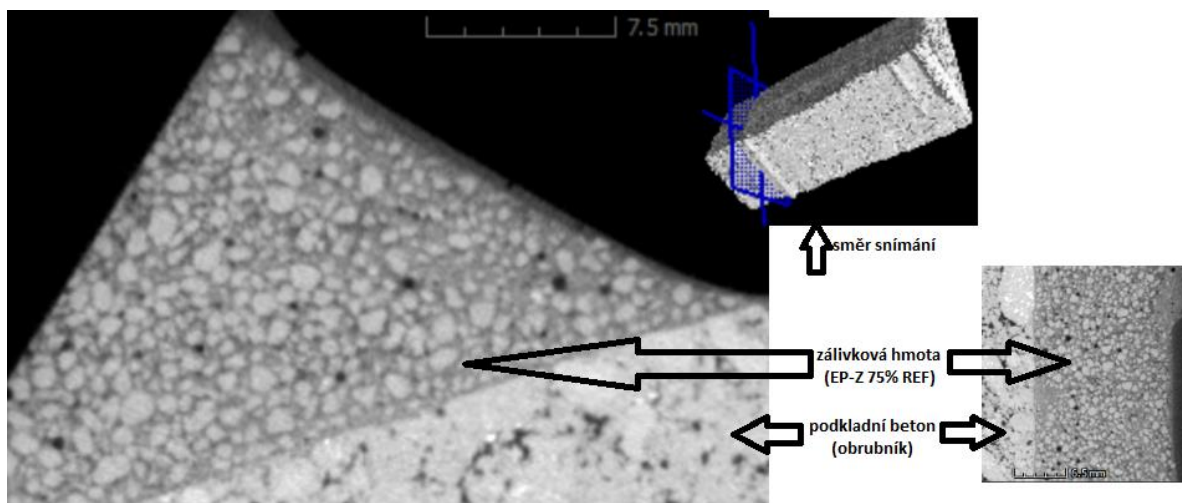
Obr. 178: CT snímek reprofilovaného rohu obrubníku (hmota EP-S 60% KP-TŘ) – horizontální snímkování



Obr. 179: CT snímek reprofilovaného rohu obrubníku referenční správkovou hmotou (EP-S 75% REF) – vertikální snímkování



Obr. 180: CT snímek reprofilovaného rohu obrubníku zálivkovou hmotou (EP-Z 65% OIDM) – vertikální snímkování



Obr. 181: CT snímek reprofilovaného rohu obrubníku referenční zálivkovou hmotou (EP-Z 75% REF) – vertikální snímkování

Na snímcích z CT tomografie (Obr. 175 až Obr. 181), které byly pořízeny na vzorcích vybraných polymerních hmot aplikovaných v rámci reprofilace uražených rohů betonového vibrolisovaného prefabrikátu, cestného obrubníku, lze pozorovat následující:

- Žádná z vyvinutých sanačních hmot nevykazovala známky porušení (nejsou patrné žádné trhliny, mikrotrhliny ani povrchová narušení).
- Správkové i zálivkové 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 pomalejším mícháním čerstvé směsi a jejím dokonalejším zhuštění v bedně.
- U sanačních hmot EP-S 60% KP-TŘ a EP-S 75% OS nebyla patrná žádná degradace hmoty a porušení soudržnosti ani po ročním vystavení povětrnostním vlivům.

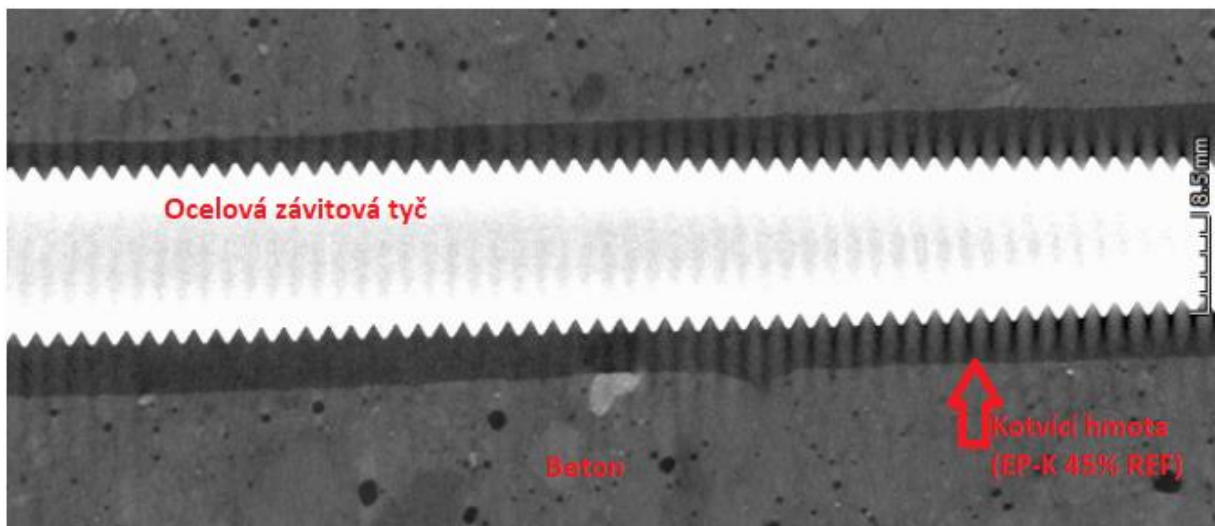
6.4.4.2. Kotvící hmoty EP-K

Pro zjištění kvality zakotvení závitových ocelových tyčí vyvinutými kotevními hmotami ve vysokopevnostním betonu (C 50/60) byla použita výpočetní tomografie. CT snímání bylo prováděno na jádrových betonových vývrtech se zakotveným ocelovým prvkem (Obr. 182). Délka vývrťů o průměru 75 mm byla přibližně 30 cm a v celé délce vývrťu byla zakotvena ocelová tyč. Vývrty byly prováděny až po zkoušce vytržení, aby se zjistilo, zdali nedošlo k nějakému narušení spoje kotvící hmoty s ocelovým prvkem a betonem.

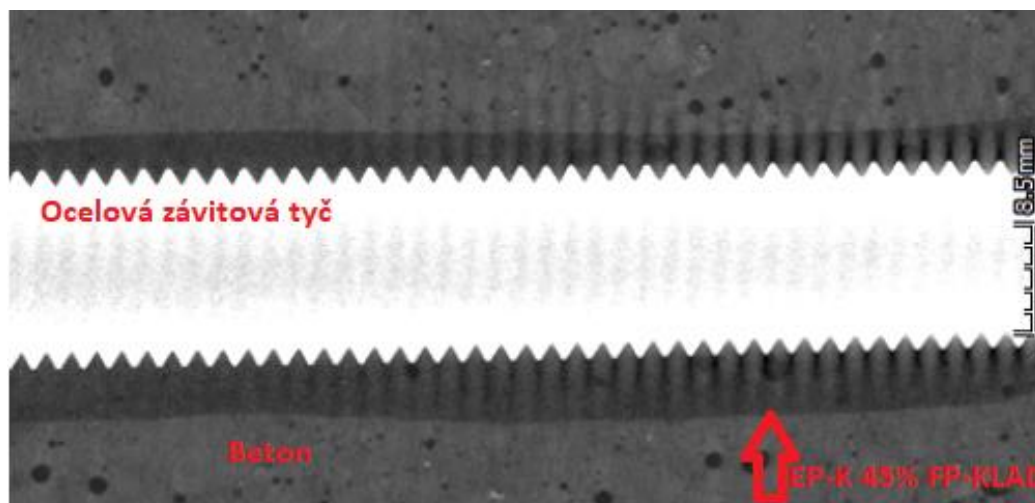
Na snímcích z tomografu (Obr. 183 až Obr. 187) lze pozorovat zakotvení ocelových tyčí po provedení zkoušky vytržení, a to jak v horizontálním (napříč), tak ve vertikálním (podélném) směru. Nepatrné šedé odstíny na ocelové tyči, na snímcích bílé barvy, jsou způsobeny šumem tomografu, vzniklým značným rozdílem v hustotách polymerní hmoty a oceli.



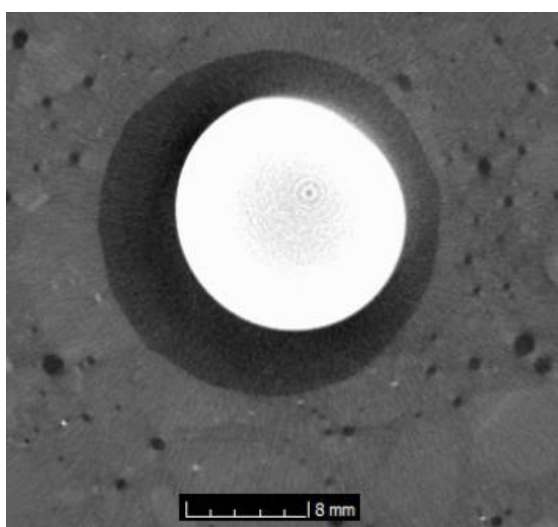
Obr. 182: Jádrový vývrt ($\varnothing 75$ mm) pro CT snímání kvality zakotvení ocelové závitové tyče



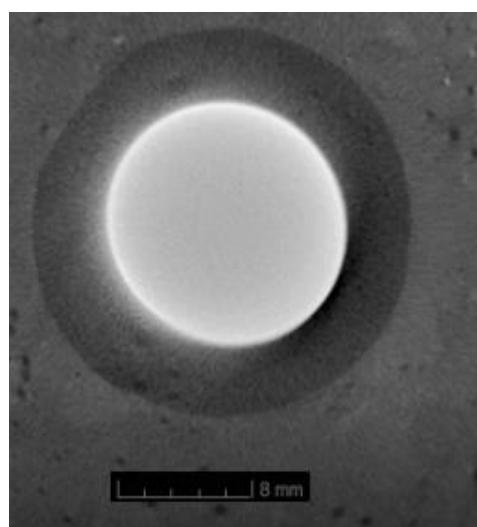
Obr. 183: CT snímek zobrazující kvalitu zakotvení závitové tyče pomocí referenční kotvící hmoty s 45% obsahem jemnozrného referenčního písku (EP-K 45% REF) – snímání v ose x



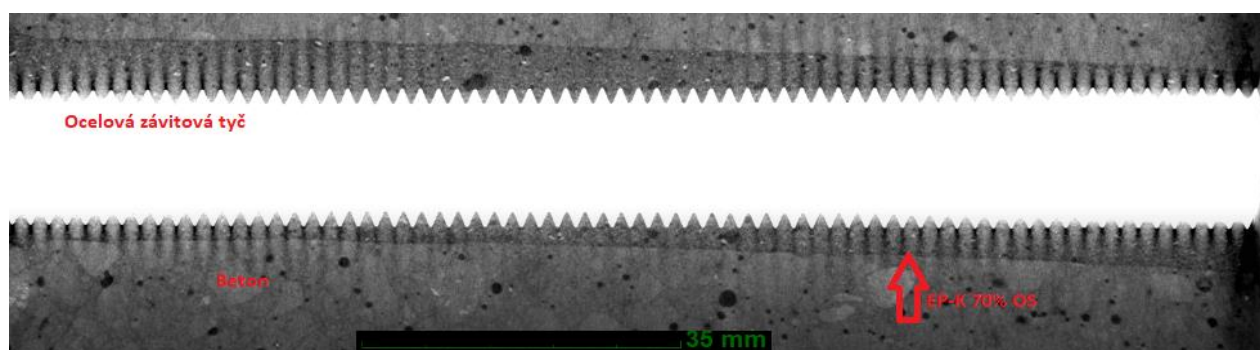
Obr. 184: CT snímek zobrazující kvalitu zakotvení závitové tyče pomocí vyvinuté kotvící hmoty s 45% obsahem fluidního popíku Kladno (EP-K 45% FP-KLAD) – snímání v ose x



Obr. 185: CT snímek zobrazující kvalitu zakotvení závitové tyče pomocí referenční kotvící hmoty s 45% obsahem jemnozrného referenčního písku (EP-K 45% REF) – snímání v ose y (seshora vývrtu)



Obr. 186: CT snímek zobrazující kvalitu zakotvení závitové tyče pomocí vyvinuté kotvící hmoty s 45% obsahem fluidního popíku Kladno (EP-K 45% FP-KLAD) – snímání v ose y (seshora vývrtu)

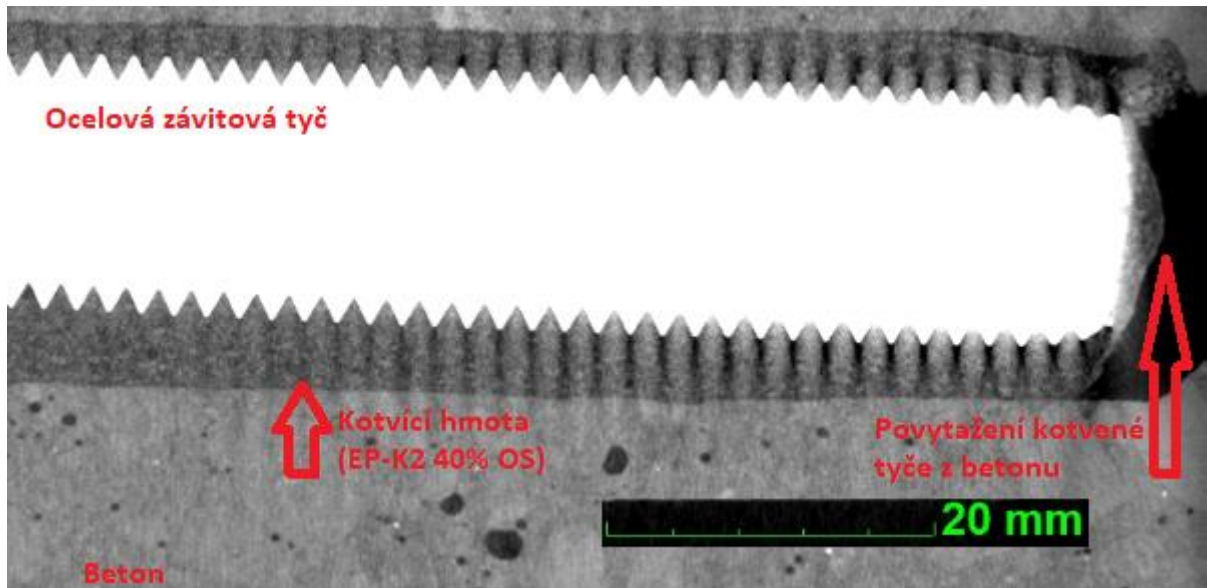


Obr. 187: CT snímek zobrazující kvalitu zakotvení závitové tyče pomocí vyvinuté kotvící hmoty s 70% obsahem odpadního skla (EP-K 70% OS) – snímání v ose x

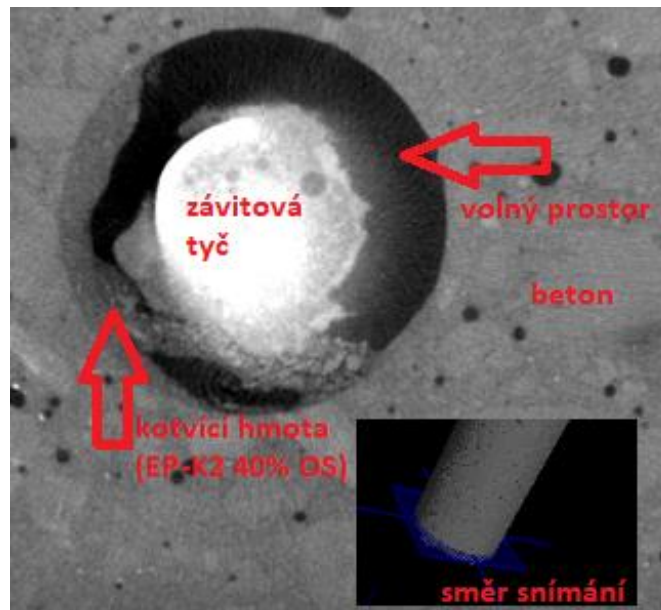
Na snímcích je vidět, že všechny zkoušené závitové tyče jsou dokonale zakotveny, což dokazuje, že vyvinuté polymerní kotvící hmoty (EP-K) mají vhodnou konzistenci – po vložení závitové ocelové tyče do čerstvé hmoty směs zateče do otevřených pórů okolního betonu, a taky do záhybů ocelové tyče. Ze snímků je patrné, že typ použitého plniva (popílek, odpadní sklo) nemá vliv na míru zakotvení ocelového prvku. Ve všech případech kotvící hmota plně zatekla 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. Dále není patrné ani porušení samotné hmoty. Z uvedených skutečností vyplývá, že byly vyvinuty speciální kotvící hmoty vykazující ideální parametry jak v čerstvém, tak v zatvrdlém stavu, za současného využití značného množství druhotných surovin, které vytváří nepostradatelnou složku v podobě velice efektivního plniva.

6.4.4.3. Kotvící hmoty EP-K2

Snímání kvality zakotvení probíhalo pro srovnání také u další zkoušené kotvící hmoty, 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. Jednalo se o kotvící hmotu na epoxidové bázi s označením EP-K2. Avšak na rozdíl od předešlé kotvící hmoty s označením EP-K se tato hmota vyznačovala velice rychlým zatuhnutím (přibližně 5 minut). Především z důvodu rychlého zatuhnutí hmota nemohla dokonale zatect do záhybů kotvené tyče a do pórovité struktury betonu. Mimo jiné tato hmota vykazovala nižší modul pružnosti, a také nižší pevnosti než hmota EP-K. Především na základě těchto skutečností nebylo u této hmoty dosaženo požadovaných parametrů (viz *Obr. 109*). Pomocí tomografického snímkování bylo po zkoušce vytržení sledováno, ve kterých místech došlo k povytažení tyče a ke ztrátě soudržnosti s betonem. Detail vysunutí kotvené ocelové tyče spolu s kotvící hmotou EP-K2, obsahující jako plnivo 40% množství odpadního skla, lze pozorovat na *Obr. 188* a na *Obr. 189*, přičemž na obou snímcích je jasně vidět volný prostor mezi kotvou a okolním betonem vzniklý v průběhu provádění zkoušky vytržení.



Obr. 188: CT snímek zobrazující povysunutí zakotvené ocelové závitové tyče pomocí zkoušené kotvící hmoty s 40% obsahem odpadního skla (EP-K2 40% OS) – snímání v ose x



Obr. 189: CT snímek zobrazující povysunutí zakotvené ocelové závitové tyče pomocí zkoušené kotvící hmoty s 40% obsahem odpadního skla (EP-K2 40% OS)

6.4.5. Závěr etapy 4

Ve čtvrté a zároveň poslední etapě této disertační práce bylo provedeno především pozorování mikrostruktury a vnitřní struktury vyvinutých a následně vybraných sanačních hmot. Pomocí optického mikroskopu byl také sledován vliv chemicky agresivního prostředí na povrch vyvinutých hmot, kdy bylo potvrzeno, že většina

agresivních roztoků nenarušuje povrch sledovaných hmot, a proto mohou být použity i v silně agresivním prostředí. V této důležité a velice přínosné etapě pro vědu a praxi bylo také prokázáno, že pomocí CT tomografu lze pozorovat i případné skryté vady zakotvených prvků, u kterých došlo k porušení. Tato metoda může tedy sloužit také jako důkaz při řešení znaleckých posudků v oblasti kotvení 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 potvrzují také ideální viskozitu čerstvé hmoty. Pomocí CT tomografie byla také sledována soudržnost vyvinutých správkových hmot s podkladním betonem, kdy 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 nebezpečného odpadu (NO) byly úspěšně inkorporovány v uzavřené struktuře hmoty při současném zamezení jejich vyluhování. Pomocí FTIR analýzy a Ramanovy spektroskopie bylo zjištěno, že s vysokou pravděpodobností nedošlo v průběhu polymerizace k chemickým reakcím mezi složkami NO a epoxidovou maticí, a dosáhlo se pouze fyzikální inkorporace polutantů do EP.

Dále bylo zjištěno, že některé hmoty vykazují větší množství pórů ve vnitřní struktuře. Na základě posouzení tomografických snímků vyvinutých hmot s výsledky pevností lze usuzovat, že zjištěná pórovitost u vyvinutých hmot nemá výrazný vliv na výsledné mechanické vlastnosti v porovnání s referenčními hmotami. Dosažená pórovitost výrazně neznehodnocuje ani dlouhodobou trvanlivost, ani chemickou odolnost vyvinutých sanačních hmot.

7. ZÁVĚR

Hlavním cílem disertační práce bylo vyvinout speciální sanační 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. Speciální sanační hmoty byly rozděleny dle jejich plánovaného použití a požadovaných vlastností do třech podkategorií, a to správkové (EP-S), zálivkové (EP-Z) a kotvící (EP-K). Tyto hmoty jsou určeny především pro 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.

Speciálními jsou tyto hmoty dále z toho důvodu, že se u nich zkouší a požadují jiné parametry než u běžných sanačních hmot.

Dílním 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.

Jako referenční hmoty byly ve všech případech použity materiály na epoxidové bázi, a jako plnivo byl použit čistý křemičitý písek Dorsilit. Tento písek vykazoval granulometrii 0–1,5 mm, přičemž vybrané hrubozrnější druhotné suroviny (odpadní sklo, struska), byly upraveny na stejnou frakci za účelem přiblížení se vlastnostem tohoto písku. Většinu použitých druhotných surovin nebylo potřeba před použitím v podobě plniv upravovat. Náročnější předúprava musela být provedena pouze u odpadního autoskla (AS) a skla z již nefunkčních solárních panelů (QS), kdy musela být odstraněna také polymerní folie a následně bylo potřeba samotné sklo pomlít na požadovanou frakci. U kotvících hmot byly použity dvě frakce, a to jemnější (do 63 μm) a hrubozrnější (do 630 μm). U vyvíjené hmoty EKO-X byl nebezpečný odpad (NO), neutralizační kal (NK), nejprve vysušen, a pak pomlet na jemnou frakci za účelem lepší inkorporace polutantů do polymerního pojiva.

V rámci první etapy práce proběhla nejprve volba vstupních surovin a jejich bližší identifikace, přičemž především na základě vlastností vstupních surovin byly navrženy základní receptury speciálních sanačních hmot na beton. Při návrhu receptur se zvolilo množství plniva v rozmezí 30–90 % hm. – důraz byl kladen především na viskozitu zvolené epoxidové pryskyřice (EP) a granulometrii vybraných druhotných a odpadních materiálů. V poslední fázi této etapy byl proveden aplikační test, a na základě jeho výsledků byly vybrány receptury pro další testování primárních fyzikálně-mechanických vlastností. Bylo zjištěno, že jemnějších plniv (KP, FP, OI DM) lze do pojiva na epoxidové bázi přidat méně (max. 65 % hm.), než hrubozrnějších plniv (OS, AS, SP, SS, QS), u kterých bylo maximální možné plnění až 85 % hm.

Ve druhé etapě byly prověřovány základní fyzikálně-mechanické vlastnosti vyvíjených speciálních sanačních hmot. Jednalo se především o stanovení objemové hmotnosti, pevností v tlaku a v tahu za ohybu, přičemž u zálivkových a správkových hmot se provedla také zkouška soudržnosti s betonovým podkladem. U správkových hmot se zaznamenalo nejvyšší pevnosti v tahu za ohybu (52 MPa) u vzorků obsahujícího 50% množství popílku kontaminovaného vlivem denitrifikace spalin. V porovnání s referenční hmotou byla tato hodnota až o 15 MPa vyšší. Obecně bylo zjištěno, že hmoty obsahující plnivo o jemné granulometrii (KP, FP, OI DM) dosahují vyšších pevností než hmoty

s hrubozrnnějším plnivem, např. odpadní sklo (OS, AS). Současně dostupné komerční zálivkové hmoty dosahují pevnost v tahu za ohybu kolem 30 MPa. Tato hodnota byla překročena u všech zkoušených receptur, kromě těch, u kterých bylo plnění vyšší než 85 % hm. Soudržnost s betonovým podkladem byla u všech prověřovaných receptur excelentní (> 4 MPa). Nejvyšších pevností dosáhla zálivková hmota s 65 % hm. obsahem vedlejšího produktu z výroby minerálních izolačních desek (OIDM). Důvod, proč byly u některých receptur dosaženy nejvyšší pevnosti, spočívá především v použitém plnivu – tvarový index, distribuce velikosti částic, rovnoměrnost rozložení ve hmotě, optimální množství a důležitou roli hraje v tomto případě také síla kontaktní zóny plnivo/pojivo.

Vyhodnocením výsledků dosažených ve třetí etapě práce v rámci pokročilého testování vybraných receptur se jednoznačně zjistilo, že nejlepší tahové vlastnosti vykazují kotvící hmoty s optimálním množstvím kontaminovaného popílku (45 hm. %). Dále byla zkoušena tepelná odolnost pomocí DMA analýzy, a na základě výsledků teploty skelného přechodu (T_g) lze říct, že typ použitého plniva nemá vliv na tepelnou odolnost speciálních sanačních hmot na epoxidové bázi. Tepelná odolnost je ovlivněna především typem použitého pojiva. Co se týče chemické odolnosti, tak nejhorší degradace zkoušených hmot byla způsobena roztokem kyseliny octové (CH_3COOH), a z toho důvodu by se vyvinuté sanační hmoty neměly používat v prostředí, kde je toto agresivní médium přítomné. Na druhé straně bylo zjištěno, že hmoty odolávají i většině silnějších roztoků anorganických kyselin a zásadám. V rámci této etapy bylo taky prokázáno stanovením dynamického modulu pružnosti (E_{dyn}), že byly vyvinuty progresivní správkové hmoty vykazující vynikající poměr mezi pevností v tlaku a modulem pružnosti v tahu a tlaku (110 MPa / 22 GPa). Hodnota modulu pružnosti je o něco nižší než u běžného betonu třídy C 30/37 (35 GPa), což bude mít pozitivní vliv na přenos případného statického i cyklického zatížení a zamezení tvorby trhlin na styčné ploše. U všech vyvinutých kotvících hmot byla dosažena kotvící síla vyšší než 75 KN a maximální posunutí nepřesáhlo hodnotu 0,6 mm, z čehož vyplývá, že tyto hmoty jsou v souladu s požadavky příslušné normy ČSN EN 1504-6. 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 předupraveného 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. Bylo unikátně potvrzeno, že došlo k výraznému snížení polutantů, především v podobě sledovaného parametru – rozpuštěné látky (RL). Tato etapa byla dále velice přínosná, protože zde byly vyhodnoceny nejen další provedené pokročilé

zkoušky, ale také zde bylo provedeno úspěšné poloprovozní ověření vyvinutých správkových a zálivkových hmot v podobě reprofilace betonových vibrolisovaných výrobků (obrubník, dlažba).

V poslední čtvrté etapě a velice přínosné z pohledu vědy i praxe 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. Pomocí CT tomografie byla také sledována soudržnost vyvinutých správkových hmot s podkladním betonem, kdy 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 nebezpečného odpadu 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.

I z ekonomického hlediska se vyvinuté polymerní sanační hmoty jeví jako velice výhodné, protože ve směsích bylo použito velké množství druhotných surovin, které nahradily značnou část pojivové složky na bázi epoxidové pryskyřice, která je nejdražší položkou celé hmoty. Jako nejlepší plnivo se jeví z pohledu finanční náročnosti denitrifikovaný elektrárenský popílek, protože tato druhotná surovina je z důvodu kontaminace NH_3 ionty pořizována pouze za transportní náklady a nemusí se dále upravovat. Lze ji hned použít pro přípravu kotvících hmot. Naproti tomu při použití odpadního skla je nutné odpadní sklo nejdříve upravit (ne vždy), poté podrtit, pomlít a roztřídit na požadovanou frakci, a až po těchto technologických operacích 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. Pokud by se začal používat tento kontaminovaný popílek do polymerních sanačních hmot, tak nejvyšší úspora by byla dosažena u kotvících hmot. 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 vyvíjené kotvící hmoty je přibližně 9 EUR za 1 kg. Hmota s popílkem vychází o něco levněji (8 EUR/kg), protože jsou zde eliminovány náklady na předúpravu plniva. Z těchto výsledků vyplývá, že výroba této kotvící hmoty je velice ekonomicky výhodná. Jediným nedostatkem těchto vyvinutých hmot může být estetická stránka, protože přidávkem popílku získá výsledná hmota šedou barvu. Avšak pokud se správkovými hmotami budou reprofilovat pouze betonové prvky a objekty bez barevných pigmentů, tak by tato tmavší barva neměla být problémem, a naopak by mohla být považována za přínos. V případě chemického kotvení není zbarvení kotvící hmoty až tak důležité, protože hmota se nachází uvnitř betonu, do kterého se kotví příslušný prvek.

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 běžně 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 ekologičtější způsobem za využití značného objemu druhotných surovin, přičemž se dosáhne výrazného snížení ekologické stopy samotného výrobku.

PŘÍNOS PRO VĚDNÍ OBOR A PRAXI

Mezi hlavní přínosy předložené disertační práce lze počítat především návrh zlepšení odpadového hospodářství, a to využitím různých druhů druhotných surovin a odpadů, včetně těch nebezpečných (NK). 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 (kotvicí, zálivkové, správkové) na polymerní bázi a dosažení lepších výsledných fyzikálně-mechanických parametrů než u referenčních hmot obsahujících jenom primární suroviny. Omezení potřeby skládkování vybraných odpadů bude znamenat pro producenty těchto odpadů především snížení nákladů spojených s jejich uložením na skládku, a na druhou stranu může přinést v budoucnu zisk za jejich prodej případnému zpracovateli. Pro zachování značné části neobnovitelných zdrojů pro další generace je nevyhnutné začít využívat značnou část vedlejších produktů, přičemž v této práci bylo podrobně objasněno, jakým způsobem lze tohoto cíle dosáhnout v oblasti výroby a použití specifických stavebních hmot.
- Návrh nové metodiky zkoušení polymerních sanačních hmot s různým typem a obsahem plniva, včetně podrobného prozkoumání mikrostruktury těchto hmot. Navržená metodika prověření vlastností polymerních sanačních hmot, jak v čerstvém, tak v zatvrdlém stavu, může být dále použita při vývoji jiných typů sanačních materiálů, přičemž lze pomocí ní vyvinout sanační hmoty s vlastnostmi odpovídajícími příslušným normám. Lze konstatovat, že byla úspěšně odzkoušena nová technologie pro zjišťování vnitřních poruch kotvených ocelových prvků a sanovaných částí betonových prvků pomocí CT Tomografie.
- Z ekonomického hlediska se vyvinuté sanační, především kotvicí, hmoty jeví jako velice výhodné, protože bylo použito velké množství druhotných surovin, které nahradily značnou část pojivové složky na bázi epoxidové pryskyřice, která je nejdražší položkou celé hmoty. Bylo zjištěno, že jako nejvhodnější plnivo do polymerních sanačních hmot se jeví denitrifikovaný elektrárenský popílek, protože tato druhotná surovina je z důvodu kontaminace NH_3 ionty pořizována pouze za transportní náklady a nemusí se dále upravovat. Lze ji hned použít pro přípravu polymerních sanačních hmot na epoxidové bázi. Naproti tomu při použití odpadního skla a odpadní slévárenské strusky je nutné tyto materiály nejprve podrtit, odstranit nečistoty, pomlít a roztřídit na požadovanou frakci. Po těchto technologických operacích je následně možné takto připravené plnivo použít pro výrobu kotvicích hmot. Použití takto upraveného odpadního skla do

nízkoviskózní epoxidové pryskyřice umožňuje zakomponovat větší množství tohoto plniva (až 70 %) než popílků (až 50 %), ale vzhledem ke skutečnosti, že příprava plniva z obalového skla je podstatně nákladnější, tak je kontaminovaný popílek z ekonomického hlediska nejvhodnějším plnivem. 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. Hmoty s popílkem vychází o něco levněji (8 EUR/kg), protože jsou zde eliminovány náklady na předúpravu plniva. Pokud by tedy producenti sanačních hmot na polymerní bázi začali využívat navrhované druhotné suroviny, mělo by to za následek znatelně pozitivní dopady na výsledný zisk společnosti.

- 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. V praxi se však s ohledem na výsledky ekotoxikologických testů nedoporučuje tuto hmotu využívat v hygienicky čistých provozech, a v místech se zvýšeným chemickým namáháním, aby nedošlo k otevření vnitřní struktury hmoty.
- 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.

8. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] PCA Portland Cement Association. CONCRETE Information. Types and Causes of Concrete Deterioration. In: *cement.org* [online]. Portland Cement Association, © 2002 [cit. 5.2.2018]. Dostupné z: http://www.cement.org/docs/default-source/fc_concrete_technology/durability/is536-types-and-causes-of-concrete-deterioration.pdf?sfvrsn=4.
- [2] HARTT, H. William. New methodology predicts onset, progression of corrosion of reinforced concrete. In: *nace.org* [online]. 25.2.2014 [cit. 5.2.2018]. Dostupné z: <https://www.nace.org/Newsroom/Press-Releases/New-methodology-predicts-onset,-progression-of-corrosion-of-reinforced-concrete/>.
- [3] Conjet. Concrete damages. In: *conjet.com* [online]. [cit. 5.2.2018]. Dostupné z: <http://conjet.com/method/damages/>. Path: methods; damages.
- [4] Cheng-Feng Chang and Jing-Wen Chen. The experimental investigation of concrete carbonation depth. *Cement and Concrete Research* [online]. Elsevier. 13 July 2004, 36, 1760–1767 [cit. 5.2.2018]. ISSN 00088846. Dostupné prostřednictvím Science Direct z: 10.1016/j.cemconres.2004.07.025
- [5] Xypex. The Structures – The Problems. In: *xypex.com* [online]. [cit. 5.2.2018]. Dostupné z: <http://www.xypex.com/projects/bridges/why-xypex/the-structures---the-problems>. Path: Bridges; Why Xypex.
- [6] STEVEN, J. Susca, PE. Concrete Solutions to Concrete Rehabilitation. *Hoffmann Architects* [online]. Journal of architectural technology published by Hoffmann Architects, Inc. 2/2016. [cit. 5.2.2018]. Dostupné z: <http://www.hoffarch.com/assets/Journal24.pdf>.
- [7] 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. Dostupné prostřednictvím Science Direct z: [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00022-2).
- [8] ALMUSALLAM, A.A., KHAN, F.M., DULAIJAN, S.U., O.S.B. Al-Amoudi. Effectiveness of surface coatings in improving concrete durability. *Cement and Concrete Composites* [online]. Elsevier. May–July 2003, 25 (4-5), 473–481 [cit. 5.2.2018]. ISSN 0958-9465. Dostupné prostřednictvím Science Direct z: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00087-2](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00087-2).
- [9] BONIĆ, Zoran, ĆURČIĆ, Gordana Topličić, TRIVUNIĆ, Milan, DAVIDOVOĆ, Nebojša, VATIN, Nikolai. Some Methods of Protection Concrete and Reinforcement of Reinforced-Concrete Foundations exposed to Environmental Impacts. *Procedia Engineering* [online]. Elsevier. 3 September 2015, 117, 419–430 [cit. 5.3.2018]. ISSN 1877-7058. Dostupné prostřednictvím Science Direct z: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.189>.
- [10] DROCHYTKA, Rostislav, DOHNÁLEK, Jiří, BYDŽOVSKÝ, Jiří, PUMPR, Václav, DUFKA, Ámos, DOHNÁLEK, Pavel. *Technické podmínky pro sanace betonových konstrukcí (TP SSBK III)*. Brno: Sdružení pro sanace betonových konstrukcí, 2012. ISBN 978-80-260-2210-7.
- [11] DOHNÁLEK, Jiří, BILČÍK, Juraj. *Sanace betonových konstrukcí*. JAGA group, 2003. ISBN 80-88905-24-9.
- [12] AL-ZAHRANI, M.M., MASLEHUDDIN, M., AL-DULAIJAN, S.U., IBRAHIM, M. Mechanical properties and durability characteristics of polymer- and cement-based repair materials.

- Cement & Concrete Composites* [online]. Elsevier. 22 October 2002, 25(4-5), 527–537 [cit. 5.3.2018]. ISSN 0958-9465. Dostupné prostřednictvím Science Direct z: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00092-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00092-6).
- [13] FOWLER, D.W. Polymers in concrete: a vision for the 21st century. *Cement & Concrete Composites* [online]. Elsevier. 2 February 2000, 21(5-6), 449–452 [cit. 5.3.2018]. ISSN 0958-9465. Dostupné prostřednictvím Science Direct z: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(99\)00032-3](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(99)00032-3).
- [14] Flexcrete. Concrete Reinstatement of Bridge Joint Nosings. In: *flexcrete.com* [online]. [cit. 5.3.2018]. Dostupné z: <https://flexcrete.com/concrete-reinstatement-bridge-joint-nosings/>.
- [15] AllGarageFloors. How to easily repair your pitted and spalled concrete. In: *allgaragefloors.com* [online]. © 2018 [cit. 5.3.2018]. Dostupné z: <http://allgaragefloors.com/repair-pitted-and-spalled-concrete/>.
- [16] SILNICE ŽELEZNICE. Systémy zálivek a kotvení podle EN 1504-3 a EN 1504-6, teorie a praxe. In: *silnice-zeleznice.cz* [online]. 8.8.2012 [cit. 5.3.2018]. Dostupné z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/systemy-zalivek-a-kotveni-podle-en-1504-3-a-en-1504-6-teorie-a-praxe/>.
- [17] indiamart. Cement Grout in Ahmedabad. In: *dir.indiamart.com* [online]. [cit. 5.3.2018]. Dostupné z: <https://dir.indiamart.com/ahmedabad/cement-grout.html>. Path: Ahmedabad; Cement Grout in Ahmedabad.
- [18] SPUTNIKCITY.CLUB. Repair Cracks in Concrete Walls, Floors, and Driveways repair of cracks in concrete. In: *sputnikcity.club* [online]. 2018 [cit. 5.3.2018]. Dostupné z: <http://sputnikcity.club/post/repair-of-cracks-in-concrete>.
- [19] GOOD USE HARDWARE CO., LTD. GU FIXINGS. Adhesive chemical anchor bolt, concrete epoxy resin, fasteners glue. In: *gooduse.en.taiwantrade.com* [online]. © 2002-2018 [cit. 5.3.2018]. Dostupné z: <https://gooduse.en.taiwantrade.com/product/adhesive-chemical-anchor-bolt-concrete-epoxy-resin-fasteners-glue-530260.html>.
- [20] FIXINGS North West. Anchor Rods. In: *fixingsnw.co.uk* [online]. [cit. 5.3.2018]. Dostupné z: <http://fixingsnw.co.uk/products/chemical-anchors/anchor-rods>. Path: Products; Chemical Anchors; Anchor Rods; Resin.
- [21] Vruty Fisher. Chemické kotvy. In: *vruty-fisher.cz* [online]. © 2016 [cit. 5.3.2018]. Dostupné z: <https://vruty-fischer.cz/stavebni-chemie/chemicke-kotvy/>. Path: Stavební chemie; Chemické kotvy.
- [22] HRUBÝ, Marcel. Chemická kotva funguje v jakémkoliv materiálu. *Konstrukce*. Odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství [online]. Ostrava: KONSTRUKCE Media, s.r.o., 24. 11. 2011 [cit. 5.3. 2018]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/chemicka-kotva-funguje-v-jakemkoliv-stavebnim-materialu/>.
- [23] 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. Dostupné prostřednictvím Science Direct z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.032>.

- [24] Diprotec, PRODUTOS TÉCNICOS PARA CONSTRUÇÃO. Chumbadores Químicos. In: *diprotec.com.br* [online]. [cit. 5.3.2018]. Dostupné z: <http://www.diprotec.com.br/produto/chumbadores-quimicos/>.
- [25] MAPEI. Mapefix VE SF – Chemical styrene-free vinylester anchor for structural loads and construction bars in concrete .In: *mapei.com* [online]. [cit. 5.3.2018]. Dostupné z: http://www.mapei.com/public/COM/products/5802_mapefixvesf_gb.pdf.
- [26] MAPEI. Selection chart of products for chemical anchors. In: *mapei.com* [online]. [cit. 5.3.2018]. Dostupné z: http://www.mapei.com/public/AE/linedocument/Sinottico_Mapefix_10-2014_gb.pdf.
- [27] FASTFIX, CHEMICAL ANCHOR EXPERT. FastFix Product HP380. In: *fastfix-it.com* [online]. [cit. 5.3.2018]. Dostupné z: <https://www.fastfix-it.com/hp380>.
- [28] chemfix TOTAL SERVICE. Chemical Anchor. In: *chemfix.co.uk* [online]. [cit. 5.3.2018]. Dostupné z: <http://www.chemfix.co.uk/products/chemical-anchoring/chemical-anchor/>.
- [29] Good Use Hardware Co., Ltd. CHEMICAL FIXING SYSTEM. Perforated sleeve for concrete and solid brick. In: *gooduse.com.tw* [online]. [cit. 5.3.2018]. Dostupné z: https://www.gooduse.com.tw/en/product/nylon_sleeve_002.html.
- [30] 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. Dostupné prostřednictvím Science Direct z: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.547>.
- [31] ČSN EN 1504-6. Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Definice, požadavky, kontrola kvality a hodnocení shody – Část 6: Kotvení výztužných ocelových prutů. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [32] DROCHYTKA, Rostislav. Plastické látky, Studijní opory VUT FAST THD. 2007.
- [33] KATEDRA CHEMIE, PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA, Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem. EPOXIDY. In: *chemistry.ujep.cz* [online]. [cit. 5.3.2018]. Dostupné z: <http://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/EPOXIDY.pdf>.
- [34] DUCHÁČEK, Vratislav. *POLYMERY – výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2.vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006, 280 s. ISBN 80-7080-617-6.
- [35] Univerzita Pardubice, Ústav polymerních materiálů, Oddělení nátěrových hmot a organických povlaků. *Sborník příspěvků 34*. Mezinárodní konference o nátěrových hmotách. Seč, 2003, s. 233–240.
- [36] MLEZIVA, Josef. *Výroba polymerů*. Studijní opory VŠCHT Pardubice, 1990.
- [37] Powerblanket. How Epoxy Cures. In: *powerblanket.com* [online]. [cit. 5.3.2018]. Dostupné z: <http://www.powerblanket.com/wp-content/uploads/2013/03/Curing-Epoxy.png>.
- [38] MAITY, Biswajit. EPOXY. In: *slideshare.net* [online]. CIPET-AHMEDABAD (INDIA):2014. [cit. 5.3.2018]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/biswajitmaity5895/epoxy-resin-presented-by-biswajit-maity-39419288>.
- [39] ZHANG, Kaomin, GU, Yizhuo, LI, Min, ZHANG, Zuoguang. Effect of rapid curing process on the properties of carbon fiber/epoxy composite fabricated using vacuum assisted resin infusion molding. *Materials & Design* [online]. Elsevier. 2 September 2013, 54, 624–631 [cit.

- 5.3.2018]. ISSN 0261-3069. Dostupné prostřednictvím Science Direct z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.08.065>.
- [40] ZHOU, Jiming, LUCAS, James P. Hygrothermal effects of epoxy resin. Part II: variations of glass transition temperature. *Polymer* [online]. Elsevier. 17 June 1999, 40 (20), 5513–5522 [cit. 5.3.2018]. ISSN 0032-3861. Dostupné prostřednictvím Science Direct z: [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(98\)00791-5](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(98)00791-5).
- [41] Resin Designs. CHASE We make a material difference. The Importance of Epoxy Glass Transition Temperature. In: *resindesigns.com* [online]. 10 May 2016. [cit. 5.3.2018]. Dostupné z: <http://resindesigns.com/2016/05/10/the-importance-of-epoxy-glass-transition-temperature/>.
- [42] Epoxy Technology Inc. TechTip 23. Tg – Glass Transition Temperature for Epoxies. In: *epotek.com* [online]. 2012. [cit. 5.3.2018]. Dostupné z: <http://www.epotek.com/site/files/Techtips/pdfs/tip23.pdf>.
- [43] HUNTSMAN. Enriching lives through innovation. Advanced Materials, Waterborne Epoxy Systems for Coatings, Selector Guide. In: *huntsman.com* [online]. © 2011 [cit. 5.4.2018]. Dostupné z: http://www.huntsman.com/advanced_materials/Media%20Library/global/files/US%20Waterborne%20Systems%20Selector%20Guide.pdf.
- [44] KATEDRA CHEMIE, PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA, Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem. POLYESTERY. In: *chemistry.ujep.cz* [online]. [cit. 5.4.2018]. Dostupné z: <http://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/POLYESTERY.pdf>
- [45] ORAK, Sezan. Investigation of vibration damping on polymer concrete with polyester resin. *Cement and Concrete Research* [online]. Elsevier. 27 March 200, 30 (2), 171–174 [cit. 5.4.2018]. ISSN 0008-8846. Dostupné prostřednictvím Science Direct z: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00225-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00225-2).
- [46] ENGINEERING 360 Powered by IEEE GlobalSpec. 2.2: POLYESTERS. In: *globalspec.com* [online]. © 2018 [cit. 5.4.2018]. Dostupné z: <https://www.globalspec.com/reference/82247/203279/2-2-polyesters>.
- [47] ThoughtCo. Vinyl Ester vs. Polyester Resins. In: *thought.com* [online]. 9 April 2017 [cit. 5.4.2018]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/vinyl-ester-vs-polyester-resins-820376>.
- [48] COMPOSITE RESIN DEVELOPMENTS. Epoxy Resin vs Vinylester vs Polyester, Use and Application Overview. In: *compresdev.co.uk* [online]. July 2004 [cit. 5.4.2018]. Dostupné z: <https://www.compresdev.co.uk/CRD%20The%20Use%20and%20Application%20of%20Epoxy%20Resin%20vs%20Vinylester%20vs%20Polyester.pdf>.
- [49] HUSIĆ, Suhreta, JAVNI, Ivan, PETROVIĆ, Zoran, S. Thermal and mechanical properties of glass reinforced soy-based polyurethane composites. *Composites Science and Technology* [online]. Elsevier. 15 September 2004, 65 (1), 19–25 [cit. 5.4.2018]. ISSN 0266-3538. Dostupné prostřednictvím Science Direct z: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.05.020>.

- [50] KK stav concrete s.r.o. Polyuretanové podlahy. In: *kkstav.cz* [online]. © 2012 [cit. 5.4.2018]. Dostupné z: <http://www.kkstav.cz/cz/nabidka-sluzeb/pryskyricne-podlahy-a-povrchy/polyuretanove-podlahy>.
- [51] HAVEL composites. EPOXIDY, POLYESTERY, TUŽIDLA A GELCOATY. In: *havel-composites.com* [online]. © 2010 [cit. 5.4.2018]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/>.
- [52] SIKA. Technický list výrobku Icosit KC 330/10. In: *cze.sika.com* [online]. 25.6. 2012 [cit. 5.4.2018]. Dostupné z: https://cze.sika.com/cs/produkty_a_reseni/dokumentace/PDS/PDS_G_Icosit.html.
- [53] CJGEO. POLYURETHANE GROUTING. In: *cjgeo.com* [online]. [cit. 5.4.2018]. Dostupné z: <http://cjgeo.com/polyurethane-grouting/>.
- [54] PlantServices. Methyl methacrylate-based acrylics are best known for their rapid cure and extreme versatility. In: *plantservices.com* [online]. [cit. 5.4.2018]. Dostupné z: <https://www.plantservices.com/articles/2002/352/>.
- [55] TRANSPO INDUSTRIES, INC. Repair/Patch. T-17 Methyl Methacrylate Polymer Concrete Patching Material. In: *transpo.com* [online]. [cit. 5.4.2018]. Dostupné z: <https://www.transpo.com/roads-highways/materials/repair-patch>.
- [56] POLYMER & FILLERS. Chapter 1 – Introduction (Fillers). In: *polymer-filler.blogspot.com* [online]. © 2008 [cit. 5.4.2018]. Dostupné z: <http://polymer-filler.blogspot.cz/2008/08/chapter-1-introduction-fillers.htm>.
- [57] LEARNCOATINGS. Five ways quartz sand is used in epoxy floors. In: *learncoatings.com* [online]. September 9, 2015 [cit. 5.4.2018]. Dostupné z: <http://learncoatings.com/wordpress/how-is-quartz-sand-used-in-epoxy-floors/>.
- [58] PermaFloor. PermaFloor Project Showcase. In: *permaflood.com* [online]. [cit. 5.4.2018]. Dostupné z: <http://www.permaflood.com/showcase/avantor-gallery/avantor.html>.
- [59] BEDI, Raman, CHANDRA, Rakesh, SINGH, S.P. Mechanical Properties of Polymer Concrete. *Journal of Composites* [online]. Hindawi. 6 November 2013, 2013, 12 pages [cit. 5.4.2018]. Dostupné prostřednictvím hindawi z: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/948745>.
- [60] GHORBANI, Siamak, CRISOSTOMO, Alejandro, V.A., ROGOV, Vladimir Aleksandrovich, POLUSHIN, Nikolay Ivanovich. Experimental and theoretical research on drilling epoxy granite using coated and uncoated carbide spiral drill bits. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. Elsevier. 21 November 2017, 135 (2018), 240–252 [cit. 5.4.2018]. ISSN 0020-7403. Dostupné prostřednictvím Science Direct z: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.11.025>.
- [61] SKLENÁŘOVÁ, Radka. Studium využitelnosti popílků z procesu denitrifikace spali. Brno, 2016. 74 stran, Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=134981.
- [62] BAUER, Lukáš. Na Zemi dochází základní stavební materiál – písek. Vědci varují před celosvětovým kolapsem. VĚDA A TECHNIKA. In: *denikplus.cz* [online]. 11.10.2017 [cit. 5.4.2018]. Dostupné z: <http://technika.denikplus.cz/703-na-zemi-dochazi-zakladni-stavebni-material-pisek-vedci-varuji-pred-celosvetovym-kolapsem.html>.

- [63] CEMEX, VUT Brno. Cemex a VUT v Brně spolupracují na výzkumu využití fluidních popílků ve stavebnictví. Firemní prezentace. *BETON TKS* [online]. 2013, 6, 11–12 [cit. 5.4.2018]. ISSN 1213-3116. Dostupné z: <http://www.betontks.cz/sites/default/files/2013-6-11.pdf>.
- [64] PRINYA, Chindaprasirt, RATTANASAK, Ubolluk. Utilization of blended fluidized bed combustion (FBC) ash and pulverized coal combustion (PCC) fly ash in geopolymer. *Waste Management* [online]. Elsevier. 23 October 2009, 30(4) (2010), 667–672 [cit. 5.4.2018]. ISSN 0956-053X. Dostupné prostřednictvím Science Direct z: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.040>.
- [65] 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. Dostupné prostřednictvím Asce Library z: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2004\)16:1\(15\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:1(15)).
- [66] KIM, Jang-Ho Jay, YOU, Young-Jun. Stable Failure-Inducing Micro-Silica Aqua Epoxy Bonding Material for Floating Concrete Module Connection. *Polymers* [online]. 24 November 2015, 7(11) (2015), 2389–2409 [cit. 5.4.2018]. ISSN 2073-4360. Dostupné prostřednictvím mdpi z: [10.3390/polym7111520](http://dx.doi.org/10.3390/polym7111520).
- [67] PIŠTĚKOVÁ, Marie, OTRUBA, Vítězslav, KANICKÝ, Viktor. Analýza vysokopecních strusek optickou emisní spektrometrií s indukčně vázaným plazmatem s laserovou ablací. *Chem. Listy* [online]. 6 Listopad 2009, 104 (2010), 697–703 [cit. 5.4.2018]. ISSN 1213-7103. Dostupné prostřednictvím chemicke-listy z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2010_07_697-703.pdf.
- [68] KIM, Hwang-Hee, PARK, Chan-Gi. Plant Growth and Water Purification of Porous Vegetation Concrete Formed of Blast Furnace Slag, Natural Jute Fiber and Styrene Butadiene Latex. *Sustainability* [online]. 20 April 2016, 8(4) (2016), 386 [cit. 5.4.2018]. ISSN 2071-1050. Dostupné prostřednictvím mdpi z: [10.3390/su8040386](http://dx.doi.org/10.3390/su8040386).
- [69] DVIR, Heim. Polymer – Filler and Filler – Filler Interactions in Polymeric Composite Materials [online]. Ben-Gurion University of the Negev, 2006 [cit. 5. 6. 2018]. Dostupné z: <http://aranne5.lib.ad.bgu.ac.il/others/DvirHaim.pdf>.
- [70] BAČÁKOVÁ, Marie, 2008. Právní předpisy ČR pro stavební výrobky. *Portál českého stavebnictví*. [online]. Říjen 2008 [cit. 5. 6. 2018]. Dostupné prostřednictvím ceskestavebnictvi z: <http://www.ceskestavebnictvi.cz/rubrika.html?k=13&l=2.5.6>.
- [71] ŤAŽKÝ, Martin, HELA, Rudolf. Působí snižování emisních limitů na kvalitu popílků a jejich využití? *Průmyslová ekologie* [online]. 29 Květen 2017 [cit. 5. 6. 2018]. Dostupné prostřednictvím prumyslovaekologie z: <http://www.prumyslovaekologie.cz/Dokument/102300/pusobi-snizovani-emisnich-limitu-na-kvalitu-popilku-a-jejich-vyuziti.aspx>.
- [72] ŠIMEK, Michal, GRÜNVALDOVÁ, Veronika, KRATOCHVÍL, Bohumil. Současné metody měření velikosti částic farmaceutických látek a jejich omezení. *Chem. Listy* [online]. 2 Listopad 2013, 108 (2014), 50-55 [cit. 5. 6. 2018]. ISSN 1213–7103. Dostupné prostřednictvím chemicke-listy z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2014_01_50-55.pdf.
- [73] RAWLE, Alan, KIPPAX, Paul. Setting New Standards for Laser Diffraction Particle Size Analysis. *American Laboratory* [online]. 7 Leden 2010 [cit. 5. 6. 2018]. ISSN 0044-7749.

- Dostupné prostřednictvím americanlaboratory z:
<http://www.americanlaboratory.com/913-Technical-Articles/606-Setting-New-Standards-for-Laser-Diffraction-Particle-Size-Analysis/>.
- [74] Micromeritics Instrument Corporation. The AccuPyc II 1340 gas displacement pycnometry system. *Micromeritics* [online]. ©2018 [cit. 5. 6. 2018]. Dostupné prostřednictvím gmkakiest z: http://www.gmkakiest.com/userfiles/Product/PDF/AccuPyc_II_1340.pdf.
- [75] Tescan. Mira3. *Tescan* [online]. ©2018 [cit. 5. 6. 2018]. Dostupné prostřednictvím tescan z: <https://www.tescan.com/en-us/technology/sem/mira3>
- [76] Gemeasurement. Phoenix v | tome | x m-k versatile industrial CT Scanner for fully automated industrial computed tomography. *Gemeasurement* [online]. ©2018 [cit. 5. 6. 2018]. Dostupné prostřednictvím gemeasurement z: <https://www.gemeasurement.com/inspection-ndt/radiography-and-computed-tomography/phoenix-vtomex-m>.
- [77] REPKA, Martin. Nové trendy v Ramanově spektrometrii. *Chempoint* [online]. 14 Prosinec 2011 [cit. 5. 6. 2018]. Dostupné prostřednictvím chempoint z: <http://www.chempoint.cz/nove-trendy-v-ramanove-spektrometrii>.
- [78] Vyhláška č.294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady. In: *Sbírka zákonů*. 11.7. 2005.
- [79] Chejn. Směsi křemičitých písků ISG. Technický list. In: *chejn.cz* [online]. [cit. 5. 6. 2018]. Dostupné z: http://www.chejn.cz/pdf/2_isg.pdf
- [80] Autosklo servis Praha. Výroba a recyklace autoskla. *Autosklo-autoskla* [online]. © 2018 [cit. 5. 6. 2018]. Dostupné prostřednictvím autosklo-autoskla z: <http://www.autosklo-autoskla.cz/o-autosklech/vyroba-a-recyklace-autoskla/>
- [81] Třídění opadu. Sklo. *Třídění opadu* [online]. © 2007–2018 [cit. 5. 6. 2018]. Dostupné prostřednictvím trideniodpadu z: <https://www.trideniodpadu.cz/sklo>.
- [82] BECHNÍK, Bronislav, PORUBA, Aleš. Recyklace fotovoltaických panelů na konci životnosti. *TZB-info* [online]. 26 Září 2011 [cit. 5. 6. 2018]. ISSN 1801-4399. Dostupné prostřednictvím oze.tzb-info z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/7868-recyklace-fotovoltaickych-panelu-na-konci-zivotnosti>.
- [83] ARULRAJAH, Arul, YAGHOUBI, Ehsan, IMTEAZ, Monzur, HORPIBULSUK, Suksun. Recycled waste foundry sand as a sustainable subgrade fill and pipe-bedding construction material: Engineering and environmental evaluation. *Sustainable Cities and Society* [online]. Elsevier. 21 October 2016, 28 (2017), 343–349 [cit. 5. 6. 2018]. ISSN 2210-6707. Dostupné prostřednictvím Science Direct z: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.10.009>.
- [84] JANOUŠEK, Radek. Formovací směsi ze sléváren. *Odpady online* [online]. 22 Srpen 2001 [cit. 5. 6. 2018]. Dostupné prostřednictvím odpady-online z: <http://odpady-online.cz/formovaci-smesi-ze-slevaren/>.
- [85] Enviroportál, informačný portál rezortu MŽP SR. Oznámenie o zmene navrhovanej činnosti kuplová pec. *enviroportal* [online]. © 2004–2018 [cit. 5. 6. 2018]. Dostupné z: <https://www.enviroportal.sk/eia/dokument/255422>.

- [86] KOŠÁRKOVÁ, Markéta. Galvanovny se snaží recyklovat maximum svých odpadů. *Odpady online* [online]. 9 Červenec 2010 [cit. 5. 6. 2018]. Dostupné prostřednictvím odpady-online z: <http://odpady-online.cz/galvanovny-se-snazi-recyklovat-maximum-svych-odpadu/>.
- [87] GOLESTANEH, M., AMINI, G., NAJAFPOUR, G.D., BEYGI, M.A. Evaluation of Mechanical Strength of Epoxy Polymer Concrete with Silica Powder as Filler. *World Applied Sciences Journal* [online]. Leden 2010, 9(2) (2010), 216-220. [cit. 5. 6. 2018]. ISSN 1818-4952. Dostupné prostřednictvím researchgate z: https://www.researchgate.net/profile/Ghasem_Najafpour/publication/228750007_Evaluation_of_Mechanical_Strength_of_Epoxy_Polymer_Concrete_with_Silica_Powder_as_Filler/links/09e415141ef7aa5f96000000.pdf.
- [88] 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 Červenec 2003, 26(7) (2004), 803–809. [cit. 5. 6. 2018]. ISSN 0020-0190. Dostupné prostřednictvím ac.els-cdn z: https://ac.els-cdn.com/S0958946503001628/1-s2.0-S0958946503001628-main.pdf?tid=877c93a0-1262-11e8-8f5b-00000aab0f27&acdnat=1518707682_6d51c33f6ad7c6757f0b452be61c885d.
- [89] VIPULANANDAN, C. AND DHARMARAJAN, N. Flexural behavior of polyester polymer concrete. *Cement and Concrete Research*. Elsevier [online]. 12 February, 17(2) (1987), 219–230. [cit. 5. 6. 2018]. ISSN 0008-8846. Dostupné prostřednictvím Science Direct z: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(87\)90105-0](https://doi.org/10.1016/0008-8846(87)90105-0)
- [90] REBEIZ, K.S., SERHAL, S.P., CRAFT, A.P. Properties of polymer concrete using fly ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*. ASCE LIBRARY [online]. 16 January 2016, 16(1) (2004), 15–19. [cit. 5. 7. 2018]. ISSN 0899-1561. Dostupné prostřednictvím ASCE LIBRARY z: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2004\)16:1\(15\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:1(15))
- [91] ZHOU, Jiming, LUCAS, James P., Hygrothermal effects of epoxy resin. Part II: variations of glass transition temperature, *Polymer*. Elsevier [online]. 3 Listopad 1998, 40(20) (1999), 5513–5522. [cit. 5. 6. 2018] ISSN 0020-0190. Dostupné prostřednictvím sciencedirect z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386198007915>.
- [92] PINGSHENG, H., ZHIQIANG, Z., CAIYUAN, P., RENJIE, W. An epoxy resin copolymer with zero shrinkage, *Journal of Materials Science*. SpringerLink [online]. 9 Září 1988, 24(5) (1989), 1528–1532. [cit. 5. 6. 2018] ISSN 1573-4803. Dostupné prostřednictvím link.springer z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2FBF01105666.pdf>.
- [93] MARTÍNEZ-BARRERA G., BROSTOW W. Effect of marble particle size and gamma irradiation on mechanical properties of polymer concrete. *e-Polymers*. [online] 01 July 2010, 10(1), 061 (2010). [cit. 8. 7. 2018] ISSN 2197-4586. Dostupné prostřednictvím degruyter z: <https://doi.org/10.1515/epoly.2010.10.1.663>
- [94] UYGUNOGLU, Tayfun, GUNES, Ibrahim, BROSTOW, Witold. Physical and Mechanical Properties of Polymer Composites with High Content of Wastes Including Boron, *Scielo* [online]. 18 Říjen 2015, 18(6) (2015). [cit. 5. 6. 2018] ISSN 1980-5373. Dostupné prostřednictvím scielo: <http://dx.doi.org/10.1590/1516-1439.009815>.
- [95] KALENDA, Petr, KALENDOVÁ, Andrea. Improved chemical resistance of epoxy resin-based coating compositions, *Dyes and pigments*, Elsevier [online]. 10 Listopad 1994, 27(4) (1995), 305–312.

- [cit. 5. 6. 2018] ISSN 0020-0190. Dostupné prostřednictvím ac.els-cnd z: https://ac.els-cdn.com/014372089400070I/1-s2.0-014372089400070I-main.pdf?_tid=2675139f-c553-4492-8eb5-bf6847a9cd86&acdnat=1521833657_d687ab212ae00b7f8b634df480f5b159.
- [96] YASMIN, Asma, ISAAC, M. Daniel. Mechanical and thermal properties of graphite platelet/epoxy composites, *Polymer, Elsevier* [online]. 21 Zář 2004, 45(24) (2004), 8211–8219. [cit. 5. 6. 2018] ISSN 0020-0190. Dostupné prostřednictvím Science Direct z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386104009279>.
- [97] KRATINA, Jakub. Lineární teplotní roztažnost materiálů. *E.konstrukter* [online]. 7 Duben 2013 [cit. 5. 6. 2018]. Dostupné prostřednictvím e-konstrukter z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/linearni-teplotni-roztaznost-mateialu>.
- [98] Teplárny Brno. Historie teplot v Brně. *Teplárny Brno* [online]. © 2014–2016. [cit. 5. 6. 2018]. Dostupné prostřednictvím teplarny z: <https://www.teplarny.cz/mapa-venkovnich-teplot/?rok=201698>.
- [99] 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. Dostupné prostřednictvím ndeint z: 10.1016/j.ndeint.2016.11.005.
- [100] STOKLASA, Karel. Skripta makromolekulární chemie I. *Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně* [online]. 2005. [cit. 5. 6. 2018]. Dostupné prostřednictvím nanoed z: https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/939/mod_resource/content/2/Skripta_MMCH_I.pdf.
- [120] Coming Plus a.s. Zkušební přístroj Tensograf TGF 02. In: vyvoj.coming.cz [online]. ©2009. [cit. 5. 6. 2018] Dostupné z: <http://vyvoj.coming.cz/zkusebni-pristroj-tensograf-tgf-02>.
- [121] DOHNÁLKOVÁ, Božena, DROCHYTKA, Rostislav, HODUL, Jakub. New possibilities of neutralisation sludge solidification technology. *Journal of Cleaner Production* [online]. Elsevier. 10 August 2018, 204, 1097–1107 [cit. 14. 9. 2018]. ISSN 0959-6526. Dostupné prostřednictvím Science Direct z: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.095>

9. SEZNAM CITOVANÝCH NOREM

- [101] ISO 7150-1. *Water quality – Determination of ammonium – Part 1 : Manual spectrometric method*. 1984.
- [102] ČSN EN ISO 2811-1. *Nátěrové hmoty – Stanovení hustoty – Pyknometrická metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [103] ČSN EN ISO 2431. *Nátěrové hmoty – Stanovení výtokové doby výtokovými pohárky pomocí Fordova výtokového pohárku*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [104] ČSN EN 1015-3. *Zkušební metody malt pro zdivo – Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [105] ČSN EN ISO 845. *Lehčené plasty a pryže – Stanovení objemové hmotnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [106] ČSN EN ISO 13892-2. *Zkušební metody potěrových materiálů – Část 2: Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [107] ČSN EN 1542. *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [108] ČSN EN ISO 527-1. *Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 1: Obecné principy*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [109] ČSN EN ISO 527-2. *Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [110] ČSN EN ISO 868. *Plasty a ebonit – Stanovení tvrdosti vtlačováním hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore)*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [111] ČSN EN ISO 6272-1. *Nátěrové hmoty – Zkoušky rychlou deformací (odolnost proti úderu) – Část 1: Zkouška padajícím závažím, velká plocha úderníku*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [112] ČSN EN 1881. *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Zkoušení výrobků pro kotvení vytrhávací zkouškou*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [113] ČSN EN 1504-2. *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Definice, požadavky, kontrola kvality a hodnocení shody – Část 2: Systémy ochrany povrchu betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2006.

10. SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

AS – Odpadní autosklo

ASTM – American Society for Testing and Materials

BTEX – Benzen, toluen, etylbenze, xyleny

CT – Výpočtová tomografie (Computed Tomography)

DMA – Dynamická mechanická analýza

DOC – rozpuštěný organický uhlík (Dissolved organic carbon)

DSC – Diferenční kompenzační kalorimetrie (Differential scanning calorimetry)

EDX – Energiově-disperzní analýza (Energy Dispersive X-Ray Analysis)

E_{dyn} – dynamický podul pružnosti v tahu a v tlaku

EKO-X – ekologická správková hmota s obsahem upraveného nebezpečného odpadu

EP – Epoxidová pryskyřice

EPA – Agentura pro ochranu životného prostředí (Environmental Protection Agency)

EP-S – polymerní správková hmota na epoxidové bázi

EP-Z – polymerní záливková hmota na epoxidové bázi

EP-K – polymerní kotvící hmota na epoxidové bázi

FEVE – Evropská federace výrobců skla (European Federation of glass packaging and glass tableware makers)

FP-KLAD – Fluidní popílek z tepelné elektrárny Kladno

FTIR – Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací (Fourier Transform Infrared)

FV – fotovoltaické panely

f_h – soudržnost s betonovým podkladem v [MPa]

KP-TŘ – Klasický (vysokoteplotní) filtrový popílek z tepelné elektrárny Třebovice

KP-NOV – Klasický (vysokoteplotní) filtrový popílek z tepelné elektrárny Nováky

KP-OPAT – Klasický (vysokoteplotní) filtrový popílek z tepelné elektrárny Opatovice

MMA – Methylmetakryláty

NK – Neutralizační kal

NO – Nebezpečný odpad

OH – Objemová hmotnost

OIDM – Odpad z výroby izolačních desek z minerální vlny

- REF – referenční plnivo (referenční hmota)
- UP – Nenasycená polyesterová pryskyřice (Unsaturated polyester resin)
- VES – Vinylesterová pryskyřice
- OS – Odpadní obalové sklo
- PAU – Polycyklické aromatické uhlovodíky
- PC – polymerbeton (Polymer Concrete)
- PCB – Polychlorované bifenoly
- PM – Polymermalta (Polymer Mortar)
- PU – Polyuretany
- REF – Referenční hmota obsahující jako plnivo křemičitý písek
- SEM – Skenovací elektronový mikroskop
- SCR – Selektivní katalytická redukce (Selective Non-Catalytic Reduction)
- SNCR – Selektivní nekatalytická redukce (Selective Catalytic Reduction)
- SP – Odpadní slévárenský písek
- RL – Rozpuštěné látky
- R_c – Pevnost v tlaku v [MPa]
- R_f – Pevnost v tahu za ohybu v [MPa]
- SS – Odpadní slévárenská struska
- T_g – Teplota skelného přechodu (Glass transition temperature)
- UP – Nenasycená polyesterová pryskyřice (Unsaturated Polyester Resin)
- UZ – Ultrazvuk
- VE – Vyinylesterové pryskyřice
- VOC – Těkavé organické látky (Volatile Organic Compounds)
- α – Součinitel délkové teplotní roztažnosti v [K^{-1}]
- ϵ_b – Poměrné prodloužení při přetržení v [%]
- σ_b – Maximální pevnost v tahu při přetržení v [MPa]

11. SEZNAM OBRÁZKŮ

| | | |
|----------|---|----|
| Obr. 1: | <i>Koroze výztužné oceli – nejběžnější příčina degradace betonu [1].....</i> | 14 |
| Obr. 2: | <i>Objemové změny korodující oceli vytvářející tahové napětí v betonu, které zapříčiňuje poruchy následné betonu [1].....</i> | 14 |
| Obr. 3: | <i>Pilíře mostu poškozené korozí výztužné oceli vlivem působení chloridů z mořské vody [2]15</i> | |
| Obr. 4: | <i>Pilíře mostu poškozené korozí výztužné oceli vlivem působení chloridů z mořské vody [3]15</i> | |
| Obr. 5: | <i>Degradace betonu s malou tloušťkou krytí způsobena převážně vlivem karbonatce [1].</i> | 16 |
| Obr. 6: | <i>Vymezení zkarbonatované oblasti betonu pomocí FF testu [5].....</i> | 16 |
| Obr. 7: | <i>Odlupování povrchu betonové dlažby vlivem mrazového narušení [1].....</i> | 16 |
| Obr. 8: | <i>Betonový most vykazující silné poškození mrazovým narušením [6]</i> | 16 |
| Obr. 9: | <i>Aplikace hydroizolační cementové ochranné hmoty při izolaci betonové budovy po úrovni terénu [9].....</i> | 17 |
| Obr. 10: | <i>Ochrana betonu bitumenovými pásy [9]</i> | 17 |
| Obr. 11: | <i>Reprofilace poškozeného železobetonu polymercementovou správkovou hmotou [14] ...</i> | 19 |
| Obr. 12: | <i>Sanace zdegradovaného betonu epoxidovou správkovou hmotou [15]</i> | 19 |
| Obr. 13: | <i>Podlití ocelové základové desky polymercementovou hmotou [16].....</i> | 20 |
| Obr. 14: | <i>Podlití ocelové základové desky (po vytvrzení zálivky) [16].....</i> | 20 |
| Obr. 15: | <i>Zalévání patky ocelového nosného sloupu polymercementovou zálivkou [17].....</i> | 20 |
| Obr. 16: | <i>Zalévání trhliny v betonu epoxidovou zálivkou [18]</i> | 20 |
| Obr. 17: | <i>Betonářské výztuže zakotvené do podkladní betonové desky pomocí rychle tvrdnoucí epoxidové chemické kotvy [19]</i> | 21 |
| Obr. 18: | <i>Detail zakotvení ocelové závitové tyče pomocí chemické kotvy na bázi EP vysoce plněné křemičitým pískem [20].....</i> | 21 |
| Obr. 19: | <i>Závitové tyče zakotvené pomocí chemické kotvy na bázi EP, připravené pro uchycení těžkých zařízení [24].....</i> | 22 |
| Obr. 20: | <i>Vinylesterová kotva bez styrenu pro kotvení konstrukcí a tyčí do betonu – princip uchycení v betonu [25].....</i> | 22 |
| Obr. 21: | <i>Příklad kotvení pomocí chemické kotvy do duté cihly [28].....</i> | 23 |
| Obr. 22: | <i>Příklad kotvení pomocí chemické kotvy do duté betonové tvárnice [29]</i> | 23 |
| Obr. 23: | <i>Rozdíl v rozložení napětí při kotvení vysokopevnostního šroubu mechanicky pomocí hmoždinky (vlevo) a pomocí chemické kotvy (vpravo) [26]</i> | 23 |
| Obr. 24: | <i>Znázornění principu kotvení ocelových prvků do betonu pomocí chemických kotev [27]..</i> | 26 |
| Obr. 25: | <i>Oblasti průmyslu, kde se nejvíce využívají epoxidové pryskyřice (EP) [38].....</i> | 28 |
| Obr. 26: | <i>Vliv teploty na vytvrzování epoxidových pryskyřic (EP) [37].....</i> | 30 |
| Obr. 27: | <i>Princip vytvrzování epoxidů pomocí polyaminů [36].....</i> | 30 |
| Obr. 28: | <i>Princip stanovení teploty skelného přechodu (T_g) pomocí výstupu z DSC analýzy [42].....</i> | 31 |
| Obr. 29: | <i>Mechanismus vytvrzování nenasycených polyesterových pryskyřic (UP) [46]</i> | 34 |
| Obr. 30: | <i>PUR injektáž při opravě úrovňového přejezdu [53]</i> | 36 |
| Obr. 31: | <i>PUR injektáž parní tunelové hydroizolace [53].....</i> | 36 |
| Obr. 32: | <i>Radikálová polymerační reakce MMA akrylátových reaktivních pryskyřic [54]</i> | 37 |

| | |
|---|----|
| Obr. 33: Aplikace MMA polymerbetonu při sanaci mostovky [55]..... | 38 |
| Obr. 34: Aplikace MMA polymerbetonu při sanaci mostovky [55]..... | 38 |
| Obr. 35: Ruční stěrkování sanované podlahy pomocí epoxidové stěrky plněné křemičitým pískem [58] | 44 |
| Obr. 36: SEM snímek vysokoteplotního popílku (KP) z elektrárny Chvaletice před zavedením technologie denitrifikace spalín (zvětšení 2000 x) [61]..... | 46 |
| Obr. 37: REM snímek fluidního popílku (FP) [63]..... | 46 |
| Obr. 38: Zrna popílku ovlivněného SNCR technologií [71]..... | 48 |
| Obr. 39: SEM snímek mikrosiliky s kulatým tvarem zrna [66]..... | 48 |
| Obr. 40: Kloubové spojení betonových bloků pomocí silné adhezivní vodou ředitelné epoxidové hmoty s obsahem mikrosiliky [66]..... | 49 |
| Obr. 41: Porézní vegetační polymerbeton tvořen z vysokopecní strusky, jutových vláken a styren butadienového latexu [68]..... | 49 |
| Obr. 42: Princip fungování laserového difrakčního analyzátoru Mastersizer 2000, který zahrnuje světelné zdroje, jednotku zpracování paprsku, Fourierové čočky a vícečásticový detektor [73] | 59 |
| Obr. 43: Integrovaný modul pro řízení a analýzu měrné hmotnosti..... | 59 |
| Obr. 44: Fordův výtokový kelímek o průměru výtokové trysky 12 mm | 63 |
| Obr. 45: Průběh stanovení viskozity pomocí Fordova výtokového kelímku..... | 63 |
| Obr. 46: Kužel naplněn správkovou hmotou s kontaminovaným popílkem | 64 |
| Obr. 47: Měření rozlivu vyvíjené správkové hmoty s obsahem popílku..... | 64 |
| Obr. 48: Přístroj Tensograf TGF 02 pro stanovení smrštění vyvíjených sanačních hmot..... | 64 |
| Obr. 49: Vyvíjená kotvicí hmota s obsahem odpadního obalového skla při stanovování smrštění.. | 64 |
| Obr. 50: Stanovení pevnosti v tahu za ohybu polymerní správkové hmoty s vysokým obsahem plniva | 66 |
| Obr. 51: Stanovení pevnosti v tlaku na zlomcích po stanovení pevnosti v tahu za ohybu vyvíjené správkové hmoty..... | 66 |
| Obr. 52: Ořezané terče připravené pro zkoušku soudržnosti s betonovou dlažbou –správková hmota s odpadním sklem..... | 67 |
| Obr. 53: Zkouška přidrženosti pomocí odtrhoměru DYNA Proceq..... | 67 |
| Obr. 54: Zkušební těleso pro zkoušení tahových vlastností – typ 1B [109]..... | 67 |
| Obr. 55: Zkušební tělesa pro stanovení tahových vlastností od vyvíjené polymerní závlčkové hmoty | 67 |
| Obr. 56: Stanovení tvrdosti Shore D (H_D) polymerní správkové hmoty | 68 |
| Obr. 57: Boční pohled na zkušební zařízení pro stanovení odolnosti vůči úderu [111] | 69 |
| Obr. 58: Stanovování odolnosti vůči úderu vyvíjené polymerní správkové hmoty | 69 |
| Obr. 59: Zakotvené závitové tyče připravené pro zkoušku vytržení | 70 |
| Obr. 60: Vytrhávací zařízení od společnosti KGF | 70 |
| Obr. 61: Zařízení DMA 2980 (TA Instruments) pro stanovení T_g | 71 |
| Obr. 62: Uchycení vzorku v testovacím zařízení | 71 |
| Obr. 63: Zařízení pro stanovení součinitele teplotní délkové roztažnosti α | 73 |

| | |
|---|-----|
| Obr. 64: Nanášení hmoty EP-S 80% SP na cementotřískovou desku pomocí zubové stěrky | 96 |
| Obr. 65: Referenční hmota po vytvrzení..... | 96 |
| Obr. 66: Detail vytvrzeného vzorku EP-S + 75 % OS..... | 96 |
| Obr. 67: Detail vytvrzeného vzorku EP-S + 75 % AS..... | 96 |
| Obr. 68: Ocelové tyče zalité vyvíjenou kotvící hmotou. | 98 |
| Obr. 69: Sedimentace plniva po 30 dnech ve hmotě EP-Z (zleva: 70% OS, 70% QS, 75% AS, 80% SS, 80% SP, 70% REF, nepl.) | 100 |
| Obr. 70: Sedimentace plniva ve hmotě EP-S (zleva: 60% KP-TŘ, 75% AS, 80% SS, 80 % SP, 75% REF, nepl.) | 100 |
| Obr. 71: Sedimentace plniva na dně otvoru, kde byla zakotvěná ocelová závitová tyč (EP-K + 60 % OS)..... | 100 |
| Obr. 72: Detail sedimentovaného plniva na dně otvoru, kde byla zakotvěná ocelová závitová tyč (EP-K + 60 % OS)..... | 100 |
| Obr. 73: Měření výtokové doby hmoty EP-S + 65% OS | 101 |
| Obr. 74: Měření výtokové doby hmoty EP-K + 45% KP-NOV | 101 |
| Obr. 75: Měření rozlití (EP-S + 60% KP-TŘ) | 102 |
| Obr. 76: Rozlití (EP-S + 75 % REF) | 102 |
| Obr. 77: Hustota v čerstvém stavu správkových hmot (EP-S) v závislosti na různém typu a množství plniva..... | 103 |
| Obr. 78: Hustota v čerstvém stavu zálivkových hmot (EP-Z) v závislosti na různém typu a množství plniva..... | 104 |
| Obr. 79: Hustota v čerstvém stavu kotvících hmot (EP-K) v závislosti na různém typu a množství plniva | 104 |
| Obr. 80: Objemová hmotnost ve zpolymerovaném stavu správkových hmot (EP-S) po 28 dnech . | 106 |
| Obr. 81: Objemová hmotnost ve zpolymerovaném stavu zálivkových hmot (EP-Z) po 28 dnech .. | 106 |
| Obr. 82: Objemová hmotnost ve zpolymerovaném stavu kotvících hmot (EP-K) po 28 dnech. | 107 |
| Obr. 83: Stanovování tříbodové pevnosti v tahu za ohybu (EP-S+80% REF)..... | 108 |
| Obr. 84: Vzorek EP-S 60% KP-NOV porušen v tahu za ohybu | 108 |
| Obr. 85: Pevnost v tahu za ohybu správkových hmot (EP-S) v závislosti na typu a množství plniva po 28 dnech..... | 108 |
| Obr. 86: Pevnost v tahu za ohybu zálivkových hmot (EP-Z) v závislosti na typu a množství plniva po 28 dnech..... | 109 |
| Obr. 87: Pevnost v tahu za ohybu kotvících hmot (EP-K) v závislosti na typu a množství plniva po 28 dnech..... | 110 |
| Obr. 88: Pevnost v tlaku správkových hmot po 28 dnech v závislosti na typu a množství plniva... | 111 |
| Obr. 89: Pevnost v tlaku zálivkových hmot po 28 dnech v závislosti na typu a množství plniva. ... | 111 |
| Obr. 90: Vzorek EP-S 85% REF po zkoušce pevnosti v tlaku..... | 112 |
| Obr. 91: Vzorek EP-S 60% KP-TŘ po zkoušce pevnosti v tlaku. | 112 |
| Obr. 92: Pevnost v tlaku kotvících hmot po 28 dnech v závislosti na typu a množství plniva. | 112 |
| Obr. 93: Grafické vyhodnocení tvrdosti Shore H_D správkových hmot (EP-S) po 28 dnech v závislosti na typu a množství plniva | 115 |

| | |
|---|-----|
| Obr. 94: Grafické vyhodnocení tvrdosti Shore H_D zálivkových hmot (EP-Z) po 28 dnech v závislosti na typu a množství plniva | 115 |
| Obr. 95: Trhlina způsobená dopadem úderníku (EP-S 55% KP-NOV) | 116 |
| Obr. 96: Výrazná síť trhlin způsobená dopadem úderníku (EKO-X 40% NK)..... | 116 |
| Obr. 97: Grafické vyhodnocení odolnosti vůči úderu v [Nm] správkových hmot po 28 dnech v závislosti na typu a množství plniva | 117 |
| Obr. 98: Grafické vyhodnocení odolnosti vůči úderu v [Nm] zálivkových hmot po 28 dnech v závislosti na typu a množství plniva | 117 |
| Obr. 99: Poměrné prodloužení při přetržení (ϵ_b) vybraných sanačních (správkových (EP-S), zálivkových (EP-Z) a kotvících (EP-K) hmot | 122 |
| Obr. 100: Pevnost v tahu při přetržení (σ_b) vybraných sanačních (správkových (EP-S), zálivkových (EP-Z) a kotvících (EP-K) hmot | 123 |
| Obr. 101: Výsledky stanovení T_g z výstupu DMA analýzy u hmoty EP-Z 65% O IDM | 124 |
| Obr. 102: Výsledky stanovení T_g z výstupu DMA analýzy u hmoty EP-S 60% KP-TŘ..... | 124 |
| Obr. 103: Porovnání teploty skelného přechodu (T_g) vybraných sanačních hmot..... | 125 |
| Obr. 104: Změna napětí ve vzorku v průběhu smršťování (EP-K 70% OS) | 126 |
| Obr. 105: Celková deformace při konstantním napětí vzorku EP-K 70% OS..... | 126 |
| Obr. 106: Celková deformace při konstantním napětí vzorku EP-S 60% KP-TŘ..... | 126 |
| Obr. 107: Celková deformace při konstantním napětí vzorku EP-Z 70% OS..... | 127 |
| Obr. 108: Minimální povytažení kotvené závitové tyče v kotvící hmotě EP-K 70% OS (vznik pórů v kotvící hmotě u paty závitové tyče)..... | 128 |
| Obr. 109: Nadměrné povytažení kotvené závitové tyče současně s kotvící hmotou EP-K2..... | 128 |
| Obr. 110: Detail přetržení kotvené ocelové závitové tyče, která byla kotvena hmotou EP-K 70% OS | 128 |
| Obr. 111: Pracovní diagram znázorňující závislost vytrhávací (kotvící) síly na posunutí hmoty EP-K | 128 |
| Obr. 112: Kotvící hmoty EP-K 45% FP-KLAD (vlevo) a EP-K 45% REF 0,063 (vpravo) po 30 denním uložení v kapalných agresivních médiích..... | 132 |
| Obr. 113: Hmoty EP-S 75% OS po 30 denním působení agresivních kapalných roztoků..... | 132 |
| Obr. 114: Hmoty EP-S 60% KP-TŘ po 30 denním působení agresivních kapalných roztoků..... | 132 |
| Obr. 115: Hmoty EP-Z 65% O IDM po 30 denním působení agresivních kapalných roztoků..... | 133 |
| Obr. 116: Dilatometrická křivka správkové hmoty EP-S 60% KP-TŘ..... | 133 |
| Obr. 117: Dilatometrická křivka správkové hmoty EP-S 75% OS..... | 134 |
| Obr. 118: Povrch vzorku EP-S 60% KP-TŘ po 50 zmrazovacích cyklech (T_{50})..... | 135 |
| Obr. 119: Povrch vzorku EP-S 75% REF před zmrazovacími cykly (A) a po zmrazovacích cyklech (B) | 135 |
| Obr. 120: Vzorky vybraných správkových hmot namáhány zmrazovacími cykly (T_{50}) po zkoušce soudržnosti | 135 |
| Obr. 121: Uražený roh betonového silničního obrubníku | 140 |
| Obr. 122: Bednění vytvořené za účelem reprofilace betonového obrubníku | 140 |
| Obr. 123: Polymerizace hmoty EP-S 75% OS po aplikaci, při laboratorních podmínkách | 140 |

| | |
|--|-----|
| Obr. 124: Polymerizace hmoty EP-S 60% KP-TŘ po aplikaci, při laboratorních podmínkách | 140 |
| Obr. 125: Reprofilovaný obrubník po 400 dnech působení povětrnostních podmínek (období 7/2016–9/2017)..... | 141 |
| Obr. 126: Průběh průměrné denní venkovní teploty ve °C v Brně [98] | 141 |
| Obr. 127: Poloprovozní ověření vyvinuté zálivkové hmoty EP-Z 65% OIDM (zalité poškozené místa betonu) | 141 |
| Obr. 128: Detail porušení v podkladním betonu po zkoušce soudržnosti (po 400 dnech)..... | 141 |
| Obr. 129: Detail povrchu vyvinuté zálivkové hmoty EP-Z 65% OIDM – průřezová plocha vzorku po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu (viditelné vzduchové póry a rovnoměrné rozložení částic plniva) | 144 |
| Obr. 130: Detail povrchu vyvinuté zálivkové hmoty EP-Z 65% OIDM – průřezová plocha vzorku po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu (viditelné vzduchové póry a rovnoměrné rozložení částic plniva)..... | 144 |
| Obr. 131: Detail povrchu vyvinuté správkové hmoty EP-S 60% KP-TŘ – průřezová plocha vzorku po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu (viditelné vzduchové póry (porušení hmoty nastalo pravděpodobně v místě největšího póru) a rovnoměrné rozložení částic plniva)..... | 144 |
| Obr. 132: Detail povrchu vyvinuté správkové hmoty EP-S 60% KP-TŘ – průřezová plocha vzorku po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu (viditelné vzduchové póry a rovnoměrné rozložení částic plniva)..... | 144 |
| Obr. 133: Snímek povrchu průřezové plochy vzorku EP-S 60% KP-TŘ při rozlišení 200x | 145 |
| Obr. 134: Mikrostruktura referenční správkové hmoty s 75% obsahem křemičitého písku Dorsilit (EP-S 75% REF) – zv. 100x | 145 |
| Obr. 135: Mikrostruktura správkové hmoty s 75% obsahem odpadního autoskla (EP-S 75% AS) – zv. 100x..... | 145 |
| Obr. 136: Mikrostruktura správkové hmoty s 75% obsahem odpadního slévárenského písku (EP-S 75% SP) – zv. 100x..... | 146 |
| Obr. 137: Mikrostruktura správkové hmoty s 75% obsahem odpadní slévárenské strusky (EP-S 75% SS) – zv. 100x | 146 |
| Obr. 138: Mikrostruktura ekologické správkové hmoty EKO-X 40 % NK – zv. 100x | 146 |
| Obr. 139: Mikrostruktura zálivkové hmoty EP-Z 65% OIDM – zv. 200x..... | 146 |
| Obr. 140: Detail rozhraní správkové hmoty EP-S 60% KP-TŘ a podkladního betonu reprofilovaného obrubníku (zv. 100x)..... | 148 |
| Obr. 141: Detail rozhraní správkové hmoty EP-S 75% OS a podkladního betonu reprofilovaného obrubníku (zv. 100x) – prosvíceno | 148 |
| Obr. 142: Povrch správkové hmoty EP-S 60% KP-TŘ nevystaven působení povětrnostních vlivů (povrch nenarušen UV zářením) – zv. 50x | 148 |
| Obr. 143: Povrch správkové hmoty EP-S 60% KP-TŘ po 400 denním působením povětrnostních vlivů (degradace především UV zářením) – zv. 50x | 148 |
| Obr. 144: Povrch vyvinuté správkové hmoty EP-S 75% OS nevystaven působení povětrnostních vlivů (povrch nenarušen UV zářením) – zv. 100 x | 149 |
| Obr. 145: Povrch správkové hmoty EP-S 75% OS po 400 denním působením povětrnostních vlivů (degradace především UV zářením) – zv. 100x | 149 |

| | |
|---|-----|
| Obr. 146: Detail rozhraní ocelové závitové tyče kotvené kotvící hmotou EP-K 45% 0,063 REF (zv. 100x) | 150 |
| Obr. 147: Detail rozhraní ocelové závitové tyče kotvené kotvící hmotou EP-K 45% FP-KLAD (zv. 100x) | 150 |
| Obr. 148: Detail povrchu vyvinuté zálivkové hmoty EP-Z 65% OIDM po 28denním působení roztoku H_2O_2 (zv. 100x) | 151 |
| Obr. 149: Povrch vyvinuté zálivkové hmoty EP-Z 65% OIDM po 28 denním působení 40% roztoku H_2SO_4 (zv. 50x) | 151 |
| Obr. 150: Povrch správkové hmoty EP-S 60% KP-TŘ po 28denním působení 40% roztoku H_2SO_4 (zv. 100x) | 151 |
| Obr. 151: Povrch správkové hmoty EP-S 60% KP-TŘ po 28denním působení 40% roztoku NaOH (zv. 100x) | 151 |
| Obr. 152: Vyleštěné a pozlacené vzorky pro stanovení mikrostruktury pomocí SEM+EDX | 152 |
| Obr. 153: Mikrostruktura zálivkové hmoty EP-Z 65% OIDM (zv. 1000x) | 152 |
| Obr. 154: Mikrostruktura zálivkové hmoty EP-Z 65% OIDM (zv. 200x) | 153 |
| Obr. 155: Mikrostruktura správkové hmoty EP-S 60% KP-TŘ (viditelné kulaté zrna popílku (cenosféry) – zv. 1000x) | 153 |
| Obr. 156: Mikrostruktura správkové hmoty EP-S 60% KP-TŘ (viditelné kulaté zrna popílku (cenosféry) – zv. 3000x) | 153 |
| Obr. 157: Mikrostruktura správkové hmoty EP-S 60% KP-TŘ (viditelné kulaté zrna popílku (cenosféry) – zv. 500x) | 153 |
| Obr. 158: Mikrostruktura správkové hmoty EKO-X s 40% obsahem NO – zv. 500x | 154 |
| Obr. 159: Mikrostruktura správkové hmoty EKO-X s 40% obsahem NO – zv. 200x | 154 |
| Obr. 160: Vyznačení bodů, kde probíhalo prvkové složení pomocí EDX analýzy u vzorku s denitifikovaným popílkem | 155 |
| Obr. 161: Vyznačení bodů, kde probíhalo prvkové složení pomocí EDX analýzy u vzorku s upraveným nebezpečným odpadem (NK) | 155 |
| Obr. 162: Vyhodnocení charakteristického spektra EDX vzorku EP-S 60% KP-TŘ | 155 |
| Obr. 163: Vyhodnocení charakteristického spektra EDX vzorku EKO-X 40 % NK | 155 |
| Obr. 164: Rozložení vápníku (Ca) v jednotlivých částicích plniva (neutralizačního kalu) – vzorek EKO-X 40 % NK | 156 |
| Obr. 165: Rozložení železa (Fe) v jednotlivých částicích plniva (neutralizačního kalu) – vzorek EKO-X 40 % NK | 156 |
| Obr. 166: Porovnání jednotlivých FTIR spekter – plniva (denitifikovaný popílek KP-TŘ), pojiva (EP) a vybrané správkové hmoty EP-S 60% KP-TŘ pro identifikaci nových sloučenin | 158 |
| Obr. 167: Porovnání jednotlivých FTIR spekter – plniva (upravený NO – NK), pojiva (EP) a vybrané správkové hmoty EKO-X 40% NK pro identifikaci nových sloučenin | 159 |
| Obr. 168: Vyhodnocení Ramanovy spektroskopie třech vybraných sanačních hmot (EP-Z 65% OIDM, EP-S 60% KP-TŘ, EKO-X 40% NK) | 160 |
| Obr. 169: CT snímek vzorku EP-S 60% KP-TŘ | 161 |
| Obr. 170: CT snímek vzorku EP-S 60% KP-TŘ (rovnoměrné rozložení částic popílku a pórů) | 161 |

| | |
|--|-----|
| Obr. 171: Reprofilovaná část obrubníku (po působení povětrnostních vlivů), která byla vyříznuta a následně snímaná pomocí CT Tomografie (hmota EP-S 75% OS)..... | 161 |
| Obr. 172: Reprofilovaná část obrubníku (po působení povětrnostních vlivů), která byla vyříznuta a následně snímaná pomocí CT Tomografie (hmota EP-S 60% KP-TŘ) | 161 |
| Obr. 173: Reprofilovaná část obrubníku (po 28 dnech uložení v lab. prostředí), která byla vyříznuta a následně snímaná pomocí CT Tomografie (zálivkové hmoty EP-Z 65% OIDM, EP-Z 75% REF) | 162 |
| Obr. 174: Reprofilovaná část obrubníku (po 28 dnech uložení v lab. prostředí), která byla vyříznuta a následně snímaná pomocí CT Tomografie (hmota EP-S 75% REF)..... | 162 |
| Obr. 175: CT snímek reprofilovaného rohu obrubníku (hmota EP-S 75% OS) – horizontální snímkování | 162 |
| Obr. 176: CT snímek reprofilovaného rohu obrubníku (hmota EP-S 75% OS) – snímkování přes styčnou plochu | 162 |
| Obr. 177: CT snímek reprofilovaného rohu obrubníku (hmota EP-S 60% KP-TŘ) – snímkování přes styčnou plochu..... | 163 |
| Obr. 178: CT snímek reprofilovaného rohu obrubníku (hmota EP-S 60% KP-TŘ) – horizontální snímkování..... | 163 |
| Obr. 179: CT snímek reprofilovaného rohu obrubníku referenční správkovou hmotou (EP-S 75% REF) – vertikální snímkování..... | 163 |
| Obr. 180: CT snímek reprofilovaného rohu obrubníku zálivkovou hmotou (EP-Z 65% OIDM) – vertikální snímkování..... | 163 |
| Obr. 181: CT snímek reprofilovaného rohu obrubníku referenční zálivkovou hmotou (EP-Z 75% REF) – vertikální snímkování..... | 164 |
| Obr. 182: Jádrový vývrt (Ø75 mm) pro CT snímkování kvality zakotvení ocelové závitové tyče | 165 |
| Obr. 183: CT snímek zobrazující kvalitu zakotvení závitové tyče pomocí referenční kotvící hmoty s 45% obsahem jemnozrnného referenčního písku (EP-K 45% REF) – snímání v ose x | 165 |
| Obr. 184: CT snímek zobrazující kvalitu zakotvení závitové tyče pomocí vyvinuté kotvící hmoty s 45% obsahem fluidního popíku Kladno (EP-K 45% FP-KLAD) – snímání v ose x | 166 |
| Obr. 185: CT snímek zobrazující kvalitu zakotvení závitové tyče pomocí referenční kotvící hmoty s 45% obsahem jemnozrnného referenčního písku (EP-K 45% REF) – snímání v ose y (seshora vývrtu)..... | 166 |
| Obr. 186: CT snímek zobrazující kvalitu zakotvení závitové tyče pomocí vyvinuté kotvící hmoty s 45% obsahem fluidního popíku Kladno (EP-K 45% FP-KLAD) – snímání v ose y (seshora vývrtu) | 166 |
| Obr. 187: CT snímek zobrazující kvalitu zakotvení závitové tyče pomocí vyvinuté kotvící hmoty s 70% obsahem odpadního skla (EP-K 70% OS) – snímání v ose x..... | 166 |
| Obr. 188: CT snímek zobrazující povysunutí zakotvené ocelové závitové tyče pomocí zkoušené kotvící hmoty s 40% obsahem odpadního skla (EP-K2 40% OS) – snímání v ose x | 168 |
| Obr. 189: CT snímek zobrazující povysunutí zakotvené ocelové závitové tyče pomocí zkoušené kotvící hmoty s 40% obsahem odpadního skla (EP-K2 40% OS) | 168 |

12. SEZNAM TABULEK

| | | |
|----------|--|-----|
| Tab. 1: | Požadavky na správkové hmoty dle příslušné normy ČSN EN 1504-3 [10]..... | 18 |
| Tab. 2: | Přehled některých používaných chemických kotev a jejich vlastnosti [27]..... | 24 |
| Tab. 3: | Vliv teploty na zatuhnutí chemické kotvy a na počátek zatížení [27]..... | 25 |
| Tab. 4: | Identifikační požadavky na kotvící hmoty určené pro kotvení ocelových prutů [31]..... | 27 |
| Tab. 5: | Požadavky na funkční vlastnosti kotevních hmot [31] | 27 |
| Tab. 6: | Shrnutí vlivu typu a množství plniva na mechanické vlastnosti PC [59] | 39 |
| Tab. 7: | Systém hodnocení aplikačního testu pro vyvíjené polymerní správkové a zálivkové hmoty | 61 |
| Tab. 8: | Hodnotící tabulka pro posouzení a vyhodnocení zkoušky sedimentace..... | 62 |
| Tab. 9: | Hodnotící systém pro zrychlenou zkoušku chemické odolnosti navržen s ohledem na předpokládané chování vyvíjených sanačních hmot ve vybraných agresivních médiích | 72 |
| Tab. 10: | Vybraná vhodná plniva pro jednotlivé vyvíjené speciální sanační hmoty na beton | 77 |
| Tab. 11: | Identifikace primárního referenčního plniva – křemičitého písku Dorsilit ISG..... | 78 |
| Tab. 12: | Identifikace použitého odpadního autoskla | 80 |
| Tab. 13: | Identifikace použitého odpadního obalového skla | 81 |
| Tab. 14: | Identifikace použitého odpadního skla z již nefunkčních FV panelů typu QS Solar | 83 |
| Tab. 15: | Identifikace použitého odpadního slévárenského písku (SP)..... | 84 |
| Tab. 16: | Identifikace použitého odpadního slévárenského písku | 85 |
| Tab. 17: | Identifikace použité druhotné suroviny z výroby minerálních izolačních desek | 87 |
| Tab. 18: | Identifikace použitých filtrových popílků kontaminovaných vlivem DeNOx technologie ... | 88 |
| Tab. 19: | Identifikace neutralizačního kalu (NK)..... | 91 |
| Tab. 20: | Chemické složení použitých epoxidových pryskyřic (EP)..... | 94 |
| Tab. 21: | Parametry použitých epoxidových pryskyřic (EP) | 94 |
| Tab. 22: | Vyhodnocení aplikačního testu – správkové hmoty (EP-S + plnivo) | 96 |
| Tab. 23: | Vyhodnocení aplikačního testu – zálivkové hmoty (EP-Z + plnivo)..... | 96 |
| Tab. 24: | Vyhodnocení zkoušky sledování vyplnění otvoru kotvící hmotou (EP-K + plnivo)..... | 98 |
| Tab. 25: | Vyhodnocení zkoušky sedimentace – správkové hmoty (EP-S + plnivo)..... | 99 |
| Tab. 26: | Vyhodnocení zkoušky sedimentace zálivkových hmot (EP-Z + plnivo)..... | 100 |
| Tab. 27: | Vyhodnocení zkoušky sedimentace kotvících hmot (EP-K + plnivo)..... | 101 |
| Tab. 28: | Výsledky stanovení viskozity (výtokové doby) v [s] – EP-Z + plnivo | 101 |
| Tab. 29: | Výsledky stanovení viskozity (výtokové doby) v [s] – EP-K + plnivo | 102 |
| Tab. 30: | Výsledky stanovení konzistence (rozlití koláče) – hmota EP-S + plnivo v [mm]..... | 102 |
| Tab. 31: | Výsledky stanovení soudržnosti (f_n) vyvíjených správkových hmot v [MPa]..... | 113 |
| Tab. 32: | Výsledky stanovení soudržnosti (f_n) vyvíjených zálivkových hmot v [MPa] | 113 |
| Tab. 33: | Tvrdość H_D [-] vyvíjených správkových hmot (EP-S) | 114 |
| Tab. 34: | Tvrdość H_D [-] vyvíjených zálivkových hmot (EP-Z)..... | 114 |
| Tab. 35: | Výsledky stanovení odolnosti vůči úderu v [Nm]– správkové hmoty (EP-S) | 116 |
| Tab. 36: | Výsledky stanovení odolnosti vůči úderu v [Nm] – zálivkové hmoty (EP-Z)..... | 116 |

| | |
|---|-----|
| Tab. 37: Výsledky základních fyzikálně-mechanických vlastností vyvíjené hmoty EKO-X | 118 |
| Tab. 38: Výběr variant pro optimalizaci receptur zálivkových hmot (EP-Z)..... | 118 |
| Tab. 39: Výběr kritérií..... | 119 |
| Tab. 40: Rozhodovací matice..... | 119 |
| Tab. 41: Výpočet váhy (Sattyho matice)..... | 120 |
| Tab. 42: Výpočtová matice (metoda kvantitativního párového srovnání)..... | 120 |
| Tab. 43: Vybrané receptury pro další (pokročilé) zkoušení..... | 121 |
| Tab. 44: Výsledky dynamického modulu pružnosti v tahu a tlaku ($E_{dyn,U}$) zjištěného dle UZ metody | 129 |
| Tab. 45: Vyhodnocení zrychlené zkoušky chemické odolnosti vybraných správkových hmot (EP-S) po 30 dnech působení kapalných agresivních roztoků..... | 130 |
| Tab. 46: Vyhodnocení zrychlené zkoušky chemické odolnosti vybraných zálivkových hmot (EP-Z) po 30 dnech působení kapalných agresivních roztoků..... | 131 |
| Tab. 47: Vyhodnocení zrychlené zkoušky chemické odolnosti vybraných kotvicích hmot (EP-K) po 30 dnech působení kapalných agresivních roztoků..... | 131 |
| Tab. 48: Výsledné hodnoty koeficientu teplotní délkové roztažnosti (α) vyvíjených správkových a zálivkových hmot..... | 134 |
| Tab. 49: Výsledky zkoušky soudržnosti vybraných správkových (EP-S) a zálivkových (EP-Z) hmot po zmrazovacích cyklech | 136 |
| Tab. 50: Výsledky zkoušky vyluhovatelnosti hmoty EKO-X..... | 137 |
| Tab. 51: Výsledky koncentrace škodlivin v sušině..... | 138 |
| Tab. 52: Výsledky ekotoxikologických testů prováděných na správkové hmotě EKO-X 40%NK..... | 139 |