



**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

**STUDIUM Vlivu struktury na rezistivitu  
silikátového kompozitu**

STUDY OF THE INFLUENCE OF STRUCTURE ON THE RESISTIVITY OF SILICATE  
COMPOSITES

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Bc. Vojtěch Uher

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

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

BRNO 2022



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

|                                |                                                                   |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| <b>Studijní program</b>        | N3607 Stavební inženýrství                                        |
| <b>Typ studijního programu</b> | Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia |
| <b>Studijní obor</b>           | 3607T020 Stavebně materiálové inženýrství                         |
| <b>Pracoviště</b>              | Ústav technologie stavebních hmot a dílců                         |

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

|                        |                                                               |
|------------------------|---------------------------------------------------------------|
| <b>Student</b>         | Bc. Vojtěch Uher                                              |
| <b>Název</b>           | Studium vlivu struktury na rezistivitu silikátového kompozitu |
| <b>Vedoucí práce</b>   | prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr.h.c.            |
| <b>Datum zadání</b>    | 31. 3. 2021                                                   |
| <b>Datum odevzdání</b> | 14. 1. 2022                                                   |

V Brně dne 31. 3. 2021

---

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

---

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

## PODKLADY A LITERATURA

- El-Dieb, A. S., El-Ghareeb, M. A., Abdel-Rahman, M. A. H., Nasr, E. S. A. Multifunctional electrically conductive concrete using different fillers. 2018
- McCarter, W. J., Starrs, G., Chrisp, T. M. Electrical conductivity, diffusion, and permeability of Portland cement-based mortars. 2000
- Gui, Q., Qin, M., Li, K. Gas permeability and electrical conductivity of structural concretes: Impact of pore structure and pore saturation. 2016
- Monteiro, A.O.; Cachim, P.B.; Costa, P.M.F.J.; Electrical Properties of Cement-based Composites Containing Carbon Black Particles, 2015
- Chen, B.; Wu, K.; Yao, W.; Conductivity of carbon fiber reinforced cement-based composites, 2004
- Duran-Herrera, A.; De-León-Esquivel, J.; Bentz, D. P.; & Valdez-Tamez, P.; Self-compacting concretes using fly ash and fine limestone powder: Shrinkage and surface electrical resistivity of equivalent mortars, 2019
- Výzkumné zprávy a protokoly ústavu THD, příspěvky ze sborníků konferencí, odborné články, časopisy, normy.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Při vývoji kompozitů se sníženou rezistivitou je volba vhodného vodivého plniva a jeho dávky jedním ze zásadních aspektů. Nejčastěji jsou pro snížení rezistivity kompozitu používána plniva na bázi grafitu. Pro návrh a ověření vhodných surovinových variant je nezbytné věnovat se zejména volbě vhodné zrnitosti a struktury těchto plniv. Cílem diplomové práce je prokázat vliv struktury na rezistivitu cementového kompozitu.

1. V rámci rešeršní činnosti zpracujte poznatky, týkající se problematiky cementových kompozitů se sníženou rezistivitou.
  2. Na základě studia odborné literatury se zaměřte na složení surovinových směsí, zejména z pohledu optimální dávky plniva a sestavte soubor potenciálně vhodných surovin pro experimentální činnost.
  4. Sestavte metodiku postupu experimentálního vývoje elektricky vodivého kompozitu se zaměřením na prokázání vlivu struktury na rezistivitu kompozitu.
  5. Proveďte analýzu vlastností vstupních surovin pro experimentální činnost, se zaměřením na grafitová plniva.
  6. Navrhněte surovinové varianty elektricky vodivých cementových past se zaměřením na dávku a charakter grafitových plniv a experimentálně ověřte ve formě cementových kompozitů
  7. Ověřte rezistivitu surovinových variant ve formě suchých směsí a ve formě cementových past. Zhodnoťte korelaci obou způsobů přípravy a měření rezistivity.
  8. Vybraná grafitová plniva.
  9. Studium struktury zhodnoťte dominantní vlivy na rezistivitu kompozitu.
- Předpokládaný rozsah diplomové práce minimálně 60-80 stran včetně tabulkové a grafické přílohy.

## STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

---

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

dr.h.c.

Vedoucí diplomové práce

## ABSTRAKT

Silikátové kompozity se sníženou rezistivitou jsou moderními materiály, které umožňují stavebním konstrukcím plnit několik odlišných funkcí současně. Řešení problematiky jejich vývoje a použití je vhodným námětem k tématům výzkumných prací. Cílem této práce je studium vlivu struktury na rezistivitu silikátového kompozitu. Struktura elektrovedivých kompozitů je studována na suchých směsích cementových past a malt i na zkušebních tělesech ze zatvrdlé cementové pasty a malty po 28 dnech zrání. Na základě analýzy surovin je vybráno šest vhodných elektrovedivých plniv podle velikosti částic, rezistivity a nasákavosti. Jsou stanoveny parametry suchých cementových past a zatvrdlé cementové pasty s náhradou 4–19 hm. % cementu vybranými plnivy. Dvě z plniv jsou vybrána pro použití v suché a zatvrdlé maltě. Pro všechny varianty suchých směsí i zatvrdlých kompozitů je stanovena rezistivita a jsou přibližně stanoveny perkolační prahy. Studium struktury vybraných variant je prokázáno, že nejdůležitějšími parametry, které mají největší vliv na rezistivitu silikátových kompozitů, jsou zejména velikost částic a vlastní rezistivita elektrovedivého plniva. U silikátových kompozitů v zatvrdlém stavu má rovněž velký vliv objem hydratačních produktů, zejména portlandit a C-S-H gely. Pro suché směsi i zatvrdlé kompozity bylo zjištěno, že čím menší je velikost částic elektrovedivého plniva, tím je třeba menšího zastoupení k dosažení perkolačního prahu. Množství portlanditu a C-S-H gelů v objemu zatvrdlého kompozitu určuje jeho rezistivitu. Rezistivita zatvrdlých kompozitů se zvyšuje s rostoucím množstvím hydratačních produktů. Rezistivita zatvrdlého kompozitu je vždy vyšší než rezistivita suché směsi stejného složení. Tedy i potřebné zastoupení elektrovedivého plniva k dosažení perkolačního prahu je u zatvrdlých kompozitů vyšší než u suchých směsí. Rezistivita, objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku zatvrdlých kompozitů vždy klesá se zvyšujícím se množstvím elektrovedivých plniv. Rovněž tyto parametry kompozitů klesají s klesající velikostí částic elektrovedivých plniv při stejném zastoupení. Výjimku tvoří pevnost v tahu za ohybu zatvrdlých cementových past, která naopak roste se zvyšujícím zastoupením a velikostí částic elektrovedivých plniv.

## KLÍČOVÁ SLOVA

silikátový kompozit, elektrická rezistivita, elektrovedivý kompozit, elektrovedivé plnivo, grafitový prach, práh perkolace

## ABSTRACT

Electroconductive silicate-based composites are advanced materials that allow building structures to perform several different functions simultaneously. Addressing the issues of their development and use is a suitable topic for research work. The aim of this work is to study the effect of structure on the resistivity of silicate composite. The structure of electrically conductive composites is studied on dry cement paste and mortar mixtures as well as on test bodies made of hardened cement paste and mortar after 28 days of curing. Based on the analysis of the raw materials, six suitable electroconductive fillers are selected based on particle size, resistivity, and water absorption. The parameters of dry cement paste and hardened cement paste with replacement of 4-19 wt. % cement by the selected fillers are determined. Two of the fillers are selected for use in dry and hardened mortar. Resistivity is determined for all dry mixes and hardened composites variants, and percolation thresholds are approximately determined. By studying the structure of the selected variants, it is shown that the most important parameters that have the greatest influence on the resistivity of the silicate composites are mainly the particle size and the intrinsic resistivity of the electrically conductive filler. For silicate composites in the hardened state, the volume of hydration products, especially portlandite and C-S-H gels, also has a significant influence. For both dry blends and hardened composites, it was found that the smaller the particle size of the electroconductive filler, the smaller the representation needed to reach the percolation threshold. Portlandite and C-S-H gels in the volume of the hardened composite cause its high resistivity. The resistivity of the hardened composite is always higher than that of the dry blends. Thus, the proportion of electroconductive filler needed to reach the percolation threshold is higher in hardened composites than in dry mixes. The resistivity, bulk density, flexural tensile strength, and compressive strength of hardened composites always decrease as the amount of electrically conductive filler increases. Also, these parameters of composites decrease with decreasing particle size of electroconductive fillers at the same proportion. The exception is the flexural tensile strength of hardened cement pastes, which increases with the increasing proportion and particle size of the conductive fillers.

## KEYWORDS

silicate composite, electrical resistivity, electroconductive composite, electroconductive filler, graphite dust, percolation threshold

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

UHER, Vojtěch. *Studium vlivu struktury na rezistivitu silikátového kompozitu*. Brno, 2022. 150 s., 0 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr.h.c

## PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Studium vlivu struktury na rezistivitu silikátového kompozitu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 14.1.2022

---

Bc. Vojtěch Uher  
autor práce

## PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Studium vlivu struktury na rezistivitu silikátového kompozitu* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 14.1.2022

---

Bc. Vojtěch Uher  
autor práce

## PODĚKOVÁNÍ

Mé upřímné poděkování patří zejména vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Rostislavovi Drochytzkovi, CSc., MBA, dr.h.c. za odborné a cenné rady, věcné připomínky a přívětivý přístup, který vyžadovalo zvládnutí práce v plném rozsahu. Opravdu velké díky patří také Ing. Vítovi Černému, Ph.D. za jeho obětavost, laskavost, smysl pro humor a obrovské množství času, které mně a mému výzkumu věnoval. Srdečné díky patří přátelům z akademické půdy Ing. Janě Majerové, Ing. Jindřichu Melicharovi, Ph.D., Ing. Radkovi Hermannovi, Ing. Petrovi Figalovi a Ing. Šimonovi Baránkovi za mnoho užitečných rad, spoustu zábavy a slov podpory, kterými mě zásobovali v posledních letech. Ovšem mé největší díky patří přítelkyni Tereze za nekončící podporu, rodině, bez které bych tu nebyl a přátelům, bez kterých bych se zkrátka neobešel.

Diplomová práce byla zpracována za finanční podpory Grantové agentury ČR v rámci projektu číslo 20-09072J a názvem „Tvorba struktury pokročilých silikátových kompozitů se sníženou impedancí“

# OBSAH

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ÚVOD.....                                                                            | 16 |
| TEORETICKÁ ČÁST.....                                                                 | 17 |
| 1. Silikátové kompozitní materiály .....                                             | 17 |
| 1.1. Přirozené elektrické vlastnosti silikátových kompozitů .....                    | 18 |
| 1.2. Silikátové kompozity se sníženou rezistivitou .....                             | 18 |
| 1.3. Základní důležité pojmy .....                                                   | 19 |
| 1.3.1. Elektrický náboj .....                                                        | 19 |
| 1.3.2. Elektrický proud.....                                                         | 19 |
| 1.3.3. Elektrická vodivost .....                                                     | 19 |
| 1.3.4. Elektrická Impedance .....                                                    | 20 |
| 1.3.5. Elektrická rezistivita.....                                                   | 20 |
| 1.3.6. Teorie elektrické vodivosti kovů a uhlíku .....                               | 20 |
| 1.4. Způsoby přenosu elektrického proudu silikátovým kompozitem .....                | 22 |
| 1.4.1. Přímé vedení .....                                                            | 22 |
| 1.4.2. Tunelové a skokové vedení.....                                                | 22 |
| 1.4.3. Iontová vodivost .....                                                        | 23 |
| 1.4.4. Vnější faktory ovlivňující elektrické vlastnosti silikátových kompozitů ..... | 23 |
| 1.4.5. Perkolační teorie .....                                                       | 24 |
| 1.4.6. Perkolační křivka.....                                                        | 24 |
| 1.4.7. Perkolační práh .....                                                         | 25 |
| 1.5. Elektricky vodivá plniva.....                                                   | 25 |
| 1.5.1. Uhlíková vlákna.....                                                          | 26 |
| 1.5.2. Uhlíkové nanotrubičky.....                                                    | 27 |
| 1.5.3. Uhlíkové saze.....                                                            | 28 |

|        |                                                                                                                  |    |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.5.4. | Grafit .....                                                                                                     | 28 |
| 1.5.5. | Grafen .....                                                                                                     | 30 |
| 1.6.   | Reálné využití silikátových kompozitů se sníženou rezistivitou.....                                              | 31 |
| 1.6.1. | Elektricky vyhřívané betony.....                                                                                 | 31 |
| 1.6.2. | Kontrola stavu konstrukce .....                                                                                  | 31 |
| 1.6.3. | Monitoring dopravní situace .....                                                                                | 32 |
| 1.6.4. | Stínění rušivých signálů .....                                                                                   | 32 |
| 1.7.   | Přehled výzkumných prací s použitím elektricky vodivých plniv a vývojem kompozitů se sníženou rezistivitou ..... | 33 |
| 1.7.1. | Použití uhlíkových vláken .....                                                                                  | 33 |
| 1.7.2. | Použití uhlíkových nanotrubiček.....                                                                             | 33 |
| 1.7.3. | Použití grafenu .....                                                                                            | 34 |
| 1.7.4. | Použití uhlíkových sazí.....                                                                                     | 34 |
| 1.7.5. | Použití grafitu .....                                                                                            | 34 |
| 1.7.6. | Použití kovových prášků.....                                                                                     | 35 |
| 1.7.7. | Použití ocelových vláken .....                                                                                   | 35 |
| 1.7.8. | Další výzkumné práce věnující se kompozitům se sníženou rezistivitou .....                                       | 35 |
| 1.8.   | Shrnutí poznatků z oblasti silikátových kompozitů se sníženou rezistivitou.....                                  | 36 |
|        | CÍL PRÁCE .....                                                                                                  | 38 |
|        | PRAKTICKÁ ČÁST .....                                                                                             | 39 |
| 2.     | METODIKA PRÁCE .....                                                                                             | 39 |
| 2.1.   | Přehled I. etapy – Analýza a výběr vhodných surovin .....                                                        | 39 |
| 2.2.   | Přehled II. etapy – Stanovení rezistivity a perkolačních prahů suchých směsí.....                                | 39 |

|        |                                                                                                                                           |    |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3.   | Přehled III. etapy – Stanovení hlavních parametrů a studium struktury zatvrdlých cementových past po 28 dnech zrání .....                 | 40 |
| 2.4.   | Přehled IV. etapy – Stanovení hlavních parametrů zatvrdlých malt po 28 dnech zrání .....                                                  | 40 |
| 2.5.   | Podrobné schéma a popis I. etapy – Analýza a výběr vhodných surovin .....                                                                 | 41 |
| 2.6.   | Podrobné schéma a popis II. etapy – Stanovení rezistivity a perkolačních prahů suchých směsí .....                                        | 42 |
| 2.7.   | Podrobné schéma a popis III. etapy – Stanovení hlavních parametrů a studium struktury zatvrdlých cementových past po 28 dnech zrání ..... | 44 |
| 2.8.   | Podrobné schéma a popis IV. etapy – Stanovení hlavních parametrů zatvrdlých malt po 28 dnech zrání .....                                  | 46 |
| 3.     | METODY PROVÁDĚNÝCH ZKOUŠEK A MĚŘENÍ .....                                                                                                 | 48 |
| 3.1.   | Zkoušky a měření vstupních surovin a suchých směsí .....                                                                                  | 48 |
| 3.1.1. | Objemová hmotnost .....                                                                                                                   | 48 |
| 3.1.2. | Sypná hmotnost .....                                                                                                                      | 48 |
| 3.1.3. | Nasákavost .....                                                                                                                          | 48 |
| 3.1.4. | Měrný povrch .....                                                                                                                        | 49 |
| 3.1.5. | Velikost a distribuce částic .....                                                                                                        | 50 |
| 3.1.6. | Příprava suchých směsí .....                                                                                                              | 50 |
| 3.1.7. | Stanovení parametrů elektrovodivých plniv a suchých směsí při napětí 420 kPa .....                                                        | 51 |
| 3.2.   | Příprava a zkoušky cementových past a malt .....                                                                                          | 54 |
| 3.2.1. | Příprava čerstvé směsi .....                                                                                                              | 54 |
| 3.2.2. | Kontrola zpracovatelnosti čerstvé směsi .....                                                                                             | 56 |
| 3.2.3. | Příprava zatvrdlých zkušebních těles k měření impedance .....                                                                             | 56 |
| 3.2.4. | Stanovení rezistivity .....                                                                                                               | 56 |

|        |                                                                                              |    |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.5. | Přibližné stanovení perkolačních prahů.....                                                  | 58 |
| 3.2.6. | Zkoušení mechanických vlastností zatvrdlých kompozitů .....                                  | 58 |
| 3.3.   | Studium mikrostruktury částic a kompozitů .....                                              | 59 |
| 3.3.1. | Digitální mikroskop .....                                                                    | 59 |
| 3.3.2. | Elektronový mikroskop .....                                                                  | 60 |
| 3.3.3. | Mikrotomograf .....                                                                          | 61 |
| 4.     | Etapa I – Analýza a výběr vhodných surovin.....                                              | 62 |
| 4.1.   | Strategie výběru vhodných plniv .....                                                        | 62 |
| 4.2.   | Analýza surovin .....                                                                        | 62 |
| 4.2.1. | Pojivo .....                                                                                 | 62 |
| 4.2.2. | Inertní plnivo.....                                                                          | 64 |
| 4.2.3. | Elektrovodivá plniva .....                                                                   | 65 |
| 4.3.   | Vyhodnocení I. Etapy.....                                                                    | 78 |
| 4.4.   | Závěr I. Etapy .....                                                                         | 81 |
| 5.     | ETAPA II – Stanovení rezistivity a perkolačního prahu suchých směsí..                        | 82 |
| 5.1.   | Vybrané kategorie vhodných plniv .....                                                       | 82 |
| 5.2.   | Receptury a příprava suchých cementových past .....                                          | 82 |
| 5.3.   | Zjištění hlavních sledovaných parametrů suchých cementových past<br>při napětí 420 kPa ..... | 83 |
| 5.3.1. | Objemová hmotnost při stlačení suchých cementových past ....                                 | 84 |
| 5.4.   | Rezistivita suchých cementových past .....                                                   | 85 |
| 5.5.   | Stanovení prahu perkolace vybraných plniv v suchých cementových<br>pastách .....             | 85 |
| 5.5.1. | Perkolační práh plniva Condufit C 4 v suché pastě.....                                       | 86 |
|        | .....                                                                                        | 86 |
| 5.5.2. | Perkolační práh plniva Micrographite F 10 v suché pastě .....                                | 86 |

|        |                                                                                                                     |     |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.5.3. | Perkolační práh plniva Supragraphite C 63 v suché pastě.....                                                        | 87  |
| 5.5.4. | Perkolační práh plniva Odpad vysavač v suché pastě .....                                                            | 87  |
| 5.5.5. | Perkolační práh plniva Supragraphite C 300 v suché pastě.....                                                       | 88  |
| 5.5.6. | Perkolační práh plniva Supragraphite U C 700 v suché pastě ..                                                       | 88  |
| 5.5.7. | Diskuse k přibližnému určení perkolačních prahů vybraných plniv<br>v suchých cementových pastách.....               | 89  |
| 5.6.   | Výběr vhodných elektrovodivých plniv pro přípravu suchých směsí s<br>cementem a normovým pískem – suchých malt..... | 89  |
| 5.7.   | Receptury a příprava suchých malt .....                                                                             | 90  |
| 5.8.   | Zjištění vlastností suchých malt při napětí 420 kPa a porovnání se<br>suchými cementovými pastami.....              | 91  |
| 5.8.1. | Rezistivita suchých malt.....                                                                                       | 91  |
| 5.9.   | Stanovení prahu perkolace vybraných plniv v suchých maltách .....                                                   | 92  |
| 5.9.1. | Diskuse k přibližnému určení perkolačních prahů vybraných plniv<br>v suchých maltách.....                           | 93  |
| 5.9.2. | Objemová hmotnost suchých malt .....                                                                                | 93  |
| 5.10.  | Diskuse ke II. etapě .....                                                                                          | 94  |
| 5.11.  | Závěr II. etapy.....                                                                                                | 95  |
| 6.     | ETAPA III – Stanovení hlavních parametrů a studium struktury zatvrdlých<br>cementových past po 28 dnech zrání ..... | 96  |
| 6.1.   | Vybrané receptury a varianty pro přípravu zatvrdlých cementových<br>past                                            | 96  |
| 6.2.   | Receptury cementových past a příprava zkušebních těles .....                                                        | 96  |
| 6.3.   | Rezistivita zatvrdlých cementových past po 28 dnech zrání .....                                                     | 98  |
| 6.4.   | Stanovení perkolačních prahů vybraných plniv ve vysušené zatvrdlé<br>cementové pastě po 28 dnech zrání.....         | 99  |
| 6.4.1. | Perkolační práh pro Condufit C 4 v zatvrdlé pastě .....                                                             | 100 |

|        |                                                                                                                                  |     |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.4.2. | Perkolační práh pro Micrographite F 10 v zatvrdlé pastě .....                                                                    | 100 |
| 6.4.3. | Perkolační práh pro Supragraphite C 63 v zatvrdlé pastě .....                                                                    | 101 |
| 6.4.4. | Perkolační práh pro Odpad vysavač v zatvrdlé pastě .....                                                                         | 101 |
| 6.4.5. | Perkolační práh pro Supragraphite C 300 v zatvrdlé pastě .....                                                                   | 102 |
| 6.4.6. | Perkolační práh pro Supragraphite U C 700 v zatvrdlé pastě .                                                                     | 102 |
| 6.5.   | Diskuse k přibližnému určení perkolačních prahů vybraných plniv<br>v zatvrdlé cementové pastě .....                              | 103 |
| 6.5.1. | Srovnání perkolačních prahů v suchých cementových pastách a<br>vysušených zatvrdlých cementových pastách po 28 dnech zrání ..... | 103 |
| 6.6.   | Stanovení hlavních parametrů zatvrdlých cementových past po 28<br>dnech zrání .....                                              | 104 |
| 6.6.1. | Objemová hmotnost zatvrdlých cementových past ve 100%<br>nasyceném stavu .....                                                   | 105 |
| 6.6.2. | Objemová hmotnost vysušených zatvrdlých cementových past<br>106                                                                  |     |
| 6.6.3. | Pevnost v tahu ohybem zatvrdlých cementových past .....                                                                          | 107 |
| 6.6.4. | Pevnost v tlaku zatvrdlých cementových past .....                                                                                | 109 |
| 6.7.   | Diskuse ke studiu struktury .....                                                                                                | 110 |
|        | .....                                                                                                                            | 115 |
|        | .....                                                                                                                            | 116 |
| 6.8.   | Vyhodnocení III. etapy .....                                                                                                     | 117 |
| 6.9.   | Závěr III. etapy .....                                                                                                           | 120 |
| 7.     | Etapa IV – Zjištění hlavních parametrů zatvrdlých malt po 28 dnech<br>zrání .....                                                | 121 |
| 7.1.   | Vybrané receptury a varianty pro přípravu malt .....                                                                             | 121 |
| 7.2.   | Receptury pro přípravu zkušebních těles zatvrdlých malt .....                                                                    | 121 |
| 7.3.   | Rezistivita zatvrdlých malt .....                                                                                                | 122 |

|                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.4. Stanovení prahu perkolace vybraných plniv ve vysušené zatvrdlé maltě                                                 | 123 |
| 7.4.1. Závěrečné srovnání perkolačních prahů vybraných plniv ve vysušených zatvrdlých kompozitech i suchých směsích ..... | 124 |
| 7.5. Stanovení hlavních parametrů zatvrdlých malt po 28 dnech.....                                                        | 124 |
| 7.5.1. Objemová hmotnost zatvrdlých malt ve 100% nasyceném stavu                                                          | 125 |
| 7.5.2. Objemová hmotnost vysušených zatvrdlých malt.....                                                                  | 125 |
| 7.5.3. Pevnost v tahu ohybem zatvrdlých malt .....                                                                        | 126 |
| 7.5.4. Pevnost v tlaku zatvrdlých malt .....                                                                              | 127 |
| 7.6. Vyhodnocení IV. etapy.....                                                                                           | 128 |
| 7.7. Závěr IV. etapy .....                                                                                                | 130 |
| ZÁVĚR .....                                                                                                               | 131 |
| ZDROJE .....                                                                                                              | 133 |
| SEZNAM OBRÁZKŮ .....                                                                                                      | 143 |
| SEZNAM GRAFŮ.....                                                                                                         | 146 |
| SEZNAM TABULEK .....                                                                                                      | 149 |

# ÚVOD

Silikátové kompozity se sníženou rezistivitou přinášejí nové možnosti nejen do stavebnictví, ale i do dalších technických odvětví lidské činnosti. Schopnost vedení elektrického proudu, kterou mají tyto moderní materiály, otevírá prostor pro řadu nových funkcí, kterou může stavební, či jiná konstrukce plnit.

Použití silikátových kompozitů se sníženou rezistivitou není zatím běžnou součástí stavební praxe. Kompozitní materiály se sníženou rezistivitou, označované také jako inteligentní kompozitní materiály, přináší širokou škálu využití.

Avšak k jejich aplikaci a použití dochází stále poměrně výjimečně, a to převážně za výzkumnými účely. Je to způsobeno tím, že jejich použití může přinést i řadu komplikací anebo je jejich použití příliš ekonomicky náročné. Z toho vyplývá, že je stále zapotřebí další výzkum a vývoj nových řešení.

Pro kvalitní vlastní výzkumnou činnost je potřebné se neustále věnovat shromažďování a studiu aktuálních poznatků z oblasti silikátových kompozitů se sníženou rezistivitou. Neboť přenos elektrického náboje strukturou silikátového kompozitu je poměrně složitým mechanismem a pro pochopení komplexity problému je třeba zabývat se i studiem s tímto tématem souvisejících oborů.

Doposud nebyly nalezeny všechny fyzikální, chemické a další zákonitosti, které se šířením elektrického pole hmotou silikátového kompozitu souvisí. Naopak se stále otvírají nové příležitosti a témata pro základní výzkum, protože s přibývajícím množstvím poznatků roste i množství nových otázek. Tato oblast stavebně materiálové vědy je tedy vhodným prostorem pro zpracování diplomové práce a případnou další výzkumnou činnost.

# TEORETICKÁ ČÁST

## 1. Silikátové kompozitní materiály

Nejčastěji používanými silikátovými kompozity jsou cementové kompozitní materiály, které lze obecně charakterizovat jako hmotu se strukturou tvořenou pojivem na cementové bázi, specifickým typem plniva, vody a dále různých přísad a příměsí. [1-5]

Silikátová či konkrétněji cementová matrice plní roli ochrany plniva, případně výztuže před účinky vnějšího prostředí. Na vlastnostech matrice závisí některé vlastnosti vzniklého kompozitu, zejména tepelná vodivost, teplotní a požární odolnost, elektrická vodivost a další. Rovněž matrice určuje soudržnost celého kompozitu a podílí se na mechanických vlastnostech. [1-5]

Plniva mohou být ve tvaru různě dlouhých vláken o různém průměru, mohou mít tvar kulovitých či nepravidelných částic anebo to mohou být nanočástice. V kompozitu zajišťují zejména mechanické vlastnosti, mají zásadní vliv na objemovou hmotnost a také cenu výsledného kompozitu. Velmi důležitým aspektem je distribuce plniv v matrici. Speciální kategorií plniv jsou výztuže, které jsou nejčastěji ocelové, ale mohou to být rovněž syntetické sklo/uhlík-polymerní materiály. [1-5]

Vzájemným synergickým působením všech těchto složek jsou determinovány výsledné vlastnosti kompozitu. S použitými složkami velice úzce souvisí široké možnosti použití cementových kompozitů. Patří mezi ně nejrozumnější typy betonů, malt, stěrek, potěrů, v neposlední řadě mezi ně patří i cementové kompozity se sníženou rezistivitou. [1-5]



Obrázek 1: Typy kompozitů [6]

### 1.1. Přirozené elektrické vlastnosti silikátových kompozitů

Beton je dielektrický, vysoce heterogenní materiál. Vzhledem k tomu je obtížné pochopit jeho chování a nalézt optimální techniky pro zvládnutí návrhu jeho složení, a tedy vytvoření jeho složité makro a mikro struktury. Rovněž je velmi obtížné rozlišit elektrické vlastností různých složek, jako je hydratovaná cementová pasta, skelet kameniva a mezifázová přechodová zóna. Elektrický odpor betonu je ovlivněn různými faktory, včetně spojitosti pórů, pórovitosti, vodivosti pórového roztoku, obsahu vlhkosti, teploty a další. [7–10]

Vysoký měrný elektrický odpor betonu a dalších silikátových materiálů potvrdili různí autoři. Elektrický odpor betonu vysušeného na volném vzduchu byl naměřen  $6,54 \times 10^5$ – $11 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ . Pro nasycený beton jsou uváděny hodnoty elektrického odporu 106–109  $\Omega \cdot \text{cm}$ . [11]

Obecně lze říct, že cementové kompozity dovolují mírný pohyb elektronů v důsledku přítomnosti vlhkosti. Na přirozenou elektrovodivost silikátových kompozitů má vliv objem a druh kameniva. Elektrovodivost kompozitů se snižuje s nárůstem objemu kameniva v betonu. Značný účinek na množství vodivých iontů rozpuštěných v pórovém roztoku může mít adsorpce alkálií na povrchu kameniva. Některé vodivé ionty mohou být extrahovány z kameniva a rozpuštěny do pórového roztoku, tím rovněž zvyšovat elektrickou vodivost betonu. Malta je špatným elektrickým vodičem, zejména za sucha jsou její podmínky použití v elektrických aplikacích omezené. [2] [12] [1315]

### 1.2. Silikátové kompozity se sníženou rezistivitou

*„Kompozitní materiály na bázi cementu či jiných silikátových pojiv se stávají elektricky vodivými tehdy, je-li do jejich matrice, která je elektrickým izolantem, přidáno a rozptýleno dostatečné množství elektricky vodivých plniv. Platí, že čím je elektrická vodivost vyšší, tím silnější elektrický proud může vodičem projít při stejném napětí. K přenosu náboje může u pevných látek dojít třemi způsoby – přímým kontaktním vedením, tunelovým a skokovým vedením či iontovým vedením. Elektrickou vodivost lze také dělit na povrchovou a vnitřní. Povrchovou vodivostí jsou typické pevné látky, zatím co vnitřní vodivost probíhá u látek všech skupenství. Vnitřní elektrická vodivost je závislá na množství a složení funkčního*

*plniva, které udává intenzitu vnitřního elektrického pole. Povrchová elektrická vodivost je závislá hlavně na vlhkosti materiálu.“ [16, s. 43]*

Základním kamenem elektrické vodivosti silikátových kompozitů je vytvoření elektricky vodivé struktury. Nejjednodušším a nejpřímějším způsobem, jak toho dosáhnout, je vytvoření spojitě elektricky vodivé sítě, nejčastěji volbou a správným použitím vhodného elektricky vodivého plniva. [17-19]

Volba správného plniva je náročný krok každého návrhu elektricky vodivého kompozitu. Zásadní je, aby byla rezistivita kompozitu snížena natolik, aby byl umožněn přenos dostatečně silného elektrického náboje, které vyžaduje konkrétní použití silikátového kompozitu. [17-19]

### **1.3. Základní důležité pojmy**

#### **1.3.1. Elektrický náboj**

Elektrický náboj vyjadřuje schopnost hmoty působit elektrickou silou. Nabitá tělesa mohou působit elektrickou silou, pokud jsou umístěna do elektromagnetického pole. U elektrovodivých kompozitů se setkáváme pouze s elektrickým nábojem přenášeným elektrony. Látky se stejným elektrickým nábojem se odpuzují a opačným se přitahují. [20]

#### **1.3.2. Elektrický proud**

Elektrický proud je usměrněný pohyb elektrických nábojů, který vzniká makroskopickým pohybem nábojů v látce schopné přenosu elektronů či iontů, takové látky jsou nazývané vodiče. Spolu s elektrickým proudem potažmo elektrickým polem vždy koexistuje magnetické pole. Je rozlišován stejnosměrný proud, který nemění svůj směr. A proud s měnícím se směrem, který je nazýván střídavý proud. Směr elektrického proudu je totožný se směrem toku kladných nábojů. [20]

#### **1.3.3. Elektrická vodivost**

*„Elektrická vodivost je veličina která, udává schopnost materiálu vést elektrický proud, značí se  $G$  a její jednotkou je siemens (S). V látkách různého*

typu mohou náboje přenášet volné elektrony nebo ionizované atomy či molekuly. Jedná se o základní vlastnost látek, roztoků elektrolytů, ze kterých disociací (štěpením) vznikají elektricky nabitě částice ionty buď s kladným nábojem kationty nebo se záporným anionty. S vodivostí souvisí také měrná vodivost, která se značí:  $\gamma$  a udává se v S/m a je vyjádřena vztahem  $\gamma = (G \cdot l) / A$ , kde  $G$  je elektrická vodivost,  $l$  vzdálenost mezi elektrodami,  $A$  plocha elektrody.“ [21, s. 22]

#### 1.3.4. Elektrická Impedance

„Impedance patří mezi základní elektro-fyzikální veličiny, značí se  $Z$  a jedná se o poměr napětí a proudu. Základní jednotkou impedance je ohm  $\Omega$ . Analogicky jako měrný elektrický odpor (rezistivita) je vlastnost tělesa při průchodu stejnosměrného proudu, je impedance „odporem“ pro střídavý proud. Jedná se o komplexní veličinu, která se skládá z imaginární a reálné složky. Pro přesné měření je zapotřebí přesně definovat měřené veličiny (napětí a proud) a mít správně kalibrovaný měřící přístroj.“ [21, s. 23]

#### 1.3.5. Elektrická rezistivita

„Rezistivita nebo také měrný elektrický odpor je elektro-fyzikální veličina, značí se  $\rho$  a základní jednotkou je  $\Omega \cdot m$ . Jedná se o materiálovou konstantu a uvádí odpor tělesa vůči stejnosměrnému proudu. Tato hodnota závisí na odporu tělesa, ploše průřezu a jeho délce, dále je tato jednotka také významně ovlivněna teplotou vodiče. Rezistivitu lze měnit změnou struktury látek a přidáním příměsí. Dle hodnot rezistivity můžeme rozdělit látky na vodiče (např. železo  $Fe = 8,81 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ), polovodiče (např. křemík  $Si = 3 \times 10^3 \Omega \cdot m$ ) a izolanty (např. sklo  $10^{11}$  až  $10^{16}$ ).“ [21, s. 22]

#### 1.3.6. Teorie elektrické vodivosti kovů a uhlíku

Základním předpokladem elektrovodivých prvků pro schopnost přenosu elektrického náboje je existence volných elektronů, které jsou v případě kovů nazývány vodivostní. [22]

Teorie známá jako klasická elektronová teorie vodivosti kovů platí kromě kovů ještě pro jeden prvek. Některé modifikace uhlíku – grafit, grafen a uhlíkové nanotrubičky jsou stejně, nebo dokonce více elektricky vodivé než kovy. Je to umožněno existencí volných elektronů. Prvky látky, které umožňují přenos elektrického náboje bez zvláštních podmínek pouze prostřednictvím volných elektronů, označujeme jako elektrické vodiče. Některé modifikace uhlíku, například diamant, jsou naopak elektrickými izolanty – nemají volné elektrony. [22]

Molekuly kovů jsou tvořeny vazebnými elektrony, spojenými kovovou vazbou do krystalové mřížky a volnými elektrony. Uhlík v modifikacích jako grafit, grafen nebo v uhlíkových nanotrubičkách vytváří plochou kovalentní vazbu, ve které je propojen vždy jeden atom uhlíku se třemi dalšími, jeden elektron zůstává volný. V mezimřížkovém prostoru, ať už uhlíku nebo některého z kovů, se neuspořádaně ve všech směrech pohybují volné elektrony. [22]

Po připojení vodiče ke zdroji elektrického napětí začne na každý volný elektron působit elektrické pole a pohyb elektronů se usměrní ve směru intenzity elektrického pole, tento pohyb se projevuje jako elektrický proud. [22]

Elektrony při pohybu v prostoru krystalové mřížky narážejí do vazebných elektronů, které ji tvoří a brzdí tak svůj pohyb. Při brždění pohybu dochází k předání části kinetické energie od volného elektronu k vazebnému elektronu, ta se mění na energii tepelnou a způsobuje ohřívání hmoty. Důsledkem zvýšení teploty hmoty dochází k rychlejšímu kmitání krystalové mřížky a tím i k četnějším srážkám s volnými elektrony. Naopak při nízkých teplotách, kdy je krystalová mřížka klidnější, ke srážkám s volnými elektrony dochází méně. Teploty blízké absolutní nule se nazývají oblast supravodivosti materiálů, při těchto teplotách je odpor teoreticky nulový. [22]

## 1.4. Způsoby přenosu elektrického proudu silikátovým kompozitem

V ideálním případě je třeba brát při návrhu elektricky vodivého kompozitu v potaz elektrický transport iontů, Seebeckův jev, Thompsonův jev, nárůst a úbytek elektronů, perkolační teorií a molekulární dynamiku. [2][7]

Elektrony střídavého proudu procházejí elektrovodivým plnivem distribuovaným v materiálu. Ionty přenášejí elektrický náboj skrz hmotu matrice, která ve vlhkém stavu funguje jako elektrolyt. V suchém stavu k tomuto typu transportu nedochází, nebo jen minimálně. Existují dva nejpravděpodobnější mechanismy elektrické vodivosti silikátových kompozitů, které lze popsat perkolační teorií. Jedná se o tunelové, přeskokové vedení elektronů mezi blízkými částicemi ve vzdálenosti jednotek nanometrů, tedy mechanismus přenosu nanostrukturou materiálu. A přímé vedení elektrického proudu spojitými sítěmi, tvořenými dotýkajícími se částicemi elektrovodivého plniva, považovaný za přenos mikrostrukturou materiálu. [23-26]

### 1.4.1. Přímé vedení

*„K přímému přenosu elektrického náboje dochází tehdy, jsou-li jednotlivé částice elektricky vodivých plniv ve vzájemném kontaktu. Docílit přímého vedení náboje hmotou kompozitu lze přidáním vysokého množství funkčních plniv, které při správném rozmístění vytvoří rovnoměrně hustou síť vodivých cest, po kterých se elektrony pohybují.“* [16, s. 43]

### 1.4.2. Tunelové a skokové vedení

*„Při tunelovém a skokovém vedení elektrického náboje existuje mezní vzdálenost vodivých částic. Pokud je tato vzdálenost větší než 10 nm, nemůže k přechodu náboje dojít a elektrická vodivost kompozitu je velmi malá, neboť je závislá pouze na vodivosti matrice. Pokud je tato vzdálenost menší než 10 nm, může pak materiálem procházet elektrický proud. Vzdálenost menší než 10 nm je už natolik nízká, že elektrony mohou přecházet skrz energetické bariéry oddělující vodivé částice. K tomuto druhu vedení dochází pouze tehdy, je-li použité funkční plnivo schopno vytvořit dostatečně silné elektrické pole, které by*

stačilo pro vyvolání emise dostatečného množství elektronů k proražení energetické bariéry.“ [16, s. 43]

#### **1.4.3. Iontová vodivost**

*„Cementová matrice kompozitního materiálu skládající se z CSH gelů, portlanditu  $\text{Ca(OH)}_2$  a dalších složek obsahuje také množství pórů. Voda obsažená zejména v mikro pórech o velikosti  $2 \times 10^{-9}$  až  $2 \times 10^{-6}$  m tvořící přirozenou vlhkost materiálu způsobuje iontovou vodivost. Ve vodě jsou rozpuštěné ionty minerálů z cementové matrice, zejména  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{OH}^-$ , které zajišťují přenos elektrického náboje. Elektrická vodivost je závislá tedy i na vlhkosti, čím je vlhkost kompozitu vyšší, tím je vyšší i iontová elektrická vodivost. Pokud je kompozit vysušený, je iontová elektrická vodivost téměř nulová. Iontová vodivost může také způsobovat elektrickou polarizaci kompozitu, která závisí na množství a druhu vodivé příměsi. Tento efekt je nežádoucí, protože vede k rušení při měření elektrického odporu, které se provádí stejnosměrným proudem.“* [16, s. 43]

#### **1.4.4. Vnější faktory ovlivňující elektrické vlastnosti silikátových kompozitů**

Na šíření elektrického proudu vzorkem má vliv celá řada vnějších vlivů. Majoritní vliv je prokázán u dvou základních charakteristik prostředí, a to je teplota a vlhkost. Při dlouhodobém umístění zkušební tělesa do nějakého prostředí, které stejně jako například konstrukční prvek vyrobený z elektricky vodivého kompozitu, bude mít teplotu a vlhkost shodnou s prostředím, ve kterém je umístěn.

##### **Vliv vlhkosti**

Sledováním vlivu vlhkosti na elektrickou vodivost charakteristiky se zabývá Otten, který porovnává vzorky ošetřené hydrofobními impregnacemi s těmi neošetřenými. Závěrem jeho výzkumu je, že s rostoucím obsahem vlhkosti materiálu se snižuje elektrický měrný odpor. Zvýšení obsahu vlhkosti nemusí nutně vést ke zvýšení vodivosti. Rovněž bylo zjištěno, že existuje bod, ve kterém zvýšení vlhkosti vede k ředění roztoků rozpuštěných iontů, tento pokles

způsobuje snížení iontové vodivosti. Iontová vodivost kompozitu klesá s poklesem vodního součinitele. [2] [27–28]

### **Vliv teploty**

Vliv na elektrický měrný odpor silikátového kompozitu má i teplota vzorků potažmo prostředí, ve kterém se vzorky nacházejí. Byly zkoušeny teploty 4, 20 a 36 °C a bylo prokázáno, že se zvyšující se teplotou měrný elektrický odpor roste. Vodivost při teplotách nad bodem mrazu závisí na velikosti a propojenosti sítě kapilárních pórů a teplotou a roste s rostoucí frekvencí v důsledku relaxace polarizačních procesů. Ukazuje se, že pod teplotami mrazu je elektrická vodivost ovlivněna také objemovým obsahem ledu [2] [27] [29]

#### **1.4.5. Perkolační teorie**

Ukazuje se, že perkolační teorií lze dobře aplikovat na elektrickou vodivost silikátových kompozitů. Byla totiž formulována právě za účely řešení obdobných problémů, kdy procentuální zastoupení jedné z látek v systému přímo ovlivňuje jeden či více sledovaných parametrů systému. V případě silikátových kompozitů se sníženou rezistivitou perkolační teorie popisuje převažující způsob přenosu elektronů strukturou kompozitu v závislosti na množství, druhu, tvaru a velikosti částic elektrovedivých plniv použitých v kompozitu. Sledovaným parametrem je elektrická rezistivita, která se přímo odvíjí od převažujícího způsobu přenosu elektronů. [30-32] [90-91]

#### **1.4.6. Perkolační křivka**

Perkolační křivka je grafickým vyjádřením změny sledovaného parametru v závislosti na změně procentuálního zastoupení látek v systému. V případě, kdy je perkolační teorie aplikována na silikátový kompozit se sníženou rezistivitou, vyjadřuje perkolační křivka změnu rezistivity v závislosti na procentuálním zastoupení elektrovedivého plniva. V kartézském systému souřadnic pak obvykle tuto křivku vykreslujeme tak, že na ose x jsou vyneseny hodnoty zastoupení elektrovedivého plniva vyjádřené v hm. % a na ose y jsou vyneseny hodnoty rezistivity, které byly pro daná zastoupení elektrovedivého plniva ověřeny

reálnými experimenty. Spojnice takto definovaných bodů je perkolační křivkou. [33–36] [90–91]

#### 1.4.7. Perkolační práh

*„Perkolační práh udává takové množství funkčního plniva, při kterém se vytváří dostatečně propojená vodivá síť přímo se dotýkajících částic a kompozit se stává vodičem elektrického proudu. Perkolační práh je vyjádřen v objemových % použitého funkčního plniva z celkového množství hmoty. Je závislý na druhu funkční příměsi, na její struktuře, chemickém složení a poměru délek částic k jejich šířce. Závislost rezistivity na množství funkčního plniva se bude dále výrazně měnit v závislosti na tvaru částic. Je známo, že při použití vodivých plniv v podobě vláken s vysokým poměrem stran je potřeba menšího množství plniva než při použití plniv se zrny kulovými. Z hlediska výroby spolehlivého elektricky-vodivého materiálu je třeba volit množství plniva za perkolačním prahem. Lze tak s větší jistotou zaručit dobrou elektrickou vodivost při opakované výrobě kompozitního materiálu stejného složení. V materiálech s obsahem funkčních plniv za perkolačním prahem převládá přímé kontaktní vedení. Je to způsobeno spojitou trojrozměrnou sítí tvořenou vodivými částicemi v přímém kontaktu. U materiálů s obsahem vodivých částic, které perkolační práh nepřekračují, je elektrická vodivost nižší. Je to způsobeno podílem tunelového a skokového způsobu vedení elektrického proudu, neboť se některé částice přímo nedotýkají.“* [16, s. 44]

#### 1.5. Elektricky vodivá plniva

Jak již bylo mnohokrát zmíněno se ke snížení rezistivity silikátových kompozitů využívá nejrůznějších elektrovodivých plniv rozptýlených v matici kompozitu. Nejčastěji se jedná o materiály na bázi uhlíku, které mají dobrou elektrickou vodivost. Také se používají kovová plniva, nejčastěji ocelová vlákna. S použitím jiných kovových plniv se váže vícero komplikací technického charakteru nebo příliš ovlivňují jiné vlastnosti kompozitu, proto se jimi tato práce nezabývá.

### 1.5.1. Uhlíková vlákna

Uhlíkovými vlákny je myšlena široká skupina vláknových uhlíkatých materiálů s obvyklým průměrem v jednotkách mikrometrů. Obsah čistého uhlíku se pohybuje nejčastěji v rozmezí 92 %–99 % v závislosti na materiálovém složení vlákna. Vláknem je tvořeno jednotlivými krystaly krystalického uhlíku nebo grafitovými destičkami uspořádanými do řetězců a orientovanými ve směru podélné osy vlákna. Anglická zkratka uhlíkových vláken je CF (carbon fibers). [37]

Pro uhlíková vlákna sledujeme typické vlastnosti jako u jiných vláknových materiálů. Nejdůležitějšími mechanickými vlastnostmi jsou pevnost v tahu, která u vláken z krystalického uhlíku může dosahovat až 4,5 GPa. Modul pružnosti takových vláken je obvykle stanoven 120–440 GPa. Zásadní výhodou uhlíkových vláken je excelentní poměr mezi mechanickými vlastnostmi, odolností proti korozi, chemickou odolností, tepelnou odolností a rovněž elektrickou vodivostí a jejich hmotností. [38]

Vyjma výhod použití uhlíkových vláken, které vychází z jejich vlastností, tedy zlepšení mechanických, tepelně technických a elektrických vlastností kompozitů, jsou dalšími výhodami použití uhlíkových vláken v kompozitním materiálu snížení autogenního smrštění a tvorba hydratačních trhlin, zvýšení hutnosti a kompaktnosti hmoty. Těmito efekty uhlíková vlákna i sekundárně přispívají ke zvýšení elektrické vodivosti. Při jejich použití je potřeba zohlednit komplikace, které plynou z tvaru uhlíkových vláken, náročnější homogenizace. Také je třeba počítat se zvýšením záměsové vody, kvůli vysokému měrnému povrchu vláken a tvorbě shluků a smotků vláken. Uhlíková vlákna jsou dostupnými materiály na trhu a využívají se nejen k dosažení elektrovodivých vlastností materiálů. [18] [39] [40]

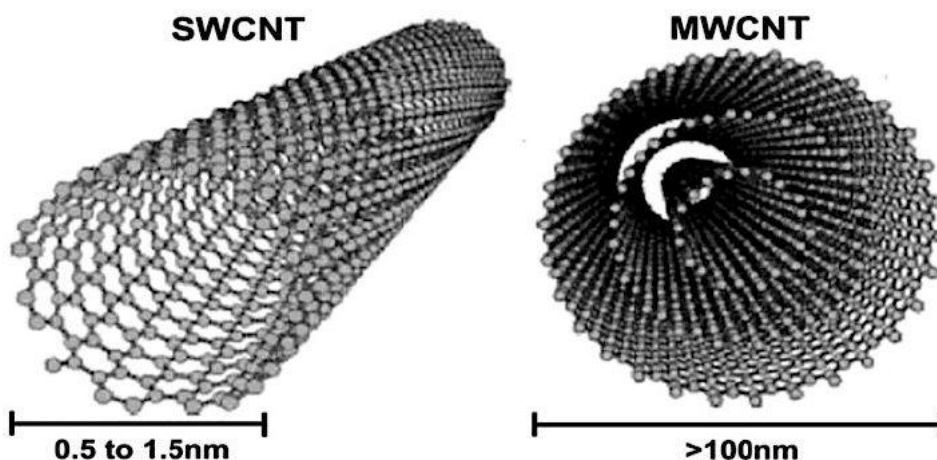
### 1.5.2. Uhlíkové nanotrubičky

Uhlíkové nanotrubičky patří mezi pokročilé materiály, které se k navození elektrovedivých vlastností používají nejčastěji v kombinaci s dalšími elektricky vodivými plnivy. Anglická zkratka pro uhlíkové nanotrubičky CNT (carbon nano tubes) napovídá, že se jedná o modifikaci uhlíku, která je tvořena jednotlivými vrstvami grafenu, které se při procesu výroby zabalí do tvaru válce. [41]

Tyto trubice mají nejčastěji průměr 20–200  $\mu\text{m}$  a je pro ně typický měrný povrch 90-120  $\text{m}^2/\text{g}$ . Průměr trubiček a měrný povrch úzce souvisí s množstvím plášťů, které mají konkrétní CNT od konkrétního výrobce. Množství plášťů, které nanotrubičky obvykle mívají, se pohybuje od jednotek po nižší desítky. Nejběžnější jsou jednotěnné SWCNT (single wall CNT) a uhlíkové nanotrubičky s neurčitým množstvím plášťů větší než jedna MWCNT (multi wall CNT). [41]

Vysoký měrný povrch a schopnost nabíjet se elektrickým nábojem vede k tomu, že částice vytvářejí mikrochuchvalce, které se nedají lehko rozrušit. Povrch je současně hydrofobní, proto se musejí dispergovat ve vhodných roztocích s povrchově aktivními aditivy a speciálními metodami, nejčastěji ultrazvukem.

Při jejich použití může dojít ke snížení pevnosti v tlaku kvůli nízké adhezi s cementovou maltou. Kompozity s použitím CNT vykazují vyšší modul pružnosti a měli by zajistit elektrovedivé vlastnosti i v případě výskytu mikrotrhlin. Mají významně lepší elektrovedivé vlastnosti než grafitový prášek, jejich měrný elektrický odpor je odhadován na  $1 \times 10^{-10} \Omega \times \text{m}$ . [39] [41-42]



Obrázek 2: Příklady různých druhů uhlíkových trubiček [43]

### 1.5.3. Uhlíkové saze

Speciální částicové vysokouhlíkové plnivo, které je označováno anglickou zkratkou CB (carbon black). Toto plnivo jsou opravdu saze, které jsou cíleně průmyslově vyráběné a vznikají spalováním organických paliv za nedostatku kyslíku anebo také spalováním zemního plynu, acetylenu nebo odpadních olejů. [44]

Částice samotných sazí se pohybují v desítkách až stovkách nm, ale díky vysokému povrchovému napětí se shlukují do částic o dva řády vyšší. Skládají se z elementárního uhlíku ve formě kulovitých částic. Proto je měrný povrch většiny typů sazí extrémně velký, a to 50 až 770 m<sup>2</sup>/g. [44]

Při použití CB v silikátovém kompozitu je třeba počítat se snížením pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu. Modul pružnosti by se měl zvýšit. Z hlediska elektrovodivých vlastností vykazují velice proměnlivé vlastnosti, měrný odpor se udává 20–2000 Ω·cm. Používají se spíše v kombinaci s jinými elektrovodivými plnivy jako aditivum než samostatně. [44]

Uhlíkové saze se používají především jako plnivo do pryže, plastů a také jako pigment. Zlepšují UV odolnost a ošetrzdornost polymerních hmot. Jsou používány jako barvivo v inkoustech a tonerech. [33][39]

### 1.5.4. Grafit

Grafit je jedna ze dvou nejběžněji přirozeně se vyskytujících modifikací uhlíku. Grafit je krystalickou formou uhlíku s atomy uspořádanými do hexagonální struktury, tedy orbitální hybridizace sp<sup>2</sup>. V této formě se vyskytuje v přírodě a za standardních podmínek je nejstabilnější formou uhlíku. Druhou běžnou formou uhlíku je diamant s hybridizací sp<sup>3</sup>. [39] [45-47]

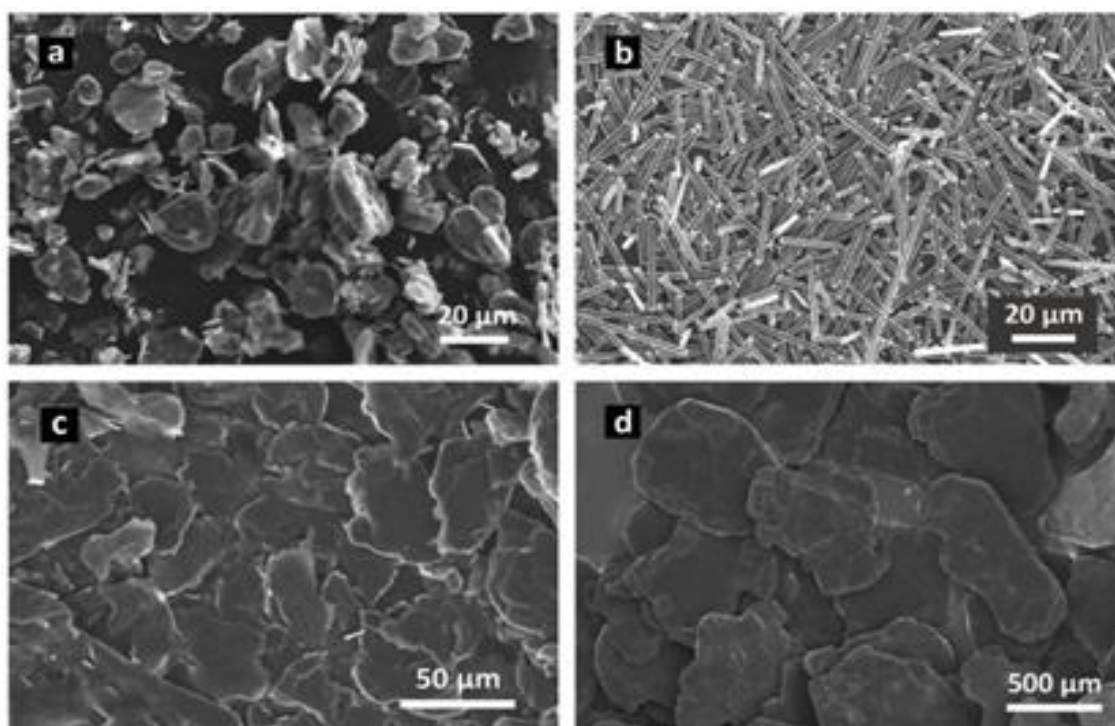
Grafit je tvořen jednotlivými plátky grafenu spojenými pouze van der Waalsovými vazbami, které jsou nejslabším typem chemické vazby. Z toho vyplývají špatné mechanické vlastnosti. [39] [45-47]

Má excelentní tepelné vlastnosti a dobré elektrické vlastnosti, k přenosu elektrického náboje může docházet pomocí volných elektronů přítomných v kovalentní vazbě. I přesto, že k přenosu elektrického náboje dochází převážně

ve směru roviny vrstev, jsou i vločkové a prachové grafity dobrými elektrickými vodiči. [39] [45-47]

Z vlastností grafitu vyplývají i jeho použití. Grafit je využíván v elektrotechnice, například ve snímačích tlaku v uhlíkových mikrofonech. Používá se jako jeden z materiálů pro výrobu elektrod, baterií a solárních panelů. Grafit se používá také v tužkách, mazivech a vysokoteplotních mazivech. Pro jeho vysokou teplotní odolnost se uplatnil i v oblasti zpracování materiálů za vysokých teplot. [39] [45-47]

Mezi nevýhody grafitu patří krom špatných mechanických vlastností usnadňování důlkové koroze u některých nerezových ocelí. Rovněž podporuje galvanickou korozi mezi různorodými kovy. V přítomnosti vlhkosti působí korozivně i na hliník. [39] [45-47]



Obrázek 3: a) částice grafitu, b) grafitová vlákna, c) a d) grafitové vločky [48]

### 1.5.5. Grafen

Grafen, dvourozměrný jednoduchý list atomů uhlíku, byl objevený roku 2004 a je jedním z nejzajímavějších materiálů moderní doby. Velmi zjednodušeně by se dalo říct, že grafen je základním stavebním prvkem všech materiálů na bázi uhlíku kromě diamantu. Z mnoha listů grafenu jsou tvořeny jak přírodní, tak umělé grafity. Uhlíkové nanotrubičky by se zase daly považovat za „srolované“ listy grafenu. Grafen vyniká mnoha svými vlastnostmi. V poměru k jeho hmotnosti naprosto předčí ostatní materiály svými mechanickými vlastnostmi, elektrickými vlastnostmi a chemickou a teplotní odolností. [49-51]

Grafen je v současnosti elektricky nejvodivějším materiálem, jeho měrný elektrický odpor je  $10^{-6} \Omega \times \text{cm}$ . Grafen má vynikající deformační vlastnosti. Se svými 130 GPa pevnosti v tahu je grafen nejpevnějším materiálem na světě. Grafen má rovněž vysoký specifický povrch, který nelze přesně experimentálně změřit, ale byl odhadnut na 2500 až 3000  $\text{m}^2/\text{g}$ . Optické vlastnosti grafenu jsou neméně zajímavé, protože grafen je zatím jediným známým materiálem, který reaguje na všechny vlnové délky, jak viditelného, tak neviditelného záření elektromagnetického spektra. [49-51]

Vzhledem k vynikajícím vlastnostem grafenu, ale i jeho vysoké ceně a náročnému způsobu výroby, se stal grafen častou součástí kompozitních materiálů. Kompozity s přídavkem grafenu vykazují výrazné zlepšení vlastností již při dávkách pod 1 obj. %. Grafen má určitý vliv na odolnost materiálů proti korozi. Grafen je rovněž možno dobře kombinovat s polymery. Například s epoxidy, polyethylenem, polyamidem a dalšími. [49-51]

I grafen má ovšem nějaké nevýhody, patří mezi ně zdravotní závadnost grafenu, která je způsobena velikostí a reaktivností plátků grafenu. Taktéž vysoká cena je velkou překážkou pro jeho širší využití. V případě, že k využití dojde, je problémem jeho zpracování, které vyžaduje obdobný způsob zpracování jako nanotrubičky, tedy použití ultrazvukových homogenizátorů a suspenzí s povrchově aktivní látkou. [49-51]

## **1.6. Reálné využití silikátových kompozitů se sníženou rezistivitou**

Stavební materiály s elektrickou vodivostí mohou nacházet uplatnění při odstraňování sněhu. Také při ochraně budov před statickou elektřinou a bleskem, tak, že se stávají součástí uzemňovací soustavy. Také se využívají při prevenci ocelových konstrukcí a pro zpevnění vrstvy oceli v betonových budovách proti korozi. Někteří autoři poukazují na to, že elektrický odpor má významnou úlohu při určování odolnosti betonů z hlediska koroze. Elektrovodivý beton při dostatečné vlastní vlhkosti vykazuje lepší vlastnosti v podmínkách blesku. [52-56]

### **1.6.1. Elektricky vyhřívané betony**

Ze statistik vyplývá, že 10 až 15 % dopravních nehod zapříčinily namrzlé, zledovatělé a zasněžené vozovky. K namrzání jsou náchylné zvláště mostní konstrukce, kde nepůsobí tepelná akumulace tepla v tělese vozovky. Běžné používání chemického posypu však poškozuje jak beton samotný, tak ocelové konstrukční prvky mostu, nebo vozovky (svodidla...). Také mechanické odstraňování sněhu a ledu z vozovek je značně nešetrná a finančně náročná. Řešením tohoto problému může být použití třífázového kompozitního betonu, složeného z ocelových vláken, uhlíkových vláken a grafitu. Jeho použitím lze velice efektivně zlepšit bezpečnost na silnicích a zásadně změnit způsob, rychlost a náročnost zimní údržby silnic. Tento kompozit s měrným odporem do  $400 \Omega \times \text{cm}$  poskytuje potřebné tepelné účinky s ohledem na ekonomický faktor, které splňují požadavky na odmrazování vozovky. [18-19]

### **1.6.2. Kontrola stavu konstrukce**

Elektrický měrný odpor určuje schopnost materiálu bránit průtoku elektrického proudu. Tato fyzikální charakteristika je určována povahou materiálu: jeho homogenitou, pórovitostí a schopností vést elektrický proud. Cílem SHM (structural health monitoring) je neustálá kontrola strukturálního chování konstrukce za různých povětrnostních podmínek a jejího provozního zatížení. Sbíraná data přinášejí informace o důležitých parametrech, jako jsou mechanické vlastnosti, rychlost koroze, vlhkost, PH, napětí, přetvoření nebo praskliny. Elektricky vodivé kompozity mohou právě zde sehrát důležitou roli.

Jejich použitím lze velice spolehlivě předcházet závažným nehodám civilních infrastruktur jako jsou mosty, přehrady a silnice. Pro relevantní výsledky takového monitorování je zapotřebí dlouhodobého sledování. Vlhkost a další vnější povětrnostní vlivy mohou mít negativní vliv na přesnost výsledků. [33] [50] [57]

### **1.6.3. Monitoring dopravní situace**

Řízení stále se zvyšujícího silničního provozu se neobejde bez jeho kvalitního a přesného monitoringu. Používání klasických senzorů však přináší mnoho problémů. Jejich instalováním do chodníků nebo krajnic vozovek snižuje trvanlivost jak chodníků a vozovek, tak senzorů samotných. Řešení přináší použití elektrovodivého betonu se schopností detekce hustoty provozu na základě změny rezistivity vlivem zatížení. Díky jeho vlastnostem je možné vyvíjet zcela nové senzory, které samotné zdaleka tolik netrpí a ani nepoškozují těleso chodníku nebo silnice, do kterých jsou zabudovány. Důvody jsou nasnadě. Materiál chodníku či silnice je s materiálem senzorů z elektrovodivých betonů v podstatě stejný. Přitom senzory vyrobené z vodivých kompozitů dokážou detekovat důležitá data, například mohutnost provozu, rychlost vozidel, hustota provozu, a dokonce i vážení vozidel stejně spolehlivě, jako ty klasické. Výhody vyplývající z jejich snadné instalace a údržby, široké detekční oblasti, dlouhé životnosti a nízkých pořizovacích nákladů, jistě povedou k jejich stále většímu používání. [47] [57]

### **1.6.4. Stínění rušivých signálů**

Častým požadavkem v civilním i vojenském sektoru je odstínění elektromagnetického záření. Důvodem je ochrana elektroniky, rušení mobilního signálu i zabránění možnosti sledování. V nemocnicích je to nejčastější na JIP – jednotkách intenzivní péče a operačních sálech, kde by například použití mobilního telefonu mohlo znamenat narušení signálu pro přístroje a tím ohrožení života pacienta. Elektromagnetické stínění je také potřeba ve věznicích či speciálních vojenských objektech. Ideální je pro tyto účely využití právě elektrovodivých kompozitů. Jejich schopnost stínění elektromagnetického záření dokonce předčí tradiční způsoby zastínění. Kompozitní materiály lze totiž velmi

přesně modifikovat a tím jejich vlastnosti upravovat pro požadovaná frekvenční pásma. To u ostatních materiálů možné není. [39] [58-59]

### **1.7. Přehled výzkumných prací s použitím elektricky vodivých plniv a vývojem kompozitů se sníženou rezistivitou**

V rámci přípravy na vypracování experimentální části byla provedena rešerše množství impaktovaných článků za účelem získání vědomostí a zkušeností s použitím elektricky vodivých plniv a vývojem kompozitů se sníženou rezistivitou. Byl sestaven stručný přehled těch nejdůležitějších poznatků, který je řazen podle použitého elektro-vodivého plniva.

#### **1.7.1. Použití uhlíkových vláken**

Wu ve svém výzkumu hledá nejvhodnější dávku CF v elektricky vodivém betonu. Nejvhodnější dávka se nalézá okolo 0,4–0,5 obj. % z cementu. Jako nejeftivnější se ukázaly CF o délce 0,6 mm. Podařilo se dosáhnout o 2 řády nižší hodnoty rezistivity. Uvádí, že použitím pouze CF bez dalších plniv lze dosáhnout snížení rezistivity až na  $150 \Omega \cdot \text{cm}$ . [3] [60]

Elektrický odpor měřený na zkušebních tělesech z malty po 28 dnech vytvrzování, měřený s mezelektrodovou vzdáleností 7 cm, byl zjištěn  $820 \Omega \cdot \text{cm}$  pro náhradu 1 obj. %,  $349 \Omega \cdot \text{cm}$  pro náhradu 3 obj. % a  $78 \Omega \cdot \text{cm}$  pro náhradu 5 % 78 křemičitého písku uhlíkovými vlákny. [61]

#### **1.7.2. Použití uhlíkových nanotrubiček**

Azhari a Banthia ve své práci uvedli, že přídavek CF a CNT v množství 1,0 obj. % – 15,0 obj. % do cementových kompozitů významně zvýšil elektrickou vodivost a zlepšil piezorezistivní vlastnosti. [62]

Kim a kol. se dlouhodobě zabývali vlivem CF na homogenitu vodivých drah v cementových kompozitech obsahujících CNT a v jednom ze článků uvedli, že přídavek CF do kompozitů zlepšil elektrickou stabilitu vytvořením hierarchických vodivých sítí. [50]

### **1.7.3. Použití grafenu**

Rhee, I. a spol. v rámci své studie zkoušejí využít kombinaci grafenu a uhlíkových nanotrubiček ke snížení rezistivity silikátových kompozitů. Grafen a uhlíkové nanotrubičky jsou přidávány v množství 0,2, 0,4, 0,6 a 0,8 objemových % do malty tvořené jedním dílem cementu CEM I, třemi díly křemičitého písku, plastifikátorem a vody  $w_c = 0,5$ . Po 28 dnech zkouší vlastnosti vysušených zatvrdlých těles. [50]

### **1.7.4. Použití uhlíkových sazí**

Çinar ve svém výzkumu speciálního betonu nahradil cement uhlíkovými sazemi v množství 0, 1, 2 a 3 hm. %. Vzorky byly vytvrzeny elektrickým vytvrzováním a bylo zjištěno, že se zvyšujícím se podílem sazí se zvyšuje pórovitost betonu. [64]

### **1.7.5. Použití grafitu**

Lunak ve své práci zkoumal vlastnosti alkalicky aktivovaných kompozitních materiálů na bázi strusky s přídavkem různého množství mikromletého přírodního grafitu s dávkováním 1–10 hm. %. Sledoval hodnoty rezistivity a další parametry u deseti variant s krokem 1 hm. %. [65]

Snížení objemové hmotnosti silikátových kompozitů přímo ovlivňuje jejich pevnost v tlaku. Míra poklesu objemové hmotnosti, která je při použití grafitu typická, může být částečně kontrolována volbou správného grafitového prachu, největší vliv má velikost a tvar částic. Nejlepších vlastností kompozitu lze dosáhnout s vločkovými grafity. Izostatické rozložení grafitu v cementové hmotě může také zlepšit přenos napětí, jak ukázaly jiné studie s grafitem. [66]

Monteiro a spol. experimentálně zkoušeli směsi malt s přídavkem 0 %, 4 % a 10 % grafitového prachu. Používali maltu se složením jeden díl cementu CEM I a tři díly křemičitého písku s vodním součinitelem  $w_c=0,5$ . Pro každou recepturu byla vytvořena sada zkušebních těles  $40 \times 40 \times 160$  mm, na které byla stanovena rezistivita, pevnosti v tahu a tlaku. Rezistivita zkušebních těles byla stanovena z impedance, která byla změřena pomocí čtyř měděných elektrod umístěných do zkušebních těles. [33]

Guo vyrábí speciální elektrovedivé kamenivo tak, že modifikovaným agarovým roztokem s dispergovanými grafitovými prachy prosycuje pórovou strukturu keramzitu. Následně zkouší elektrické vlastnosti připraveného kameniva. [67]

#### **1.7.6. Použití kovových prášků**

Nayak se ve svém výzkumu zabývá využitím kovového odpadního železného prášku v cementové matrici. Tímto práškem nahrazuje pojivo až do množství

40 hm. %. Experimentálně zjištěné hodnoty pak porovnává s matematickým modelem a sleduje elektrickou vodivost zkoušeného kompozitu. [68]

#### **1.7.7. Použití ocelových vláken**

Norambuena-Contreras se ve svých výzkumných pracích zabývá elektrickým odporem silikátového kompozitu s využitím odpadních vláken ocelové vlny a ocelových hoblin. Zabývá se vývojem metody, kterou by zajistil dokonalou homogenizaci a distribuci v celém objemu kompozitu mechanicky řezaného a prosévaného pro usnadnění procesu míchání a hutnění surovin. [69]

#### **1.7.8. Další výzkumné práce věnující se kompozitům se sníženou rezistivitou**

Rovnaník se zabývá alkalicky aktivovanými kompozity, zejména struskovými, aktivovanými vodním sklem, a porovnává jejich elektrické vlastnosti se silikátovými kompozity. [70]

Z hlediska použití jsou podle Azhariho vhodná elektrovedivá plniva, která mají protáhlý tvar. Dobře rozmíchané částice takového tvaru snadno vytvoří spojitou síť uvnitř kompozitu, která pak vede elektrický proud přímým kontaktním vedením. Částice protáhlého tvaru mají větší pravděpodobnost vzájemného doteku a propojení sítě, než mají částice tvaru kulovitého. Částic protáhlého tvaru je třeba přidat za účelem dosažení požadovaných elektrovedivých vlastností významně nižší množství (až 10×) než částic kulovitého tvaru. [62]

Braganca dochází k závěru, že usazování Friedelových solí v cementové matrici a vysoká tvorba korozních produktů mají tendenci zvyšovat elektrický odpor kompozitů. [71]

Yehia a Host úspěšně použili elektrovodivý beton pro horní vrstvu mostovky, který současně sloužil jako anoda. Tento výzkum prokázal, že elektrovodivé kompozitní materiály mohou sloužit jako materiál pro tvorbu anody v rámci katodické ochrany výztuže pod napětím. [19]

### **1.8. Shrnutí poznatků z oblasti silikátových kompozitů se sníženou rezistivitou**

K dosažení elektricky vodivých vlastností kompozitních materiálů se ve světě používají elektrovodivá. Jsou to typicky jemné sypané materiály či vlákna s velikostí částic v řádu  $\mu\text{m}$ , nebo různé uhlíkové nanočástice. Přidání takové příměsi může přeměnit kompozit na bázi cementu na elektrovodivý materiál.

Elektricky vodivý silikátový kompozit se připravuje smícháním cementových materiálů s elektrovodivými plnivými. V závislosti na dalších vlastnostech, které od kompozitu budou očekávány, se volí přidávané elektrovodivé plnivo. Jsou to zejména, ocelová vlákna a mikroválkna, ocelové hoblíny, grafit, grafitová a uhlíková vlákna a mikroválkna (CF), uhlíková nanoválkna (CNF), uhlíkové nanotrubičky (CNT), grafen, antracit a uhlíkové saze (CB).

Obvykle se sypaná plniva dávkuje hmotnostně, zatímco nanočástice, které bývají ve formě suspenzí, se dávkuje objemově. Platí základní pravidlo, které vychází z fyzikální podstaty elektrovodivých plniv: čím více přidáváme do kompozitních materiálů elektrovodivého plniva, tím dosahujeme větší elektrické vodivosti, a tedy nižší rezistivity.

Pro nejčastěji používaná elektrovodivá plniva byla mnohými experimenty stanovena orientační množství těchto plniv, ve kterých je možno je přidávat. A to tak, aby bylo dosaženo co nejnižších hodnot rezistivity bez výrazného snížení mechanických či jiných vlastností kompozitu. Důležitým poznatkem pro experimentální část diplomové práce je, že plniva na bázi grafitu s velikostí částic

průměru 20  $\mu\text{m}$  lze přidávat v množství 1–10 hm.%, a tak docílit elektrické rezistivity až  $9,09 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ .

Při použití elektrovedivých plniv za účelem snížení rezistivity silikátového kompozitu je třeba zvážit nejen pozitivní, ale také negativní vlivy, které se s daným plnivem pojí. V případě plniv na bázi grafitu se jedná zejména o snížení pevnosti v tlaku, snížení objemové hmotnosti a zvýšení autogenního smršťování vlivem zvýšení vodního součinitele.

## CÍL PRÁCE

Hlavním cílem diplomové práce je zhodnocení dominantních vlivů na rezistivitu silikátového kompozitu na základě studia struktury. Za účelem dosažení hlavního cíle bylo vytyčeno několik dílčích cílů, které jsou postupně řešeny v samostatných kapitolách.

Prvním dílčím cílem je výběr vhodných elektrovodivých plniv, zejména různě hrubých grafitů a dalších elektrovodivých plniv s vysokým obsahem uhlíku. Pro všechna dostupná plniva bude provedena analýza vlastností, na základě, které může být učiněn výběr nejvhodnějších plniv pro experimentální činnost.

Podstatným dílčím cílem je provedení návrhu surovinových variant elektrovodivých cementových past a malt v suchém stavu a stanovení rezistivity připravených suchých směsí.

Důležitým dílčím cílem je přibližné určení perkolačních prahů vybraných plniv v suchých směsích.

Následujícím dílčím cílem je příprava vybraných variant čerstvých směsí elektrovodivých cementových past a malt shodného surovinového složení s variantami suchých směsí.

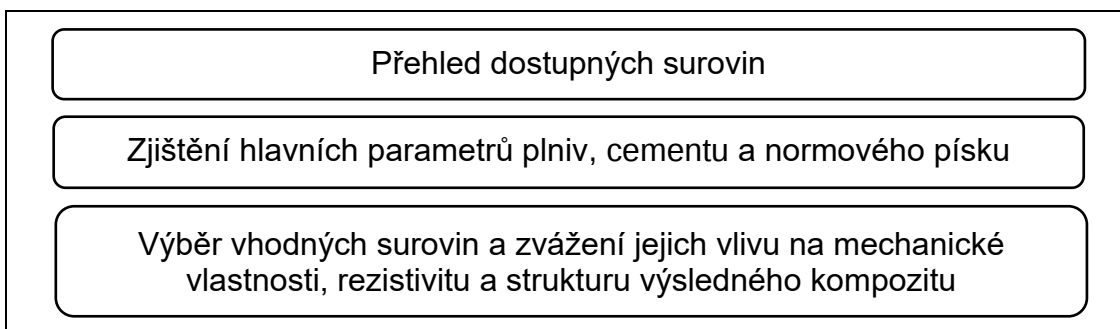
Dalším důležitým dílčím cílem je stanovení perkolačních prahů vybraných plniv v zatvrdlém kompozitu po 28 dnech. A zhodnocení korelace obou způsobů přípravy a měření rezistivit.

# PRAKTICKÁ ČÁST

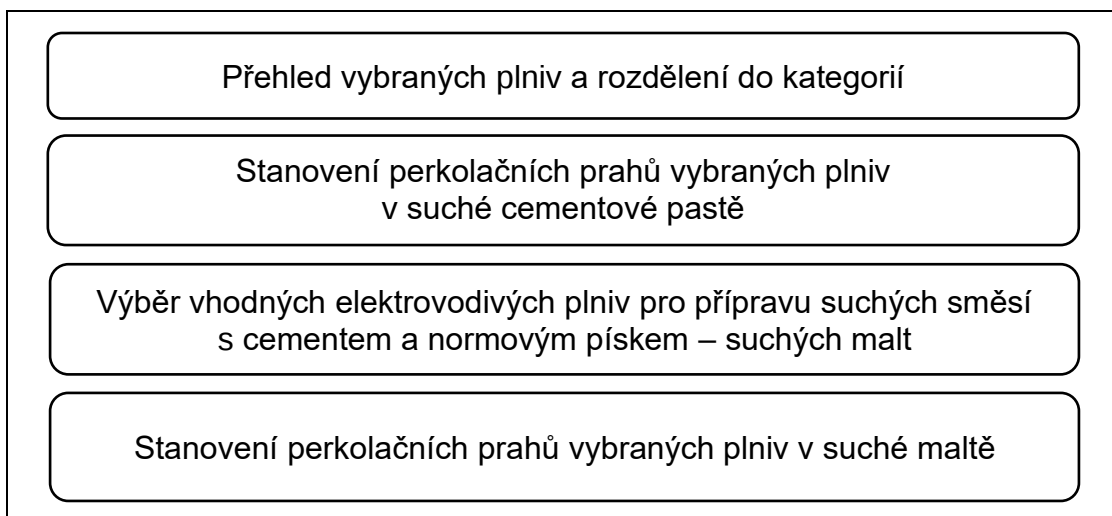
## 2. METODIKA PRÁCE

V rámci metodiky práce byla praktická část rozdělena na čtyři po sobě jdoucí etapy, ve kterých budou systematicky řešeny dílčí cíle práce.

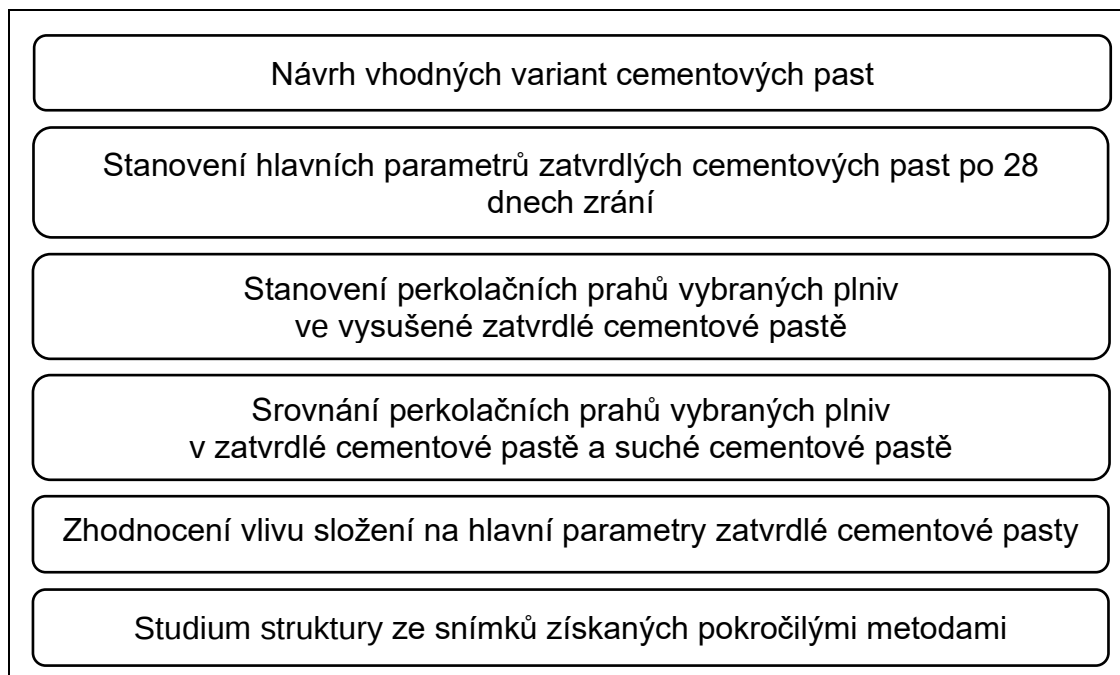
### 2.1. Přehled I. etapy – Analýza a výběr vhodných surovin



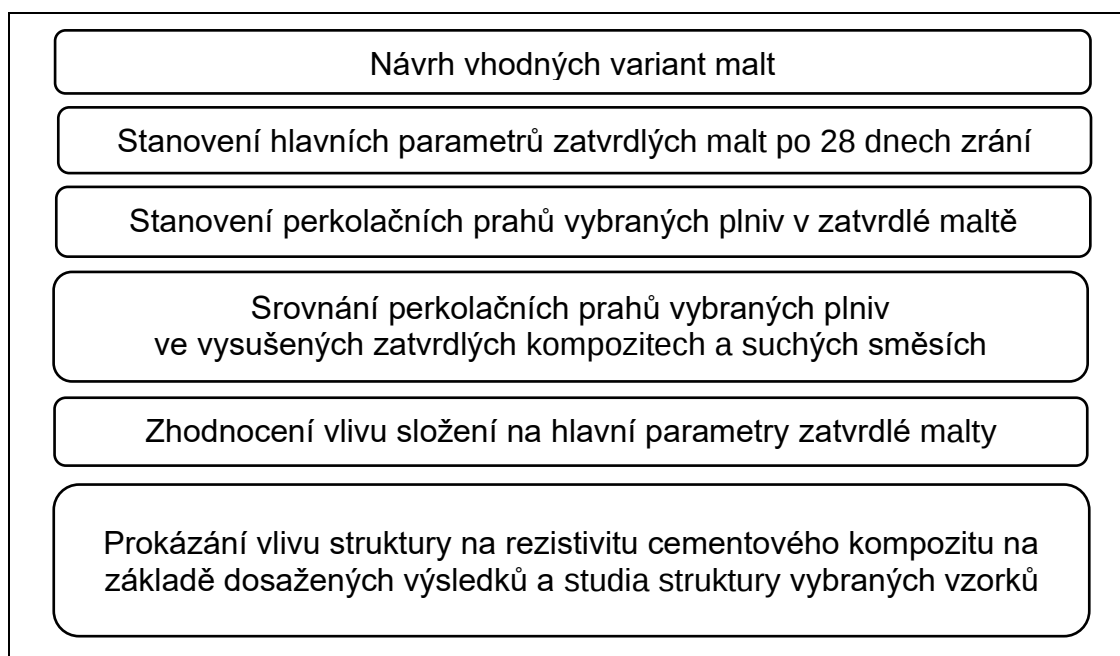
### 2.2. Přehled II. etapy – Stanovení rezistivity a perkolačních prahů suchých směsí



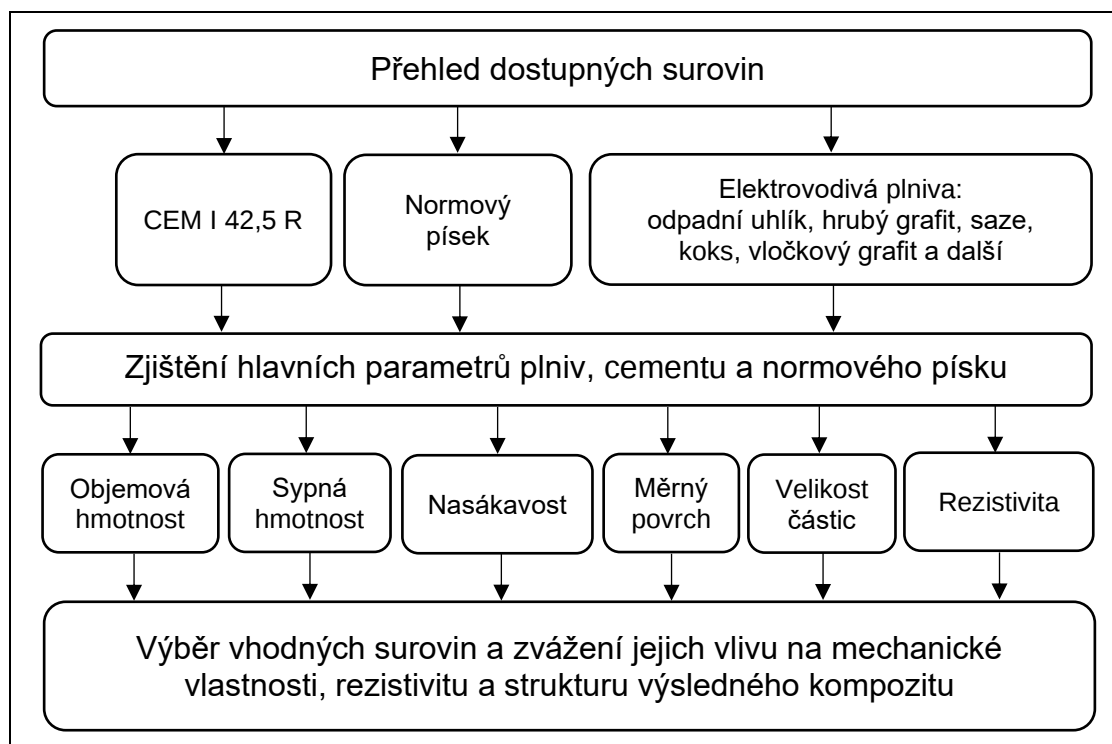
### 2.3. Přehled III. etapy – Stanovení hlavních parametrů a studium struktury zatvrdlých cementových past po 28 dnech zrání



### 2.4. Přehled IV. etapy – Stanovení hlavních parametrů zatvrdlých malt po 28 dnech zrání

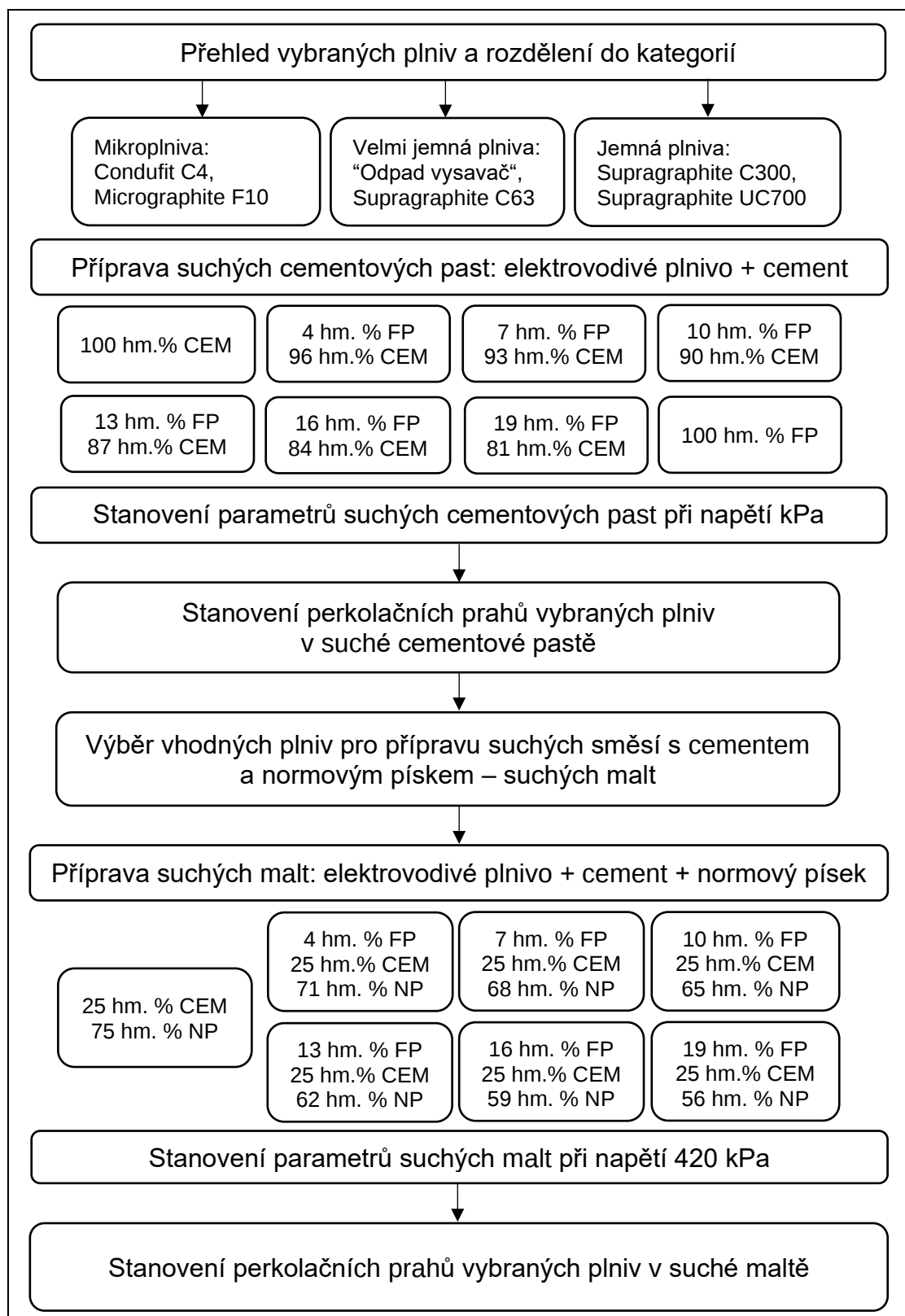


## 2.5. Podrobné schéma a popis I. etapy – Analýza a výběr vhodných surovin



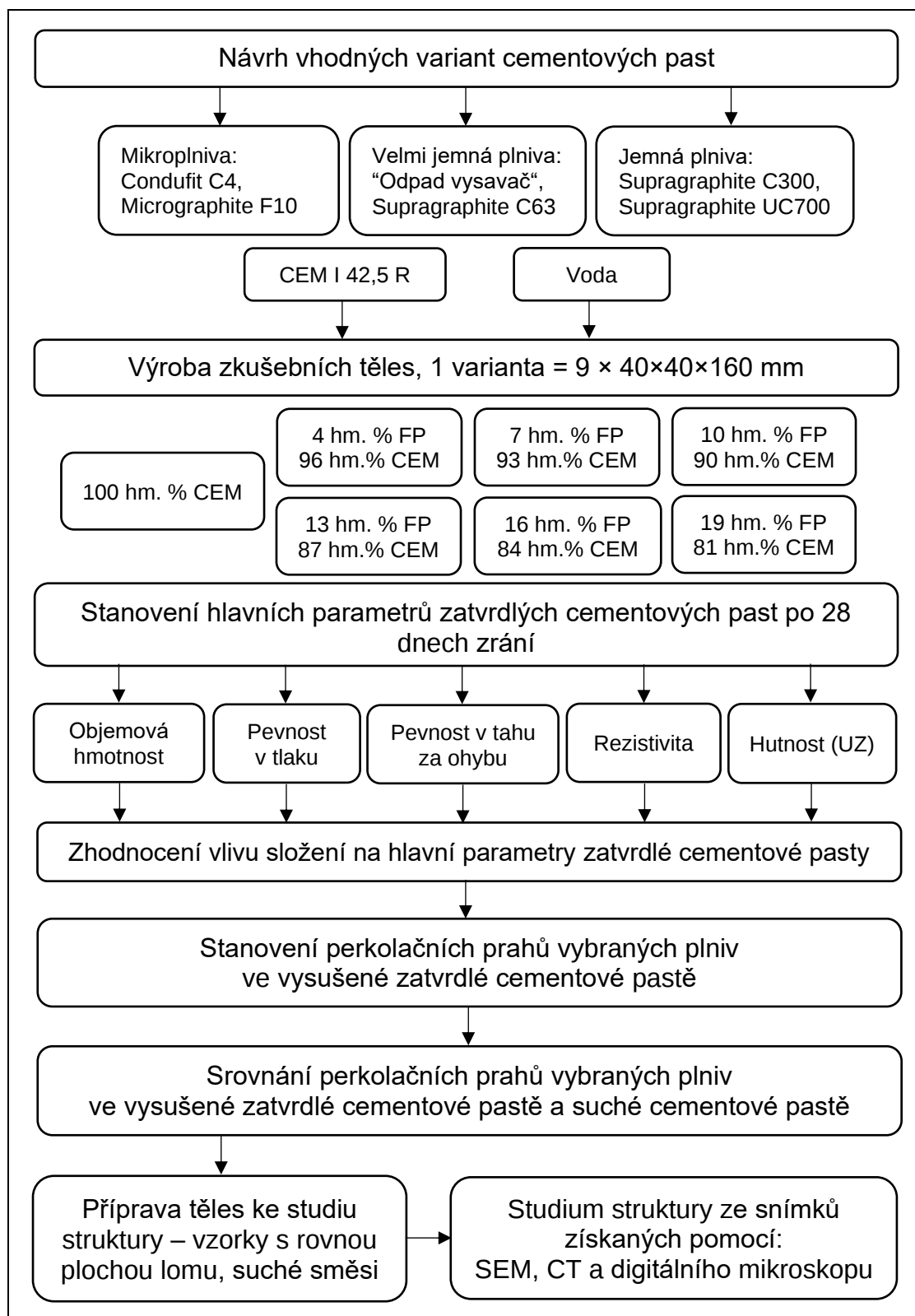
Hlavním cílem první etapy je výběr vhodných elektrovodivých plniv, zejména různě hrubých grafitů, pro studium vlivu struktury na rezistivitu silikátového kompozitu. V první etapě bude zpracován souhrn potenciálně vhodných elektrovodivých plniv s vysokým obsahem uhlíku, u kterých jsou zjištěny důležité parametry pro učinění kvalifikovaného výběru. Hlavními parametry, které budou zohledněny při výběru plniv pro další etapy, je jejich rezistivita a velikost částic. Nasákavost plniv bude použita jako pomocný parametr. Pro účely dalších etap budou všechna plniva rozdělena do tří kategorií na základě velikosti částic. Rozlišována budou mikroplniva, velmi jemná plniva a jemná plniva. Z každé z kategorií budou vybrána dvě plniva, která budou mít vzájemně podobnou, co možná nejnižší úroveň rezistivity a současně se budou podobat velikostí částic. Výstupem první etapy bude šest plniv vhodných pro použití v dalších etapách.

## 2.6. Podrobné schéma a popis II. etapy – Stanovení rezistivity a perkolačních prahů suchých směsí



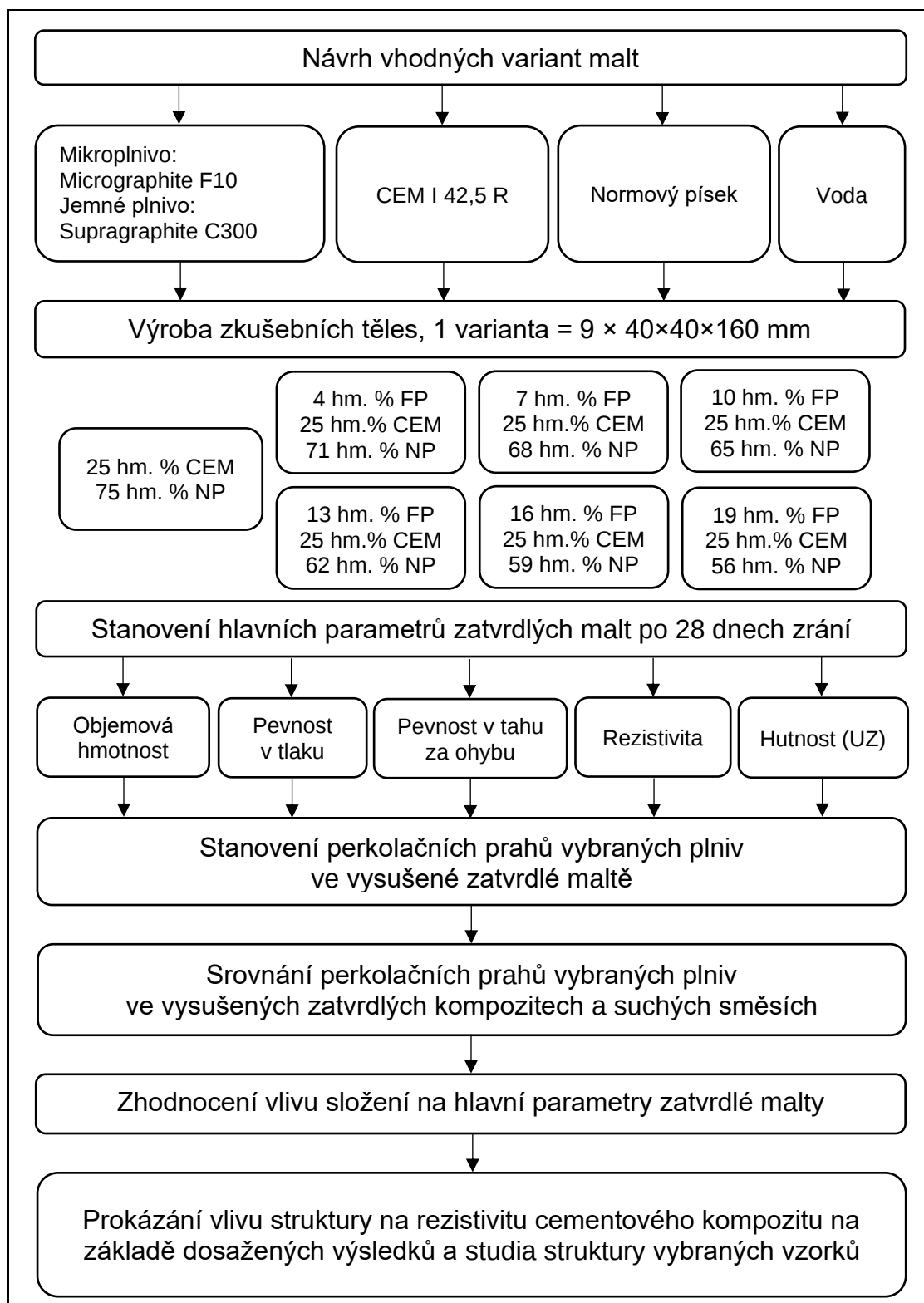
V předchozí etapě bylo vybráno šest plniv, dvě plniva z každé ze tří kategorií podle velikosti částic. Během druhé etapy budou připraveny suché směsi cementu CEM I 42,5 R s vybranými plnivy a jsou nazývány suché cementové pasty. Bylo naplánováno, že vhodná náhrada cementu elektrovodivým plnivem je 4, 7, 10, 13, 16 a 19 hm. %. U připravených suchých cementových past budou z naměřených hodnot stanoveny hlavní sledované parametry suchých směsí. Rezistivita při napětí 420 kPa a objemová hmotnost při napětí 420 kPa. Na základě stanovené rezistivity budou přibližně stanoveny perkolační prahy pro jednotlivá plniva v suché cementové pastě. Následně budou vybrána dvě vhodná plniva pro použití v suché cementové maltě. Příprava a měření suchých směsí cementu CEM I 42,5 R, normového písku 0–2 a vybraných plniv bude provedena shodným způsobem jako příprava suchých cementových past. Pro porovnatelnost výsledků bude zachována náhrada 4, 7, 10, 13, 16 a 19 hm. %. avšak u malt grafitové prachy nahrazují normový písek, množství cementu zůstává neměnné a to 25 hm. % celku. Stejně jako u suchých cementových past bude z naměřených hodnot stanovena rezistivita při napětí a objemová hmotnost při napětí pro suché cementové malty. Rovněž budou přibližně určeny perkolační prahy vybraných plniv v suché maltě. Výsledky druhé etapy budou později porovnány s výsledky dalších etap. Zjištěné parametry, zejména rezistivita při napětí a perkolační práh suchých směsí, jsou nedílnou součástí podkladů pro studium vlivu struktury na rezistivitu silikátového kompozitu.

## 2.7. Podrobné schéma a popis III. etapy – Stanovení hlavních parametrů a studium struktury zatvrdlých cementových past po 28 dnech zrání



Ve třetí etapě budou připravena zkušební tělesa z cementové pasty, která budou vytvořena smícháním cementu CEM I 42,5 R s vodou a plnivy vybranými v druhé etapě. Množství, ve kterých bude cement nahrazen příslušným plnivem, bude již obvyklých 4, 7, 10, 13, 16 a 19 hm. %. Množství vody bude voleno individuálně pro každou variantu směsi podle konzistence. Lze předpokládat, že vodní součinitel bude, vzhledem k rozdílným parametrům a dávkám plniv, proměnlivý. Zkušební tělesa ze zatvrdlých cementových past budou zkoušena po 28 dnech za účelem zjištění hlavních parametrů. Nejprve bude stanovena objemová hmotnost nasyceného vzorku a mechanické vlastnosti, jako je pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku. Také bude zjištěna objemová hmotnost a rezistivita vysušené zatvrdlé cementové pasty. Na základě stanovených parametrů bude provedeno zhodnocení vlivu složení na hlavní parametry cementových past. Budou rovněž přibližně stanoveny perkolační prahy na základě rezistivit všech variant zatvrdlých cementových past a bude provedeno srovnání perkolačních prahů vybraných plniv v zatvrdlé cementové pastě s perkolačními prahy oněch plniv v suché směsi. Na základě tohoto srovnání budou vybrány vzorky pro studium struktury digitálním mikroskopem, pokročilými metodami SEM, EDX a pomocí výpočtové mikrotomografie.

## 2.8. Podrobné schéma a popis IV. etapy – Stanovení hlavních parametrů zatvrdlých malt po 28 dnech zrání



Pro čtvrtou etapu budou během výroby těles pro třetí etapu připravena zkušební tělesa z cementové malty. Pro jejich výrobu bude použit cement CEM I 42,5 R, dvě plniva z druhé etapy, která byla zkoušena v suchých maltách, a voda. U suchých malt zůstává konstantní množství cementu, normový písek je nahrazen vybranými plnivý v již zavedeném a osvědčeném množství 4, 7, 10, 13, 16 a 19 hm. %. Množství vody bude voleno individuálně pro každou variantu směsi podle konzistence. Po 28 dnech zrání budou zkušební tělesa zatvrdlých malt zkoušena za účelem zjištění hlavních parametrů. Bude stanovena objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku nasyceného vzorku. Bude zjištěna objemová hmotnost a rezistivita vysušené zatvrdlé cementové pasty. Na základě stanovených parametrů bude provedeno zhodnocení vlivu složení na hlavní parametry zatvrdlých malt a bude provedeno srovnání se zatvrdlými cementovými pastami. U přibližně stanovených perkolačních prahů vybraných plniv v zatvrdlých maltách bude provedeno srovnání s perkolačními prahy stejných plniv v suchých maltách, suchých cementových pastách a zatvrdlých cementových pastách. Tato srovnání budou v kombinaci s výsledky a závěry z předešlých etap dobrými podklady pro prokázání vlivu struktury na rezistivitu cementového kompozitu.

### **3. METODY PROVÁDĚNÝCH ZKOUŠEK A MĚŘENÍ**

Nejprve jsou popsány zkoušky a měření vstupních surovin a suchých směsí, následně se tato část věnuje zkouškám prováděným na zatvrdlých cementových pastách a maltách a v poslední řadě a v závěru jsou představeny pokročilé optické a výpočetní metody, které byly využity k pozorování vzorků zatvrdlých past, zatvrdlých malt i suchých směsí.

Rozsah popisu uvedených zkoušek a měření se odvíjí od dostupnosti informací k dané problematice. To znamená, že zkoušky a měření, ke kterým jsou dostupné normové postupy, jsou pouze stručně shrnuty, zatímco vlastní metodické postupy nebo složitější přístrojová měření jsou popsány do větších detailů. Zejména vlastní metodický postup měření impedance suchých směsí při napětí 420 kPa je podrobně popsán a fotograficky zdokumentován.

#### **3.1. Zkoušky a měření vstupních surovin a suchých směsí**

##### **3.1.1. Objemová hmotnost**

Pro získání dostatečně vypovídající hodnoty byla objemová hmotnost zjišťována pomocí přístrojového plynového pyknometru AccuPyc II 1340. Při měření velmi jemných plniv a mikroplniv nemusí být za pomoci běžných skleněných pyknometrů a lihové metody dosaženo přesných hodnot. Měření bylo provedeno shodným způsobem s normovým postupem popsaným v normě ČSN EN 1097-6. [72]

##### **3.1.2. Sypná hmotnost**

Dalším velmi důležitým parametrem zjišťovaným u částicových, sypkých surovin je sypná hmotnost. Typicky rozlišujeme a zjišťujeme dvě různé hodnoty, a to sypnou hmotnost volně sypané suroviny a sypnou hmotnost setřesené suroviny. Jednotkou sypné hmotnosti jsou  $\text{kg/m}^3$ . Oba postupy jsou přesně popsány v normě ČSN EN 1097-3. [73]

##### **3.1.3. Nasákavost**

U všech plniv byla zkouška nasákavosti provedena podle normy pro pórovitá kameniva ČSN EN 13055 (D). [74]



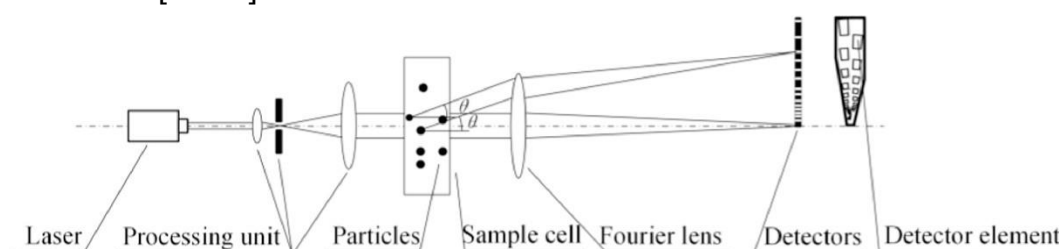
Obrázek 4: Průběh zkoušky Nasákavosti WA5 (foto autora)

#### 3.1.4. Měrný povrch

V rámci této práce byl měrný povrch plniv velmi jemných plniv a mikroplniv měřen metodou BET ve shodě s normou ISO 9277:1995 (E). Vzhledem k větší náročnosti a nákladnosti metody BET bylo pro stanovení měrného povrchu jemných plniv, u kterých bylo předpokládáno převažující množství částic větších než 0,063 mm, využito jednodušší metody pro stanovení měrného povrchu – permeabilní metody dle Blaina dle normy ČSN EN 196-6. [75-77]

### 3.1.5. Velikost a distribuce částic

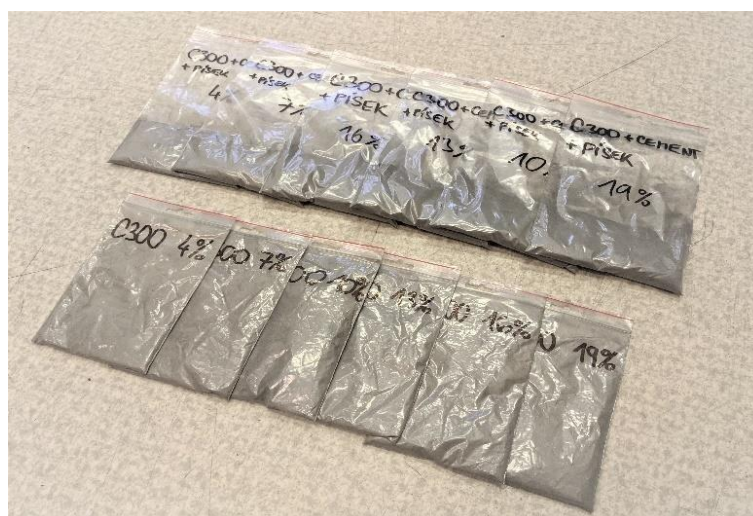
Velikost a distribuce částic byla zjišťována zvlášť nejprve pro jemná elektrovodivá plniva, u kterých bylo předpokládáno převažující množství částic větších než 0,063 mm. U těchto plniv byl proveden standardní síťový rozbor dle normy ČSN EN 933-1. Podsítný zbytek těchto plniv byl následně analyzován spolu s dalšími elektrovodivými plnivy přístrojovou metodou. Použitou přístrojovou metodou byla laserová difrakční analýza provedena dle normy ISO 13320:2009. [78-79]



Obrázek 5: Schéma typického nastavení laserových difraktometrů [80]

### 3.1.6. Příprava suchých směsí

Suché směsi byly připravovány jednoduchým způsobem, kdy bylo do nerezové misky naváženo požadované množství grafitového, cementu a po případě normového písku v závislosti na připravované receptuře. Navážená suchá směs byla homogenizována pomocí rotačního homogenizátoru a následně umístěna do hermeticky uzavíratelného sáčku pro udržení směsi v suchém stavu. Důležitým předpokladem, na který bylo dbáno, a který byl dodržen, bylo zachování přesných procentuálních množství jednotlivých složek při přípravě suchých směsí a později čerstvých směsí pro výrobu zkušebních těles.



Obrázek 6: Připravené sáčky suchých směsí (foto autora)

### **3.1.7. Stanovení parametrů elektrovodivých plniv a suchých směsí při napětí 420 kPa**

Za účelem zjištění rezistivity a měrné hmotnosti elektrovodivých plniv a suchých směsí při napětí byl v rámci této diplomové práce vylepšen nový metodický postup, který byl navržen, popsán a úspěšně ověřen výzkumným týmem pod vedením profesora Rostislava Drochytky.

#### **Měření impedance při napětí 420 kPa**

Impedance je hlavním parametrem zjišťovaným u elektrovodivých plniv. Na základě impedance přepočítané na rezistivitu budou na konci první etapy vybrána nejvhodnější plniva pro následující etapy. Impedanci samotných elektrovodivých plniv a suchých směsí ovlivňuje řada faktorů. Mezi hlavní faktory patří celkový obsah uhlíku, tvar a charakter povrchu částic, velikost částic a schopnost hutnit se, která je vyjádřena objemovou hmotností při napětí.

#### **Objemová hmotnost při napětí 420 kPa**

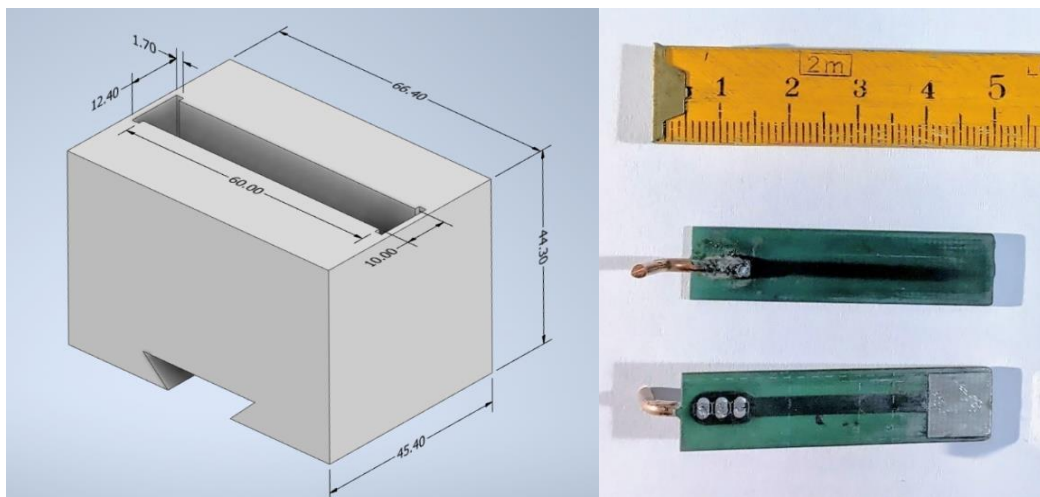
Jedná se částečně o sypanou hmotnost setřesené sypké suroviny, kdy je proces střešení nahrazen kontrolovaným lisovacím tlakem. Při stlačení navážky zkoušené suroviny ve zkušebním přípravku dochází k jeho hutnění, postupnému přibližování všech částic, zvyšování objemové hmotnosti. Vyvození napětí probíhá v lisu, který konstantní rychlostí zatěžuje suchou směs v přípravku tak, aby bylo umožněno průběžné dotvarování navážky.

#### **Rychlost zatěžování a maximální napětí 420 kPa**

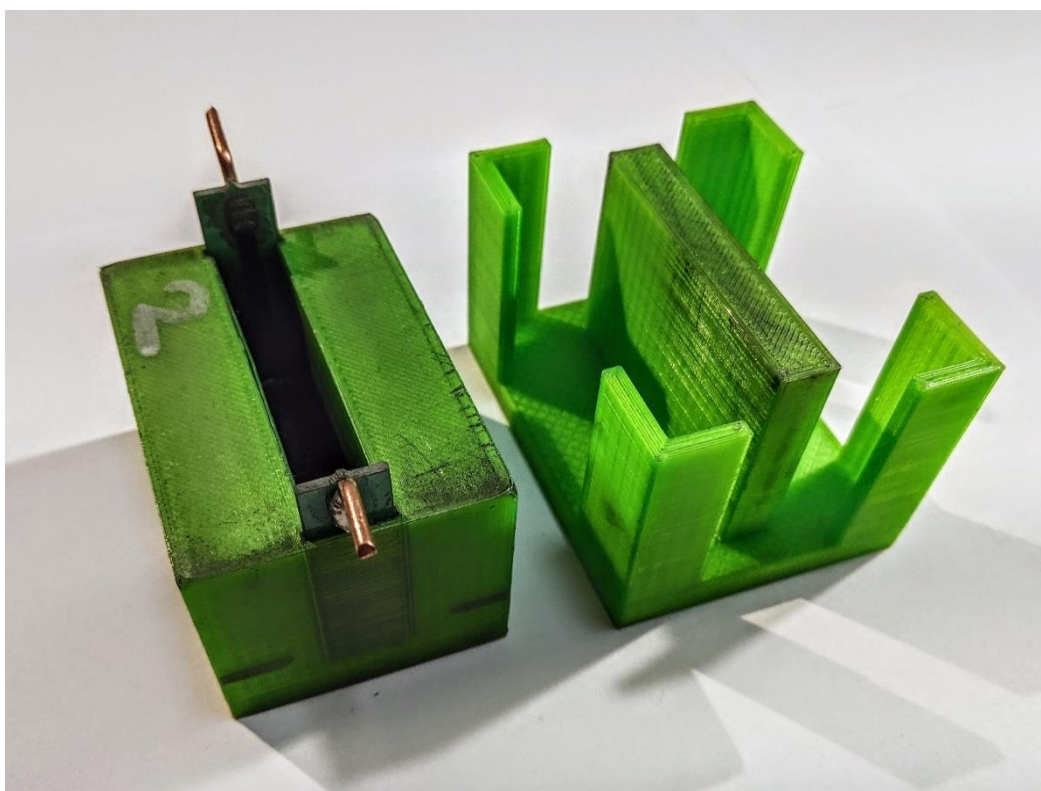
Proces vylepšení metodického postupu měření impedance a měrné hmotnosti při napětí elektrovodivých plniv a suchých směsí obnášel stovky měření, kdy byla hledána optimální rychlost zatěžování a maximální tlak. Optimální rychlost byla stanovena na 2,5 mm za jednu minutu. Jako maximální síla, kterou bude zatížen přípravek s vodorovnou plochou 6 cm<sup>2</sup>, je 250 N. Ta vyvolá v suché směsi napětí 420 kPa. Množstvím opakovaných kalibračních měření bylo zjištěno, že při napětí 420 kPa již impedance neklesá, ani neroste.

## Vybavení a pomůcky

- a. Přípravek PTP6 se zkušební komorou 10x60x35 mm
- b. Protikus přípravku s hutnícím pístem
- c. Elektrody EDP (elektrody do přípravku)
- d. Měřicí přístroj GW Instek LCR-6020
- e. Lis Testometric M350-20CT



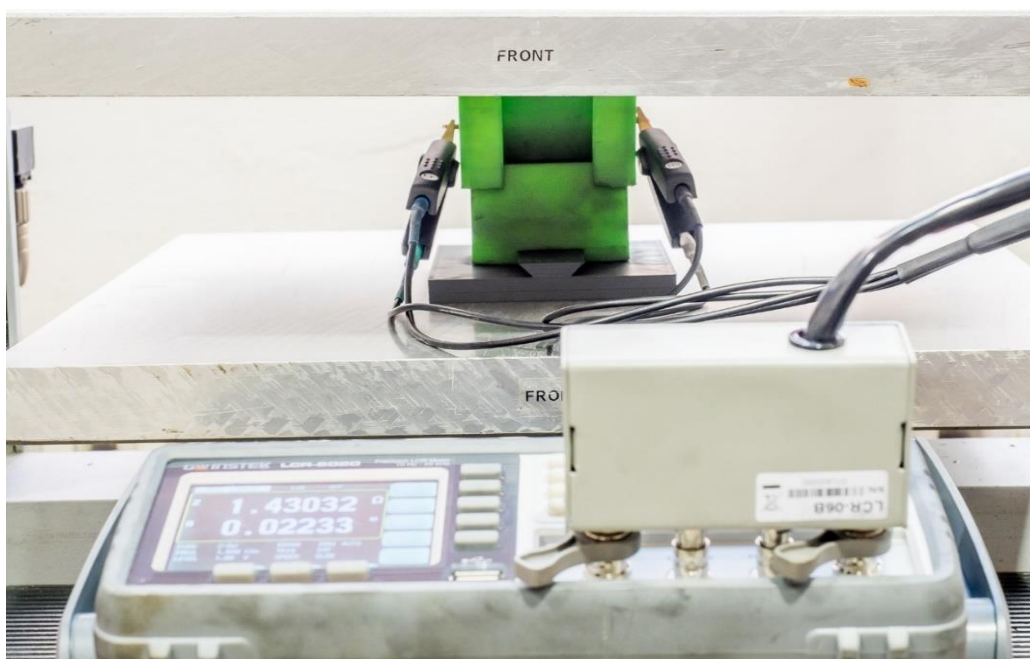
Obrázek 8: Přípravek PTP6 a elektrody EDP, kóty v mm  
(foto autora)



Obrázek 7: Přípravek PTP6 s umístěnými elektrodami a protikus přípravku  
(foto autora)

## Postup měření

- I. Do přípravku s umístěnými elektrodami se naváží takové množství plniva, suché směsi nebo jiné sypké látky, aby po setřesení třiceti drobnými údery přípravku o podložku zůstala rezerva 5 mm od horního okraje přípravku.
- II. Naplněný přípravek s umístěnými elektrodami ve správné pozici se uzavře protikusem a celá sestava se vloží do zkušebního prostoru mezi plochami lisu.
- III. K elektrodám přípravku se připojí svorky měřicího přístroje GW Instek LCR-6020 a plochy lisu se umístí do výchozí polohy.
- IV. Spustí se proces lisování rychlostí 2,5 mm/min. Zaznamenávají se hodnoty impedance při zatěžovací síle 25 N, 50 N, 75 N, 100 N, 150 N, 200 N, 250 N.
- V. Po dosažení maximální požadované síly 250 N se vzorek odtíží, vyjme z lisu, opatrně se odejme protikus a několikrát se změří výška od povrchu ztuhlé vrstvy po horní hranu přípravku. Tento rozměr je klíčový pro výpočet objemové hmotnosti při napětí.
- VI. Přípravek se vyprázdní a vyčistí od zbytků sypkého materiálu. Až pak může být použit k dalšímu měření.

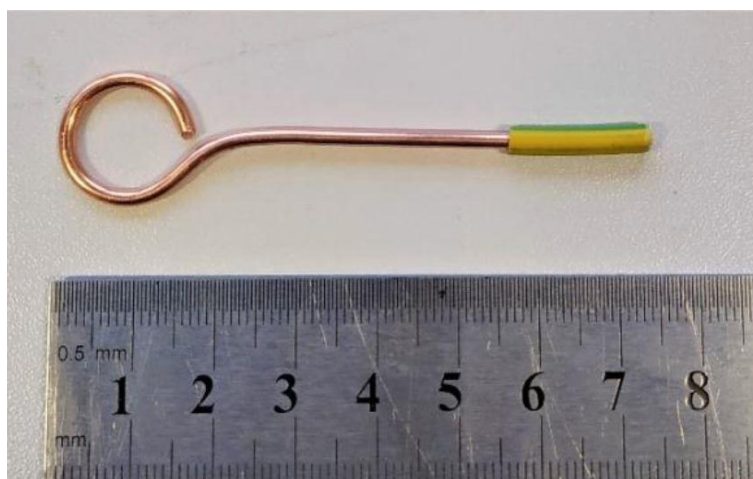


Obrázek 9: Průběh měření Impedance suché směsi při stlačení (foto autora)

## 3.2. Příprava a zkoušky cementových past a malt

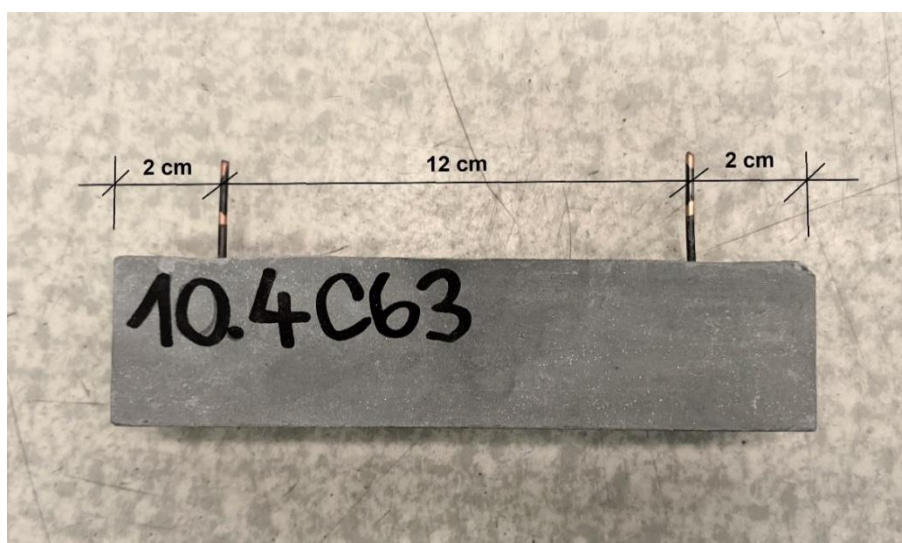
### 3.2.1. Příprava čerstvé směsi

Čerstvé směsi byly připravovány s velkým důrazem na kvalitu provedení. Pro každou z receptur bylo vyrobeno 54 zkušebních těles o rozměrech  $40 \times 40 \times 160$  mm. Jedna sada – devět zkušebních těles pro každou z variant. Šest těles z každé sady bylo opatřeno dvěma měděnými elektrodami ve vzdálenosti 2 cm od okraje formy, tedy ve vzájemné vzdálenosti 12 cm.



Obrázek 10: Měděná elektroda (foto autora)

Nejprve byly naváženy suroviny, které byly ručně zamíchány ve velké nerezové míse. Vzniklou suchou směsí byla naplněna nádoba laboratorní míchačky, ve které probíhala další homogenizace. Ta byla prováděna míchací lopatkou na nejnižší otáčky po dobu 5 minut.



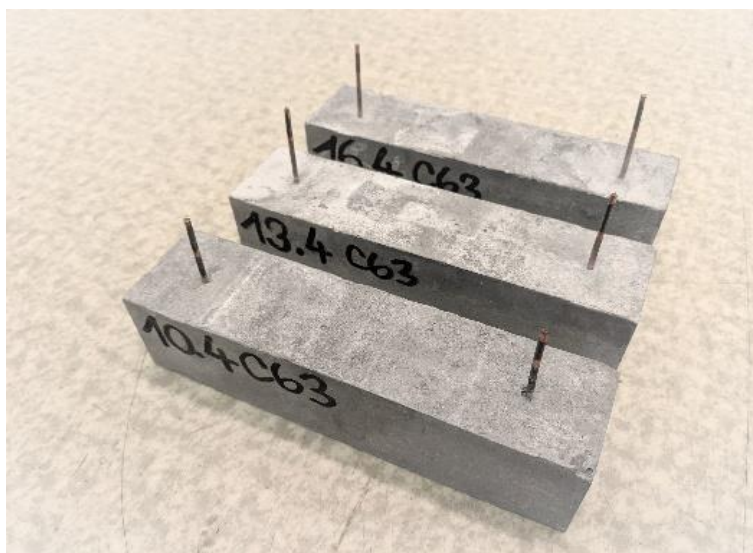
Obrázek 11: Vzájemná vzdálenost elektrod ve zkušebním tělesu (foto autora)

Do téměř homogenní suché směsi byla přidávána voda v základním množství 0,5 dílu cementu. Další voda byla přidávána v množství určeném individuálně pro každou recepturu, klíčovým parametrem bylo vodní součinitel zvyšovat co nejméně. Zároveň však dbát na zpracovatelnost tak, aby bylo možno vzniklou směsí naplnit formy a aby bylo možné směs ve formách hutnit pomocí vibračního stolku.



Obrázek 12: Naplněná forma (foto autora)

Takto připravenými směsmi byly plněny trojformy, které byly po naplnění zhutněny na vibračním stolku, povrch byl uhlazen špachtlí a plné formy překryty polyethylenovou fólií. Čerstvé směsi zrály po dobu jednoho dne ve formách uloženy v laboratorních podmínkách. Po 24 hodinách tvrdnutí byly vzorky vyjmuty z forem, označeny a uloženy po dobu dalších 27 dní v mokrému uložení.



Obrázek 13: Označení zatvrdlých těles po vyjmutí z formy po 28 dnech zrání (foto autora)

### 3.2.2. Kontrola zpracovatelnosti čerstvé směsi

Zpracovatelnost čerstvé směsi byla kontrolována normovým postupem dle normy ČSN EN 1015-3. [81] Vzhledem k charakteru plniv, kterými jsou velmi jemné suroviny s velkým měrným povrchem, nešlo v podstatě docílit rovnoměrné konzistence bez zásadních rozdílů ve vodním součiniteli. Proto byla konzistence pomocí střešovacího stolku kontrolována pouze orientačně.

### 3.2.3. Příprava zatvrdlých zkušebních těles k měření impedance

Pro porovnatelnost impedance suchých směsí se zatvrdlými kompozity, ať už se jedná o cementové pasty nebo malty, byla všechna zkušební tělesa vysušena do stavu velice blízkému 0 % vlhkosti. Sušení zkušebních těles po zrání ve vodním uložení probíhalo v laboratorní sušárně od výrobce Controls nejprve při teplotě 50 °C po dobu jednoho týdne, následně byly vzorky zváženy.

Teplota 50 °C je žádoucí, protože při rychlém odchodu vody, ke kterému by mohlo dojít při sušení na vyšší teplotu by mohlo dojít k narušení propojení elektrod s hmotou zkušebního tělesa. To by výrazně ovlivnilo výsledky později prováděných měření. Další fáze sušení byly prováděny při teplotě 100 °C po dobu jednoho dne, následovala kontrola hmotnosti vzorků a případné další sušení. Tímto způsobem byly vzorky vysušeny do konstantní hmotnosti.

Vysušené vzorky byly zanechány ve vypnuté sušárně po dobu jednoho dne, aby vychladly na teplotu, při které bude měřena impedance, teplota  $21,5 \pm 1$  °C. Během této doby obvykle vzorky nabraly 0–0,25 % vlhkosti. Takto nízká vlhkost byla zanedbána.

### 3.2.4. Stanovení rezistivity

Stanovení rezistivity plně zatvrdlých zkušebních vzorků bylo provedeno podle ČSN EN IEC 62561-7. K vnitřním elektrodám zkušebních vzorků byly připnuty elektrody LCR měřicího zařízení GW Instek LCR-6020 a byla měřena impedance  $Z$  a úhel  $\theta$ . [82] Ze zaznamenaných hodnot byla později vypočítána rezistivita.

Rezistivita se vypočítá pomocí vzorce:

$$\rho = (R \times A) / a,$$

kde  $\rho$  je rezistivita [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ],

$R$  je odpor [ $\Omega$ ],

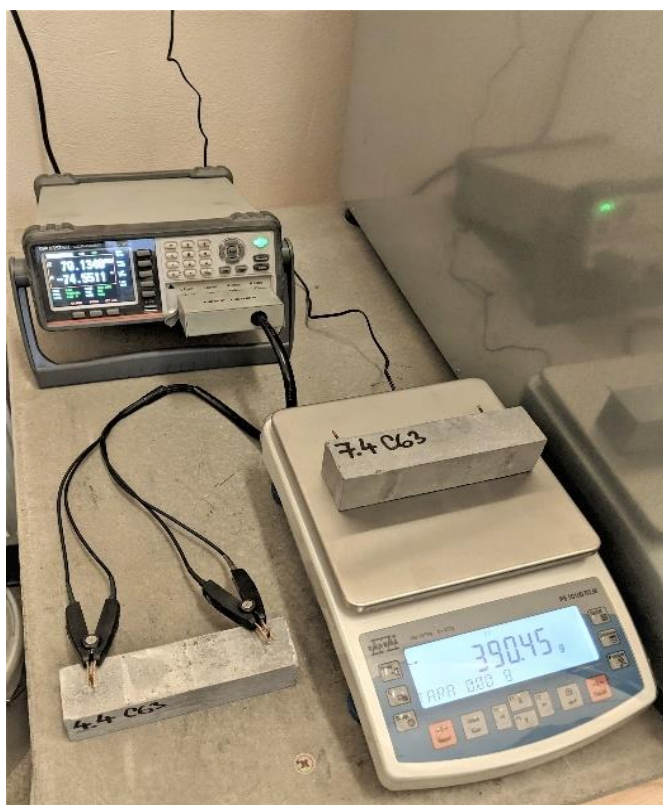
$A$  je plocha vodiče kolmá na směr proudu v [ $\text{cm}^2$ ],

$a$  je vzdálenost mezi vnitřními elektrodami [ $\text{cm}$ ]

V případě, že byla impedance  $Z$  měřena u zkušebních vzorků, které využívají jako vnitřní elektrody vyráběné elektrody z měděného drátu průměru 2,26 mm, dosazuje se za plochu  $A$  hodnota 4,29  $\text{cm}^2$ , tato hodnota představuje plochu pláště a podstavy do tělesa vnořené části jedné z elektrod. Za vzdálenost  $a$  se pro účely práce dosazuje vždy 12 cm, protože všechny zkušební vzorky byly stejné. Úhel  $\theta$  byl přepočítán ze stupňů na radiány a označen  $\theta_r$ .

Impedance  $Z$  byla na odpor  $R$  přepočítána pomocí vzorce:

$$R = Z \times \cos(\theta_r)$$



Obrázek 14: Vážení hmotnosti zkušebních těles a měření impedance (foto autora)

### **3.2.5. Přibližné stanovení perkolačních prahů**

Neboť pro úspěšnou aplikaci analytických metod nebylo nasbíráno dostatečné množství hodnot, byl pro přibližné stanovení perkolačního prahu zaveden faktor SZR, faktor skokové změny rezistivity. Množina intervalů, pro které určujeme jejich faktor SZR je vždy o jedna menší, než je množina variant, pro které máme stanovené hodnoty rezistivity. Faktor SZR vyjadřuje, kolikrát je rezistivita na začátku zvoleného intervalu větší než rezistivita na konci intervalu. Faktor SZR je vždy vyjádřen celým číslem, uvádí se bez jednotky a může nabývat kladných i záporných hodnot. Perkolační práh nejpravděpodobněji leží vždy v intervalu s nejvyšší kladnou hodnotou faktoru SZR.

### **3.2.6. Zkoušení mechanických vlastností zatvrdlých kompozitů**

Na zkušebních tělesech zatvrdlých kompozitů, které byly skladovány ve vodním uložení, byly po 28 dnech zrání zkoušeny dva základní parametry pro všechny silikátové kompozitní materiály. Byla zjišťována pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku po 28 dnech.

#### **Pevnost v tahu za ohybu**

V souladu s normou ČSN EN 12390-5 byla pevnost v tahu za ohybu zkoušena na zkušebních tělesech 40×40×160 mm. [83]

#### **Pevnost v tlaku**

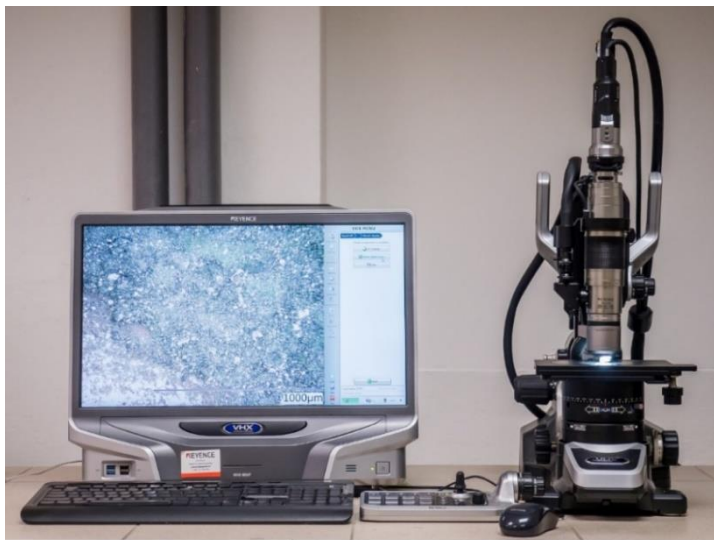
V souladu s normou ČSN EN 12390-4 byla pevnost v tlaku zkoušena na částech vzorků vzniklých při zkoušce pevnosti v tahu za ohybu. Vzorky vkládáme do přípravku tak, aby byla namáhána vždy plocha 40×40 mm. [84]

### 3.3. Studium mikrostruktury částic a kompozitů

Ke studiu struktury použitých elektrovedivých plniv a rovněž zkoumaných suchých směsí byla použito několika pokročilých zařízení a metod. Jedná se o metody SEM a EDX provedené na skenovacím elektronovém mikroskopu, dále o metodu Micro-CT a pozorování a snímkování vzorků na optickém mikroskopu. Snímky a výsledky získané těmito metodami by se měly obsahově vzájemně doplňovat a shodovat. Shodnost několika dostatečně podobných výsledků získaných odlišnými přístroji a metodami umožnila určitý stupeň pochopení vztahů mezi mikrostrukturou a vlastnostmi pozorovaných vzorků.

#### 3.3.1. Digitální mikroskop

Pro základní pozorování struktury materiálů a výběr vhodných vzorků pro pokročilejší optické metody byl použit digitální optický mikroskop z řady VHX-7000 od japonského výrobce Keyence, který mimo jiné umožňuje pozorování i nerovného povrchu a pořízení velmi ostrých snímků při zvětšení až 1000×. Digitální optický mikroskop rovněž umožňuje za pomoci polarizačních sklíček barevně zvýraznit určitý typ částic na základě odlišných odrazivostí povrchů a chemické podstaty částic. Na základě několika pozorování na optickém mikroskopu a předchozích zkušenostech bylo rozhodnuto, že u všech pro studium struktury vybraných variant cementových past budou pozorovány vždy lomové plochy. Jiné způsoby přípravy vzorků — řez kotoučovou pilou, vodním paprskem, vybrušováním, jsou méně vhodné. [85]



Obrázek 15: Digitální mikroskop Keyence VHX-7000  
(foto autora)

### 3.3.2. Elektronový mikroskop

Pro účely této práce byl využit mikroskop MIRA3 brněnské značky TESCAN, kterým byly pořízeny snímky použitých plniv ve zvětšení  $250\times$ – $20\,000\times$ . Pro elektronový mikroskop byly připravovány rovněž vzorky suchých směsí, které byly zmáčknuty stejným napětím jako suché směsi, u kterých byla měřena rezistivita. Vzorky byly zamáčknuty do speciálních přípravků zkonstruovaných ze speciálních ocelových maticek průměru 6 mm.

Pokročilejším měřením je kvantifikační metoda EDX, která umožňuje vytváření kontrastních snímků požadovaného přiblížení. Na dvoubarevných snímcích získaných metodou EDX je výrazným odstínem odlišen vybraný chemický prvek od zbytku v materiálu obsažených prvků. Metodou EDX byl úspěšně detekován a na vysoko kontrastních snímcích zvýrazněn uhlík v cementové matici několika pozorovaných vzorků vybraných variant suchých směsí. [86]



Obrázek 16: Pohled na vzorky umístěné v pracovní komoře mikroskopu MIRA3 (foto autora)

### 3.3.3. Mikrotomograf

Výpočtová mikrotomografie (Micro-CT) je jedna z široce používaných nedestruktivních metod charakterizace materiálů. Umožňuje získání 3D modelu mikrostruktury pozorovaného vzorku. Touto metodou byly charakterizovány mikrostruktury několika pozorovaných vzorků vybraných variant suchých směsí. Za účelem získání nejlepších výsledků pomocí mikrotomografu byly vzorky suchých směsí zalisovány do kartuší z 3D tiskárny. Vzorek v kartuši byl zafixován vysokopevnostním lepidlem, které by mělo udržet napětí 420 kPa a tím zajistit porovnatelnost pozorovaného vzorku se vzorky, na kterých byla měřena rezistivita a měrná hmotnost při napětí. [87]



Obrázek 17: Proces zalisování kartuše pro mikrotomograf (foto autora)

## **4. Etapa I – Analýza a výběr vhodných surovin**

### **4.1. Strategie výběru vhodných plniv**

Bylo zvoleno vhodné běžně používané pojivo, které by mělo vykazovat co nejstálější vlastnosti a umožnit tak vyvození správných obecně platných závěrů. Protože silikátové kompozity se sníženou rezistivitou nejsou tvořeny pouze pojivem a elektrovedivými plnivy, bylo rovněž vybráno vhodné inertní plnivo pro přípravu malt. Z přehledu mnoha dostupných elektrovedivých plniv budou vybrány tři dvojice. V analýze surovin jmenovaná elektrovedivá plniva jsou převážně grafitové prachy s různou velikostí částic, pozornost je rovněž věnována uhlíkovým sazím, odpadnímu koksu a odpadnímu grafitu. Ve všech případech se jedná o suroviny s velmi vysokým obsahem uhlíku. Strategie spočívá ve výběru šestice nejvhodnějších elektrovedivých plniv na základě dvou hlavních sledovaných vlastností suchých směsí, a to rezistivita při napětí 420 kPa a velikost částic. Vybraná šestice nejvhodnějších elektrovedivých plniv se skládá ze tří dvojic, které mají podobnou, co nejnižší hodnotu impedance a současně se v rámci dvojic podobají velikostí částic. Jako doplňující kritérium pro usnadnění výběru byla zvolena nasákavost. Je žádoucí, aby nasákavost byla co nejnižší. Tři dvojice vybraných plniv jsou, v rámci této práce, nazývány na základě velikosti částic následovně – mikroplniva, velmi jemná plniva a jemná plniva.

### **4.2. Analýza surovin**

#### **4.2.1. Pojivo**

Jako pojivo byl uvažován pouze cement portlandský CEM I. Obsah příměsí, jejichž vlastnosti by nebyly známy, je nežádoucí a je snaha tento faktor maximálně eliminovat. Nejedná se pouze o přítomnost příměsí samotných, ale také o jejich množství. To se i v rámci daného druhu cementu pohybuje v určitém intervalu a tento, zdánlivě zanedbatelný rozdíl, by mohl výrazně ovlivnit výsledky základního výzkumu. Portlandský cement CEM I svým složením, 95–100 % portlandského slínku a 5–0 % sádrovce jako regulátoru tuhnutí vyhovuje požadavkům základního výzkumu nejvíce. [88]

Byl vybrán široce používaný druh cementu CEM I 42,5 R (Mokrá) od společnosti Českomravský cement a.s. Tento druh cementu se svým původem, konstantní kvalitou, a tedy i dobrou pověstí hodí jak pro nejrůznější stavební účely, tak pro výzkumnou činnost. Charakteristiky udávané výrobcem jsou popsány v následující tabulce. [88]

Tabulka 1: Základní charakteristiky cementu CEM I 42,5 R [88]

| <b>Základní charakteristiky:</b>      | <b>Hodnoty garantované výrobcem:</b> | <b>Jednotky:</b> |
|---------------------------------------|--------------------------------------|------------------|
| Pevnost v tlaku počáteční pevnost     | $\geq 20,0$                          | [MPa]            |
| Pevnost v tlaku normalizovaná pevnost | $\geq 42,5, \leq 62,5$               | [MPa]            |
| Počátek tuhnutí                       | $\geq 60$                            | [min]            |
| Objemová stálost                      | $\leq 10,0$                          | [mm]             |
| Nerozpustný zbytek                    | $\leq 5,0$                           | [hm. %]          |
| Ztráta žíháním                        | $\leq 5,0$                           | [hm. %]          |
| Obsah síranů (jako SO <sub>3</sub> )  | $\leq 4,0$                           | [hm. %]          |
| Obsah chloridů                        | $\leq 0,1$                           | [hm. %]          |

Za účelem ujištění, že je tento druh cementu vhodný pro účely studia vlivu struktury na rezistivitu silikátového kompozitu, byly na základě některých metod pro zkoušení vstupních surovin provedeny zkoušky a u cementu CEM I 42,5 R byly zjištěny parametry shrnuté v následující tabulce.

Tabulka 2: Zjišťované vlastnosti cementu CEM I 42,5 R

| <b>Zjišťované parametry:</b>          | <b>Průměrné naměřené hodnoty:</b> | <b>Jednotky:</b>              |
|---------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| Rezistivita při napětí 420 kPa        | 5 360 000                         | [ $\Omega \times \text{cm}$ ] |
| Sypná hmotnost při napětí 420 kPa     | 2270                              | [kg/m <sup>3</sup> ]          |
| Objemová hmotnost (héliový pyknometr) | 3100                              | [kg/m <sup>3</sup> ]          |
| Měrný povrh                           | 350                               | [m <sup>2</sup> /kg]          |

#### 4.2.2. Inertní plnivo

Jako inertní plnivo pro přípravu těles z malty pro studium struktury malt se sníženou rezistivitou bylo vybráno takové plnivo, které nebude žádným neznámým způsobem ovlivňovat rezistivitu. Jako vhodný kandidát byl vybrán na českém trhu dobře dostupný výrobek zvaný Normový písek od společnosti Filtrační písky, spol. s r.o. sídlící v obci Chlum v severních Čechách. Je to výrobek využívaný k laboratorní přípravě malty normové konzistence a výzkumu v oblasti malt, rovněž se využívá napříč stavebnictvím pro své, výrobcem garantované, vlastnosti dle normy ČSN EN 196-1. [89]

Dále v textu této práce už bude používán pouze termín „písek“, protože žádný jiná surovina tohoto typu nebyla použita. Pro účely výzkumu byly zjišťovány další parametry, které jsou shrnuté v následující tabulce.

Tabulka 3: Zjišťované parametry normového písku

| Zjišťované parametry:                 | Průměrné naměřené hodnoty: | Jednotky:                     |
|---------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Rezistivita při napětí 420 kPa        | 3 930 000                  | [ $\Omega \times \text{cm}$ ] |
| Sypná hmotnost při napětí 420 kPa     | 2710                       | [kg/m <sup>3</sup> ]          |
| Objemová hmotnost (héliový pyknometr) | 2750                       | [kg/m <sup>3</sup> ]          |



Obrázek 18: Detail normového písku (foto autora)

### 4.2.3. Elektrovodivá plniva

Většinu uvažovaných elektrovodivých plniv tvoří různě hrubé grafitové vločky a prachy od jihočeské firmy Epinikon a.s. Výjimku tvoří speciální elektricky vodivé saze od americké firmy Cabot Corporation, která je světovou špičkou ve výrobě pokročilých materiálů a surovin pro nejrozličnější odvětví průmyslu.

Dále v textu této práce bude používán termín „plniva“ či „elektrovodivá plniva“, vždy se bude jednat o plniva jmenovaná v tabulce 4.

V tabulce 4 je uvedena pouze základní charakteristika a hlavní zjišťované parametry všech elektrovodivých plniv, které byly uvažovány pro použití v rámci této práce.

Tabulka 4: Přehled hlavních parametrů uvažovaných elektrovodivých plniv

| Plnivo                | Rezistivita při napětí 420 kPa [ $\Omega \times \text{cm}$ ] | Velikost 95 % částic [ $\mu\text{m}$ ] | Základní charakteristika                                          |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Condufit C 4          | 0,85                                                         | 1,0–8,0                                | upravovaný přírodní grafit, primární surovina                     |
| Micrographite C 4     | 1,46                                                         | 1,0–9,0                                | upravovaný přírodní grafit, primární surovina                     |
| Micrographite U C 4   | 1,24                                                         | 1,0–10,0                               | syntetický grafit, primární surovina                              |
| Condufit F 8          | 0,99                                                         | 2,0–22,0                               | upravovaný přírodní grafit, primární surovina                     |
| Micrographite F 10    | 1,02                                                         | 3,0–24,0                               | upravovaný přírodní grafit, primární surovina                     |
| Vulcan XC605          | 3,88                                                         | 4,0–50,0                               | syntetické speciální saze, primární surovina                      |
| Filtr mazačka         | 0,34                                                         | 4,0–280,0                              | odpadní směs přírodních i syntetických grafitů, druhotná surovina |
| Supragraphite C 63    | 0,30                                                         | 4,0–330,0                              | upravovaný přírodní grafit, primární surovina                     |
| Odpad vysavač         | 0,33                                                         | 4,0–360,0                              | odpadní směs přírodních i syntetických grafitů, druhotná surovina |
| Supragraphite C 300   | 0,10                                                         | 60,0–600,0                             | upravovaný přírodní grafit, primární surovina                     |
| Petrolejový koks C63  | 1,6                                                          | 80,0–2 000,0                           | kalcinovaný petrolejový koks z rafinace ropy, druhotná surovina   |
| Supragraphite U C 700 | 0,13                                                         | 150,0–2 800,0                          | syntetický grafit, primární surovina                              |

## Condufit C 4

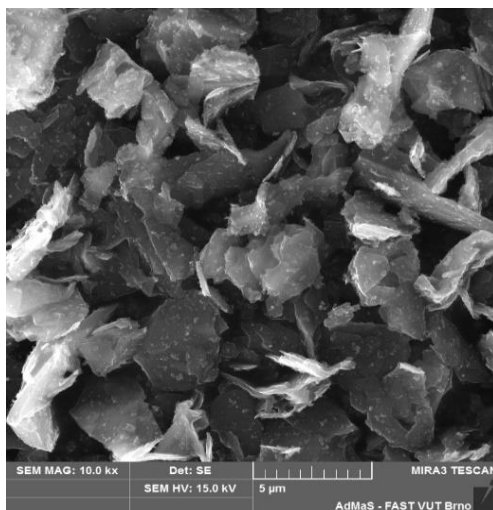
Condufit C 4 je vylepšená verze přírodního mikromletého grafitu Micrographite C 4. Je tvořený destičkovitými částicemi, z nichž je alespoň 50 % velikosti 3,5–5  $\mu\text{m}$ . Grafit je speciálně povrchově upraven za účelem vylepšení elektrovodivých vlastností. Je garantován obsah 99,5 % grafitu a 0,5 % popelovin.

Tabulka 5: Zjišťované parametry plniva Condufit C 4

| Zjišťované parametry:                 | Průměrné naměřené hodnoty: | Jednotky:            |
|---------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| Sypná hmotnost volně sypaná           | 190                        | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Sypná setřesená hmotnost              | 240                        | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Sypná hmotnost při napětí 420 kPa     | 800                        | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Objemová hmotnost (héliový pyknometr) | 2 410                      | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Nasákavost WA5                        | 190                        | [%]                  |
| Měrný povrch                          | 20 418                     | [m <sup>2</sup> /kg] |



Obrázek 19: Condufit C 4 (foto autora)



Obrázek 20: Detail částic Condufit C 4 při zvětšení 10 000× (foto autora)

## Micrographite C 4

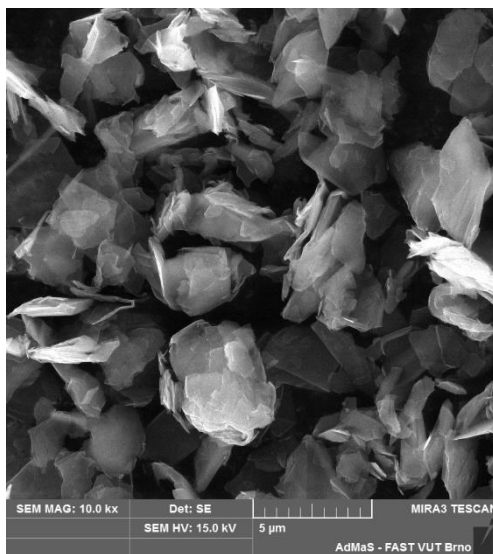
Micrographite C 4 je přírodní mikromletý grafit. Je tvořený destičkovitými částicemi, z nichž je alespoň 50 % velikosti 3,5–5,0  $\mu\text{m}$ . Je garantován obsah 99,5 % grafitu a 0,5 % popelovin.

Tabulka 6: Zjišťované parametry plniva Micrographite C 4

| Zjišťované parametry:                 | Průměrné naměřené hodnoty: | Jednotky:            |
|---------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| Sypná hmotnost volně sypaná           | 150                        | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Sypná setřesená hmotnost              | 190                        | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Sypná hmotnost při napětí 420 kPa     | 810                        | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Objemová hmotnost (héliový pyknometr) | 2 500                      | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Nasákavost WA5                        | 172                        | [%]                  |
| Měrný povrch                          | 11 933                     | [m <sup>2</sup> /kg] |



Obrázek 21: Micrographite C 4 (foto autora)



Obrázek 22: Detail částic Micrographite C 4 při zvětšení 10 000 $\times$  (foto autora)

## Micrographite U C 4

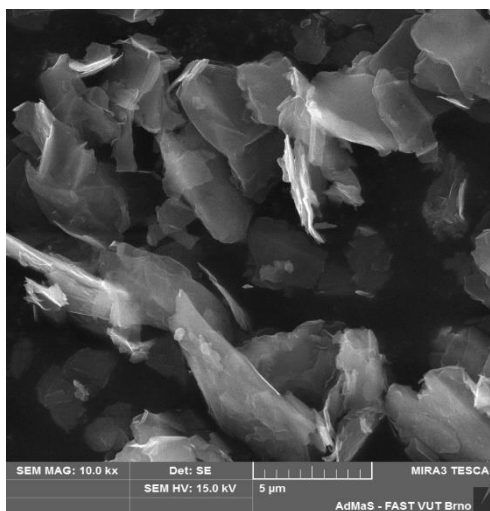
Micrographite U C 4 je syntetická verze Micrographite C 4, rovněž se tedy jedná o mikromletý grafit, který je tvořený pravidelnými destičkovitými částicemi, z nichž je alespoň 50 % velikosti 3,5–5,0  $\mu\text{m}$ . Je garantován obsah 99,0 % grafitu a 1,0 % popelovin.

Tabulka 7: Zjišťované parametry plniva Micrographite U C 4

| Zjišťované parametry:                 | Průměrné naměřené hodnoty: | Jednotky:            |
|---------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| Sypná hmotnost volně sypaná           | 170                        | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Sypná setřesená hmotnost              | 220                        | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Sypná hmotnost při napětí 420 kPa     | 810                        | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Objemová hmotnost (héliový pyknometr) | 2 650                      | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Nasákavost WA5                        | 174                        | [%]                  |
| Měrný povrch                          | 12 454                     | [m <sup>2</sup> /kg] |



Obrázek 23: Micrographite U C 4 (foto autora)



Obrázek 24: Detail částic Micrographite U C 4 při zvětšení 10 000× (foto autora)

## Condufit F 8

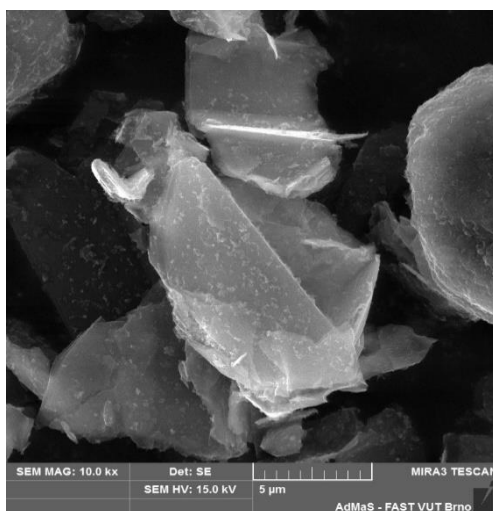
Condufit F 8 je vylepšený přírodní mikromletý grafit, tvořený destičkovitými částicemi, z nichž je alespoň 50 % velikosti 7,0–9,0  $\mu\text{m}$ . Grafit je speciálně upraven za účelem vylepšení elektrovodivých vlastností. Je garantován obsah 96,0 % grafitu a 4,0 % popelovin.

Tabulka 8: Zjišťované parametry plniva Condufit F 8

| Zjišťované parametry:                 | Průměrné naměřené hodnoty: | Jednotky:            |
|---------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| Sypná hmotnost volně sypaná           | 190                        | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Sypná setřesená hmotnost              | 250                        | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Sypná hmotnost při napětí 420 kPa     | 880                        | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Objemová hmotnost (héliový pyknometr) | 2 400                      | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Nasákavost WA5                        | 215                        | [%]                  |
| Měrný povrch                          | 16 094                     | [m <sup>2</sup> /kg] |



Obrázek 25: Condufit F 8 (foto autora)



Obrázek 26: Detail částic Condufit F 8 při zvětšení 10 000× (foto autora)

## Micrographite F 10

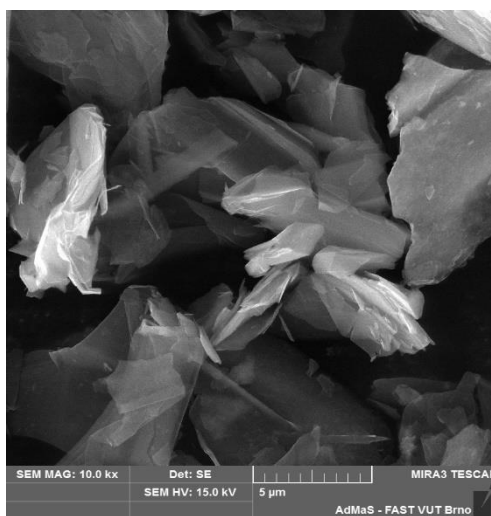
Micrographite F 10 je mikromletý přírodní grafit, tvořený destičkovitými částicemi, z nichž je alespoň 50 % velikosti 7,0–11,0  $\mu\text{m}$ . Je garantován obsah 96,0 % grafitu a 4,0 % popelovin.

Tabulka 9: Zjišťované parametry plniva Micrographite F 10

| Zjišťované parametry:                 | Průměrné naměřené hodnoty: | Jednotky:            |
|---------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| Sypná hmotnost volně sypaná           | 200                        | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Sypná setřesená hmotnost              | 240                        | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Sypná hmotnost při napětí 420 kPa     | 810                        | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Objemová hmotnost (héliový pyknometr) | 2 490                      | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Nasákavost WA5                        | 132                        | [%]                  |
| Měrný povrch                          | 6 287                      | [m <sup>2</sup> /kg] |



Obrázek 27: Micrographite F 10 (foto autora)



Obrázek 28: Detail částic Micrographite F 10 při zvětšení 10 000× (foto autora)

## Vulcan XC605

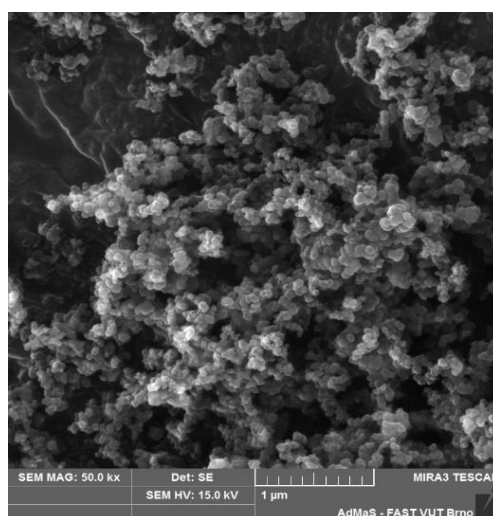
Vulcan XC605 jsou speciální saze nejvyšší třídy v kategorií příměsí pro zušlechtění elektrovedivých vlastností od výrobce. Saze jsou dodávány granulované velikosti 100–1000  $\mu\text{m}$ , granule jsou tvořeny kulovitými částicemi, z nichž je 90 % velikosti 0,023–0,144  $\mu\text{m}$  a jedná se o téměř 100 % amorfni uhlík. Měrný povrch výrobce uvádí 18 000 až 550 000  $\text{m}^2/\text{kg}$ .

Tabulka 10: Zjišťované parametry plniva Vulcan XC605

| Zjišťované parametry:                 | Průměrné naměřené hodnoty: | Jednotky:                |
|---------------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Sypná hmotnost volně sypaná           | 310                        | $[\text{kg}/\text{m}^3]$ |
| Sypná setřesená hmotnost              | 370                        | $[\text{kg}/\text{m}^3]$ |
| Sypná hmotnost při napětí 420 kPa     | 660                        | $[\text{kg}/\text{m}^3]$ |
| Objemová hmotnost (héliový pyknometr) | 2 040                      | $[\text{kg}/\text{m}^3]$ |
| Nasákavost WA5                        | 175                        | $[\%]$                   |



Obrázek 29: Vulcan XC605 (foto autora)



Obrázek 30: Detail částic Vulcan XC605 při zvětšení 10 000 $\times$  (foto autora)

## Filtr mazačka

Filtr mazačka je označení pro směs přírodních i syntetických grafitových prachů zachycených filtry odprašovacího systému výrobního zařízení pro přípravu různých grafitových maziv a směsí. Dle výrobce by se mělo jednat o čistý grafitový prášek s velikostí částic okolo 10,0  $\mu\text{m}$ .

Tabulka 11: Zjišťované parametry plniva Filtr mazačka

| Zjišťované parametry:                 | Průměrné naměřené hodnoty: | Jednotky:            |
|---------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| Sypná hmotnost volně sypaná           | 460                        | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Sypná setřesená hmotnost              | 550                        | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Sypná hmotnost při napětí 420 kPa     | 1 270                      | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Objemová hmotnost (héliový pyknometr) | 2 310                      | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Nasákavost WA5                        | 105                        | [%]                  |



Obrázek 31: plnivo Filtr mazačka (foto autora)

### Supragraphite C 63

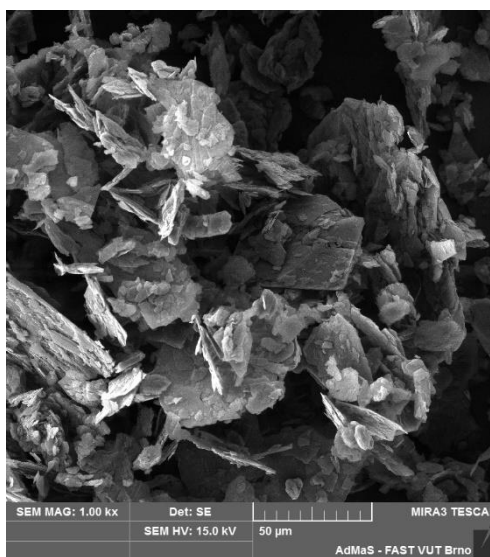
Supragraphite C 63 je vločkový přírodní grafit. Podle výrobce je maximálně 10 % částic Supragrafitu C 63 nad 63,0  $\mu\text{m}$ . Provedená zkouška distribuce částic přinesla odlišné výsledky. Viz graf 1. Je garantován obsah 99,5 % grafitu a 0,5 % popelovin.

Tabulka 12: Zjišťované parametry plniva Supragraphite C 63

| Zjišťované parametry:                 | Průměrné naměřené hodnoty: | Jednotky:            |
|---------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| Sypná hmotnost volně sypaná           | 380                        | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Sypná setřesená hmotnost              | 490                        | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Sypná hmotnost při napětí 420 kPa     | 1 280                      | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Objemová hmotnost (héliový pyknometr) | 2 540                      | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Nasákavost WA5                        | 67                         | [%]                  |



Obrázek 32: Supragraphite C 63 (foto autora)



Obrázek 33: Detail částic Supragraphite C 63 při zvětšení 1 000× (foto autora)

## Odpad vysavač

Odpad vysavač je označení pro odpadní směs přírodních i syntetických grafitových materiálů. Směs je získávána pravidelným vysáváním výrobních prostor. Obsahuje blíže nespecifikované množství nečistot, které neobsahují vysoký podíl uhlíku. Obsah uhlíku a velikost částic není výrobcem garantována.

Tabulka 13: Zjišťované parametry plniva Odpad vysavač

| Zjišťované parametry:                 | Průměrné naměřené hodnoty: | Jednotky:            |
|---------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| Sypná hmotnost volně sypaná           | 450                        | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Sypná setřesená hmotnost              | 550                        | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Sypná hmotnost při napětí 420 kPa     | 1 190                      | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Objemová hmotnost (héliový pyknometr) | 2 300                      | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Nasákavost WA5                        | 91                         | [%]                  |



Obrázek 34: plnivo Odpad vysavač (foto autora)

## Supragraphite C 300

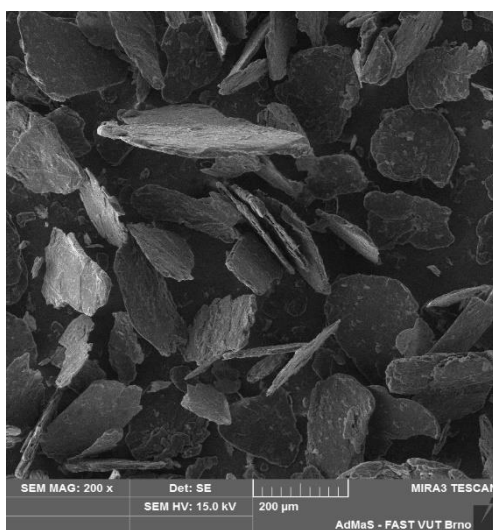
Supragraphite C 300 je vločkový přírodní grafit. Výrobce uvádí, že 60–80 % částic je větších než 100,0  $\mu\text{m}$ . Je garantován obsah 99,5 % grafitu a 0,5 % popelovin.

Tabulka 14: Zjišťované parametry plniva Supragraphite C 300

| Zjišťované parametry:                 | Průměrné naměřené hodnoty: | Jednotky:            |
|---------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| Sypná hmotnost volně sypaná           | 450                        | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Sypná setřesená hmotnost              | 550                        | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Sypná hmotnost při napětí 420 kPa     | 1 400                      | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Objemová hmotnost (héliový pyknometr) | 2 250                      | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Nasákavost WA5                        | 26                         | [%]                  |
| Měrný povrch                          | 119                        | [m <sup>2</sup> /kg] |



Obrázek 35: Supragraphite C 300 (foto autora)



Obrázek 36: Detail částic Supragraphite C 300 při zvětšení 200× (foto autora)

## Petrolejový koks C 63

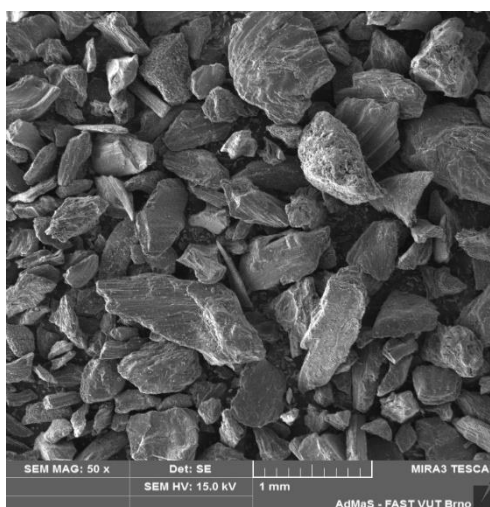
Kalcinovaný Petrolejový koks C 63 je konečný pevný materiál bohatý na uhlík, který pochází z rafinace ropy s obsahem uhlíku min. 99,5 % a s požadovanou skladbou částic od velmi jemných po částice velké cca 5 mm.

Tabulka 15: Zjišťované parametry plniva Petrolejový koks C 63

| Zjišťované parametry:                 | Průměrné naměřené hodnoty: | Jednotky:            |
|---------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| Sypná hmotnost volně sypaná           | 940                        | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Sypná setřesená hmotnost              | 1 050                      | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Sypná hmotnost při napětí 420 kPa     | 1 540                      | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Objemová hmotnost (héliový pyknometr) | 2 120                      | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Nasákavost WA5                        | 9                          | [%]                  |
| Měrný povrch                          | 23                         | [m <sup>2</sup> /kg] |



Obrázek 37: Petrolejový koks C 63 (foto autora)



Obrázek 38: Detail částic Petrolejový koks C 63 při zvětšení 50× (foto autora)

## Supragraphite U C 700

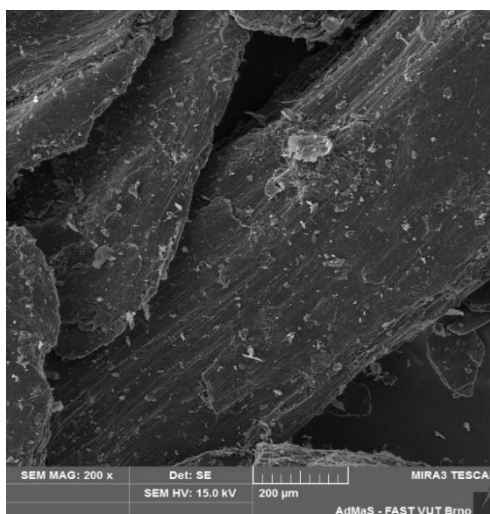
Synteticky vyráběný tříděný grafit tvořený z 90 % poměrně pravidelnými částicemi velikosti 150–2800  $\mu\text{m}$ . Je garantován obsah 99 % grafitu a 1 % popelovin.

Tabulka 16: Zjišťované parametry plniva Supragraphite U C 700

| Zjišťované parametry:                 | Průměrné naměřené hodnoty: | Jednotky:            |
|---------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| Sypná hmotnost volně sypaná           | 740                        | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Sypná setřesená hmotnost              | 830                        | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Sypná hmotnost při napětí 420 kPa     | 1 310                      | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Objemová hmotnost (héliový pyknometr) | 2 200                      | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Nasákavost WA5                        | 11                         | [%]                  |
| Měrný povrch                          | 27                         | [m <sup>2</sup> /kg] |



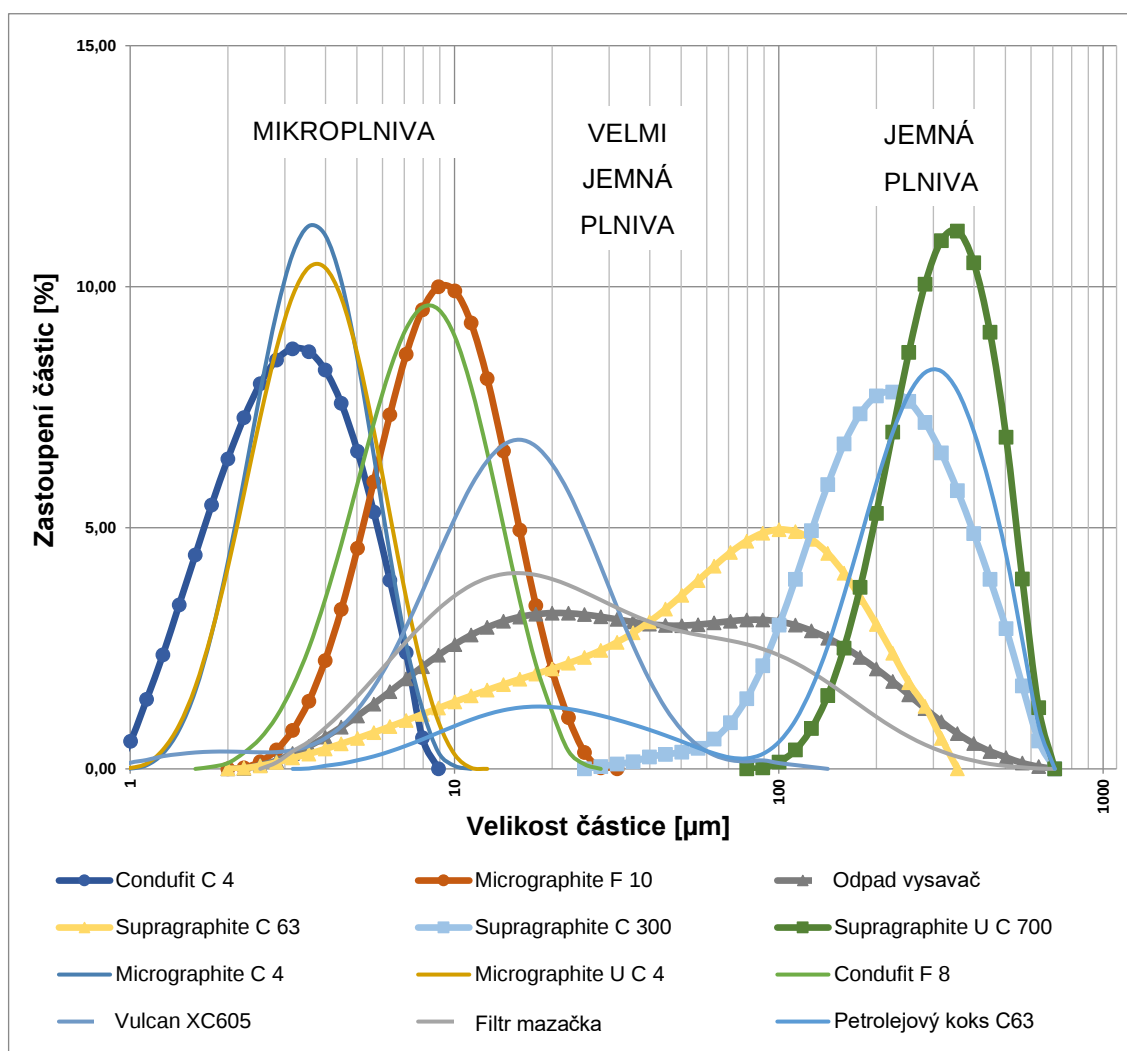
Obrázek 39: Supragraphite U C 700 (foto autora)



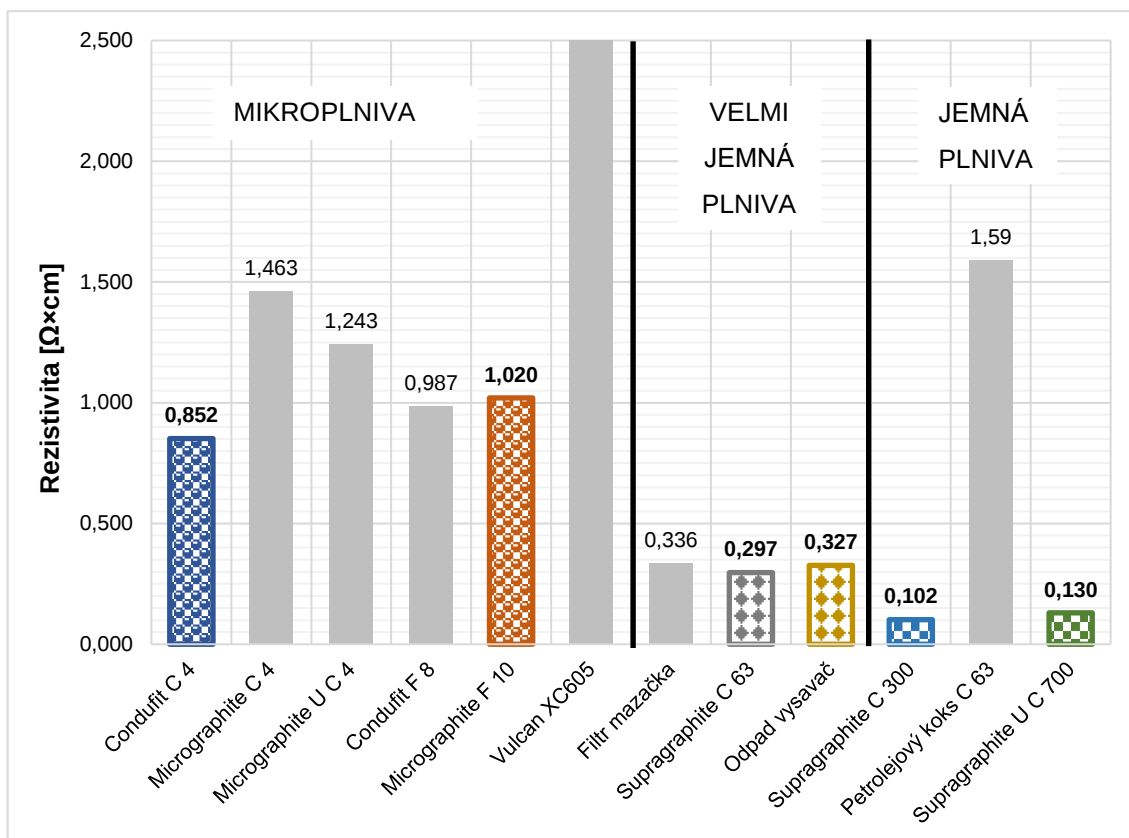
Obrázek 40: Detail částic Supragraphite U C 700 při zvětšení 200× (foto autora)

### 4.3. Vyhodnocení I. Etapy

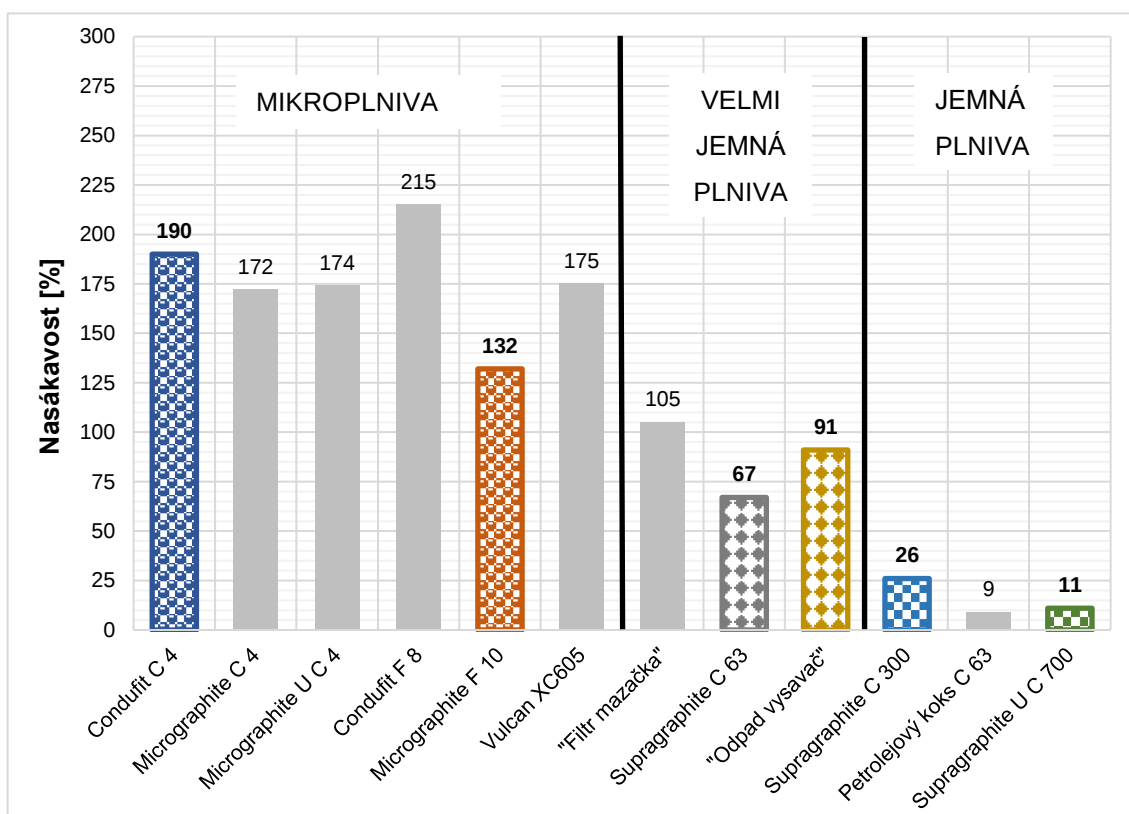
Všechna uvažovaná plniva byla vyzkoušena stejnými zkouškami a postupy, za stejných laboratorních podmínek, stejnými laboratorními pomůckami a kalibrovanými přístroji. Naměřené hodnoty byly vždy nejprve převedeny do základních jednotek. Z hodnot získaných opakovanými měřeními byl vypočítán aritmetický průměr. Některé hodnoty musely být přepočítány na sledované vlastnosti podle příslušných vzorců. Všechny vlastnosti jsou v první etapě přehledně uvedeny v tabulkách. Hlavní sledované vlastnosti všech uvažovaných plniv, na základě kterých byl proveden výběr šestice nejvhodnějších pro další etapy, jsou přehledně zpracované na následujících třech grafech. Vybraná plniva jsou vždy graficky zvýrazněna barvami, značkami a výplní.



Graf 1: Křivky distribuce částí všech uvažovaných elektrovedivých plniv



Graf 2: Rezistivita při napětí 420 kPa pro všechna uvažovaná elektrovedivá plniva



Graf 3: Nasákavost všech uvažovaných elektrovedivých plniv

Předem stanovená strategie umožnila správně vybrat šestici nejvhodnějších plniv na základě všech informací, které byly v první etapě nashromážděny a shrnuty. Znalost množství různých vlastností o každém z plniv je dobrým předpokladem, že provedený výběr byl ten nejlepší možný.

Jako nejvhodnější mikroplniva byly vybrány grafitové prachy Condufit C 4 a Micrographite F 10. U Condufit C 4 byla naměřena nejnižší rezistivita ze všech uvažovaných mikroplniv, a to  $0,852 \Omega \times \text{cm}$ . Současně se jedná o druhé nejjemnější plnivo ze všech uvažovaných, s čímž souvisí nasákavost 190 %, která je rovněž druhá nejvyšší v porovnání s ostatními elektrovedivými plnivy. Micrographite F 10 vykazoval rezistivitu  $1,020 \Omega \times \text{cm}$ . Nižší hodnoty rezistivity vykazoval sice Condufit F 8, a to  $0,592 \Omega \times \text{cm}$ . Protože však nasákavost plniva Condufit F 8, která byla stanovena na 215 %, značně převyšuje nasákavost Micrographite F 10, která byla stanovena na 132 %, a rozdíl v rezistivitě je zanedbatelný, byl vybrán jako lepší volba Micrographite F 10. Velký rozdíl v nasákavosti je pravděpodobně způsoben speciální povrchovou úpravou, která je u Condufit F 8, stejně jako u Condufit C 4 prováděna za účelem vylepšení elektrovedivých vlastností. Dalším důvodem, proč byl zvolen Micrographite F 10 a nikoliv Condufit F 8 je ten, že pro účely základního výzkumu je vhodnější prověřit a porovnat vlastnosti přírodního neupravovaného grafitu (Micrographite F 10) s upravovaným grafitem (Condufit C 4/Condufit F8). Porovnávat dvě plniva, upravená stejným způsobem a s vylepšenými elektrovedivými vlastnostmi, není tak přínosné.

Z kategorie velmi jemných plniv byl vybrán vločkový grafit Supragraphite C 63 s rezistivitou  $0,297 \Omega \times \text{cm}$  a nasákavostí 67 %. Rovněž byla vybrána odpadní směs grafitů Odpad vysavač s rezistivitou  $0,297 \Omega \times \text{cm}$  a nasákavostí 91 %.

Mezi jemnými plnivy byl výběr usnadněn tím, že oba z grafitů z této kategorie vykazují o řád nižší rezistivitu než Petrolejový koks C 63. Proto byl vybrán Supragraphite C 300 s rezistivitou  $0,102 \Omega \times \text{cm}$  a nasákavostí 26 % a Supragraphite U C 700 s rezistivitou  $0,130 \Omega \times \text{cm}$  a nasákavostí 11 %.

#### **4.4. Závěr I. Etapy**

- Elektrovodivá plniva s velmi vysokým uhlíku se od sebe mohou stále výrazně lišit svými parametry. Má tedy velký význam provádět analýzu vstupních surovin, stanovit kritéria výběru a výběr těch nejvhodnějších surovin učinit na základě zjištěných parametrů.
- Na základě velikosti částic, rezistivity a nasákavosti bylo vybráno šest vhodných elektrovodivých plniv – Condufit C 4, Micrographite F 10, Supragraphite C 63, Odpad vysavač, Supragraphite C 300 a Supragraphite U C 700.

## 5. ETAPA II – Stanovení rezistivity a perkolačního prahu suchých směsí

### 5.1. Vybrané kategorie vhodných plniv

V první etapě bylo vybráno šest elektrovodivých plniv se kterými bude pracováno v rámci dalších etap této práce. Rozdělení těchto plniv je uvedeno v tabulce spolu s hlavními sledovanými parametry.

Tabulka 17: Rozdělení do kategorií a hlavní sledované vlastnosti vybraných plniv

| Kategorie          | Plnivo                | Rezistivita při napětí 420 kPa [ $\Omega \times \text{cm}$ ] | Velikost částic [ $\mu\text{m}$ ] | Nasákavost WA5 [%] |
|--------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| Mikroplniva        | Condufit C 4          | 0,852                                                        | 1,0–8,0                           | 190                |
|                    | Micrographite F 10    | 1,020                                                        | 3,0–24,0                          | 132                |
| Velmi jemná plniva | Supragraphite C 63    | 0,297                                                        | 4,0–330,0                         | 67                 |
|                    | Odpad vysavač         | 0,327                                                        | 4,0–360,0                         | 91                 |
| Jemná plniva       | Supragraphite C 300   | 0,102                                                        | 60,0–600,0                        | 26                 |
|                    | Supragraphite U C 700 | 0,130                                                        | 120,0–2800,0                      | 11                 |

### 5.2. Receptury a příprava suchých cementových past

Tak jak bylo popsáno v kapitole „Metodiky prováděných zkoušek a měření“ byly připraveny suché cementové směsi pro měření rezistivity a sypné hmotnosti při napětí 420 kPa. Základní náhrada cementu elektrovodivým plnivem jsou 4 hm. %, další varianty jsou vždy 7, 10, 13, 16 a 19 hm. %. Jako reference byl použit samotný cement CEM I 42,5 R. Tabulka obsahuje veškerá označení a složení daných variant. Klíč k označení variant je jednoduchý. Písmena a čísla před první pomlčkou označují recepturu, tedy jaké bylo použito plnivo. Tři písmena SCP mezi pomlčkami říkají, že se jedná o suchou cementovou pastu a číslo za druhou pomlčkou označuje náhradu v hm. %.

Tabulka 18: Označení a složení receptur a jejich variant suchých směsí

| Receptury    |                    |                    |               |                     |                       | Množství plniva [hm. %] | Množství CEM I 42,5 R [hm. %] |
|--------------|--------------------|--------------------|---------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------------|
| Condufit C 4 | Micrographite F 10 | Supragraphite C 63 | Odpad vysavač | Supragraphite C 300 | Supragraphite U C 700 |                         |                               |
| Varianty     |                    |                    |               |                     |                       |                         |                               |
| CC4-SCP-4    | MF10-SCP-4         | SC63-SCP-4         | OV-SCP-4      | SC30-SCP-4          | SUC70-SCP-4           | 4                       | 96                            |
| CC4-SCP-7    | MF10-SCP-7         | SC63-SCP-7         | OV-SCP-7      | SC30-SCP-7          | SUC70-SCP-7           | 7                       | 93                            |
| CC4-SCP-10   | MF10-SCP-10        | SC63-SCP-10        | OV-SCP-10     | SC30-SCP-10         | SUC70-SCP-10          | 10                      | 90                            |
| CC4-SCP-13   | MF10-SCP-13        | SC63-SCP-13        | OV-SCP-13     | SC30-SCP-13         | SUC70-SCP-13          | 13                      | 87                            |
| CC4-SCP-16   | MF10-SCP-16        | SC63-SCP-16        | OV-SCP-16     | SC30-SCP-16         | SUC70-SCP-16          | 16                      | 84                            |
| CC4-SCP-19   | MF10-SCP-19        | SC63-SCP-19        | OV-SCP-19     | SC30-SCP-19         | SUC70-SCP-19          | 19                      | 81                            |
| CC4-SP       | MF10-SP            | SC63-SP            | OV-SP         | SC30-SP             | SUC70-SP              | 100                     | 0                             |

### 5.3. Zjištění hlavních sledovaných parametrů suchých cementových past při napětí 420 kPa

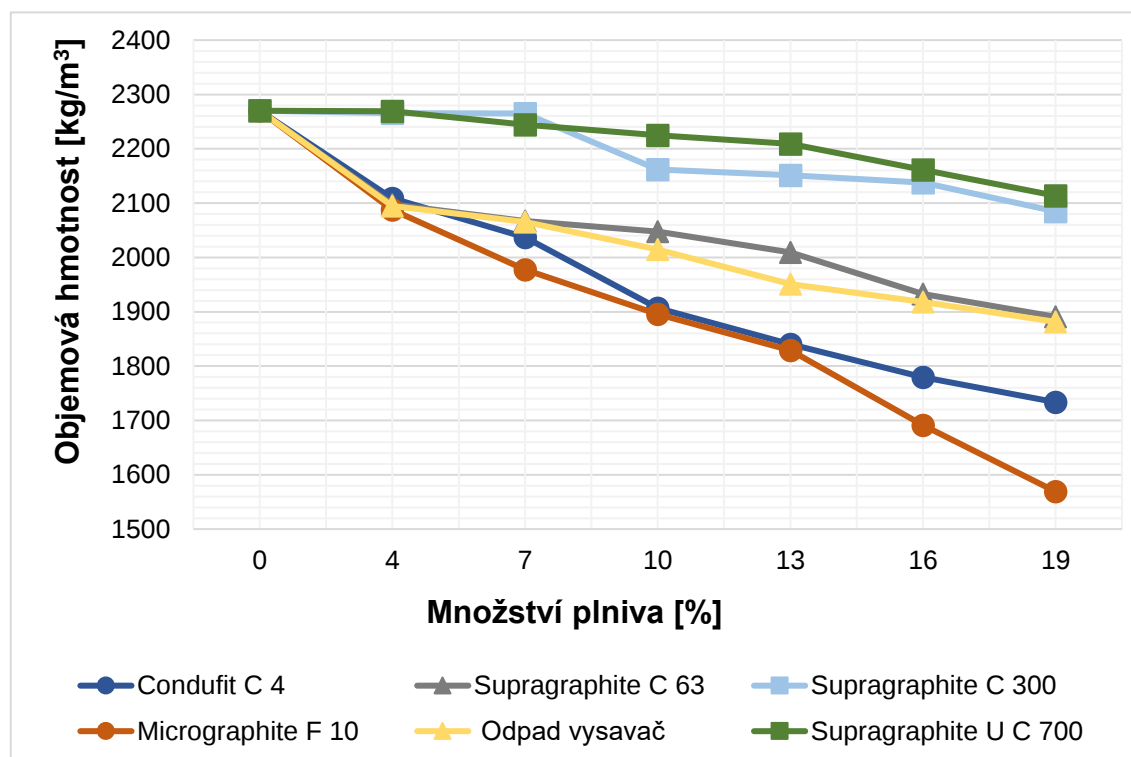
Vlastnosti elektrovodivých plniv a suchých směsí při stlačení byly zjišťovány způsobem popsaným v kapitole „Metody prováděných zkoušek a měření“. Pro účely této práce a váhu výsledků bylo provedeno vždy alespoň pět měření rezistivity a objemové hmotnosti při napětí pro každou z variant. Uváděné hodnoty jsou vždy hodnoty průměrné, po odstranění nejvyšší a nejnižší hodnoty. Průměrné hodnoty zjištěných parametrů jsou zpracovány v grafech a hodnoty číselně uvedeny v tabulkách pod grafy. Vyhodnocení zjištěných parametrů suchých směsí je provedeno v závěru II. etapy.

### 5.3.1. Objemová hmotnost při stlačení suchých cementových past

Současně s měřením impedance suchých past při stlačení, byly měřeny a zapisovány hodnoty výšky od povrchu ztuhlé vrstvy po horní hranu přípravku. Vypočítané hodnoty objemové hmotnosti při stlačení jsou graficky znázorněny v grafu a přesné hodnoty uvedeny v tabulce.

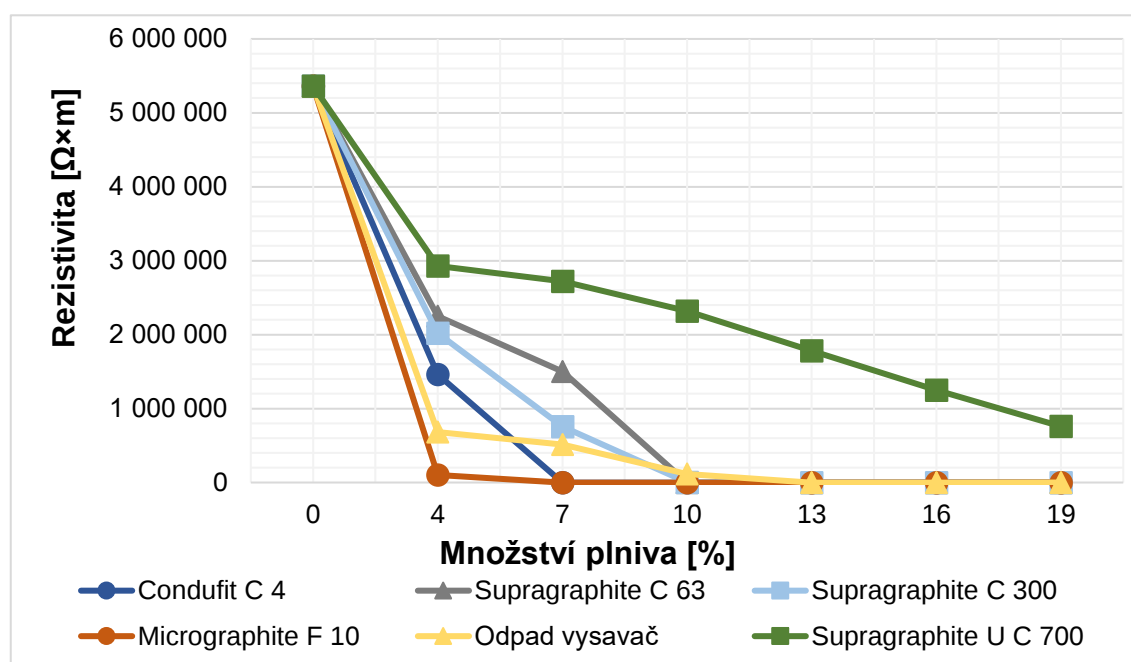
Tabulka 19: Objemová hmotnost všech variant suchých past při napětí 420 kPa

| Receptura | REF-SCP | Varianta                                                    |       |       |       |       |       |      |
|-----------|---------|-------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
|           |         | 4                                                           | 7     | 10    | 13    | 16    | 19    | 100  |
|           |         | Objemová hmotnost při stlačení 420 kPa [kg/m <sup>3</sup> ] |       |       |       |       |       |      |
| CC4-SCP   | 2270    | 2 110                                                       | 2 040 | 1 910 | 1 840 | 1 780 | 1 730 | 805  |
| MF10-SCP  |         | 2 090                                                       | 1 980 | 1 900 | 1 830 | 1 690 | 1 570 | 812  |
| SC63-SCP  |         | 2 090                                                       | 2 070 | 2 010 | 1 950 | 1 920 | 1 880 | 1282 |
| OV-SCP    |         | 2 100                                                       | 2 070 | 2 050 | 2 010 | 1 930 | 1 890 | 1194 |
| SC30-SCP  |         | 2 270                                                       | 2 260 | 2 160 | 2 150 | 2 140 | 2 080 | 1399 |
| SUC70-SCP |         | 2 270                                                       | 2 240 | 2 230 | 2 210 | 2 160 | 2 110 | 1308 |



Graf 4: Objemová hmotnost všech variant suchých past při napětí 420 kPa

## 5.4. Rezistivita suchých cementových past



Graf 5: Rezistivita všech variant suchých past při napětí 420 kPa

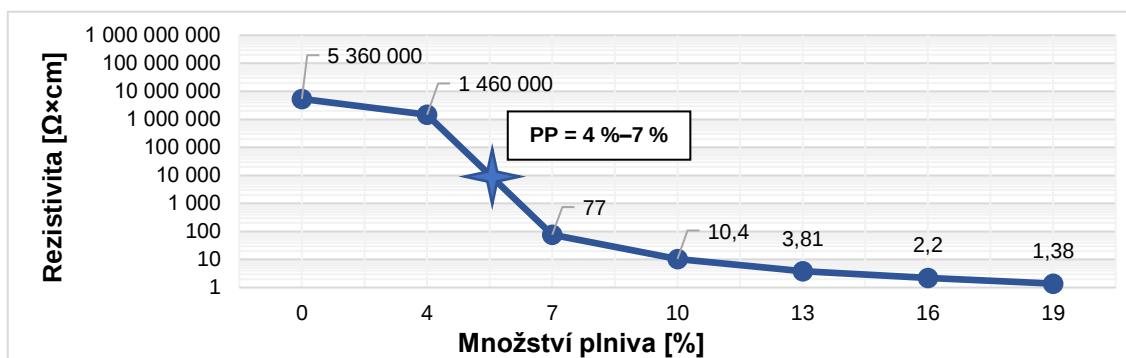
Tabulka 20: Rezistivita všech variant suchých past při napětí 420 kPa

| Receptura             | REF-SCP   | varianta                                                       |           |           |           |           |         |
|-----------------------|-----------|----------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
|                       |           | 4                                                              | 7         | 10        | 13        | 16        | 19      |
|                       |           | Rezistivita při stlačení 420 kPa [ $\Omega \times \text{cm}$ ] |           |           |           |           |         |
| Condufit C 4          | 5 360 000 | 1 460 000                                                      | 76,8      | 10,4      | 3,81      | 2,18      | 1,38    |
| Micrographite F 10    |           | 101 000                                                        | 68,8      | 12,4      | 2,80      | 1,93      | 1,01    |
| Supragraphite C 63    |           | 2 250 000                                                      | 1 500 000 | 165       | 10,3      | 4,11      | 1,82    |
| Odpad vysavač         |           | 684 000                                                        | 514 000   | 116 000   | 73,5      | 12,7      | 2,81    |
| Supragraphite C 300   |           | 2 020 000                                                      | 754 000   | 445       | 9,62      | 1,88      | 0,89    |
| Supragraphite U C 700 |           | 2 930 000                                                      | 2 720 000 | 2 320 000 | 1 780 000 | 1 250 000 | 759 000 |

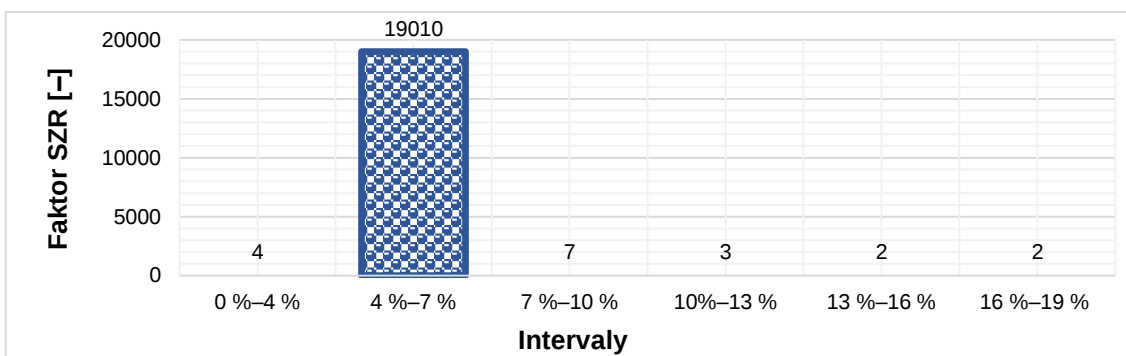
## 5.5. Stanovení prahu perkolace vybraných plniv v suchých cementových pastách

Stanovení prahu perkolace bylo provedeno pouze přibližně, a to pomocí faktoru SZI. Pro každou z receptur je nejprve uveden graf rezistivity suché cementové pasty při napětí. Osa y je v logaritmickém měřítku, protože tehdy je lépe rozpoznatelná skoková změna impedance a kde je v případě nalezení naznačen perkolační práh. Druhý graf zobrazuje intervaly mezi variantami a faktor SZI pro daný interval.

### 5.5.1. Perkolační práh plniva Condufit C 4 v suché pastě

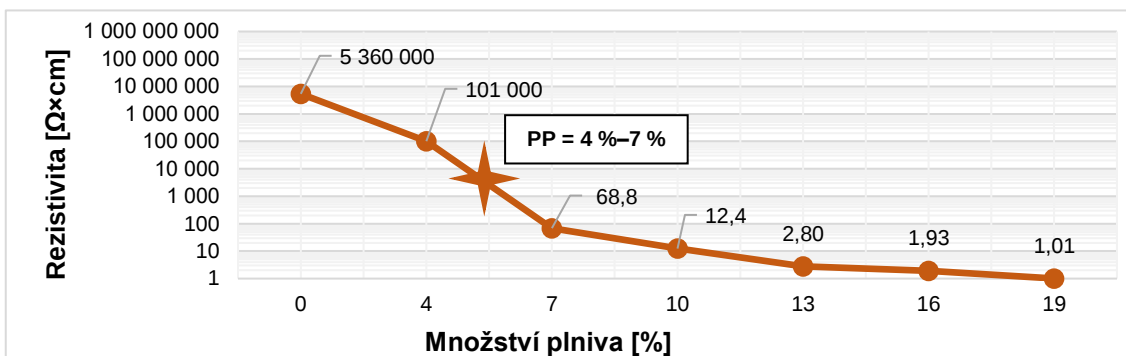


Graf 6: Přibližné stanovení perkolačního prahu pro Condufit C 4 v suché pastě

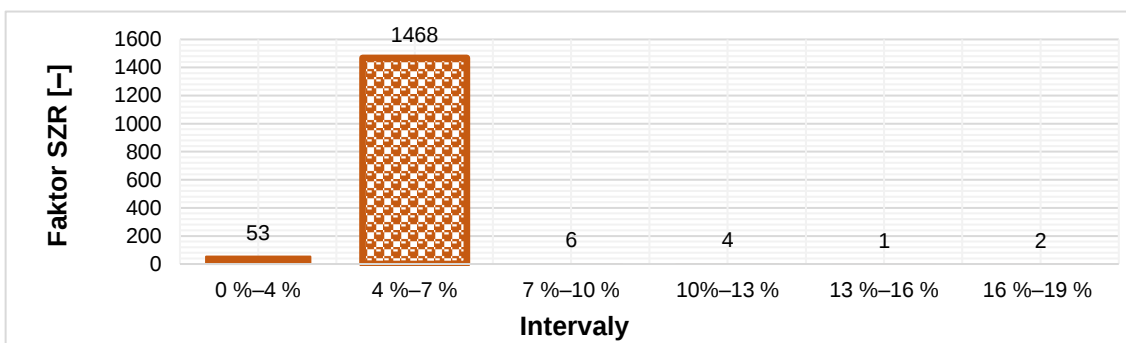


Graf 7: Faktor SZR pro Condufit C 4 v suché pastě

### 5.5.2. Perkolační práh plniva Micrographite F 10 v suché pastě

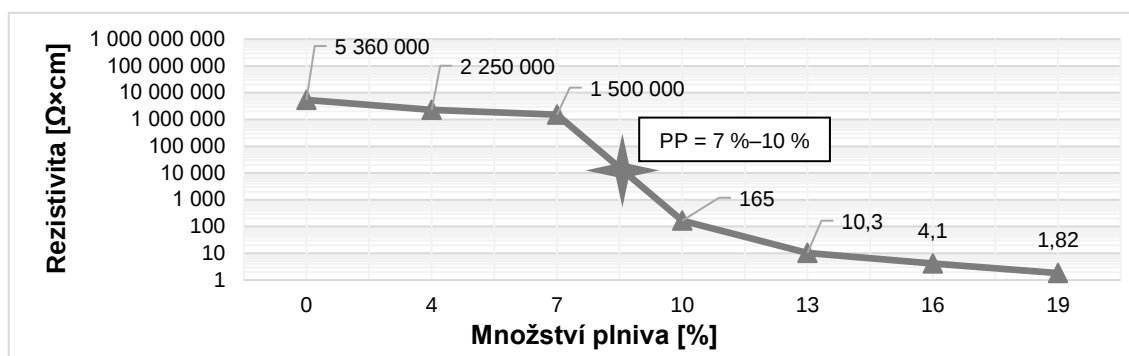


Graf 8: Přibližné stanovení perkolačního prahu pro Micrographite F 10 v suché pastě

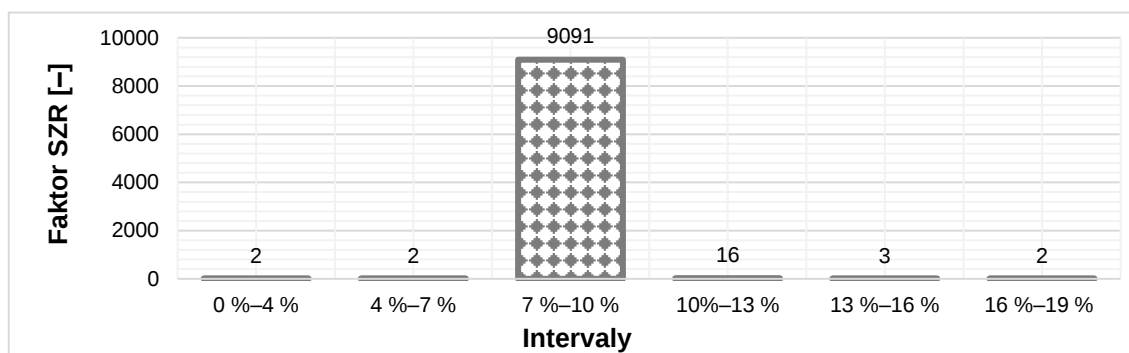


Graf 9: Faktor SZR pro Micrographite F 10 v suché pastě

### 5.5.3. Perkolační práh plniva Supragraphite C 63 v suché pastě

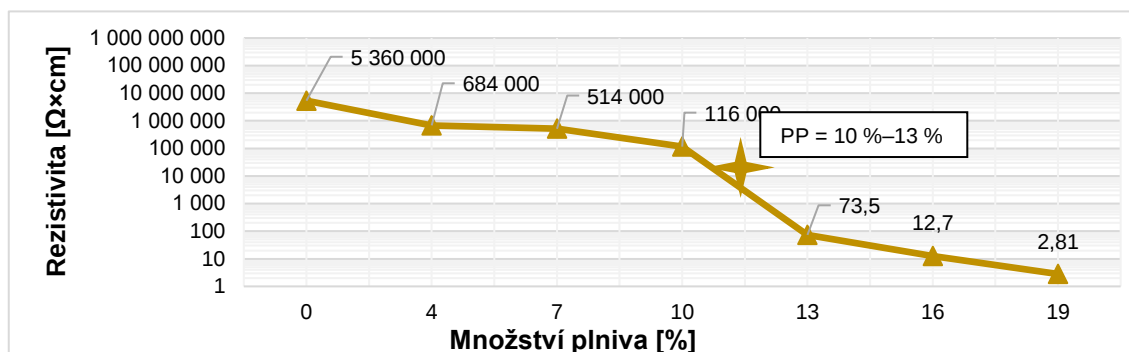


Graf 10: Přibližné stanovení perkolačního prahu pro Supragraphite C 63 v suché pastě

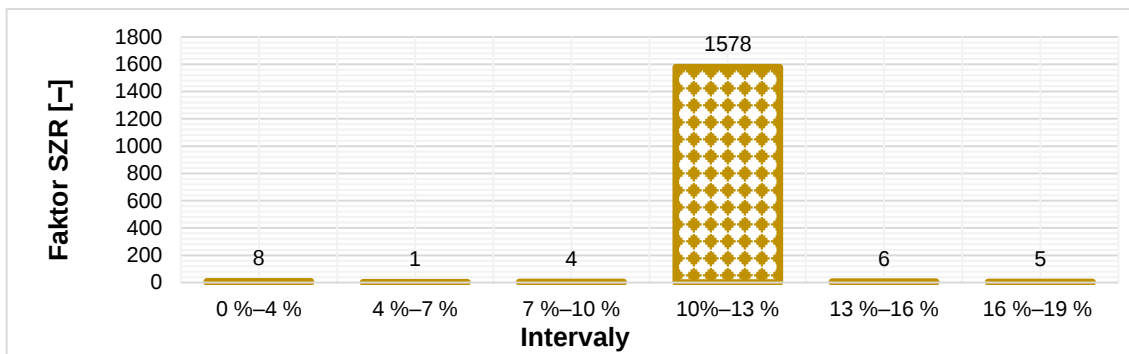


Graf 11: Faktor SZR pro Supragraphite C 63 v suché pastě

### 5.5.4. Perkolační práh plniva Odpad vysavač v suché pastě

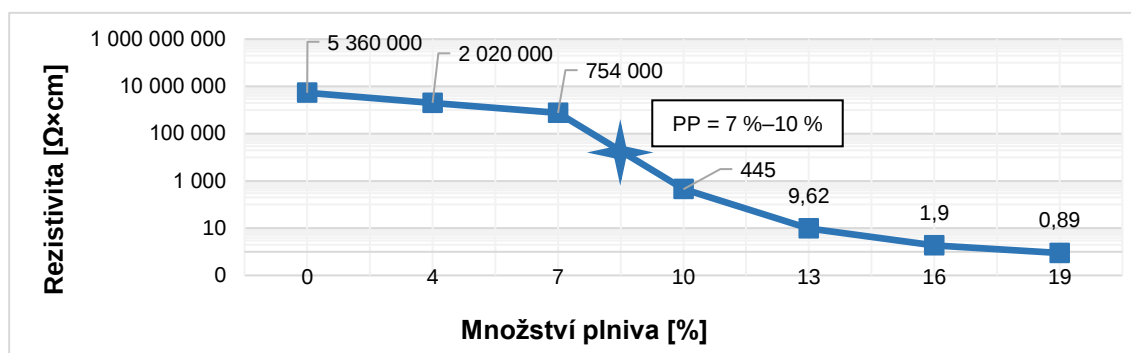


Graf 12: Přibližné stanovení perkolačního prahu pro Odpad vysavač v suché pastě

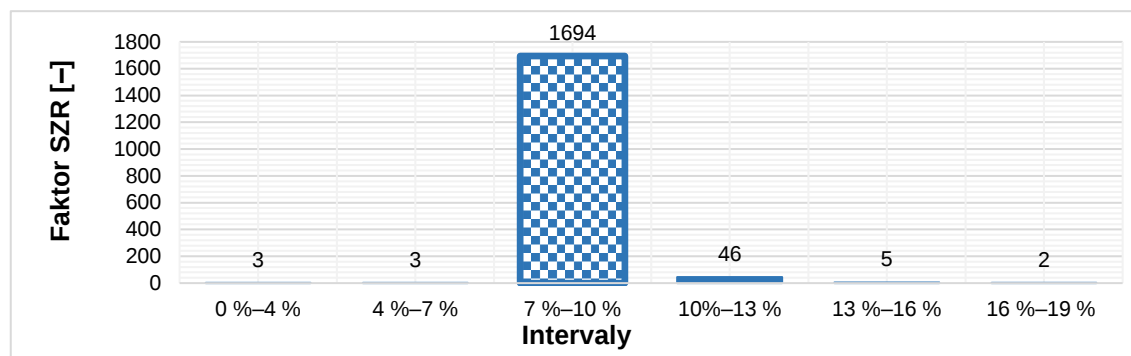


Graf 13: Faktor SZR pro Odpad vysavač v suché pastě

### 5.5.5. Perkolační práh plniva Supragraphite C 300 v suché pastě

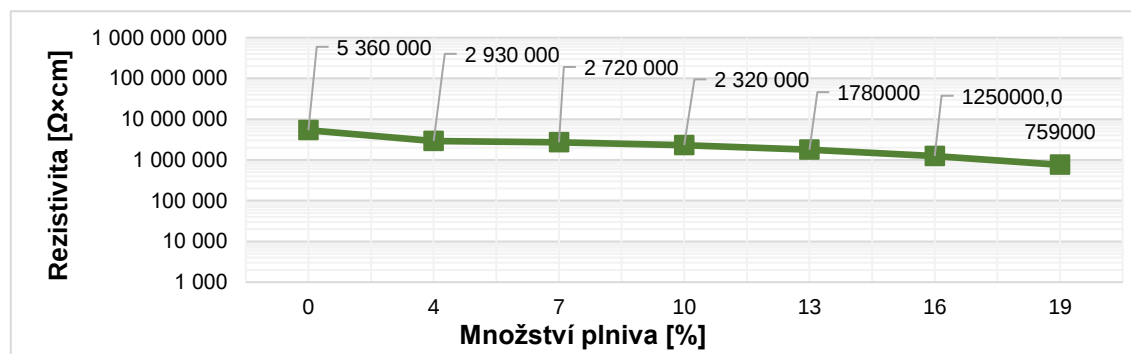


Graf 14: Přibližné stanovení perkolačního prahu pro Supragraphite C 300 v suché pastě

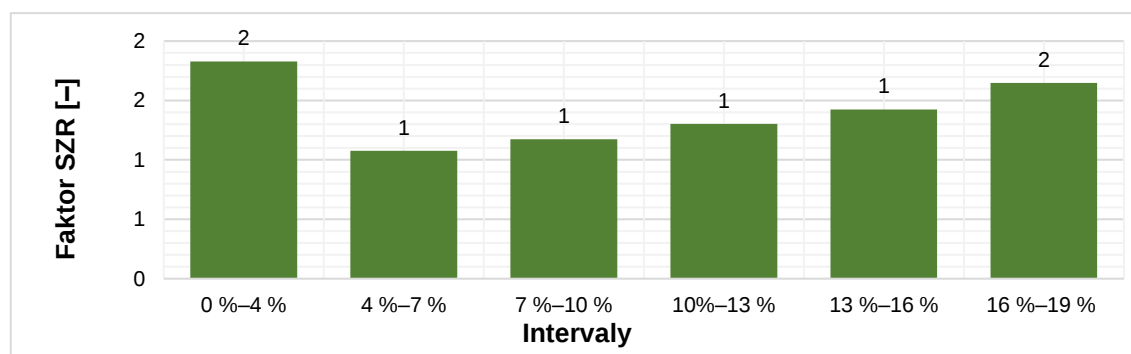


Graf 15: Faktor SZR pro Supragraphite C 300 v suché pastě

### 5.5.6. Perkolační práh plniva Supragraphite U C 700 v suché pastě



Graf 16: Přibližné stanovení perkolačního prahu pro Supragraphite U C 700 v suché pastě



Graf 17: Faktor SZR pro Supragraphite U C 700 v suché pastě

### **5.5.7. Diskuse k přibližnému určení perkolačních prahů vybraných plniv v suchých cementových pastách**

U obou mikroplniv Condufit C 4 i Micrographite F 10 byl perkolační práh v suché cementové pastě přibližně stanoven do intervalu 4 %–7 % hmotnostní náhrady cementu plnivem. Pro jemné plnivo Supragraphite C 63 byl perkolační práh v suché cementové pastě přibližně stanoven do intervalu 7 %–10 %, zatímco pro druhé z jemných plniv Odpad vysavač byl perkolační práh v suché cementové pastě přibližně stanoven do intervalu 10 %–13 %. Jemné plnivo Supragraphite C 300, jak už napověděly hodnoty rezistivity, má perkolační práh v suché cementové pastě při překvapivě nízké náhradě cementu plnivem, a to v intervalu 7 %–10 %. Pro druhé jemné plnivo Supragraphite U C 700 nebyl perkolační práh v cementové pastě nalezen v rozmezí 0–19 hm. % náhrady cementu plnivem, kterým se tato práce zabývala. Můžeme předpokládat, že se perkolační práh Supragraphite U C 700 v suché pastě nalézá při vyšším množství plniva. Protože Supragraphite U C 700 je nejhrubším použitým plnivem, odpovídá výsledek společnému trendu a podporuje hypotézu, která bude uvedena v závěru.

### **5.6. Výběr vhodných elektrovodivých plniv pro přípravu suchých směsí s cementem a normovým pískem – suchých malt**

Jako vhodná plniva pro studium vlivu struktury na rezistivitu malt byl vybrán Micrographite F 10 jako zástupce mikroplniv. Micrographite F 10 dosáhl perkolačního prahu v intervalu 4 %–7 %, stejně jako Condufit C 4, ale hodnoty rezistivity ve všech variantách měl Micrographite F 10 jednoznačně nižší. Supragraphite C300 byl vybrán jako zástupce jemných plniv, druhé z jemných plniv Supragraphite U C 700 vykazuje vysoké hodnoty rezistivity ve všech variantách. Z kategorie velmi jemných plniv nebyl vybrán ani jeden zástupce. Na základě prostudování naměřených a vyhodnocených výsledků bylo rozhodnuto, že pro formulaci prvních závěrů o vlivu velikosti částic elektrovodivých plniv na strukturu suchých malt budou stačit data pro dvě co nejvíce rozdílná elektrovodivá plniva. Na použití mikromletého grafitu Micrographite F 10 v suché maltě byl ověřen vliv mikroplniva s velikostí částic v jednotkách mikrometrů a na

použití vločkového grafitu Supragraphite C 300 v suché maltě byl ověřen vliv jemného plniva s velikostí částic ve stovkách mikrometrů.

## 5.7. Receptury a příprava suchých malt

Suché malty byly připravovány shodným způsobem jako suché cementové pasty. Pro účely nalezení perkolačního prahu v suché maltě byly vybrány dvě plniva, na kterých byly po navážení a homogenizaci zkoušeny hlavní sledované vlastnosti suchých směsí. Složení suchých malt s elektricky vodivým plnivem vychází ze složení normové malty, tedy 1 díl cementu a 3 díly normového písku. Dávkování vybraných plniv bylo provedeno jako náhrada normového písku. Náhrada normového písku vybranými plnivy je za účelem porovnatelnosti provedena ve stejných hm. % z celkového množství jako u suchých cementových past, a to 4, 7, 10, 13, 16 a 19 hm. %. Veškerá označení a složení receptur a jejich variant suchých malt a referenční suché normové malty jsou uvedeny v tabulce, jako reference byl použit 1 díl cementu CEM I 42,5 R se 3 díly normového písku. Klíč k označení variant je jednoduchý. Písmena a čísla před první pomlčkou označují recepturu. Písmena SM mezi pomlčkami říkají, že se jedná o suchou cementovou pastu a číslo za druhou pomlčkou označuje náhradu v hm. %.

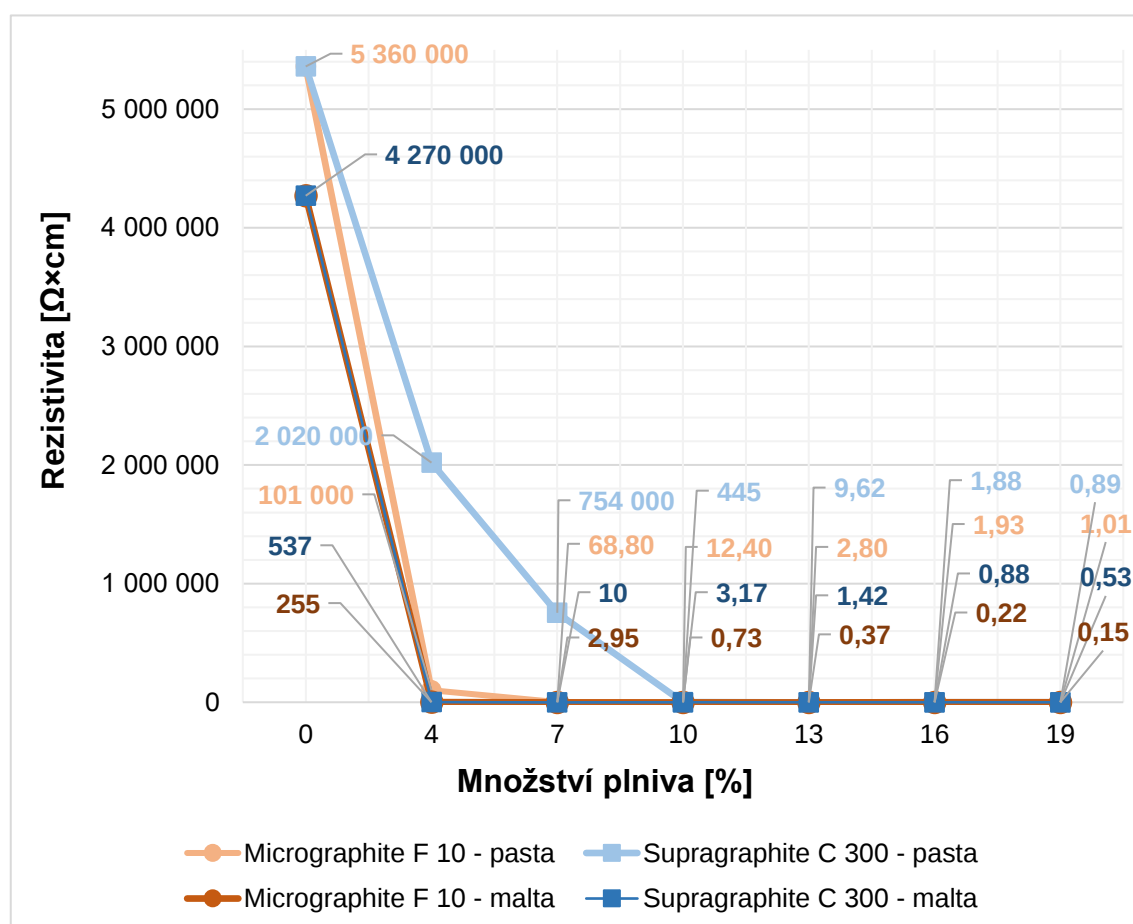
Tabulka 21: Označení a složení receptur a jejich variant suchých malt

| Receptura          |                     | Množství plniva [hm. %] | Množství normového písku [hm. %] | Množství CEM I 42,5 R [hm. %] |
|--------------------|---------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| Micrographite F 10 | Supragraphite C 300 |                         |                                  |                               |
| Varianta           |                     |                         |                                  |                               |
| MF10-SM-4          | SC30-SM-4           | 4                       | 71                               | 25                            |
| MF10-SM-7          | SC30-SM-7           | 7                       | 68                               | 25                            |
| MF10-SM-10         | SC30-SM-10          | 10                      | 65                               | 25                            |
| MF10-SM-13         | SC30-SM-13          | 13                      | 62                               | 25                            |
| MF10-SM-16         | SC30-SM-16          | 16                      | 59                               | 25                            |
| MF10-SM-19         | SC30-SM-19          | 19                      | 56                               | 25                            |

## 5.8. Zjištění vlastností suchých malt při napětí 420 kPa a porovnání se suchými cementovými pastami

Pro názornost jsou v grafech a tabulkách v tomto oddílu znovu uvedeny hodnoty suchých cementových past s použitím plniv vybraných pro použití v suchých maltách. Z grafu číslo 24 a tabulky 22 je vyvoditelné, že obě vybraná elektrovedivá plniva s elektricky vodivou funkcí snížily rezistivitu suché malty o několik řádů hned při variantě s náhradou plniva 4 hm. %. Hodnoty rezistivity suchých malt s různými plnivy jsou přibližně stejné, proto zatím nelze určit, zda je mezi účinnostmi elektricky vodivých plniv s rozdílnou velikostí částic v suchých maltách rozdíl. Objemové hmotnosti suchých malt ve srovnání s objemovými hmotnostmi suchých cementových sledují stejné trendy. S přibývajícím hm. % plniv klesá objemová hmotnost. Plnivo s menšími částicemi snižuje objemovou hmotnost výrazněji než plnivo s částicemi většími.

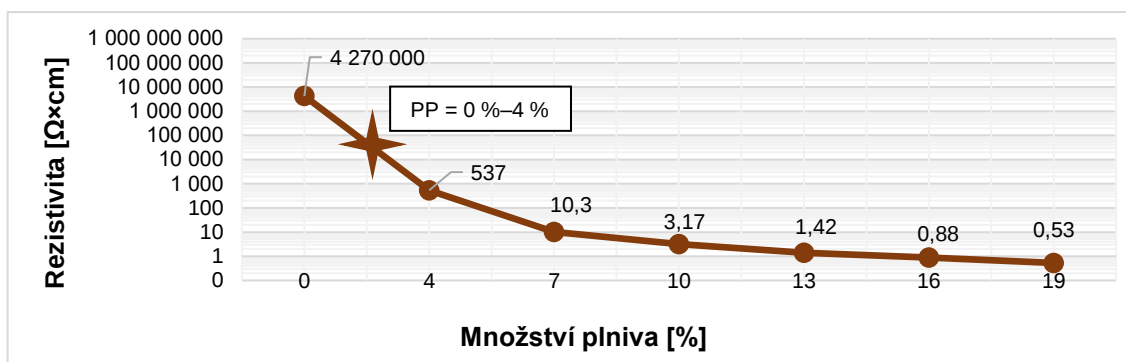
### 5.8.1. Rezistivita suchých malt



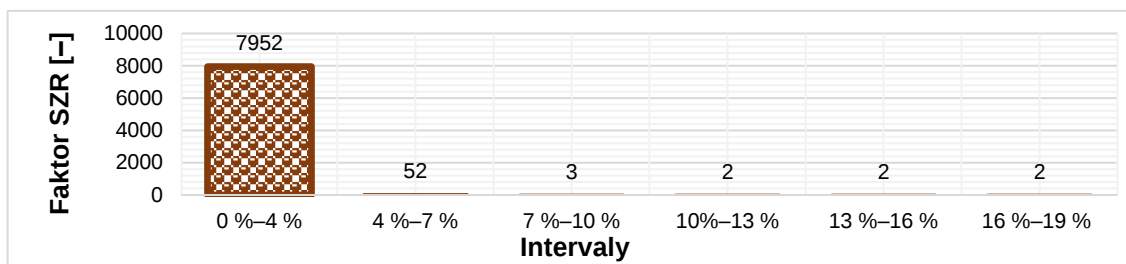
Graf 18: Rezistivita všech variant suchých malt ve srovnání se suchými pastami s použitím stejných plniv při napětí 420 kPa

## 5.9. Stanovení prahu perkolace vybraných plniv v suchých maltách

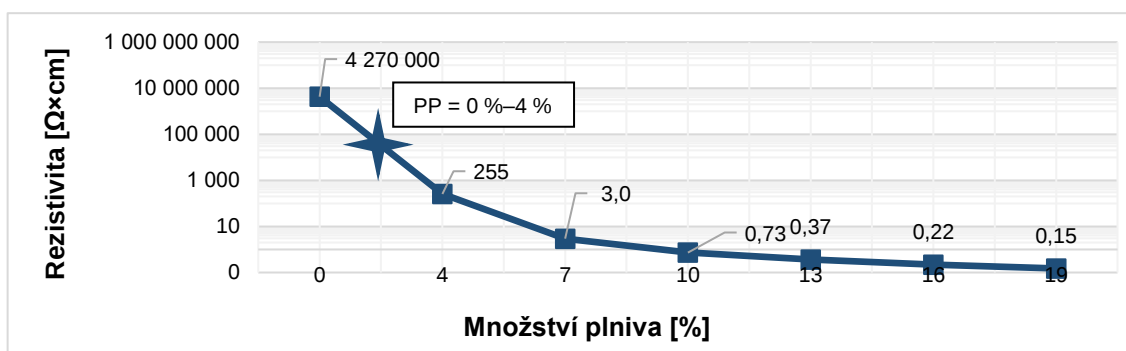
Stanovení prahu perkolace bylo provedeno pouze přibližně, a to pomocí faktoru SZI. Způsob uspořádání tohoto oddílu je shodný jako pro stanovení prahu perkolace u suchých cementových past. Zhodnocení úspěšnosti nalezení perkolačních prahů v suchých maltách je provedeno v následujícím oddílu.



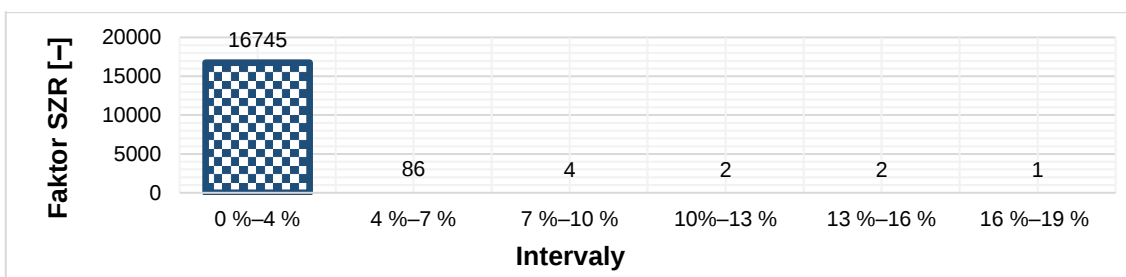
Graf 19: Přibližné stanovení perkolačního prahu pro Micrographite F 10 v suché maltě



Graf 20: Faktor SZR pro Micrographite F10 v suché pastě



Graf 21: Přibližné stanovení perkolačního prahu pro Supragraphite C 300 v suché maltě



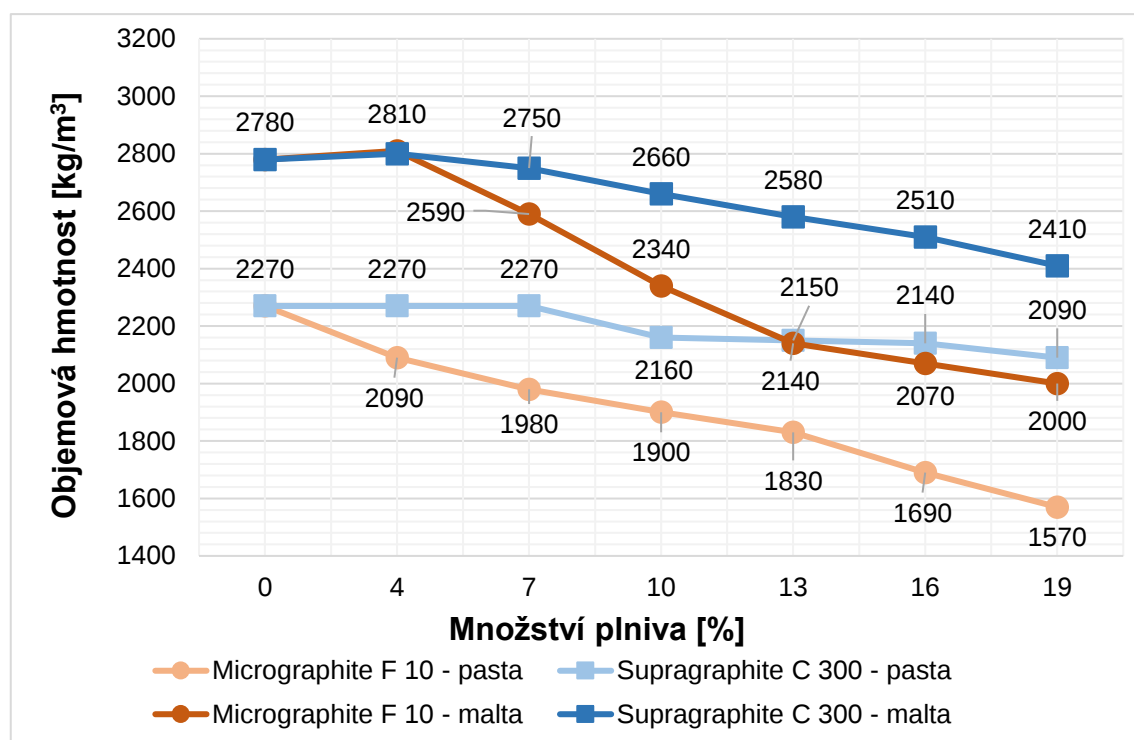
Graf 22: Faktor SZR pro Supragraphite C 300 v suché maltě

### 5.9.1. Diskuse k přibližnému určení perkolačních prahů vybraných plniv v suchých maltách

Pro mikroplnivo Micrographite F 10 i jemné plnivo Supragraphite C 300 byl perkolační práh v suché maltě přibližně stanoven do intervalu 0 %–4% hmotnostní náhrady normového písku plnivem. Tento výsledek napovídá, že přidáním většího množství částic kolem 1 mm velkých, byť elektricky nevodivé suroviny, a současně snížení množství velmi jemných částic, v tomto případě cementu, je výrazně sníženo množství elektricky vodivého plniva, kterým je nutno nahradit určitá hm. % směsi za účelem překročení prahu perkolace.

Vzhledem k tomu, že se pro mikroplnivo i jemné plnivo perkolační práh nalézá ve stejném intervalu, nelze v tomto případě říct, jaké plnivo a s jakou velikostí částic je vhodnější pro použití v suché maltě. Ale lze konstatovat, že ve struktuře suché cementové pasty je potřeba větší množství elektricky vodivého plniva ke snížení rezistivity než ve struktuře suché malty.

### 5.9.2. Objemová hmotnost suchých malt



Graf 23: Objemová hmotnost všech variant suchých malt ve srovnání se suchými pastami s použitím stejných plniv při napětí 420 kPa

## 5.10. Diskuse ke II. etapě

Ve druhé etapě byly zjištěny sledované vlastnosti suchých cementových past a suchých malt. Byly zjištěny hodnoty rezistivity a objemové hmotnosti při napětí 420 kPa, obě tyto vlastnosti mají stejné trendy poklesu. Rezistivita a objemové hmotnosti pro všechna plniva klesají s přibývajícím zastoupením plniv vyjádřeném v hm. %. Pokles rezistivity i objemové hmotnosti je výraznější a je pozorovatelný a měřitelný již při nižším zastoupení u plniv s menší velikostí částic.

Na základě naměřených a zpracovaných hodnot pro suché směsi lze konstatovat, že čím je menší velikost částic a menší objemová hmotnost samotného plniva, tím je menší rezistivita a objemová hmotnost suché směsi, ve které je dané plnivo použito.

Další parametry plniva, které mohou mít nezanedbatelný vliv na rezistivitu suchých směsí, je rezistivita samotného plniva, tvar částic plniva a křivka distribuce částic. Tvar částic v případě této práce má pravděpodobně vliv zanedbatelný, protože všechna použitá plniva mají charakter destiček. Rezistivita samotného plniva byla velmi pečlivě sledovaná vlastnost. Ve výsledcích měření rezistivity si lze povšimnout, že jemná plniva, zejména Supragraphite UC 700 vykazují mnohem vyšší hodnoty rezistivity u variant se 4 a 7 hm. % oproti například mikroplnivům Condufit C 4 a Micrographite F 10, která u variant se 7 hm. % mají rezistivity v řádu desítek  $\Omega \times \text{cm}$ , Supragraphite UC 700 má stále rezistivitu v jednotkách  $M\Omega \times \text{cm}$ . Z toho lze vyvodit hypotéza o vlivu struktury suché směsi na její rezistivitu.

Nejdůležitějšími vlastnostmi, které mají největší vliv na rezistivitu suché směsi, jsou velikost částic plniva a vlastní rezistivita plniva.

Za předpokladu, že budou namíchány dva vzorky cementových past, ve kterých bude použito a homogenizováno shodné množství plniva s identickou vlastní rezistivitou, ale řádově rozdílnou velikostí částic, lze předpokládat, že nižší rezistivitu bude vykazovat ten vzorek, ve kterém bylo využito plnivo s menší velikostí částic.

### 5.11. Závěr II. etapy

- Nejdůležitějšími vlastnostmi elektrovodivého plniva, které mají největší vliv na parametry suché směsi, jsou velikost částic a vlastní rezistivita.
- Nejdůležitější vlastností matrice suchých směsí je zastoupení a velikost částic.
- Rezistivita a objemové hmotnosti suchých směsí klesají s přibývajícím zastoupením elektrovodivých plniv.
- Čím je menší velikost částic, tím je menší objemová hmotnost samotného elektrovodivého plniva, a tím je menší rezistivita a objemová hmotnost suché směsi.
- Perkolačního prahu v suché maltě lze dosáhnout s menším zastoupením elektrovodivého plniva než perkolačního prahu v suché cementové pastě.
- Čím menší je velikost částic elektrovodivého plniva, tím je třeba menšího zastoupení tohoto elektrovodivého plniva k dosažení perkolačního prahu v suché směsi.

## **6. ETAPA III – Stanovení hlavních parametrů a studium struktury zatvrdlých cementových past po 28 dnech zrání**

### **6.1. Vybrané receptury a varianty pro přípravu zatvrdlých cementových past**

Za účelem studia vlivu různých plniv na strukturu a parametry zatvrdlé cementové pasty po 28 dnech zrání a porovnání vybraných parametrů s parametry suché pasty bylo ve třetí etapě použito stejných šest elektrovedivých plniv jako ve druhé etapě.

### **6.2. Receptury cementových past a příprava zkušebních těles**

Zkušební tělesa rozměru 40 × 40 × 160 mm byly vyrobeny z cementových past podle receptur jednotlivých variant popsanych v tabulce. Od každé z variant bylo vyrobeno devět zkušebních těles. Šest těles s vnitřními elektrodami a tři tělesa bez elektrod. Při výrobě těles byl kladen důraz na správné umístění a zanoření elektrod do zkušebního vzorku. Během prvních 24 hodin, po kterých byly vzorky vyjmuty z forem, musí být při manipulaci brán zřetel na to, že se elektroda může při neopatrném zacházení uvolnit. Těleso s uvolněnou elektrodou již nemůže být použito k měření impedance, můžou na něm být prováděny mechanické zkoušky.

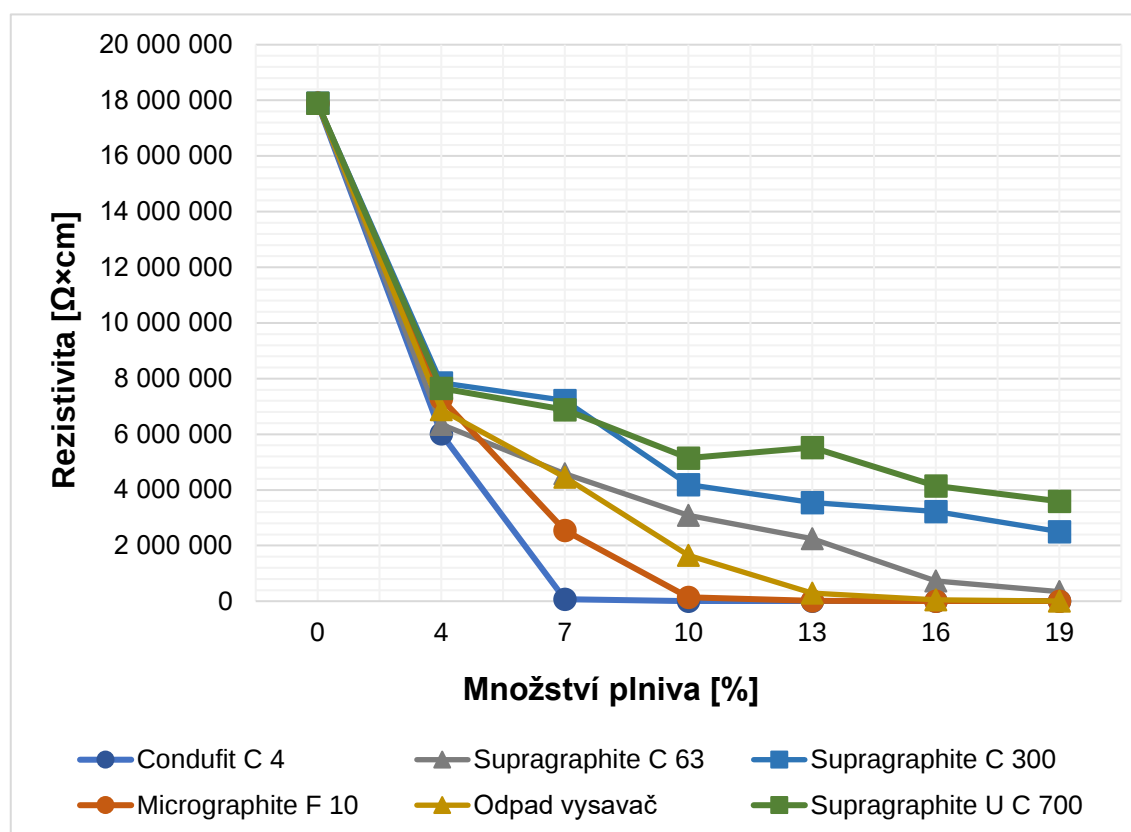
Složení jednotlivých variant se shodují se složeními variant suchých směsí. Jediný rozdíl tvoří přídavek vody. Ta byla dávkována takovým způsobem, aby bylo dosaženo konzistence, při které lze směs dobře plnit do forem, ale současně byl kladen důraz na to, aby byl vodní součinitel co nejnižší. Podařilo se docílit, že všechny receptury mají vodní součinitel v rozmezí mezi hodnotami 0,37 a 0,60. Tento poměrně malý rozdíl v množství vody by měl zajistit, že výsledky hlavních parametrů zatvrdlých cementových past nebudou příliš ovlivňovány množstvím záměsové vody, a tedy sledované změny parametrů mezi variantami budou souviset pravděpodobněji s použitým plnivem. O sledování změn parametrů způsobených různými dávkami různých plniv jde především.

Písmena a čísla před první pomlčkou označují recepturu. Písmena ZCP mezi pomlčkami říkají, že se jedná o zatvrdlou cementovou pastu a číslo za druhou pomlčkou označuje náhradu v hm. %.

Tabulka 22: Označení a složení receptur a jejich variant cementových past

| Receptura             |                                |                       |                                |                          |                                | Množství plniva<br>[hm. %] | Množství CEM I<br>42,5 R [hm. %] |
|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| Condufit C 4          | Vodní<br>součinitel<br>c/w [-] | Supragraphite<br>C 63 | Vodní<br>součinitel<br>c/w [-] | Supragraphite<br>C 300   | Vodní<br>součinitel<br>c/w [-] |                            |                                  |
| Varianta              |                                |                       |                                |                          |                                | Množství plniva<br>[hm. %] | Množství CEM I<br>42,5 R [hm. %] |
| CC4-<br>ZCP-4         | 0,41                           | SC63-<br>ZCP-4        | 0,46                           | SC30-<br>ZCP-4           | 0,4                            |                            |                                  |
| CC4-<br>ZCP-7         | 0,44                           | SC63-<br>ZCP-7        | 0,46                           | SC30-<br>ZCP-7           | 0,41                           |                            |                                  |
| CC4-<br>ZCP-10        | 0,49                           | SC63-<br>ZCP-10       | 0,46                           | SC30-<br>ZCP-10          | 0,42                           |                            |                                  |
| CC4-<br>ZCP-13        | 0,54                           | SC63-<br>ZCP-13       | 0,49                           | SC30-<br>ZCP-13          | 0,43                           |                            |                                  |
| CC4-<br>ZCP-16        | 0,56                           | SC63-<br>ZCP-16       | 0,52                           | SC30-<br>ZCP-16          | 0,44                           |                            |                                  |
| CC4-<br>ZCP-19        | 0,60                           | SC63-<br>ZCP-19       | 0,55                           | SC30-<br>ZCP-19          | 0,45                           |                            |                                  |
| Receptura             |                                |                       |                                |                          |                                | Množství plniva<br>[hm. %] | Množství CEM I<br>42,5 R [hm. %] |
| Micrographite<br>F 10 | Vodní<br>součinitel<br>c/w [-] | Odpad<br>vysavač      | Vodní<br>součinitel<br>c/w [-] | Supragraphite<br>U C 700 | Vodní<br>součinitel<br>c/w [-] |                            |                                  |
| Varianta              |                                |                       |                                |                          |                                | Množství plniva<br>[hm. %] | Množství CEM I<br>42,5 R [hm. %] |
| MF10-<br>ZCP-4        | 0,40                           | OV-<br>ZCP-4          | 0,37                           | SUC70-<br>ZCP-4          | 0,31                           |                            |                                  |
| MF10-<br>ZCP-7        | 0,43                           | OV-<br>ZCP-7          | 0,37                           | SUC70-<br>ZCP-7          | 0,31                           |                            |                                  |
| MF10-<br>ZCP-10       | 0,48                           | OV-<br>ZCP-10         | 0,38                           | SUC70-<br>ZCP-10         | 0,31                           |                            |                                  |
| MF10-<br>ZCP-13       | 0,53                           | OV-<br>ZCP-13         | 0,42                           | SUC70-<br>ZCP-13         | 0,31                           |                            |                                  |
| MF10-<br>ZCP-16       | 0,58                           | OV-<br>ZCP-16         | 0,46                           | SUC70-<br>ZCP-16         | 0,31                           |                            |                                  |
| MF10-<br>ZCP-19       | 0,60                           | OV-<br>ZCP-19         | 0,5                            | SUC70-<br>ZCP-19         | 0,31                           | 19                         | 81                               |

### 6.3. Rezistivita zatvrdlých cementových past po 28 dnech zrání



Graf 24: Rezistivita všech variant vysušených zatvrdlých cementových past po 28 dnech zrání

Tabulka 23: Rezistivita všech variant vysušených zatvrdlých cementových past po 28 dnech zrání

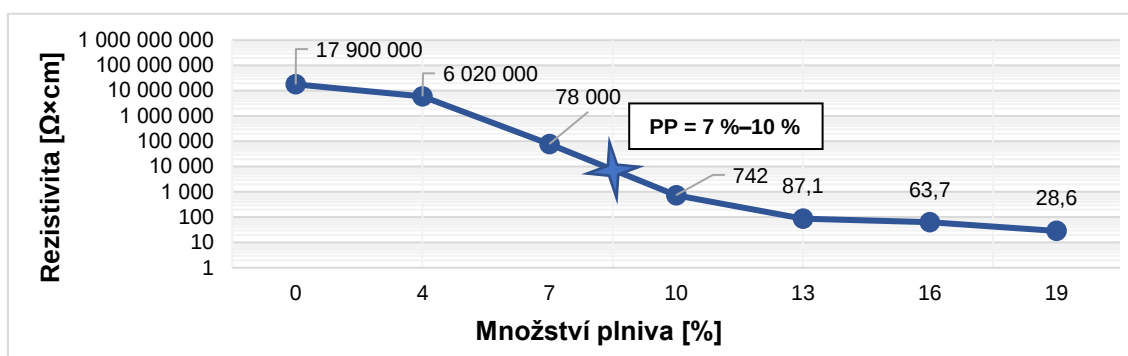
| Receptura | REF-ZCP    | Varianta                                  |           |           |           |           |           |
|-----------|------------|-------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|           |            | 4                                         | 7         | 10        | 13        | 16        | 19        |
|           |            | Rezistivita [ $\Omega \times \text{cm}$ ] |           |           |           |           |           |
| CC4-ZCP   | 17 900 000 | 6 020 000                                 | 78 000    | 472       | 87        | 64        | 29        |
| MF10-ZCP  |            | 7 280 000                                 | 2 540 000 | 145 000   | 9 950     | 379       | 67        |
| SC63-ZCP  |            | 6 350 000                                 | 4 580 000 | 3 090 000 | 2 250 000 | 730 000   | 343 000   |
| OV-ZCP    |            | 6 880 000                                 | 4 460 000 | 1 650 000 | 295 000   | 53 700    | 5 327     |
| SC30-ZCP  |            | 7 850 000                                 | 7 220 000 | 4 190 000 | 3 550 000 | 3 220 000 | 2 500 000 |
| SUC70-ZCP |            | 7 650 000                                 | 6 880 000 | 5 140 000 | 5 520 000 | 4 140 000 | 3 590 000 |

V grafu rezistivity zatvrdlých cementových past je možno si povšimnout výrazného poklesu rezistivity oproti referenční cementové pastě u receptur se všemi plnivy. Rezistivity u všech variant s náhradou 4 hm. % cementu plnivem jsou velmi podobné, a to v řádu  $M\Omega \times cm$ . U variant s náhradou 7 hm. % rezistivita receptury s plnivem Condufit C 4 začíná výrazně klesat do řádů desítek až stovek  $\Omega \times cm$ , ostatní receptury vykazují stále hodnoty rezistivity v řádu jednotek  $M\Omega \times cm$ . U dalších variant s větší náhradou hm. % cementu plnivem dochází k poklesu rezistivity do řádů desítek až stovek  $\Omega \times cm$  ještě u dvou receptur. U receptury s plnivem Micrographite F 10 a plnivem Odpad vysavač. U receptury s plnivem Supragraphite C 63 dochází k plynulým větším poklesům, ale rezistivita varianty s 19 hm. % plniva vykazuje stále stovky  $k\Omega \times cm$ , která není považována za uspokojivý výsledek. Plniva s největší velikostí částic Supragraphite C 300 a Supragraphite vykazují i u variant s 19 hm. % rezistivitu stále v jednotkách  $M\Omega \times cm$ . Poklesu rezistivity suchých směsí se dále věnuje následující oddíl.

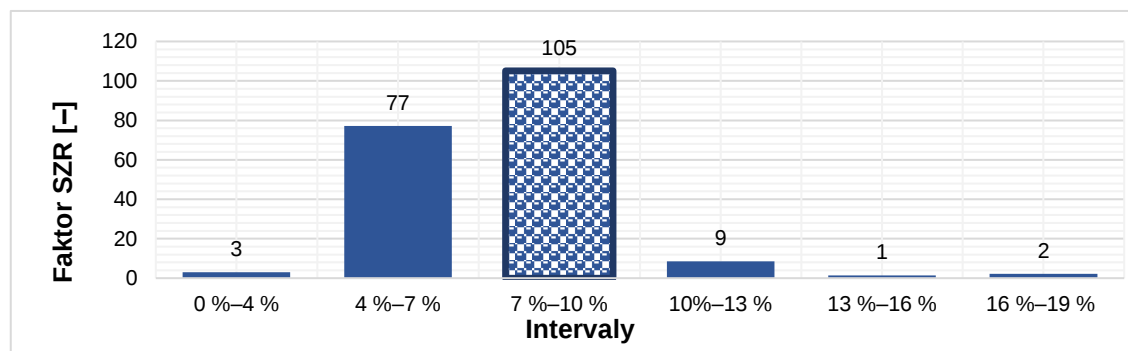
#### **6.4. Stanovení perkolačních prahů vybraných plniv ve vysušené zatvrdlé cementové pastě po 28 dnech zrání**

Přibližné stanovení prahu perkolace bylo provedeno shodným způsobem jako již několikrát v předešlých částech práce. Byla použita přibližná metoda využívající faktor SZR. Vyhodnocení grafického zpracování přibližného určení perkolačního prahu je řešeno v rámci následujícího oddílu „Diskuse k přibližnému určení perkolačních prahů vybraných plniv v zatvrdlé cementové pastě.“

#### 6.4.1. Perkolační práh pro Condufit C 4 v zatvrdlé pastě

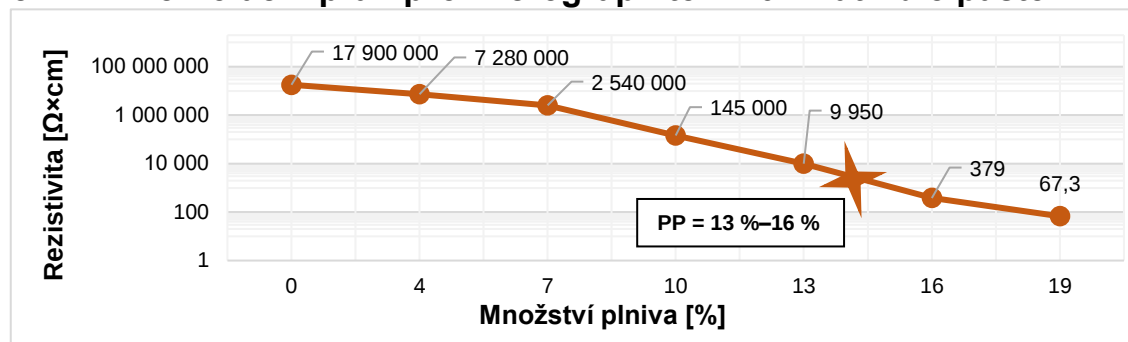


Graf 25: Přibližné stanovení perkolačního prahu pro Condufit C 4 v zatvrdlé pastě

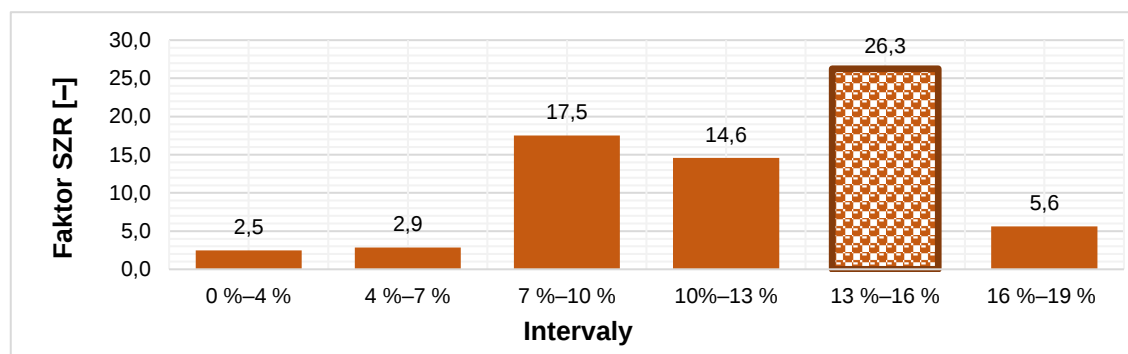


Graf 26: Faktor SZR pro Condufit C 4 v zatvrdlé pastě

#### 6.4.2. Perkolační práh pro Micrographite F 10 v zatvrdlé pastě

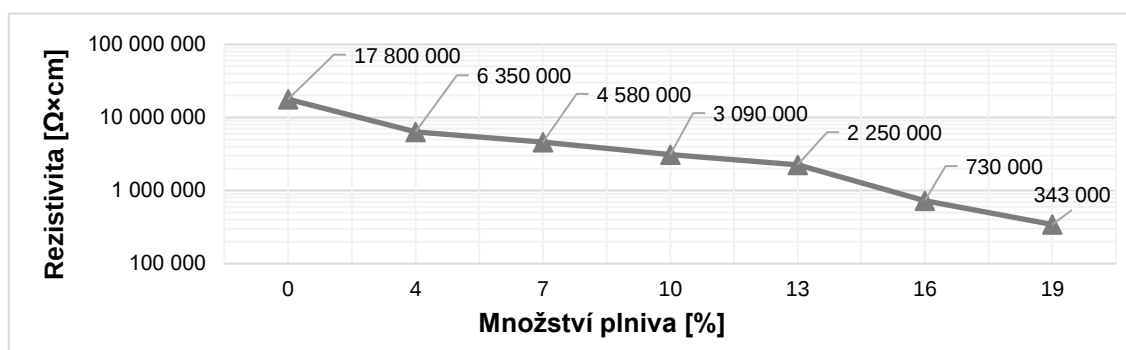


Graf 28: Přibližné stanovení perkolačního prahu pro Micrographite F 10 v zatvrdlé pastě

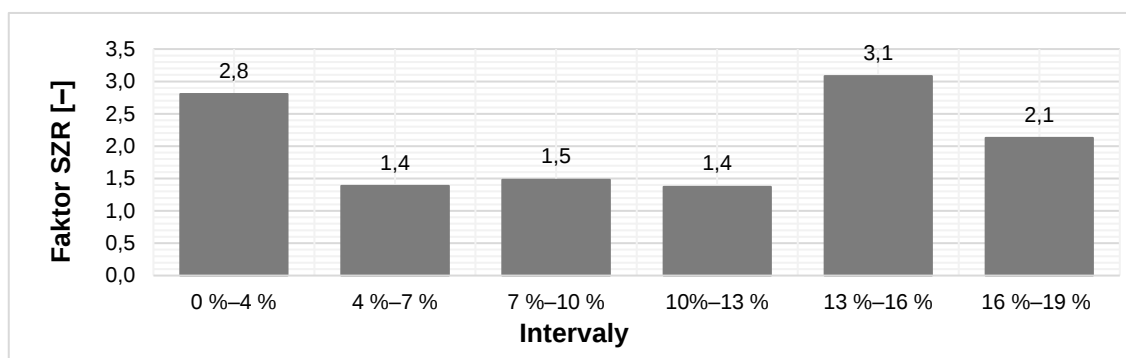


Graf 27: Faktor SZR pro Micrographite F 10 v zatvrdlé pastě

### 6.4.3. Perkolační práh pro Supragraphite C 63 v zatvrdlé pastě

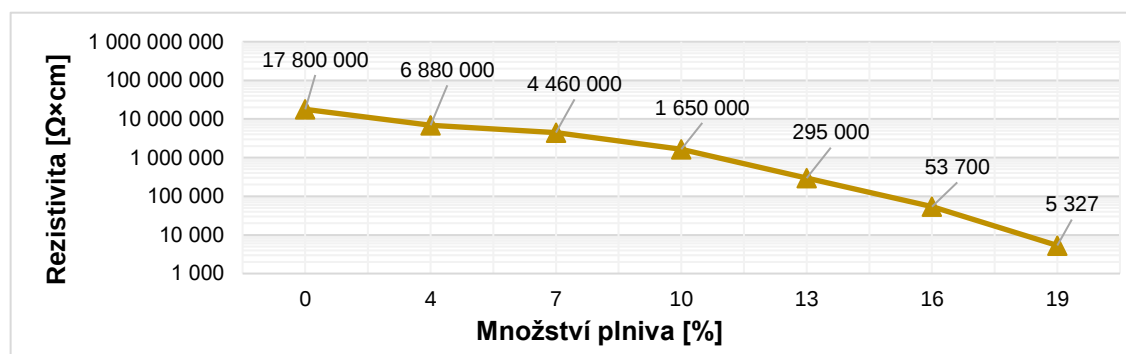


Graf 30: Přibližné stanovení perkolačního prahu pro Supragraphite C 63 v zatvrdlé pastě

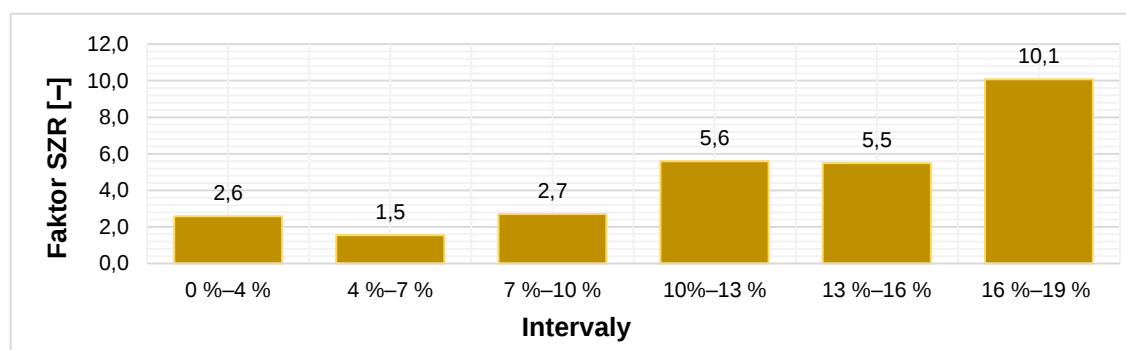


Graf 29: Faktor SZR pro Supragraphite C 63 v zatvrdlé pastě

### 6.4.4. Perkolační práh pro Odpad vysavač v zatvrdlé pastě

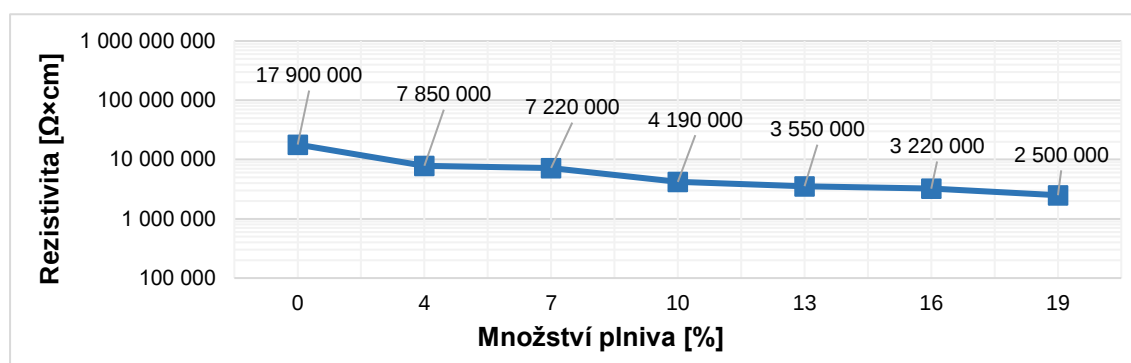


Graf 32: Přibližné stanovení perkolačního prahu pro Odpad vysavač v zatvrdlé pastě

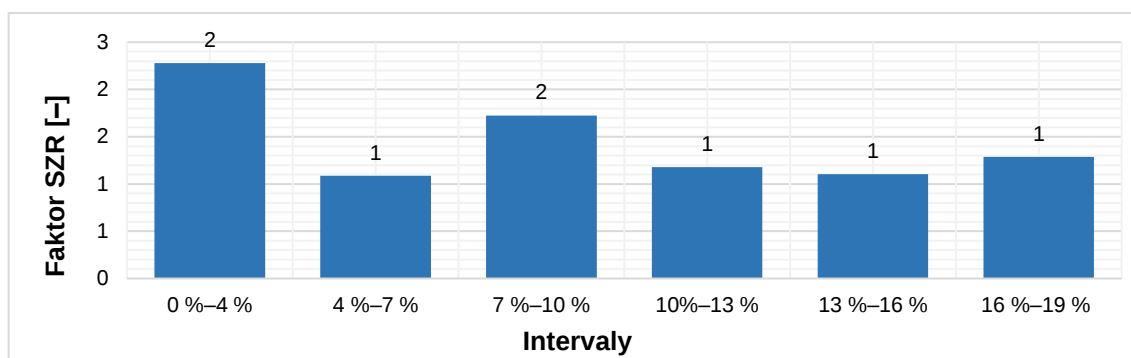


Graf 31: Faktor SZR pro Odpad vysavač v zatvrdlé pastě

#### 6.4.5. Perkolační práh pro Supragraphite C 300 v zatvrdlé pastě

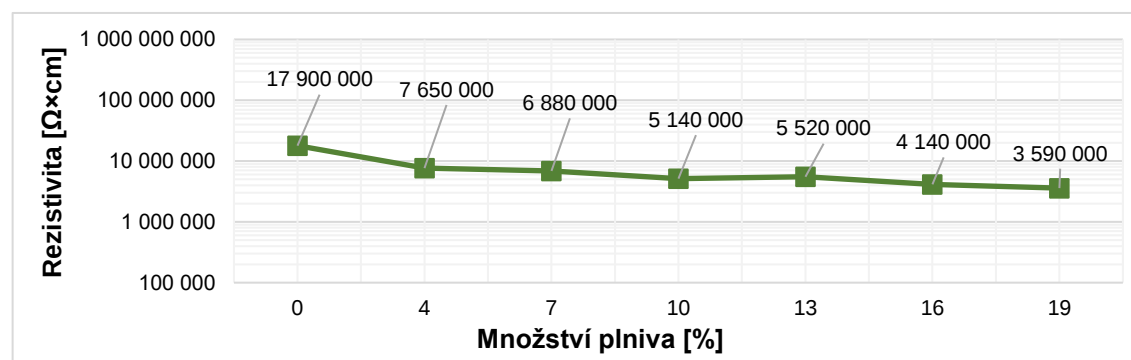


Graf 34: Přibližné stanovení perkolačního prahu pro Supragraphite C 300 v zatvrdlé pastě

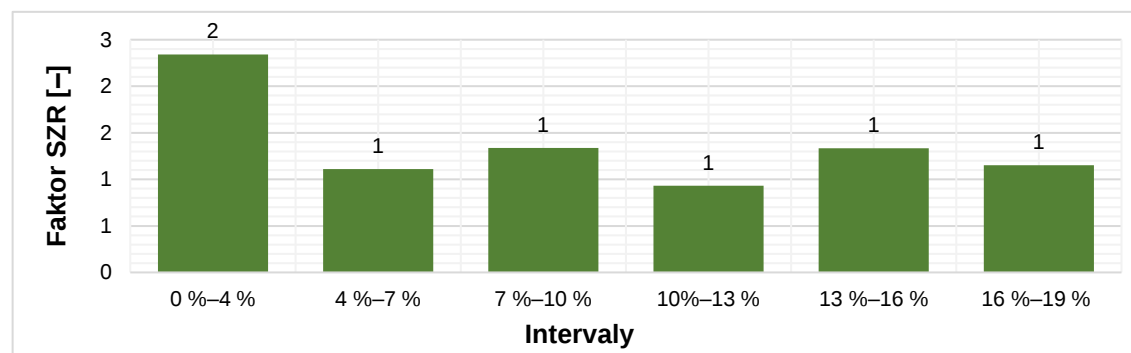


Graf 33: Faktor SZR pro Supragraphite C 300 v zatvrdlé pastě

#### 6.4.6. Perkolační práh pro Supragraphite U C 700 v zatvrdlé pastě



Graf 35: Přibližné stanovení perkolačního prahu pro Supragraphite U C 700 v zatvrdlé pastě



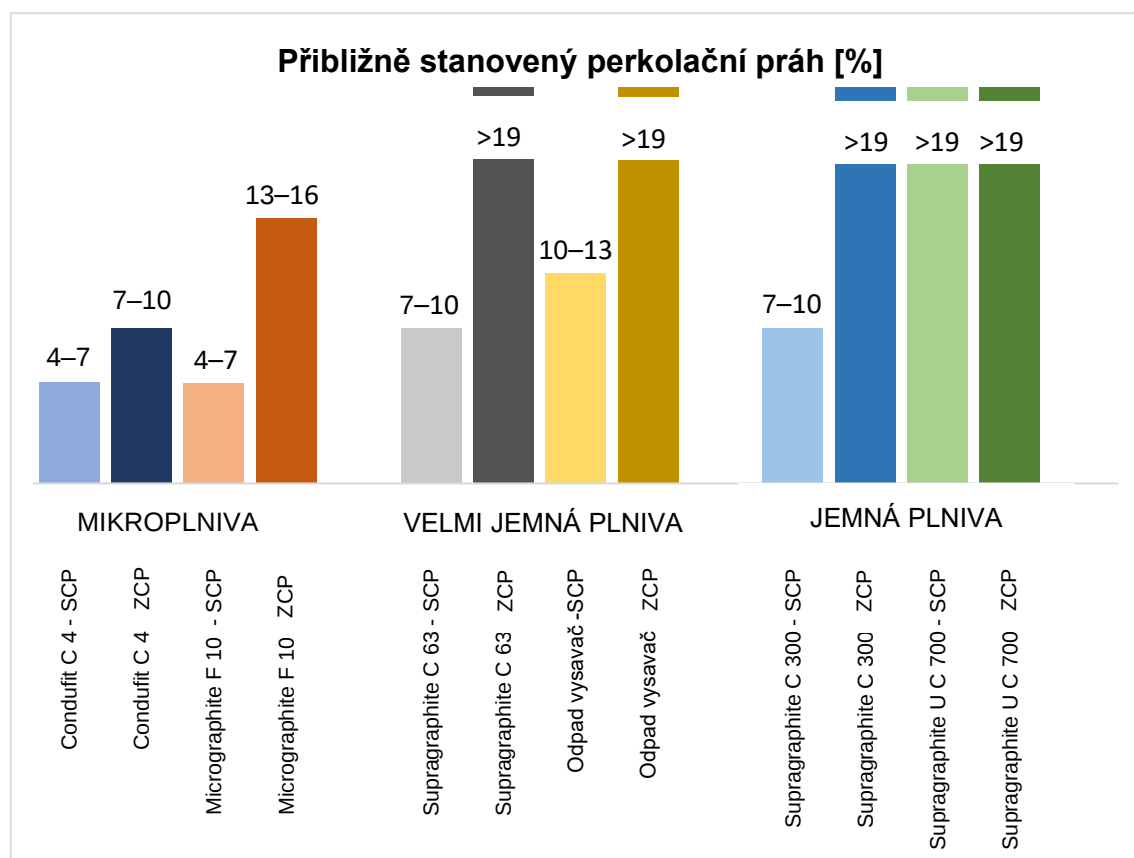
Graf 36: Faktor SZR pro Supragraphite U C 700 v zatvrdlé pastě

## 6.5. Diskuse k přibližnému určení perkolačních prahů vybraných plniv v zatvrdlé cementové pastě

U prvního z mikroplniv Condufit C 4 byl perkolační práh v zatvrdlé cementové pastě přibližně stanoven do intervalu 4 % –7 % hmotnostní náhrady cementu plnivem. Perkolační práh v zatvrdlé cementové pastě pro mikroplnivo Micrographite F 10 byl přibližně stanoven do intervalu 13 %–16 %.

Pro plniva Supragraphite C 63, Odpad vysavač, Supragraphite C 300 ani Supragraphite U C 700 nebyl perkolační práh v zatvrdlé cementové pastě nalezen v rozmezí 0–19 hm. % náhrady cementu plnivem, kterým se tato práce zabývala. Vzhledem k tomu, že se perkolační práh v zatvrdlé cementové pastě liší od prahu v suché cementové pastě, budou perkolační prahy všech vybraných plniv porovnávány ve společném grafu v následujícím oddílu.

### 6.5.1. Srovnání perkolačních prahů v suchých cementových pastách a vysušených zatvrdlých cementových pastách po 28 dnech zrání



Graf 37: Srovnání perkolačních prahů v suché cementové pastě a perkolačních prahů ve vysušené zatvrdlé cementové pastě pro všechna plniva

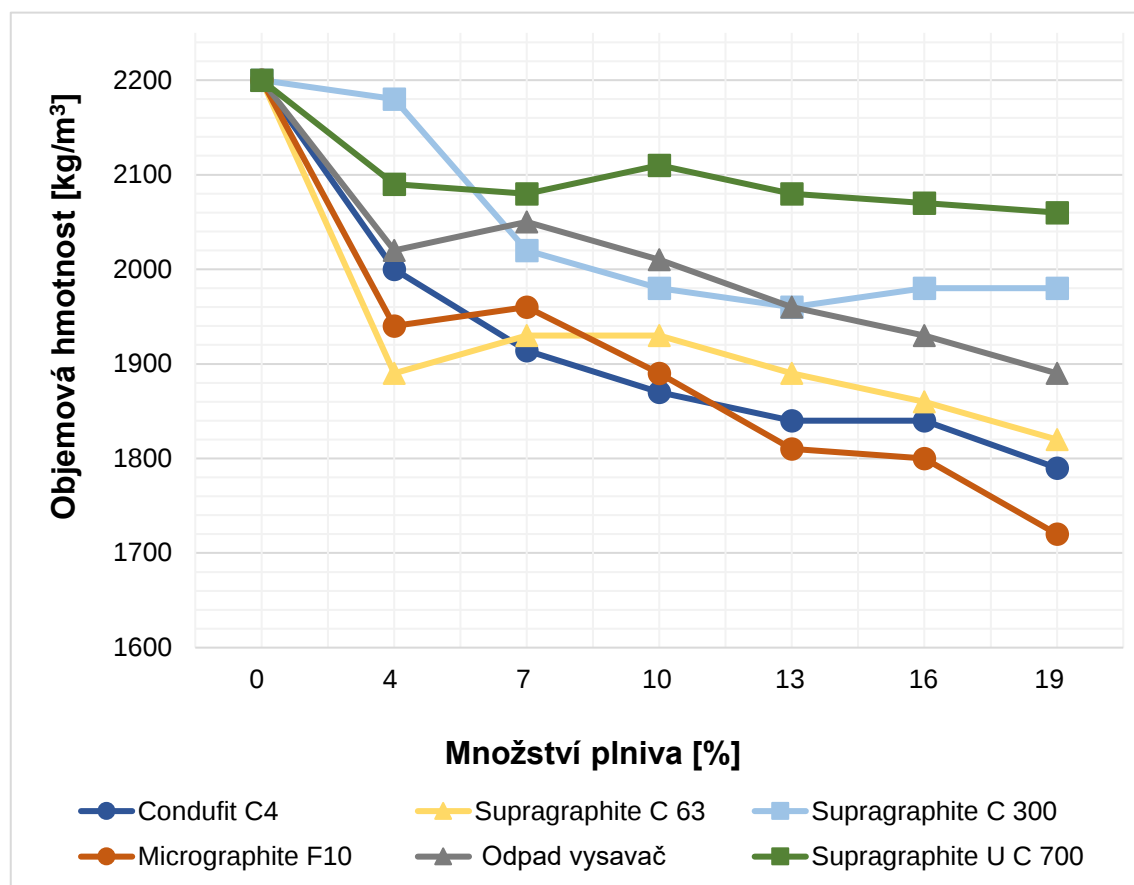
Mikroplnivo Condufit C 4, které má střední velikost částic 4  $\mu\text{m}$  dosahuje perkolačního prahu v zatvrdlé cementové pastě v intervalu 4 %–7 %. Druhý z mikroplniv Micrographite F 10 se střední velikostí částic 10  $\mu\text{m}$  dosahuje perkolačního prahu v zatvrdlé cementové pastě v intervalu 13 %–16 %. U ostatních plniv nebyl pro interval 0 %–19 % perkolační práh v zatvrdlé cementové pastě nalezen. S přihlédnutím k podmínkám měření, kdy rezistivita suchých cementových past i zatvrdlých cementových past byla měřena ve zcela vysušeném stavu, a že porovnáváné receptury pro dané plnivo měly shodné složení, lze konstatovat, že jedinou proměnnou, která mohla způsobit tuto rozdílnost, toto posunutí předpokládaných perkolačních prahů do vyšších intervalů u zatvrdlých past oproti suchým směsím, je proces hydratace, vznik a přítomnost hydratačních produktů. Tento předpoklad byl ověřen a potvrzen v rámci studia struktury.

Z grafu je dobře odvoditelný závěr, že perkolační práh jakéhokoliv z plniv je vždy přibližně stanoven do nižšího intervalu v suché cementové pastě než v zatvrdlé cementové pastě. Rovněž je zřejmá platnost hypotézy, že čím menší je velikost částic plniva, tím menší množství hm. % cementu je třeba daným plnivem nahradit pro dosažení perkolačního prahu. Na základě získaných výsledků lze předpokládat, že tento princip platný pro suché směsi je platný i pro zatvrdlou cementovou pastu.

## **6.6. Stanovení hlavních parametrů zatvrdlých cementových past po 28 dnech zrání**

Postupy stanovení hlavních parametrů zatvrdlých cementových past po 28 dnech zrání byly popsány v kapitole „Metody prováděných zkoušek a měření“. Vyhodnocení a komentáře dosažených parametrů jsou uvedeny společně pro všechny hlavní parametry v oddílu „Zhodnocení vlivu složení na hlavní parametry cementové pasty“.

### 6.6.1. Objemová hmotnost zatvrdlých cementových past ve 100% nasyceném stavu

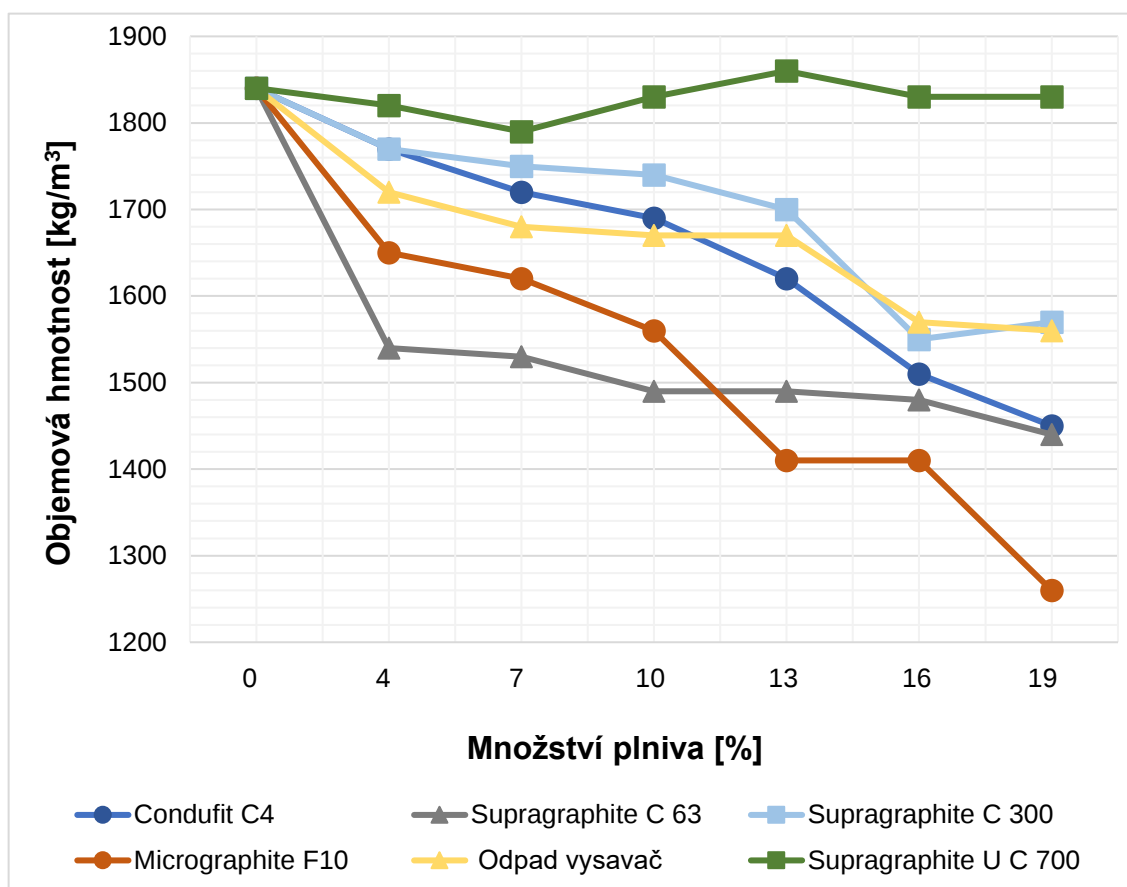


Graf 38: Objemová hmotnost všech variant zatvrdlých cementových past ve 100 % nasyceném stavu po 28 dnech zrání

Tabulka 24: Objemová hmotnost všech variant zatvrdlých cementových past ve 100 % nasyceném stavu po 28 dnech zrání

| Receptura | REF-ZCP | Varianta                                           |       |       |       |       |       |
|-----------|---------|----------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|           |         | 4                                                  | 7     | 10    | 13    | 16    | 19    |
|           |         | Objemová hmotnost ve 100 % nasyceném stavu [kg/m3] |       |       |       |       |       |
| CC4-ZCP   | 2 200   | 2 000                                              | 1 910 | 1 870 | 1 840 | 1 840 | 1 790 |
| MF10-ZCP  |         | 1 940                                              | 1 960 | 1 890 | 1 810 | 1 800 | 1 720 |
| SC63-ZCP  |         | 1 890                                              | 1 930 | 1 930 | 1 890 | 1 860 | 1 820 |
| OV-ZCP    |         | 2 020                                              | 2 050 | 2 010 | 1 960 | 1 930 | 1 890 |
| SC30-ZCP  |         | 2 180                                              | 2 020 | 1 980 | 1 960 | 1 980 | 1 980 |
| SUC70-ZCP |         | 2 090                                              | 2 080 | 2 110 | 2 080 | 2 070 | 2 060 |

### 6.6.2. Objemová hmotnost vysušených zatvrdlých cementových past



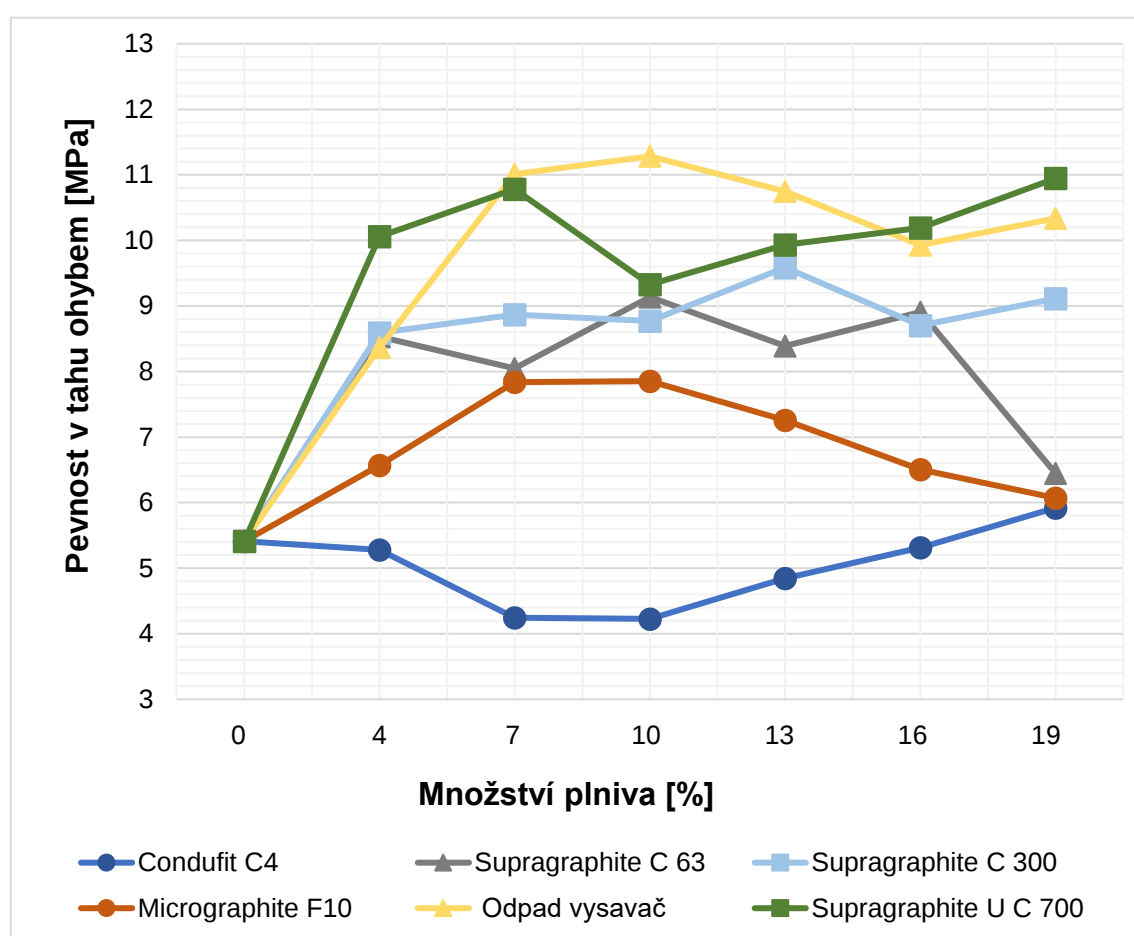
Graf 39: Objemová hmotnost všech variant zatvrdlých cementových past ve vysušeném stavu po 28 dnech zrání

Tabulka 25: Objemová hmotnost všech variant zatvrdlých cementových past ve vysušeném stavu po 28 dnech zrání

| Receptura | REF-ZCP | Varianta                                     |       |       |       |       |       |
|-----------|---------|----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|           |         | 4                                            | 7     | 10    | 13    | 16    | 19    |
|           |         | Objemová hmotnost ve vysušeném stavu [kg/m³] |       |       |       |       |       |
| CC4-ZCP   | 1 840   | 1 770                                        | 1 720 | 1 690 | 1 620 | 1 510 | 1 450 |
| MF10-ZCP  |         | 1 650                                        | 1 620 | 1 560 | 1 410 | 1 410 | 1 260 |
| SC63-ZCP  |         | 1 540                                        | 1 530 | 1 490 | 1 490 | 1 480 | 1 440 |
| OV-ZCP    |         | 1 720                                        | 1 680 | 1 670 | 1 670 | 1 570 | 1 560 |
| SC30-ZCP  |         | 1 770                                        | 1 750 | 1 740 | 1 700 | 1 550 | 1 570 |
| SUC70-ZCP |         | 1 820                                        | 1 790 | 1 830 | 1 860 | 1 830 | 1 830 |

Z grafů objemových hmotností zatvrdlé cementové pasty v nasyceném i vysušeném stavu je znát, že největší pokles mají mikroplniva a velmi jemná plniva. Jemná plniva mají jen mírný vliv na snížení objemové hmotnosti zatvrdlého kompozitu. Důvodem rozdílného vlivu různých plniv na objemovou hmotnost zatvrdlého kompozitu je nejen rozdílná objemová hmotnost jich samotných, ale především měrný povrch a nasákavost, které ovlivňují vodní součinitel. Vodní součinitel musel být zvyšován s rostoucím množstvím mikro a velmi jemných plniv, zatímco u jemných plniv být navyšován nemusel.

### 6.6.3. Pevnost v tahu ohybem zatvrdlých cementových past



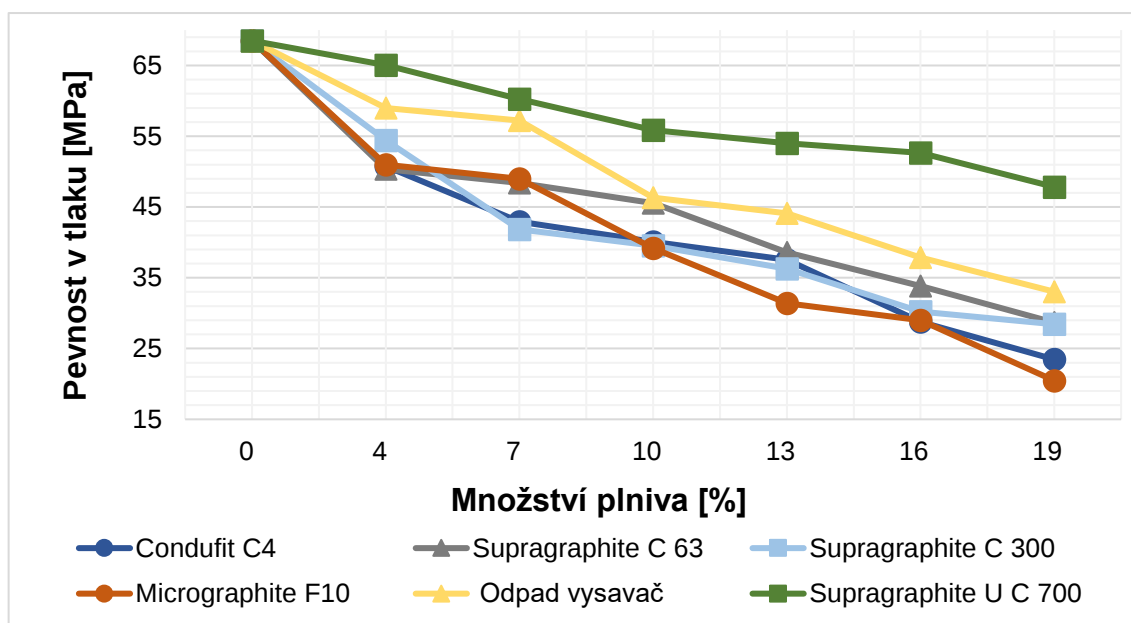
Graf 40: Pevnost v tahu ohybem všech variant zatvrdlých cementových past ve 100 % nasyceném stavu po 28 dnech zrání

Tabulka 26: Pevnost v tahu ohybem všech variant zatvrdlých cementových past ve 100 % nasyceném stavu po 28 dnech zrání

| Receptura | REF-ZCP | Varianta                    |             |             |             |             |       |
|-----------|---------|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|
|           |         | 4                           | 7           | 10          | 13          | 16          | 19    |
|           |         | Pevnost v tahu ohybem [MPa] |             |             |             |             |       |
| CC4-ZCP   | 5,41    | 5,28                        | <b>4,24</b> | <b>4,23</b> | 4,85        | 5,31        | 5,92  |
| MF10-ZCP  |         | 6,57                        | 7,84        | 7,85        | <b>7,26</b> | <b>6,51</b> | 6,07  |
| SC63-ZCP  |         | 8,53                        | 8,05        | 9,14        | 8,39        | 8,91        | 6,45  |
| OV-ZCP    |         | 8,37                        | 11,01       | 11,28       | 10,75       | 9,93        | 10,34 |
| SC30-ZCP  |         | 8,59                        | 8,87        | 8,77        | 9,59        | 8,70        | 9,11  |
| SUC70-ZCP |         | 10,06                       | 10,78       | 9,33        | 9,93        | 10,19       | 10,95 |

Nárůst pevnosti v tahu ohybem zatvrdlé pasty, který je patrný z hodnot vynesných v grafu, je přisuzován destičkovitému charakteru částic všech použitých plniv. Zrna portlandského slínku jsou kulová, takže zvýšení pevnosti v tahu ohybem s narůstajícím množstvím plniv oproti referenční cementové pastě je očekávaným výsledkem. Receptury s jemnými plnivy, zejména Supragraphite U C 700, které mají většinu částic větších než zrna cementu, mají nejvýraznější nárůsty pevnosti v tahu ohybem, zatímco mikroplniva s částicemi menšími, než zrna cementu pevnost v tahu ohybem snižují minimálně. Receptura s Condufit C 4 dokonce v nižších dávkách pevnost v tahu ohybem mírně snižuje a k nárůstu dochází až při vyšších dávkách.

#### 6.6.4. Pevnost v tlaku zatvrdlých cementových past



Graf 41: Pevnost v tlaku všech variant zatvrdlých cementových past ve 100 % nasyceném stavu po 28 dnech zrání

Tabulka 27: Pevnost v tlaku všech variant zatvrdlých cementových past ve 100 % nasyceném stavu po 28 dnech zrání

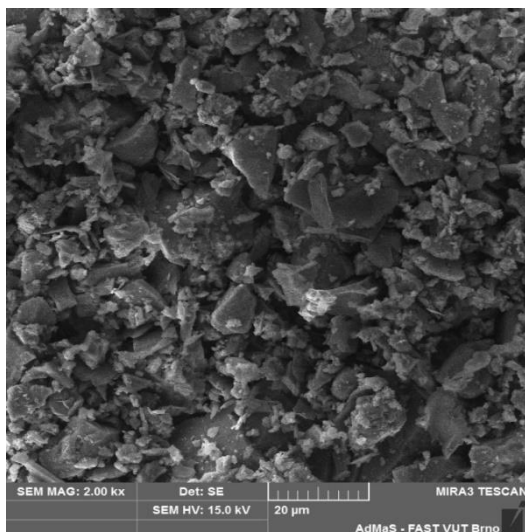
| Receptura | REF-ZCP | Varianta              |       |       |       |       |       |
|-----------|---------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|           |         | 4                     | 7     | 10    | 13    | 16    | 19    |
|           |         | Pevnost v tlaku [MPa] |       |       |       |       |       |
| CC4-ZCP   | 68,5    | 50,74                 | 42,94 | 40,06 | 37,54 | 28,75 | 23,46 |
| MF10-ZCP  |         | 50,97                 | 49,00 | 39,17 | 31,40 | 29,00 | 20,47 |
| SC63-ZCP  |         | 50,37                 | 48,40 | 45,57 | 38,60 | 33,83 | 28,67 |
| OV-ZCP    |         | 59,00                 | 57,23 | 46,30 | 44,10 | 37,87 | 33,03 |
| SC30-ZCP  |         | 54,43                 | 41,83 | 39,53 | 36,30 | 30,23 | 28,43 |
| SUC70-ZCP |         | 65,03                 | 60,27 | 55,87 | 54,00 | 52,63 | 47,83 |

Pevnost v tlaku zatvrdlé cementové pasty klesá spolu s přibývajícím množstvím plniv. Lze usuzovat, že největší vliv na pokles pevnosti v tlaku zatvrdlých cementových past má opět velikost částic. U receptur s mikroplnivý klesá pevnost v tlaku nejvíce, zatímco u jemných plniv nejméně. Velmi jemná plniva se svými hodnotami nacházejí někde mezi jemnými plnivý a mikroplnivý, to odpovídá předpokladům a potvrzuje vliv velikosti částic. Výjimkou je receptura s plnivem Supragraphite C 300, která má vliv na pokles pevnosti v tlaku srovnatelný spíše s velmi jemnými plnivý až mikroplnivý. Příčina nebyla zjištěna.

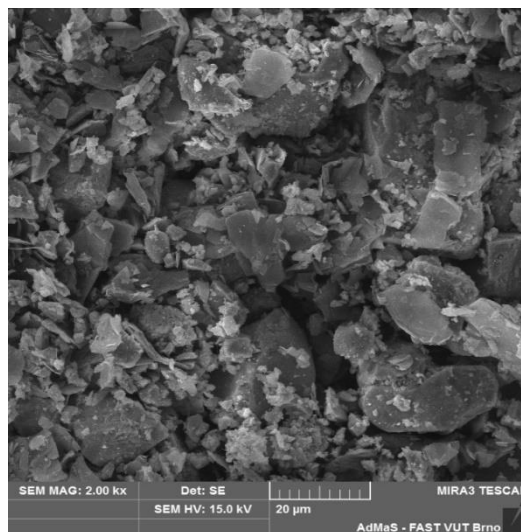
## 6.7. Diskuse ke studiu struktury

Pro studium struktury byly vybrány dvě varianty receptury s mikroplnivem Micrographite F 10. Varianty byly vybrány dvě. Varianta s náhradou 4 hm. % plniva leží jak pro suchou směs, tak pro zatvrdlý kompozit v oblasti před perkolačním prahem. Snímky této receptury jsou vždy v levém sloupečku snímků. Varianta s náhradou 13 hm. % plniva leží naopak v intervalu perkolačního prahu nebo v intervalu za perkolačním prahem. Snímky této receptury jsou vždy v pravém sloupečku snímků. Toto rozdělení by mělo zajistit, že snímky získané optickými a pokročilými metodami umožní rozpoznat hlavní faktory, které ovlivňují rezistivitu silikátového kompozitu. K vidění jsou snímky ze SEM v různých zvětšeních, a to jak pro suché směsi, tak pro zatvrdlý kompozit. Rovněž jsou uvedeny snímky z EDX analýzy uhlíku, která slouží ke kvantifikaci a vizualizace veškerého uhlíku v pozorované výseči. Uhlík obsažený v matici je obsažen v zanedbatelném množství a na snímcích ho můžeme pozorovat v podobě šumu, drobných signálů, které jsou zachyceny v celé ploše snímku v podobě mírně červených pixelů. U EDX jsou však důležité jasné signály, tedy rudé shluky a propojené oblasti. Pro doplnění jsou uvedeny snímky z digitálního mikroskopu. Makrostrukturu, dutiny, póry a mikrotrhliny je možno studovat na různých pohledech a 3D modelu získaném pomocí mikro-CT.

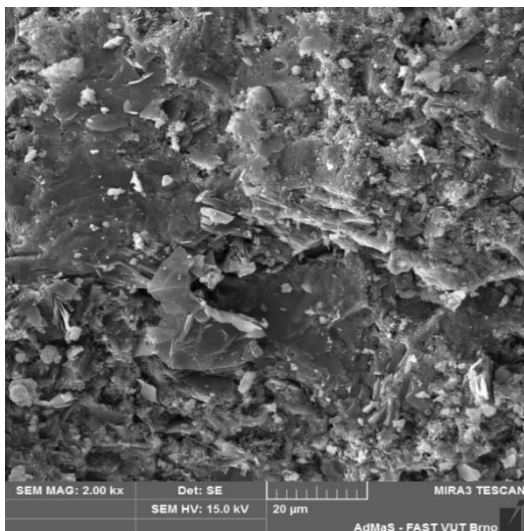
### Snímky ze SEM



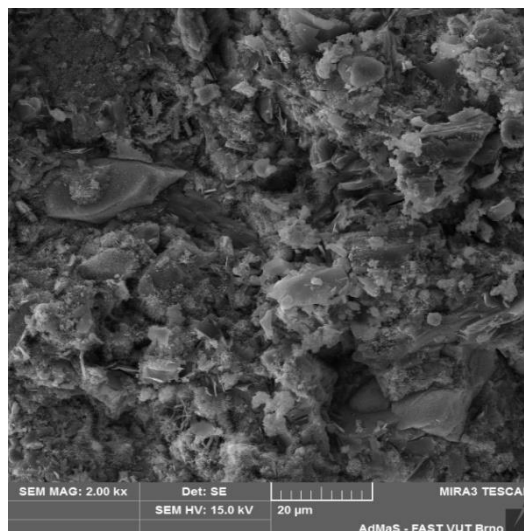
Obrázek 42: Snímek ze SEM zv. 2000× vzorku MF10-SCP-4 (foto autora)



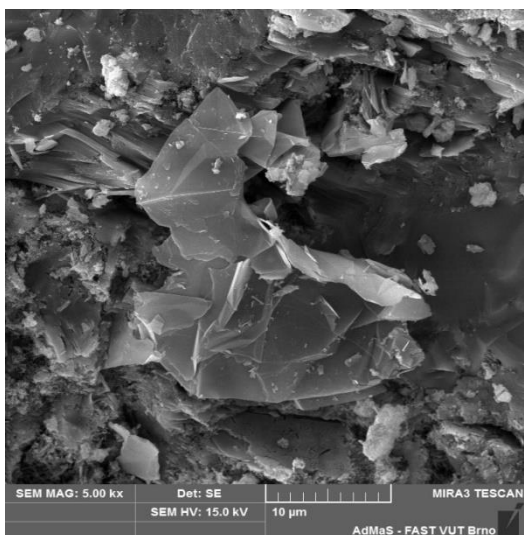
Obrázek 41: Snímek ze SEM zv. 2000× vzorku MF10-SCP-13 (foto autora)



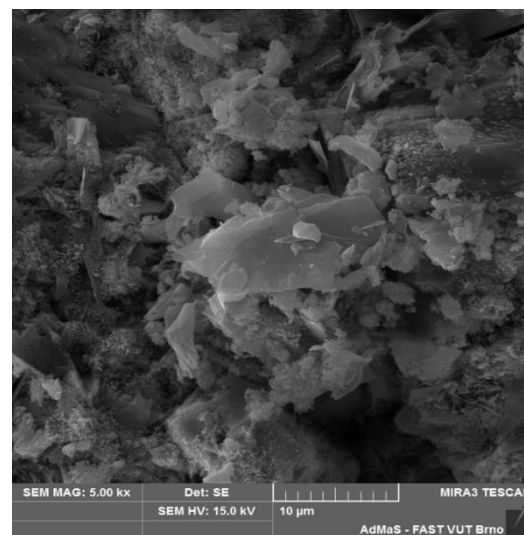
Obrázek 44: Snímek ze SEM zv. 2000× vzorku MF10-ZCP-4 (foto autora)



Obrázek 43: Snímek ze SEM zv. 2000× vzorku MF10-ZCP-13 (foto autora)



Obrázek 46: Snímek ze SEM zv. 5000× vzorku MF10-ZCP-4 (foto autora)



Obrázek 45: Snímek ze SEM zv. 5000× vzorku MF10-ZCP-13 (foto autora)

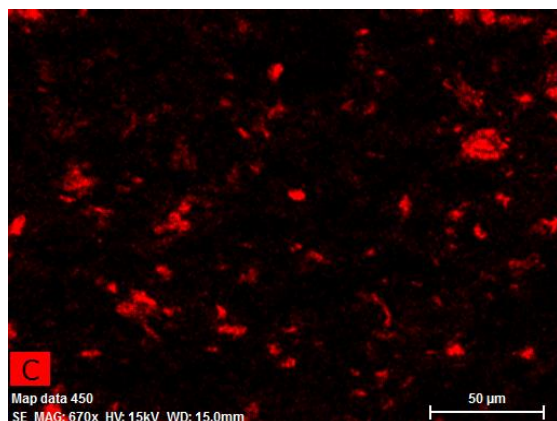
Ověření, zda opravdu hydratační produkty mohou způsobit zvýšení rezistivity vzorku, bylo provedeno hned několika metodami. Na SEM snímcích vzorků MF10-ZCP-4 a MF10-ZCP-13 se zvětšením 2000×, které jsou snímky zatvrdlé cementové pasty, si lze povšimnout masy matrice tvořené převážně portlanditem a “vatových polštářků“, které jsou pravděpodobně C-S-H gely.

Ze SEM snímků vzorků MF10-SCP-4 a vzorku MF10-SCP-13 se zvětšením 2000×, které jsou snímky suché cementové pasty, která neprošla hydratačním procesem, je zcela zřejmé, že se zde hydratační produkty nevyskytují. Na

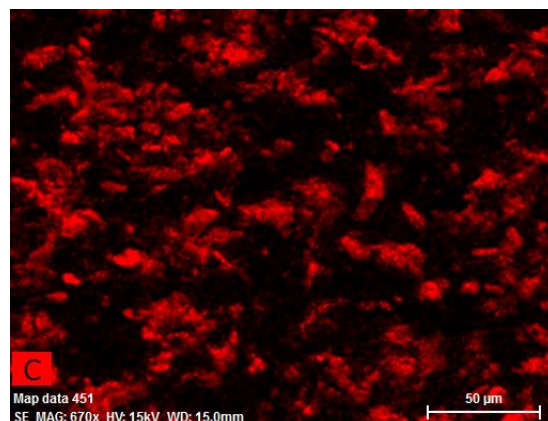
snímcích jsou poměrně dobře vidět zrna cementu a částice grafitu. Z těchto snímků lze také rozpoznat, že ve vzorku MF10-SCP-13 i MF10-ZCP-13 je významně větší množství částic grafitu, které se občasné dotýkají pozorované rovině lomu, než ve vzorcích MF10-SCP-4 a MF10-ZCP-13.

Detailnější pohled na částici grafitu, a to, jak je vetknuta do cementové matrice, si lze prohlédnout na SEM snímcích vzorků MF10-ZCP-4 a MF10-ZCP-13 se zvětšením 5000×.

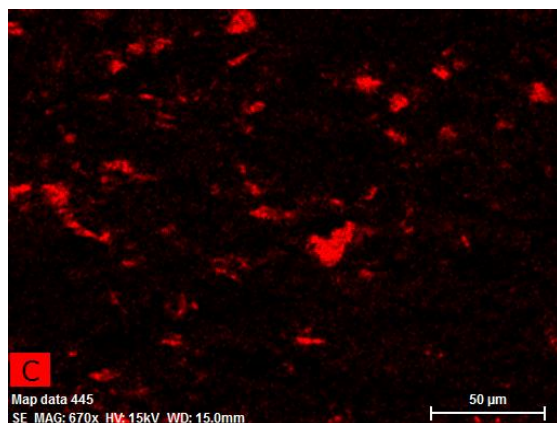
### Snímky EDX



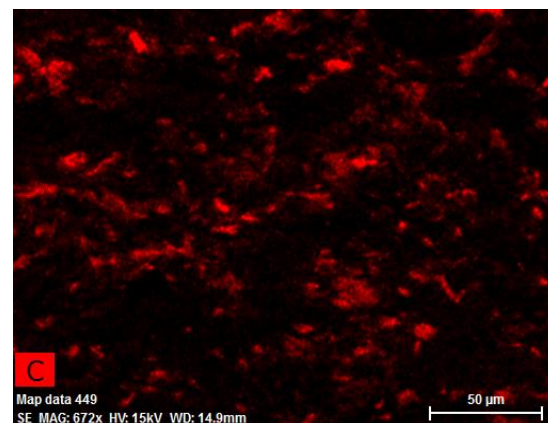
Obrázek 47: Snímek z EDX  
vzorek MF10-SCP-4 (foto autora)



Obrázek 48: Snímek z EDX  
vzorek MF10-SCP-13 (foto autora)



Obrázek 50: Snímek z EDX  
vzorku MF10-ZCP-4 (foto autora)



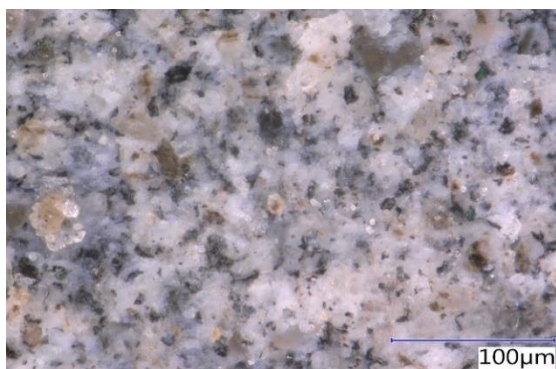
Obrázek 49: Snímek z EDX  
vzorku MF10-ZCP-13 (foto autora)

Snímky pořízené metodou EDX jasně dokazují, že vzorek MF10-SCP-4 obsahuje výrazně méně částic grafitu než vzorek MF10-SCP-13. Zatímco na snímku MF10-SCP-4 jsou pouze jasně červené body a drobné shluky, které představují uhlík detekovaný metodou EDX, volně roztroušeny po pozorované

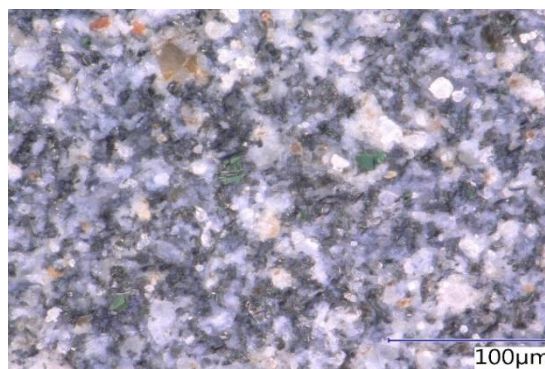
rovině lomu. Ve snímku vzorku MF10-SCP-13 jsou detekovány jasně červené až rudé velké shluky a nepřerušené spojitě dráhy. Na základě těchto snímků je možno si dobře představit charakter cementové matrice před překročením prahu perkolace a po překročení prahu perkolace. U vzorku MF10-SCP-4 v případě, že jím bude procházet elektrický proud, lze předpokládat pouze slabé skokové vedení, kdy volné elektrony mohou zřídka přeskakovat mezerami cementové matrice v místě, kde částice uhlíku mohou být dostatečně blízko. V případě, že elektrický proud bude procházet vzorkem MF10-SCP-13, lze předpokládat, že bude docházet ke kontaktnímu vedení prostřednictvím spojitých drah dotýkajících se částic grafitu napříč vzorkem.

Patrný rozdíl, mezi EDX snímky suchých cementových past, tedy snímky vzorků MF10-SCP-4 a MF10-SCP-13 a EDX snímky zatvrdlých cementových past, tedy vzorků MF10-ZCP-4 a MF10-ZCP-13, je dalším z důkazů, že proces hydratace a vznik hydratačních produktů je faktorem, který strukturu cementové pasty změní natolik, že se zvýší její rezistivita. Lze si totiž všimnout toho rozdílu, že na snímcích zatvrdlých past je menší množství jasně červených bodů, shluků a spojitých drah. Je patrné, že hydratační produkty obalují a izolují částice grafitu. Rezistivita materiálu se strukturou vyplněnou hydratačními produkty, a tedy nižším množstvím dotýkajících se částic elektricky vodivého plniva, tedy opravdu musí být zákonitě vyšší.

### **Snímky z digitálního mikroskopu**



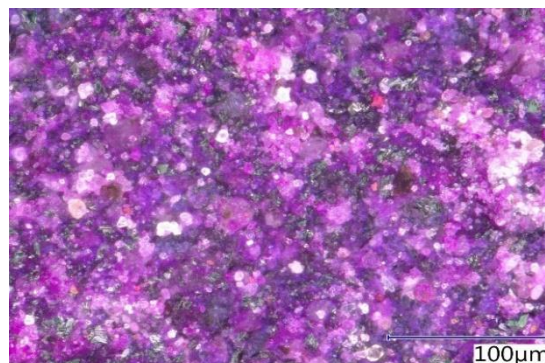
Obrázek 52: Snímek z digitálního mikroskopu vzorku MF10-ZCP-4 (foto autora)



Obrázek 51: Snímek z digitálního mikroskopu vzorku MF10-ZCP-13 (foto autora)



Obrázek 53: Snímek z digitálního mikroskopu vzorku MF10-ZCP-4, indikace fenolftaleinem (foto autora)



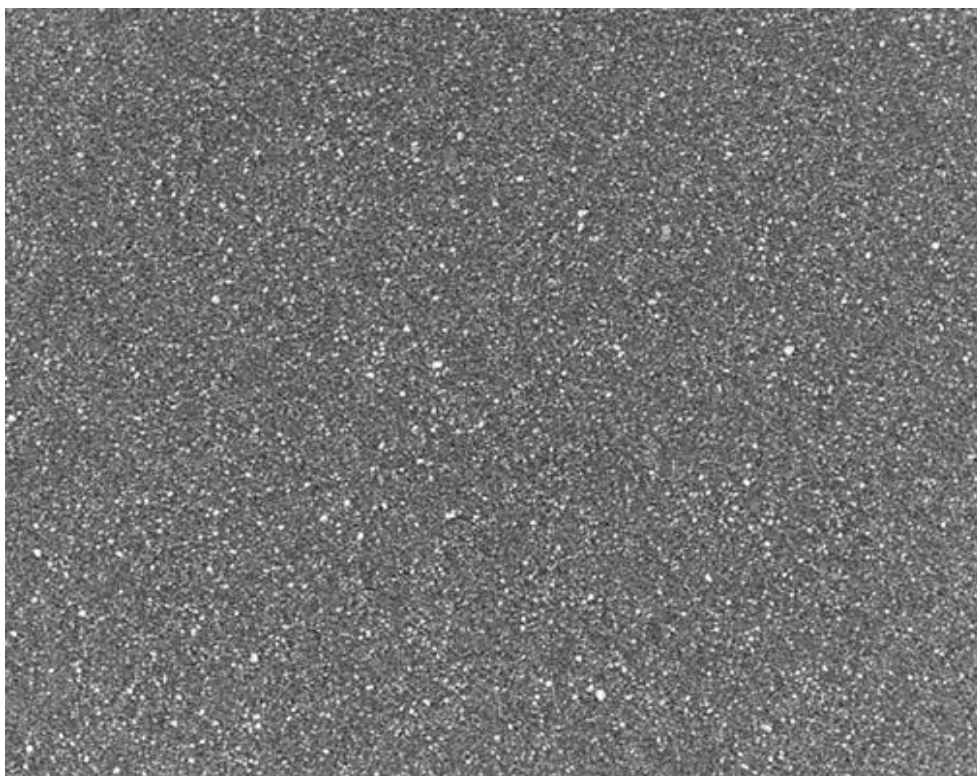
Obrázek 54: Snímek z digitálního mikroskopu vzorku MF10-ZCP-13, indikace fenolftaleinem (foto autora)

Snímky z digitálního mikroskopu mají spíše orientační a doplňující charakter. Lze z nich opět rozpoznat rozdíl v množství částic grafitu mezi vzorky MF10-ZCP-4 a MF10-ZCP-13. Napuštění cementové matrice fenolftaleinem, který se zásaditým prostředím reaguje změnou zbarvení na typický růžovo fialový odstín, zvýší možnost rozpoznat rozdíl v množství částic grafitu.

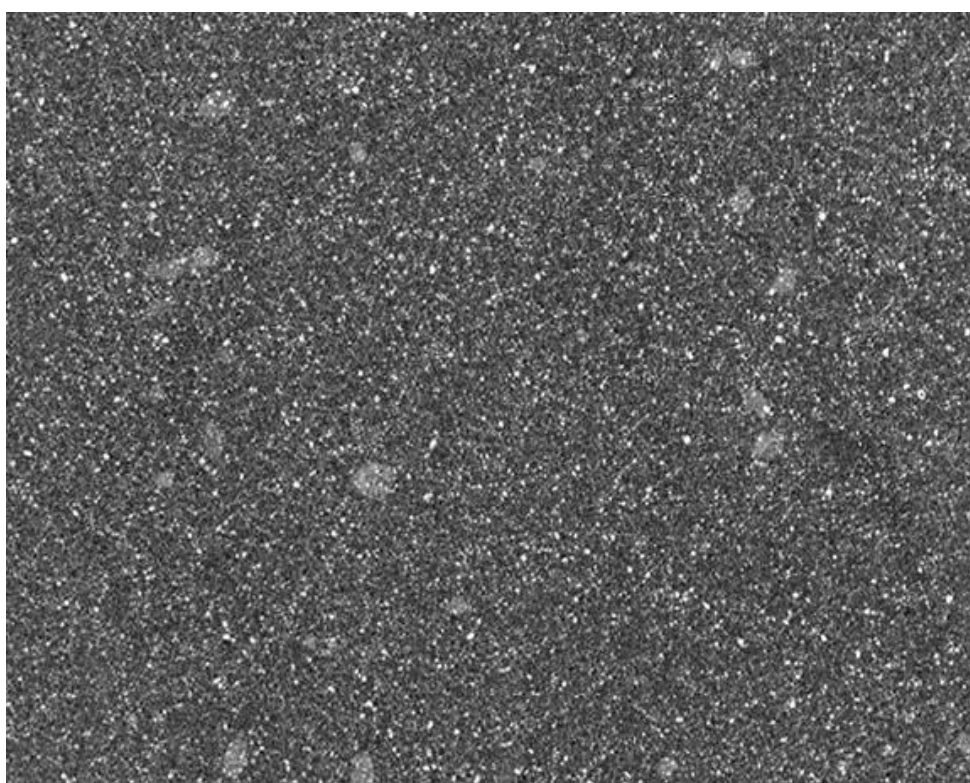
### **Snímky z Mikro-CT**

Snímky získané metodou výpočetní mikrotomografie potvrzují všechny již zmíněné vztahy a doplňují poznání o makrostruktuře. Na snímcích suchých cementových past z Mikro-CT je možno si opět všimnout, že vzorek MF10-SCP-4 obsahuje viditelně nižší množství částic grafitu než vzorek MF10-SCP-13. Částice grafitu jsou na snímcích bílé či světle šedé tečky. Taky nám tato metoda prozradila, že ve vzorku MF10-SCP-13 byly nečetně roztroušeny hrudky cementu o průměru 0,3 – 1,0 mm. Je možno se domnívat, že jejich množství a velikost však není taková, aby narušily provedené experimenty.

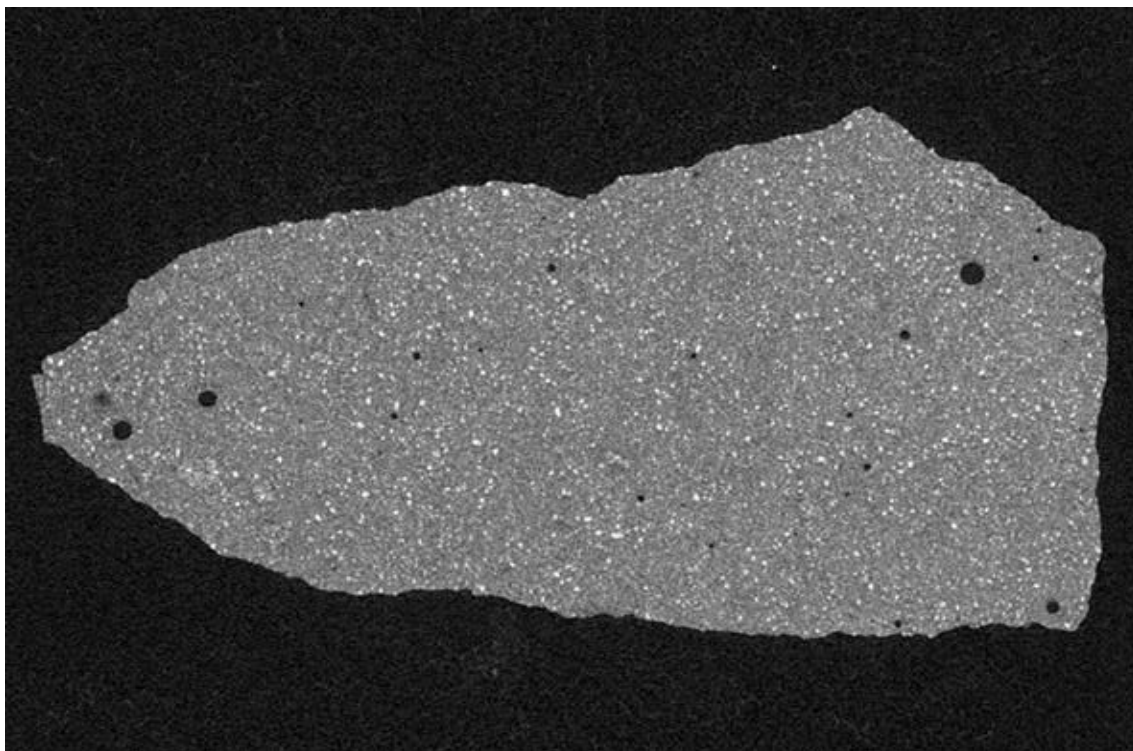
Snímky zatvrdlých cementových past z Mikro-CT vzorku MF10-ZCP-4 a MF10-ZCP-13 odhalují přítomnost nečetných drobných kulovitých makropórů velikosti cca 0,1 – 0,8 mm. Množství, rozložení a velikost pórové struktury není taková, aby narušila výsledky provedených experimentů.



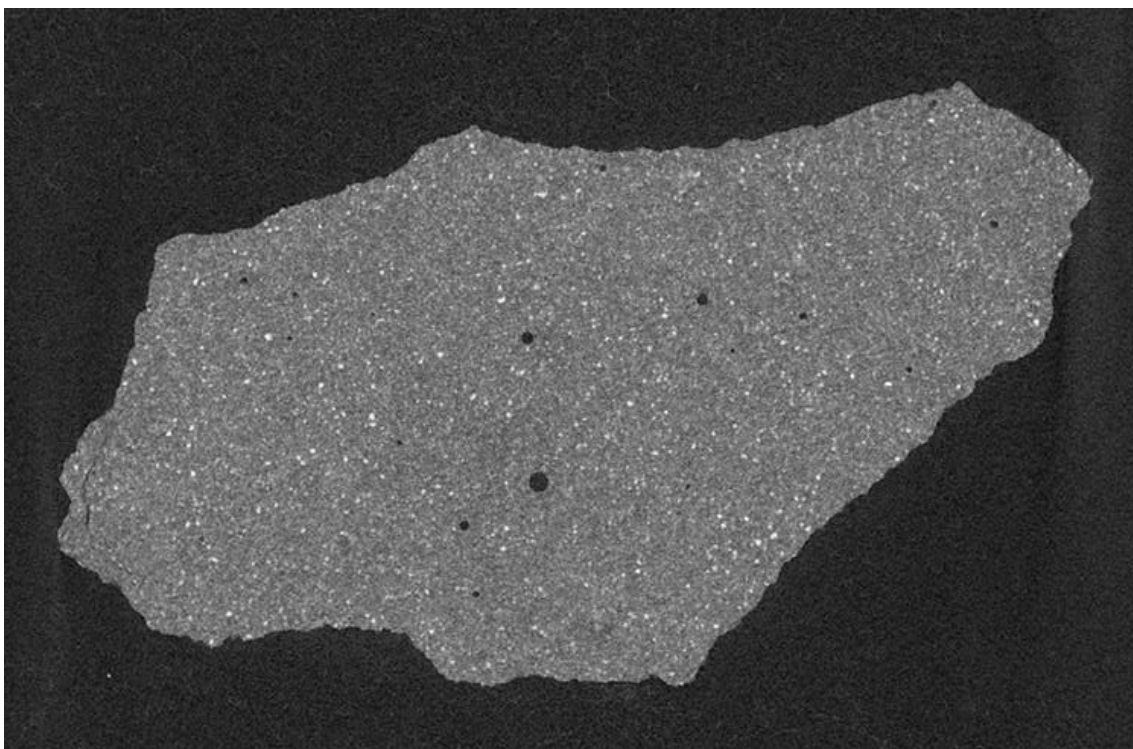
Obrázek 55: Snímek z Mikro-CT vzorku MF10-SCP-4 (foto autora)



Obrázek 56: Snímek z Mikro-CT vzorku MF10-SCP-13 (foto autora)



Obrázek 57: Snímek z Mikro-CT vzorku MF10-ZCP-4 (foto autora)



Obrázek 58: Snímek z Mikro-CT vzorku MF10-ZCP-13 (foto autora)

## 6.8. Vyhodnocení III. etapy

Objemové hmotnosti zatvrdlé cementové pasty po dnech zrání v nasyceném i vysušeném stavu klesají nejvíce u mikroplniva a velmi jemných plniv. Jemná plniva mají jen mírný vliv na snížení objemové hmotnosti zatvrdlého kompozitu.

Receptury s jemnými plnivy, zejména Supragraphite U C 700, které mají většinu částic větších než zrna cementu, mají nejvýraznější vliv a způsobují nárůst pevnosti v tahu ohybem zatvrdlých cementových past po dnech zrání. Mikroplniva s částicemi menšími než zrna cementu pevnost v tahu ohybem zvyšují minimálně. Receptura s Condufit C 4 dokonce v nižších dávkách pevnost ohybem mírně snižuje a k nárůstu dochází až při vyšších dávkách.

Pevnost v tlaku zatvrdlé cementové pasty klesá spolu s přibývajícím množstvím plniv. Lze usuzovat, že největší vliv na pokles pevnosti v tlaku zatvrdlých cementových past má opět velikost částic. U receptur s mikroplnivou klesá pevnost v tlaku nejvíce, zatímco u jemných plniv nejméně. Velmi jemná plniva se svými hodnotami nacházejí někde mezi jemnými plnivy a mikroplnivou, a to odpovídá předpokladům a potvrzuje vliv velikosti částic.

Rezistivita zatvrdlých cementových past klesá s přibývajícím množstvím elektrovodivých plniv. Pokles rezistivity je však rozdílný, u mikroplniv je pokles výrazný již při nižších zastoupeních elektrovodivých plniv v zatvrdlých cementových pastách, zatímco u velmi jemných a jemných plniv dochází ke snižování rezistivity až při vyšších zastoupeních elektrovodivých plniv v zatvrdlé cementové pastě.

Perkolační práh jakéhokoliv z elektrovodivých plniv je vždy přibližně stanoven do nižšího intervalu v suché cementové pastě než v zatvrdlé cementové pastě. Rovněž je zřejmé, že pro zatvrdlou cementovou pastu platí stejný princip jako pro suchou cementovou pastu. Čím menší je velikost částic elektrovodivého plniva, tím je třeba menšího zastoupení tohoto elektrovodivého plniva k dosažení perkolačního prahu.

S přihlédnutím k podmínkám měření, kdy rezistivita suchých cementových past tak zatvrdlých cementových past byla měřena ve zcela vysušeném stavu, a že porovnávané receptury pro dané plnivo měly shodné složení, lze konstatovat, že jedinou proměnnou, která mohla způsobit tuto rozdílnost, toto posunutí předpokládaných perkolačních prahů do vyšších intervalů u zatvrdlých past oproti suchým směsím, je proces hydratace, vznik a přítomnost hydratačních produktů. Tento předpoklad byl ověřen a potvrzen v rámci studia struktury.

Studium struktury ze snímků získaných pokročilými metodami potvrdilo domněnku, že hydratace a vznik hydratačních produktů může být a pravděpodobně je faktorem, který ovlivňuje rezistivitu cementové pasty.

Je předpokládáno že přítomnost hydratačních produktů ve struktuře materiálu je klíčovou proměnnou, která způsobuje rozdílné rezistivity u vzorků cementových past, které se od sebe liší pouze tím, že jeden ze vzorků je plně zatvrdlá, hydratovaná cementová matrice, zatímco druhý je pouze suchá směs cementu s plnivem. U všech variant všech receptur platí, že rezistivita zatvrdlého vzorku je vyšší než rezistivita vzorku suché směsi.

Z důkladného studia matrice zatvrdlých cementových past po 28 dnech zrání bylo vyvozeno, že zcela zásadní je jednak přítomnost, ale hlavně objem, který zaujímají hydratační produkty v objemu zatvrdlé cementové pasty. Pozorovány byly zejména portlandit a C-S-H gely. Můžeme konstatovat, že čím vyšší je stupeň hydratace a čím větší část objemu vzorku je vyplněna portlanditem a C-S-H gely, tím vyšší je rezistivita vzorku. Majoritní vliv má nejpravděpodobněji portlandit, který svým charakterem kompaktní spojitě jemně krystalické látky vytváří bariéry, které brání vzniku sítě spojitých elektricky vodivých drah tvořených přidávaným plnivem.

Byla vyvinuta snaha nalézt koeficient, podle kterého by bylo jednoduše možno určit jakou rezistivitu bude mít zatvrdlá cementová pasta na základě rezistivity suché cementové pasty.

V modelovém případě by byla namíchána suchá cementová pasta určitého složení, pro kterou by byla určena rezistivita suché směsi. Tato hodnota rezistivity suché směsi by byla vynásobena tímto koeficientem a výsledkem by byla vypočítaná hodnota rezistivity shodná se skutečnou rezistivitou, experimentálně připravené zatvrdlé cementové pasty stejného složení.

Do experimentálních rovnic, které byly provedeny za účelem nalézt koeficient k výpočtu rezistivity zatvrdlé cementové pasty z rezistivity suché pasty, byly zahrnuty hlavní parametry plniv, velikost částic a rezistivita samotných plniv a také experimentálně zjištěné hodnoty rezistivity suchých a zatvrdlých cementových past.

Pro určení takového koeficientu bylo nejspíše provedeno málo měření a také bylo shledáno, že celá problematika určení takového koeficientu je mnohem komplexnějšího charakteru, než je rozsah diplomové práce.

## 6.9. Závěr III. etapy

- Nejdůležitějšími parametry elektrovodivých plniv, které mají největší vliv na rezistivitu zatvrdlé cementové pasty po 28 dnech zrání, jsou velikost částic a vlastní rezistivita.
- Objemové hmotnosti zatvrdlých cementových past po 28 dnech zrání klesají s přibývajícím zastoupením elektrovodivých plniv. Při stejném zastoupení elektrovodivého plniva je objemová hmotnost nižší s plnivem s menší velikostí částic.
- Pevnosti v tahu ohybem zatvrdlých cementových past po 28 dnech zrání rostou s přibývajícím zastoupením elektrovodivých plniv. Při stejném zastoupení elektrovodivého plniva je pevnost v tahu ohybem vyšší s plnivem s větší velikostí částic.
- Pevnosti v tlaku zatvrdlých cementových past po 28 dnech zrání klesají s přibývajícím zastoupením elektrovodivých plniv. Při stejném zastoupení elektrovodivého plniva je pevnost v tlaku nižší s plnivem s menší velikostí částic.
- Rezistivita zatvrdlých cementových past po 28 dnech zrání klesá s klesající velikostí částic. Při stejném zastoupení elektrovodivého plniva je rezistivita nižší s plnivem s menší velikostí částic a nižší rezistivitou.
- Nejdůležitější vlastností matrice zatvrdlých cementových past po 28 dnech zrání je objem, který zaujímají hydratační produkty, zejména portlandit a C-S-H gely. Čím větší část objemu vzorku je vyplněna portlanditem a C-S-H gely, tím vyšší je rezistivita vzorku.
- Důsledkem přítomnosti portlanditu a C-S-H gelů v zatvrdlé cementové pastě je k dosažení perkolačního prahu v zatvrdlé cementové pastě zapotřebí vyššího zastoupení elektrovodivého plniva než k dosažení perkolačního prahu v suché cementové pastě, kde nejsou žádné hydratační produkty.
- Čím menší je velikost částic elektrovodivého plniva, tím je třeba menšího zastoupení tohoto elektrovodivého plniva k dosažení perkolačního prahu v zatvrdlé cementové pastě po 28 dnech zrání.

## 7. Etapa IV – Zjištění hlavních parametrů zatvrdlých malt po 28 dnech zrání

### 7.1. Vybrané receptury a varianty pro přípravu malt

Za účelem studia vlivu různých plniv na strukturu a parametry zatvrdlé malty a porovnání vybraných parametrů s parametry zatvrdlých past a rovněž s parametry suchých malt byla ve čtvrté etapě použita stejná dvě plniva jako v etapě druhé v suchých maltách – Micrographite F10 a Supragraphite C 300.

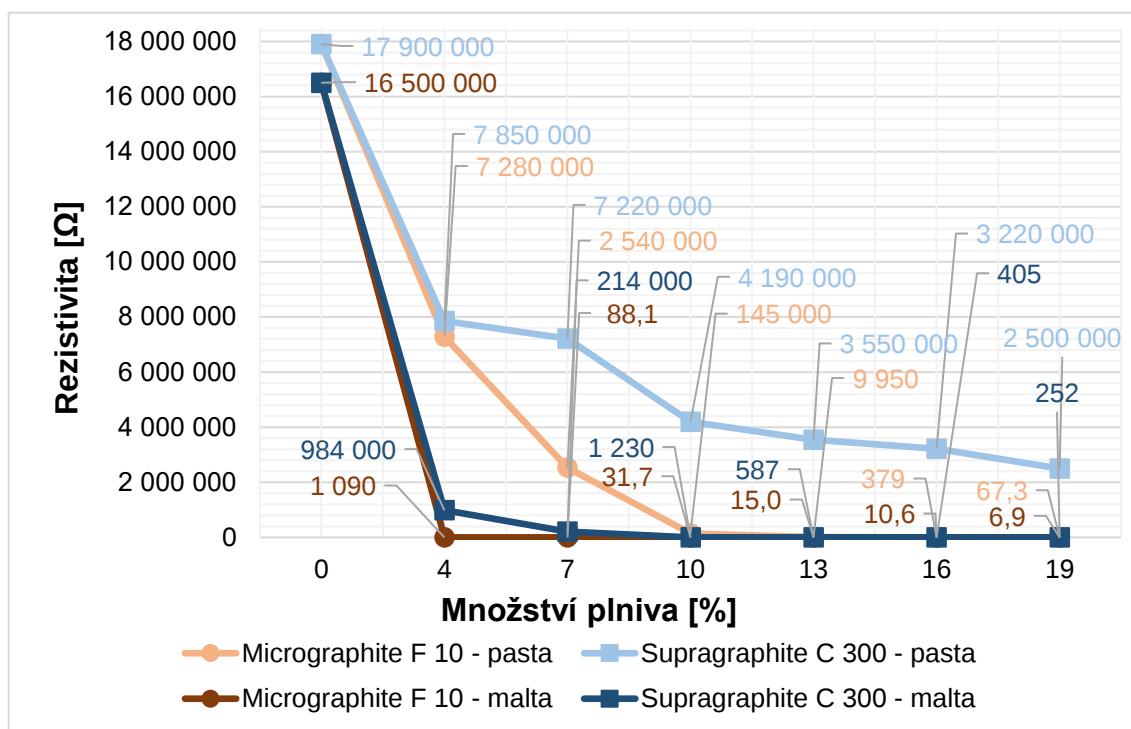
### 7.2. Receptury pro přípravu zkušebních těles zatvrdlých malt

Pro zjištění hlavních parametrů zatvrdlých malt byla připravena zkušební tělesa rozměru 40 × 40 × 160 mm podle receptur jednotlivých variant popsanych v tabulce. Stejně jako u cementových past bylo od každé z variant vyrobeno devět zkušebních těles. Šest těles s vnitřními elektrodami a tři tělesa bez elektrod. Složení jednotlivých variant se shoduje se složeními variant suchých malt. Jediný rozdíl je voda, která byla dávkována takovým způsobem, aby bylo dosaženo konzistence, při které lze směs dobře plnit do forem. Písmena a čísla před první pomlčkou označují recepturu. Písmena ZM mezi pomlčkami říkají, že se jedná o zatvrdlou maltu a číslo za druhou pomlčkou označuje náhradu v hm. %.

Tabulka 28: Označení a složení receptur a jejich variant zatvrdlých malt

| Receptura          |                          |                     |                          | Množství plniva [hm. %] | Množství CEM I 42,5 R [hm. %] | Množství CEM I 42,5 R [hm. %] |
|--------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Micrographite F 10 | Vodní součinitel c/w [-] | Supragraphite C 300 | Vodní součinitel c/w [-] |                         |                               |                               |
| Varianta           |                          |                     |                          |                         |                               |                               |
| MF10-ZM-4          | 0,64                     | SC30-ZM-4           | 0,65                     | 4                       | 71                            | 25                            |
| MF10-ZM-7          | 0,78                     | SC30-ZM-7           | 0,80                     | 7                       | 68                            | 25                            |
| MF10-ZM-10         | 0,96                     | SC30-ZM-10          | 0,87                     | 10                      | 65                            | 25                            |
| MF10-ZM-13         | 1,15                     | SC30-ZM-13          | 0,96                     | 13                      | 62                            | 25                            |
| MF10-ZM-16         | 1,38                     | SC30-ZM-16          | 1,11                     | 16                      | 59                            | 25                            |
| MF10-ZM-19         | 1,86                     | SC30-ZM-19          | 1,26                     | 19                      | 56                            | 25                            |

### 7.3. Rezistivita zatvrdlých malt

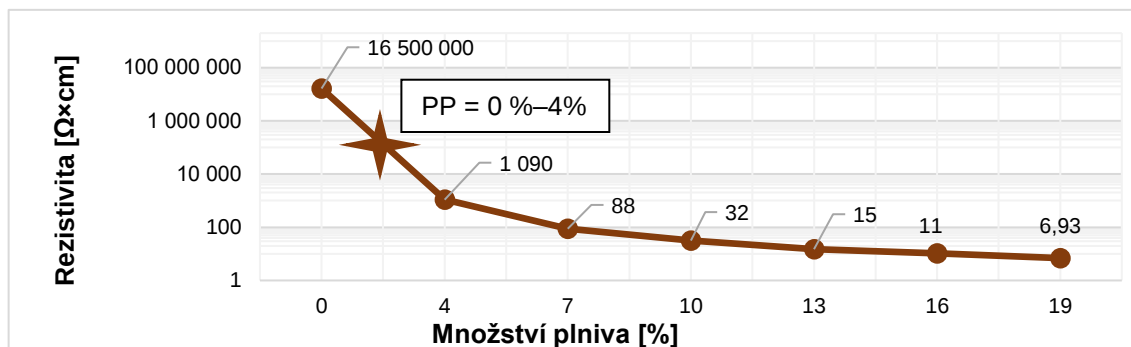


Graf 42: Pevnost v tlaku všech variant zatvrdlých cementových past ve 100% nasyceném stavu po 28 dnech zrání

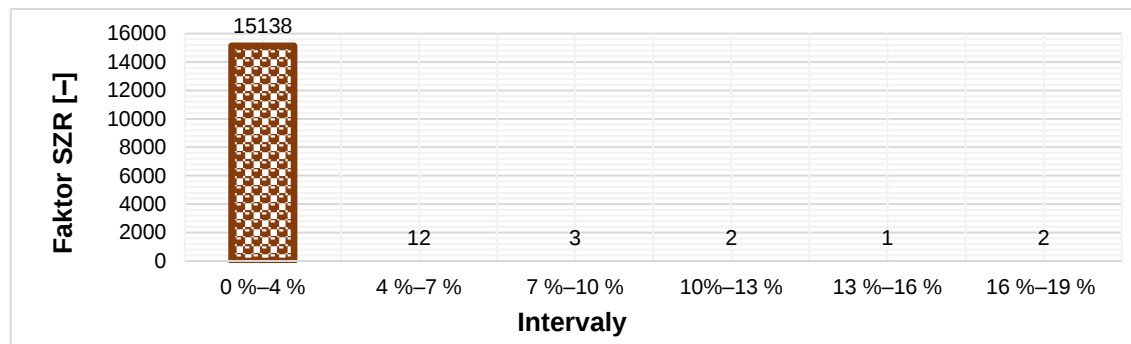
Rezistivita zatvrdlých malt je mnohem nižší než rezistivita zatvrdlých cementových past, a to velmi rapidně již při náhradě 4 hm. %. To může být považováno za další důkaz, že hydratace, potažmo množství hydratačních produktů, je oním faktorem, který nejvýznamněji ovlivňuje rezistivitu nejen zatvrdlé cementové pasty, ale i zatvrdlé malty. Malty, které obsahují 3×–4× menší množství cementu, budou po smíchání s vodou, zatvrdnutí a proběhnutí procesu hydratace cementu obsahovat méně hydratačních produktů než cementové pasty, které prošly identickým procesem. Tento rozdíl způsobuje rozdílnost rezistivit zatvrdlých cementových past a zatvrdlých malt. Rezistivita receptury s jemným plnivem Supragraphite C 300 vykazuje ve všech variantách náhrady hm. % písku plnivem vyšší hodnoty rezistivity než receptura s mikroplnivem Micrographite F10. Rozdíly v rezistivitě jsou natolik výrazné, že se nemůže jednat o chybu měření.

## 7.4. Stanovení prahu perkolace vybraných plniv ve vysušené zatvrdlé maltě

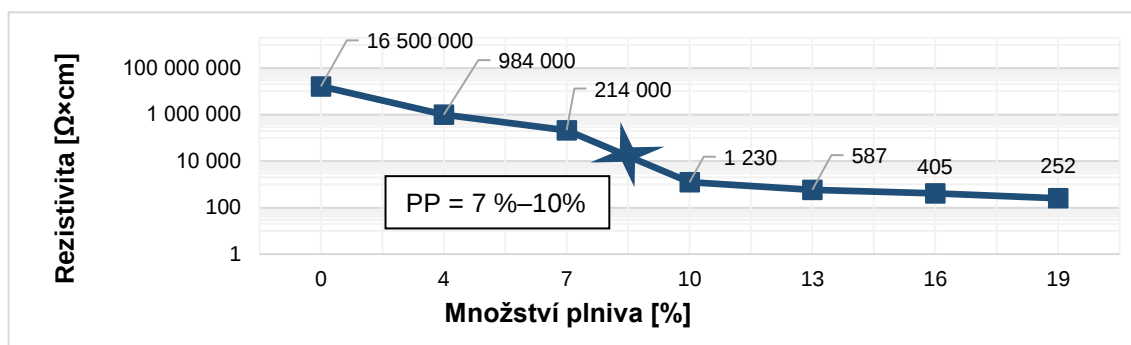
Přibližné stanovení prahu perkolace bylo v této práci provedeno zavedeným způsobem pomocí přibližné metody využívající faktor SZR. Přibližně stanovené perkolační prahy vybraných plniv jsou zpracovány v grafech.



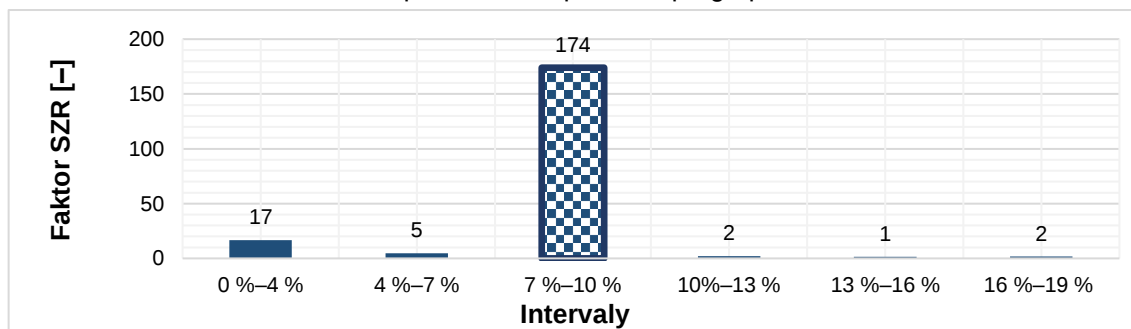
Graf 43: Přibližné stanovení perkolačního prahu pro Micrographite F 10 v zatvrdlé maltě



Graf 44: Faktor SZR pro Micrographite F10 v zatvrdlé maltě

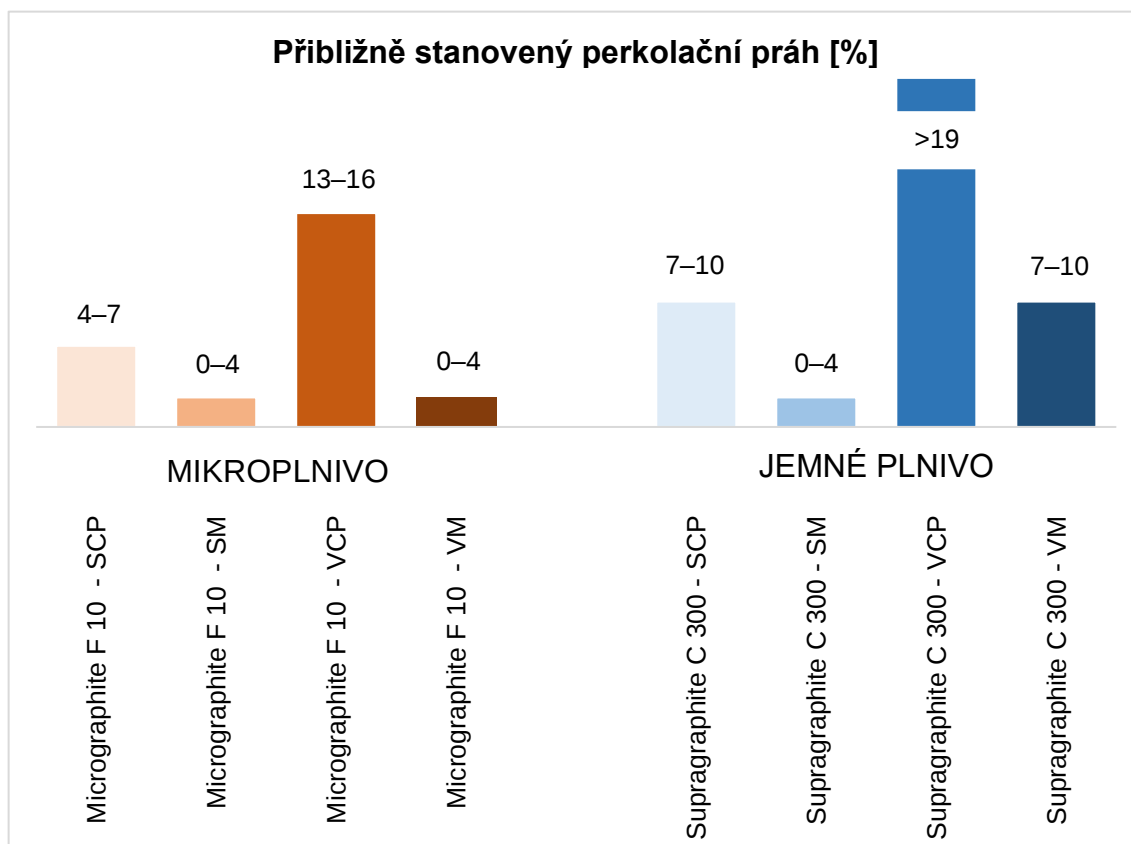


Graf 45: Přibližné stanovení perkolačního prahu Supragraphite C 300 v zatvrdlé maltě



Graf 46: Faktor SZR pro Supragraphite C 300 v zatvrdlé maltě

#### 7.4.1. Závěrečné srovnání perkolačních prahů vybraných plniv ve vysušených zatvrdlých kompozitech i suchých směsích



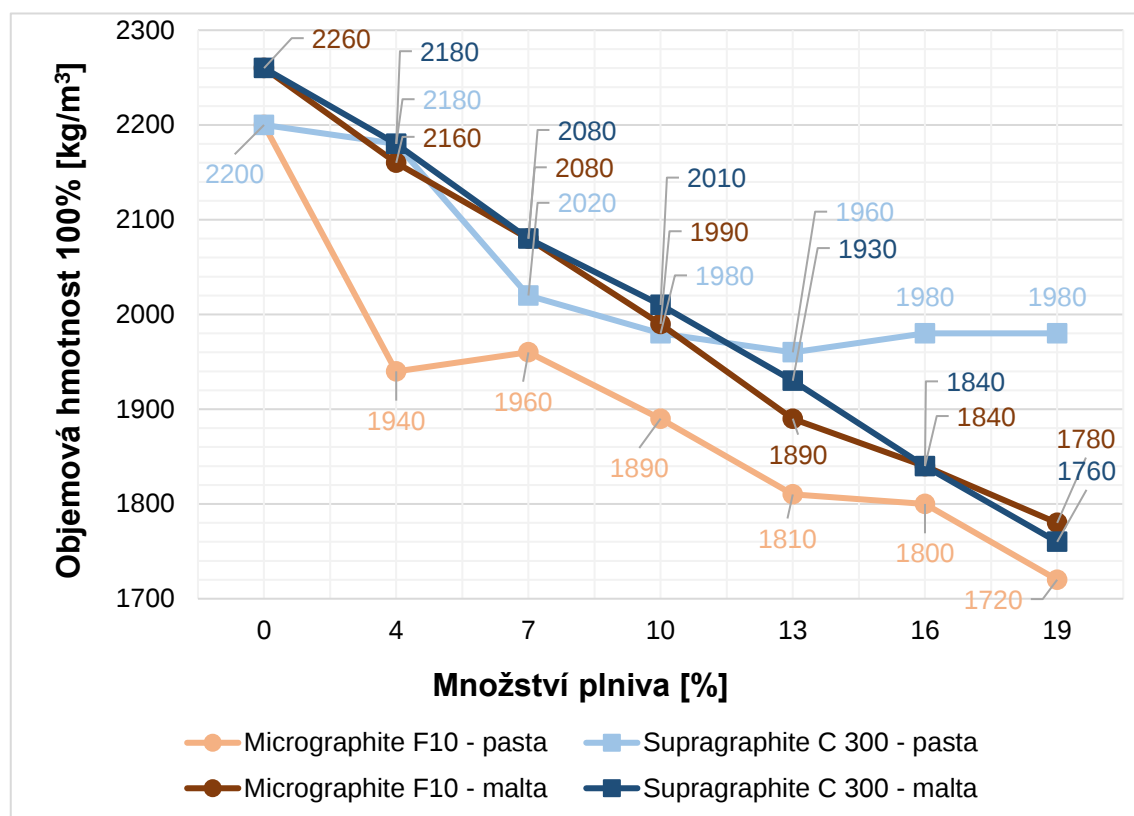
Graf 47: Srovnání perkolačních prahů v suchých směsích a zatvrdlých kompozitech pro mikroplnivo Micrographite F 10 a Supragraphite C 300

Mikroplnivo Micrographite F 10 dosahuje perkolačního prahu v nižším intervalu než jemné plnivo Supragraphite C 300 ve všech typech matrice. Perkolační prahy jsou dosaženy v nejnižším intervalu vždy pro malty, zejména pro suché malty. Ve vyšších intervalech je perkolačního prahu dosaženo v cementových pastách, zejména v zatvrdlých pastách.

#### 7.5. Stanovení hlavních parametrů zatvrdlých malt po 28 dnech

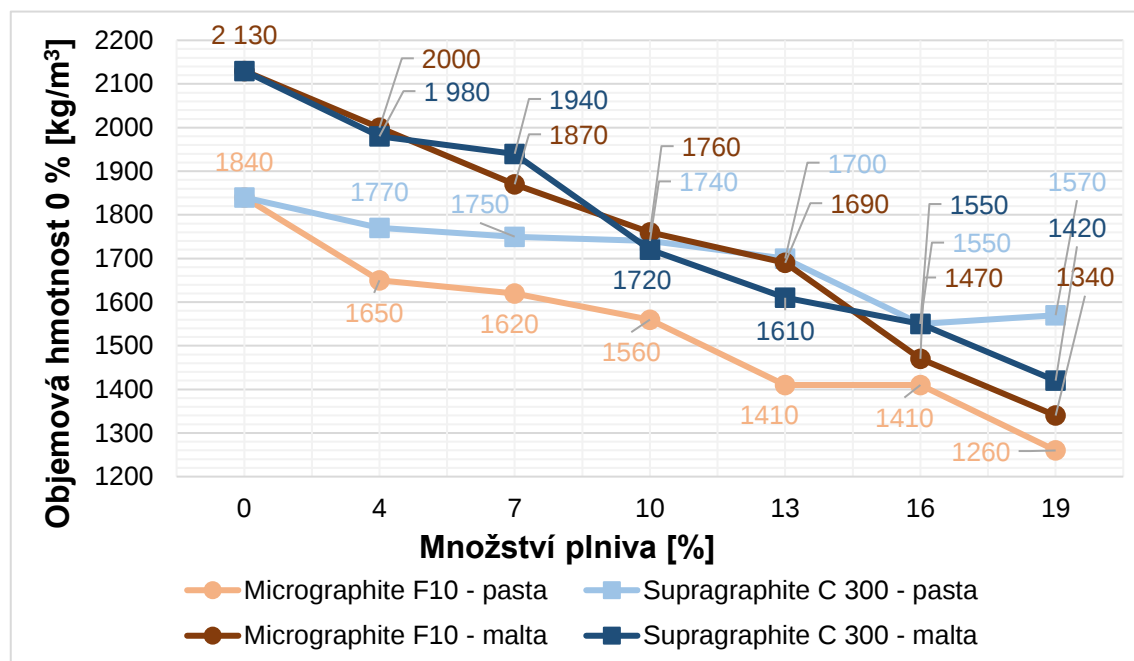
Postupy stanovení hlavních parametrů zatvrdlých cementových malt se sníženou rezistivitou po 28 dnech byly popsány v kapitole „Metody prováděných zkoušek a měření“. Parametry zatvrdlých malt jsou zpracovány v grafech společně s parametry zatvrdlých cementových past s použitím stejných plniv za účelem usnadnění rozpoznání rozdílů ve vlivu použitých plniv na hlavní parametry zatvrdlých malt v porovnání s vlivem na zatvrdlé cementové pasty.

### 7.5.1. Objemová hmotnost zatvrdlých malt ve 100% nasyceném stavu



Graf 48: Objemová hmotnost vybraných variant zatvrdlých malt a cementových past ve 100 % nasyceném stavu po 28 dnech zrání

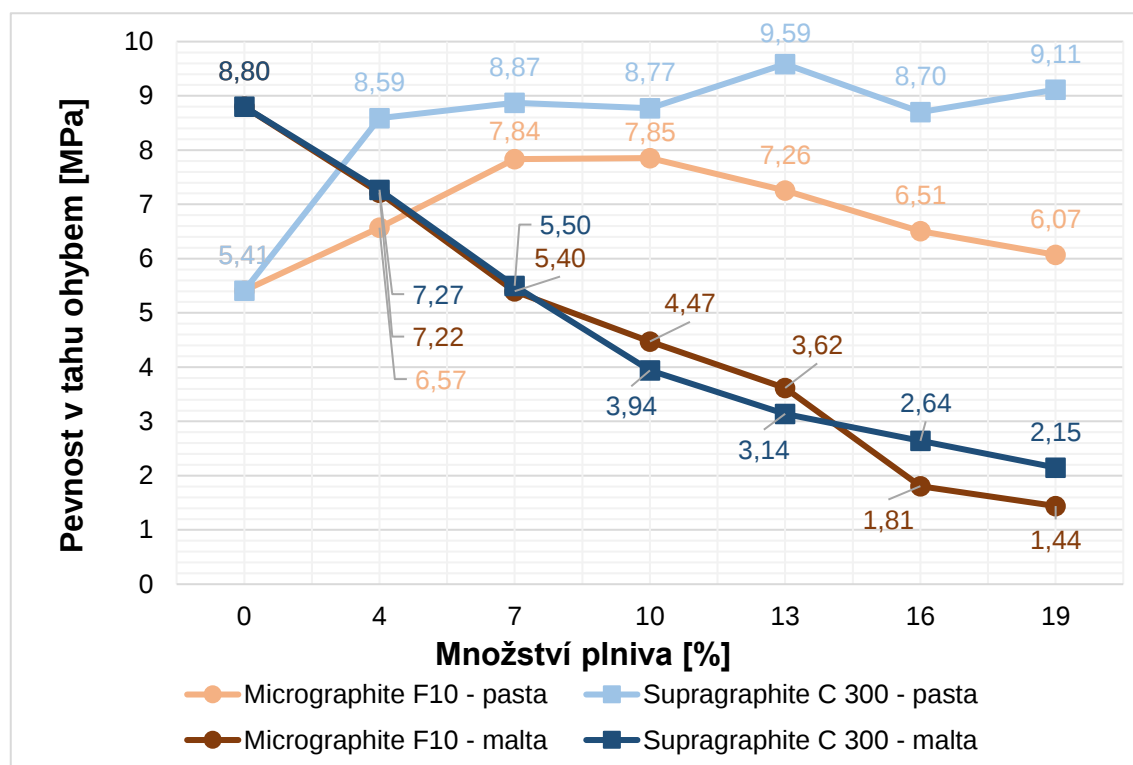
### 7.5.2. Objemová hmotnost vysušených zatvrdlých malt



Graf 49: Objemová hmotnost vybraných variant vysušených zatvrdlých malt a cementových past po 28 dnech zrání

Graf objemových hmotností zatvrdlých past a malt v nasyceném stavu ukazuje, že velikost částic použitého plniva nemá rozdílný vliv na objemovou hmotnost ve 100% nasyceném i vysušeném stavu zatvrdlé malty po 28 dnech zrání. Téměř lineárně klesá spolu s rostoucím množstvím plniva. Stejná použitá plniva s rozdílnou velikostí částic měla v zatvrdlé nasycené maltě rozdílný vliv, a to takový, že u receptury s mikroplnivem byl mnohem markantnější pokles objemové hmotnosti. V podstatě naprosto stejné trendy jsou zřetelné z grafu objemových hmotností zatvrdlých past a malt ve vysušeném stavu. Rozdílné změny objemových hmotností s rostoucím množstvím plniva zatvrdlých past a malt způsobuje právě použití normového písku 0–2 mm v recepturách malt. Použité množství 56–71 hm. % normového písku zcela mění strukturu kompozitu a znemožňuje schopnost rozlišit účinky rozdílných plniv na objemovou hmotnost. Vodní součinitel, vztažený ke všem suchým složkám, nikoliv k cementu, byl jak u variant past i malt s určitým plnivem v podstatě stejný, a to odpovídá společnému klesajícímu trendu pro všechny receptury. S rostoucím vodním součinitelem klesá objemová hmotnost jak v nasyceném, tak vysušeném stavu.

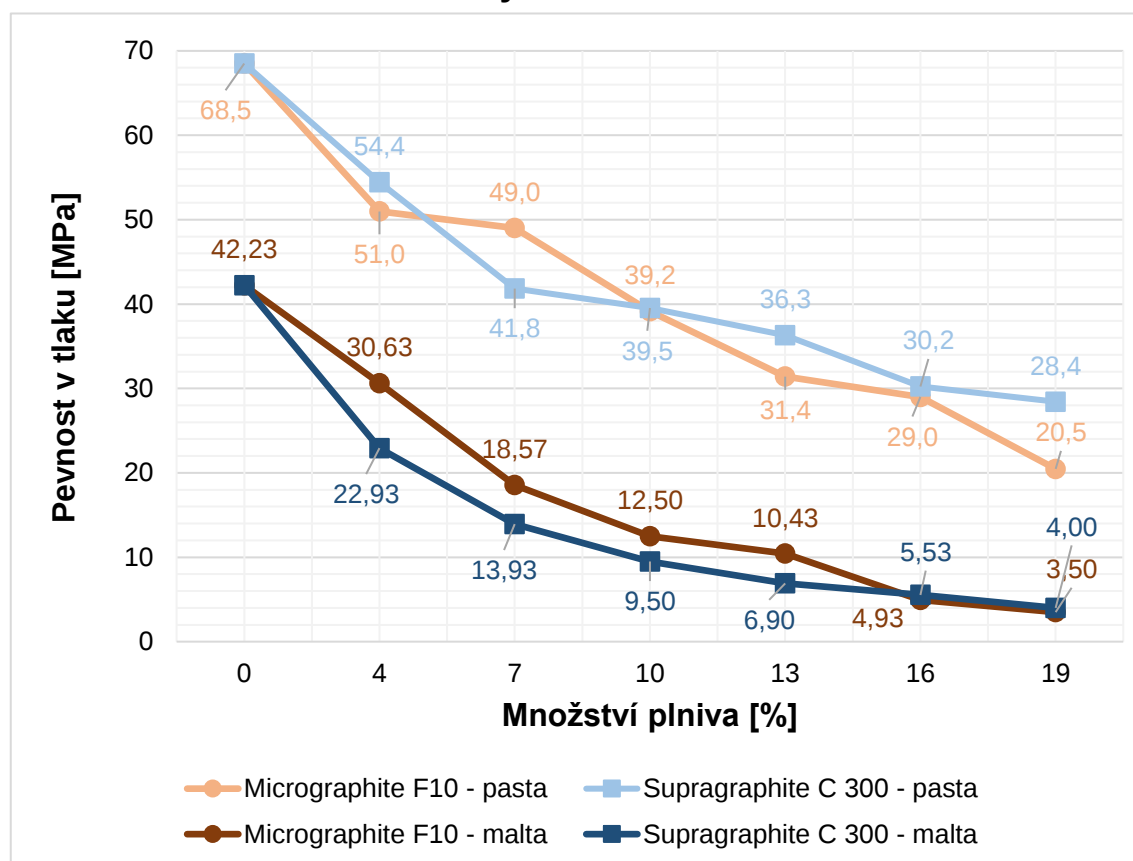
### 7.5.3. Pevnost v tahu ohybem zatvrdlých malt



Graf 50: Pevnost v tahu ohybem vybraných variant zatvrdlých malt a cementových past ve 100% nasyceném stavu po 28 dnech zrání

Z grafu pevností v tahu ohybem je dobře rozpoznatelné, že vliv množství plniva na zatvrdlé pasty a malty je zcela odlišný. Je to způsobeno tím, že zatímco pevnost v tahu ohybem referenční zatvrdlé cementové pasty, tvořené pouze kulovitými mikročásticemi cementu, není příliš vysoká, a tedy může být vylepšena přidáním jakýchkoli větších částic, zejména částic destičkovitého charakteru. Pevnost v tahu ohybem zatvrdlé cementové malty po 28 dnech zrání je poměrně vysoká, protože pevnost v tahu ohybem zde zajišťují zrna normového písku 0–2 mm velká. Tím, že v normové maltě nahradíme určité množství zrn písku mnohem menšími částicemi vybraných plniv, musí pevnost v tahu ohybem zákonitě klesat. Opět zde nelze jednoznačně určit, jaké z vybraných plniv mělo výraznější vliv na snížení pevnosti v tahu ohybem.

#### 7.5.4. Pevnost v tlaku zatvrdlých malt



Graf 51: Pevnost v tlaku vybraných variant zatvrdlých malt a cementových past ve 100% nasyceném stavu po 28 dnech zrání

Pevnost v tlaku zatvrdlých cementových malt klesá spolu s přibývajícím množstvím plniv, tento trend je shodný se zatvrdlými cementovými pastami a stejně jako u vyhodnocení objemových hmotností a pevností v tahu ohybem nelze jednoznačně říct, které z plniv, zda mikroplnivo či jemné plnivo má výraznější vliv na pevnost v tahu. Také graf pevností v tlaku dobře ilustruje, že pevnost v tlaku referenční zatvrdlé malty je téměř dvojnásobně nižší než pevnost v tlaku referenční zatvrdlé cementové pasty. To je samozřejmý fakt, který ovšem v kontextu navazujícího vyhodnocení rezistivity zatvrdlých malt a srovnání perkolačních prahů potvrzuje hypotézy, které byly v této práci formulovány.

## **7.6. Vyhodnocení IV. etapy**

Zjištění, že rezistivita zatvrdlých malt je mnohem nižší, než rezistivita zatvrdlých cementových past je považováno za další důkaz, že hydratace, potažmo objem hydratačních produktů v celkovém objemu materiálu je oním faktorem, který nejvýznamněji ovlivňuje rezistivitu.

Malty, které obsahují 3×–4× menší množství cementu, budou po smíchání s vodou, zatvrdnutí a proběhnutí procesu hydratace cementu obsahovat jednoznačně méně hydratačních produktů než zatvrdlé cementové pasty, které prošly identickým procesem.

Skutečnost, že matrice zatvrdlé cementové pasty obsahuje větší objem hydratačních produktů než matrice zatvrdlé malty a současně zatvrdlá cementová pasta vykazuje vyšší hodnoty rezistivity než matrice zatvrdlé malty, je důvodem předpokládat, že i v zatvrdlých maltách je majoritním faktorem, který ovlivňuje rezistivitu zatvrdlé cementové pasty, je hydratace, objem hydratačních produktů.

Dokládá to i srovnání perkolačních prahů, kdy mikroplnivo dosahuje perkolačního prahu vždy v nižším intervalu než jemné plnivo v suché cementové pastě a maltě i zatvrdlé cementové pastě a maltě. Perkolační prahy jsou dosaženy v nejnižším intervalu vždy pro malty, v celkově nejnižším intervalu pro suché malty. Ve vyšších intervalech je perkolačního prahu dosaženo v cementových pastách, v nejvyšším intervalu v zatvrdlých pastách.

V případě zatvrdlých malt nemáme tento výsledek potvrzen studiem struktury ze snímků ze SEM, EDX, Mikro.CT, ale předpokládáme, že princip bude stejný jako u zatvrdlých cementových malt, tedy že nejvíce záleží na objemu portlanditu a C-S-H gelů

Objemová hmotnost téměř lineárně klesá spolu s rostoucím množstvím plniva. S rostoucím vodním součinitelem klesá objemová hmotnost jak v nasyceném, tak vysušeném stavu. Nelze jednoznačně určit, jaké z vybraných elektrovodivých plniv mělo výraznější vliv na snížení pevnosti v tahu ohybem zatvrdlých malt po 28 dnech zrání.

Pevnost v tahu ohybem rovněž téměř lineárně klesá spolu s rostoucím množstvím plniva. Nelze jednoznačně určit, jaké z vybraných elektrovodivých plniv mělo výraznější vliv na snížení pevnosti v tahu ohybem zatvrdlých malt po 28 dnech zrání.

Pevnost v tlaku zatvrdlých cementových malt klesá spolu s přibývajícím množstvím plniv, tento trend je shodný se zatvrdlými cementovými pastami a stejně jako u vyhodnocení objemových hmotností a pevností v tahu ohybem nelze jednoznačně říct, které z plniv, zda mikroplnivo či jemné plnivo má výraznější vliv na pevnost v tahu.

## 7.7. Závěr IV. etapy

- Nejdůležitějšími parametry elektrovodivého plniva, které mají největší vliv na rezistivitu zatvrdlé malty po 28 dnech zrání, jsou velikost částic a vlastní rezistivita.
- Objemové hmotnosti, pevnosti v tahu ohybem i pevnosti v tlaku zatvrdlých malt po 28 dnech zrání klesají s přibývajícím zastoupením elektrovodivých plniv. Při stejném zastoupení elektrovodivého plniva jsou tyto parametry nižší s plnivem s menší velikostí částic.
- Rezistivita zatvrdlých malt po 28 dnech zrání klesá s klesající velikostí částic elektrovodivých plniv. Při stejném zastoupení elektrovodivého plniva je rezistivita nižší s plnivem s menší velikostí částic a nižší rezistivitou.
- Nejdůležitější vlastností matrice zatvrdlých malt po 28 dnech zrání je objem, který zaujímají hydratační produkty, zejména portlandit a C-S-H gely. Čím větší část objemu vzorku je vyplněna portlanditem a C-S-H gely, tím vyšší je rezistivita vzorku.
- Důsledkem přítomnosti portlanditu a C-S-H gelů v zatvrdlé maltě je k dosažení perkolačního prahu v zatvrdlé maltě zapotřebí vyššího zastoupení elektrovodivého plniva než k dosažení perkolačního prahu v suché maltě, kde nejsou žádné hydratační produkty.
- Důsledkem menšího objemu vyplněného portlanditem a C-S-H gely v zatvrdlých maltách, než v zatvrdlých cementových pastách je k dosažení perkolačního prahu v zatvrdlých maltách zapotřebí nižšího zastoupení elektrovodivého plniva než k dosažení perkolačního prahu v zatvrdlých cementových pastách, kde je objem vyplněný portlanditem a C-S-H gely mnohem vyšší.
- Čím menší je velikost částic elektrovodivého plniva, tím je třeba menšího zastoupení tohoto elektrovodivého plniva k dosažení perkolačního prahu v zatvrdlé maltě po 28 dnech zrání.

## ZÁVĚR

Na základě všech výsledků, provedených měření, vyhodnocení a srovnání lze konstatovat, že byly splněny všechny dílčí cíle práce včetně cíle hlavního. Mnohými výpočty a srovnáními hodnot byl prokázán vliv struktury na rezistivitu silikátového kompozitu.

Byly vzneseny dvě hlavní hypotézy, které na základě dosažených výsledků mohly být přijaty.

Nejdůležitějšími parametry, které mají největší vliv na rezistivitu suchých směsí, jsou zejména velikost částic a rovněž vlastní rezistivita plniva. Čím menší je velikost částic elektrovedivého plniva, tím je třeba menšího zastoupení tohoto elektrovedivého plniva k dosažení perkolačního prahu v suché směsi.

V hypotéze pro zatvrdlé cementové pasty a zatvrdlé malty po 28 dnech zrání vystupuje další parametr, kterým je množství hydratačních produktů, respektive objem, který v objemu vzorku zaujímají portlandit a C-S-H gely. Na základě studia snímků mikrostruktury je předpokládáno, že majoritní vliv má portlandit, který svým charakterem kompaktní spojitě jemně krystalické látky vytváří bariéry, které brání vzniku sítě spojitých elektricky vodivých drah tvořených přidávaným plnivem.

Nejdůležitějšími parametry, které mají největší vliv na rezistivitu zatvrdlé cementové pasty a zatvrdlé malty po 28 dnech zrání, jsou zejména velikost částic, vlastní rezistivita plniva a objem, který ve vzorku zaujímají hydratační produkty tvořící matici, zejména portlandit a C-S-H gely.

Čím menší je velikost částic elektrovedivého plniva, tím je třeba menšího zastoupení tohoto elektrovedivého plniva k dosažení perkolačního prahu v zatvrdlé maltě po 28 dnech zrání.

Čím je objem, který ve vzorku zaujímají portlandit a C-S-H gely, větší, tím je třeba většího zastoupení elektrovedivého plniva k dosažení perkolačního prahu v zatvrdlé cementové pastě nebo zatvrdlé maltě po 28 dnech zrání.

Předmětem dalšího výzkumu by mohlo být nalezení koeficientu, podle kterého by bylo jednoduše možno určit, jakou rezistivitu bude mít zatvrdlá cementová pasta nebo zatvrdlá malta po 28 dnech zrání na základě rezistivity suché směsi stejného složení.

Rovněž by se dalo dále zabývat tvorbou metodiky pro přesné stanovení perkolačního prahu, které by bylo provedeno za pomoci výpočtového modelu, pro který by bylo shromážděno minimální možné množství provedených měření při zachování rozumné míry přesnosti výpočtu.

K plnění těchto dvou vytyčených potencionálních cílů může pomoci množství zkušenosti získaných a zaznamenaných při zpracování této práce.

## ZDROJE

- [1] ZHANG, Liqing, Linwei LI, Yanlei WANG, Xun YU a Baoguo HAN. Multifunctional cement-based materials modified with electrostatic self-assembled CNT/TiO<sub>2</sub> composite filler. *Construction and Building Materials*. 2020, 238. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117787
- [2] MELICHAR, Tomáš, Jiří BYDŽOVSKÝ a Ámos DUFKA. Composites Based on Alternative Raw Materials at High Temperature Conditions. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2015. ISSN 1587-3773. Dostupné z: doi:10.3311/PPci.9820
- [3] SINGH, V.P., M. KUMAR, R.S. SRIVASTAVA a R. VAISH, 2021. Thermoelectric energy harvesting using cement-based composites: a review. *Materials Today Energy*. 21. ISSN 24686069. Dostupné z: doi:10.1016/j.mtener.2021.100714
- [4] EL-DIEB, Amr S., Mahmoud A. EL-GHAREEB, Mohamed A.H. ABDEL-RAHMAN a El Sayed A. NASR, 2018. Multifunctional electrically conductive concrete using different fillers. *Journal of Building Engineering*. 15, 61-69. ISSN 23527102. Dostupné z: doi:10.1016/j.jobbe.2017.10.012
- [5] El-enein, S. A. A., Hanna, M. Electrical conductivity of Concrete containing silica fume. *Cement and Concrete Research* 1995. Strana 1615–1620.
- [6] BOUCHAL, P. Technologie výroby a zpracování uhlíkových kompozitů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 41 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
- [7] LIU, Kaiqiang, Xiaowei CHENG, Jingxue LI, Xianshu GAO, Yan CAO, Xiaoyang GUO, Jia ZHUANG a Chunmei ZHANG, 2019. Effects of microstructure and pore water on electrical conductivity of cement slurry during early hydration. *Composites Part B: Engineering*. 177. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2019.107435
- [8] KHAJEHNOURI, Yasaman, Michel CHOUTEAU, Patrice RIVARD, Charles L. BÉRUBÉ, Yan CAO, Xiaoyang GUO, Jia ZHUANG a Chunmei ZHANG, 2019. Measuring electrical properties of mortar and concrete samples using the spectral induced polarization method: laboratory set-up. *Construction and Building Materials*. 210, 1-12. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.160
- [9] KIM, Taehwan, M. Tyler LEY, Shinhyu KANG, Jeffrey M. DAVIS, Seokhyeon KIM a Pouya AMROLLAHI, 2020. Using particle composition of fly ash to predict concrete strength and electrical resistivity. *Cement and Concrete Composites*. 107. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2019.103493

- [10] Hamed Layssi P.G.A.R.A., Mustafa S., Electrical resistivity of concrete, *Concrete International* 2015. Strana 41-46.
- [11] Whittington H., McCarter J., Forde M., The conduction of electricity through concrete, *Mag. Concr. Res.* 33 (114) (1981) 48–60
- [12] Lopanov A.N., Fanina E.A., Guzeeva O.N. Cement-quartz electrically conductive composites based on graphite dispersions. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences* 2014. Strana 2250-2253.
- [13] PRINCIGALLO, Antonio, Klaas VAN BREUGEL, Giovanni LEVITA, Jeffrey M. DAVIS, Seokhyeon KIM a Pouya AMROLLAHI, 2003. Influence of the aggregate on the electrical conductivity of Portland cement concretes. *Cement and Concrete Research.* 33(11), 1755-1763. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/S0008-8846(03)00166-2
- [14] SHI, Caijun, 2004. Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results. *Cement and Concrete Research.* 34(3), 537-545. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2003.09.007
- [15] GUI, Qiang, Minfeng QIN a Kefei LI, 2016. Gas permeability and electrical conductivity of structural concretes: Impact of pore structure and pore saturation. *Cement and Concrete Research.* 89, 109-119. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2016.08.009
- [16] Vojtěch Uher *Návrh nového typu injektážní hmoty s elektricky vodivou funkcí.* Brno, 2019. 89 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
- [17] TERASHITA, Keijiro, Tetsuya TANAKA, Kiyohiko NISHIMURA a Kei MIYANAMI. Continuous kneading for electrically conductive composite materials and evaluation of filler dispersion state. *Bulletin of the University of Osaka Prefecture, Series A Engineering and Natural Sciences.* 1993, 42(1), Strana 51-67. Dostupné z: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0027708847&partnerID=40&md5=c591e2774079442c9543872013bcf4cf>
- [18] WU, Jianmin, Jianguo LIU a Fei YANG, 2015. Three-phase composite conductive concrete for pavement deicing. *Construction and Building Materials.* 75, 129-135. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.11.004
- [19] YEHIA, S. a C.Y. TUAN. Conductive concrete overlay for bridge deck deicing. *ACI Materials Journal.* 1999, 96(3), Strana 382-390. Dostupné z: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0033134554&partnerID=40&md5=a0588e3b4ebbd29958b44a6125489b85>

- [20] JAVORSKIJ, B. M. a JU. A. SELEZNĚV. *Přehled elementární fyziky*. Praha: STNL, 1989. ISBN 04-018-89.
- [21] BARÁNEK, Šimon. *Elektricky vodivé kompozity na bázi druhotných surovin*. Brno, 2021. 140 s., 2 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Vít Černý, Ph.D.
- [22] DRÁPALA Jaromír, KURSA Miroslav. *Elektrotechnické materiály, učební texty* [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava 2012. ISBN 978-80-248-2570-0. [vid. 2. 4. 2016]. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/ETMAT/Elektrotechnicke%20materialy.pdf>
- [23] WU, Jianmin, Jianguo LIU a Fei YANG, 2015. Three-phase composite conductive concrete for pavement deicing. *Construction and Building Materials*. 75, 129-135. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.11.004
- [24] YEHA, S. a C.Y. TUAN. Conductive concrete overlay for bridge deck deicing. *ACI Materials Journal*. 1999, 96(3), 382-390. Dostupné také z: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0033134554&partnerID=40&md5=a0588e3b4ebbd29958b44a6125489b85>
- [25] DANOGLIDIS, Panagiotis A., Maria S. KONSTA-GDOUTOS a Surendra P. SHAH, 2019. Relationship between the carbon nanotube dispersion state, electrochemical impedance and capacitance and mechanical properties of percolative nanoreinforced OPC mortars. *Carbon*. 145, 218-228. ISSN 00086223. Dostupné z: doi:10.1016/j.carbon.2018.12.088
- [26] Mori T., Tanaka K., Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions, *Acta Metall* 1973. Strana 571-574.
- [27] OTTEN, Kathrin A., Christian BRISCHKE a Christopher MEYER, 2017. Material moisture content of wood and cement mortars – Electrical resistance-based measurements in the high ohmic range. *Construction and Building Materials*. 153, 640-646. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.07.090
- [28] ALDERETE, N., Y. VILLAGRÁN ZACCARDI, D. SNOECK, B. VAN BELLEGHEM, P. VAN DEN HEED, K. VAN TITTELBOOM a N. DE BELIE, 2019. Capillary imbibition in mortars with natural pozzolan, limestone powder and slag evaluated through neutron radiography, electrical conductivity, and gravimetric analysis. *Cement and Concrete Research*. 118, 57-68. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2019.02.011

- [29] KIM, Jaehwan, Benny SURYANTO, W. John MCCARTER, B. VAN BELLEGHEM, P. VAN DEN HEEDE, K. VAN TITTELBOOM a N. DE BELIE, 2019. Conduction, relaxation and complex impedance studies on Portland cement mortars during freezing and thawing. *Cold Regions Science and Technology*. 166, 57-68. ISSN 0165232X. Dostupné z: doi:10.1016/j.coldregions.2019.102819
- [30] BRANKOV, J. G., DANCHEV D. M. a TONCHEV N. S. *Theory of critical phenomena in finite-size systems: scaling and quantum effects*. River Edge, NJ: World Scientific, 2000, xvii, 439 p. Series in modern condensed matter physics, 9. ISBN 98-102-3925-4.
- [31] XIE, Ping, Ping GU a J. J. BEAUDOIN. Electrical percolation phenomena in cement composites containing conductive fibres. *Journal of Materials Science*. 1996, 31(15), 4093-4097. ISSN 1573-4803. Dostupné z: doi:10.1007/BF00352673
- [32] HAN, B.G., B.Z. HAN, X. YU a J.P. OU. Ultrahigh pressure-sensitive effect induced by field emission at sharp nano-tips on the surface of spiky spherical nickel powders. *Sensor Letters*. 2011, 9(5), 1629-1635. Dostupné z: doi:10.1166/sl.2011.1719
- [33] MONTEIRO, A.O., P.B. CACHIM a P.M.F.J. COSTA. Electrical Properties of Cement-based Composites Containing Carbon Black Particles. *Materials Today: Proceedings*. 2015, 2(1), 193-199. ISSN 2214-7853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.04.021>
- [34] ZHANG, H., C. DOU, L. PAL a M.A. HUBBE. Review of electrically conductive composites and films containing cellulosic fibers or nanocellulose. *BioResources*. 2019, 14(3), 7494-7542. Dostupné také z: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85075258131&partnerID=40&md5=6b516d19e4d3e0e39784fb22ab5824b7>
- [35] XIE, Ping, Ping GU a J. J. BEAUDOIN. Electrical percolation phenomena in cement composites containing conductive fibres. *Journal of Materials Science*. 1996, 31(15), 4093-4097. ISSN 1573-4803. Dostupné z: doi:10.1007/BF00352673
- [36] HAN, Baoguo, Xun YU, Jinping OU, B. VAN BELLEGHEM, P. VAN DEN HEEDE, K. VAN TITTELBOOM a N. DE BELIE, 2019. Self-Sensing Concrete in Smart Structures. *Cold Regions Science and Technology*. 2014, 166, 57-68. ISSN 0165232X. Dostupné z: doi:10.1016/C2013-0-14456-X
- [37] JERGA, R. *Příprava elektrod ze svazků uhlíkových vláken a jejich analytické využití* [online]. Olomouc, 2018 [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/iet40p/> Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta.

[38] BHATT, P. a A. GOE. Carbon Fibres: Production, Properties and Potential Use. *Material Science Research India* [online]. 2017, vol. 14, no. 1, p. 52-57 [cit. 2022-01-01]. ISSN 09733469. Dostupné z: doi:10.13005/msri/140109

[39] WEN, Sihai, D.D.L. CHUNG, Jinping OU, B. VAN BELLEGHEM, P. VAN DEN HEEDE, K. VAN TITTELBOOM a N. DE BELIE, 2007. Partial replacement of carbon fiber by carbon black in multifunctional cement–matrix composites. *Carbon*. 2014, 45(3), 505-513. ISSN 00086223. Dostupné z: doi:10.1016/j.carbon.2006.10.024

[40] CHUNG, D. D. L. *Carbon Fiber Composites* [online]. Butterworth-Heinemann, 1994 [cit. 2022-01-01]. ISBN 978-0-08-050073-7. Dostupné z: <https://books.google.sk/books?id=UYQXAAAAQBAJ>

[41] MALLAKPOUR, S. and S. RASHIDIMOGHADAM. Carbon Nanotubes for Dyes Removal. In: KYZAS, George Z. and Athanasios C. MITROPOULOS, eds. *Composite Nanoadsorbents* [online]. Elsevier, 2019, p. 211-243 [cit. 2022-01-01]. ISBN 978-0-12-814132-8. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/carbon-nanotubes>

[42] BOLOTNIKOVA, S.N., Ya.V. PEREVOZNIKOVA a V.K. PERESHIVAJLOV. Carbon nanostructures multilayer grafenov to create electrically conductive composites drives of energy. In: *Conference Proceedings - 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2016*. 2016. Dostupné z: doi:10.1109/APEDE.2016.7878859

[43] WILSON, C.G., F.M. MARTÍN-SAAVEDRA, N. VILABOA, R.T. FRANCESCHI, P. VAN DEN HEEDE, K. VAN TITTELBOOM a N. DE BELIE, 2013. Advanced BMP Gene Therapies for Temporal and Spatial Control of Bone Regeneration. *Journal of Dental Research*. 2014, 92(5), 409-417. ISSN 0022-0345. Dostupné z: doi:10.1177/0022034513483771

[44] DONNET, J. B., R. Ch. BANSAL and M. J. WANG. Introduction. In: DONNET, Jean-Baptiste, Roop Chand BANSAL and Meng-Jiao WANG, eds. *Carbon Black: Science and Technology* [online]. 2nd. USA: CRC Press, 1993 [cit. 2022-01-01]. ISBN 9781351462617. Dostupné z: <https://books.google.sk/books?id=SPpx6MkRYwMC>.

[45] BAOGUO, H., Y. XUN a O. JINPING. *Self-Sensing Concrete in Smart Structures* [online]. Butterworth-Heinemann, 2014 [cit. 2022-01-01]. ISBN 978-0-12-800517-0. Dostupné z: <https://books.google.sk/books?id=PmhAwAAQBAJ>

[46] DONNET, J. B., R. Ch. BANSAL and M. J. WANG. Introduction. In: DONNET, Jean-Baptiste, Roop Chand BANSAL and Meng-Jiao WANG, eds. *Carbon Black: Science and Technology* [online]. 2nd. USA: CRC Press, 1993 [cit. 2022-01-01]. ISBN 9781351462617. Dostupné z: <https://books.google.sk/books?id=SPpx6MkRYwMC>

- [47] QIN Z.,Y. WANG,X. MAO. al. Development of graphite electrically conductive concrete and application in grounding engineering. *New Build Mater* 2009;11:46–8.
- [48] LIU, Qian, Ye LIU, Siwen TANG, Juanjuan CHENG, Youming CHEN, Fang WANG, Zheng LV a Xuanhui QU, 2019. Effects of morphological characteristics of graphite fillers on the thermal conductivity of the graphite/copper composites fabricated by vacuum hot pressing sintering. *Vacuum*. 2014, 167(5), 199-206. ISSN 0042207X. Dostupné z: doi:10.1016/j.vacuum.2019.06.011
- [49] PRIMO, A., P. ATIENZAR, E. SANCHEZ, J.M. DELGADO a H. GARCÍA. From biomass wastes to large-area, high-quality, N-doped graphene: Catalyst-free carbonization of chitosan coatings on arbitrary substrates. *Chemical Communications*. 2012, 48(74), 9254-9256. Dostupné z: doi:10.1039/c2cc34978g
- [50] RHEE, I., J.S. LEE, Y.A. KIM, J.H. KIM a J.H. KIM. Electrically conductive cement mortar: Incorporating rice husk-derived high-surface-area graphene: Incorporating rice husk-derived high-surface-area graphene. *Construction and Building Materials*. 2016, 125, 632-642. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.08.089
- [51] SINGH, Shraddha, V. SRIVASTAVA a Rajiv PRAKASH. Influences of carbon nanofillers on mechanical performance of epoxy resin polymer. *Applied Nanoscience*. 2014/03/01, 5. Dostupné z: doi:10.1007/s13204-014-0319-0
- [52] ZHANG, Jinrui, Lingna XU, Qingxin ZHAO, Juanjuan CHENG, Youming CHEN, Fang WANG, Zheng LV a Xuanhui QU, 2017. Investigation of carbon fillers modified electrically conductive concrete as grounding electrodes for transmission towers: Computational model and case study. *Construction and Building Materials*. 2014, 145(5), 347-353. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.03.223
- [53] ABDUL HAMEAD, Alaa A., Sura S. AHMED, Shatha R. AHMED AZZAT, Mayyadah S. ABED, Aseel B. AL.ZUBAIDI, Ghufra K. HAMMOD, Zheng LV a Xuanhui QU, 2020. Employing recycling materials for the fabrication of smart mortar: Computational model and case study. *Materials Today: Proceedings*. 2014, 20(5), 397-402. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2019.09.154
- [54] DANOGLIDIS, Panagiotis A., Maria S. KONSTA-GDOUTOS, Surendra P. SHAH, Xianshu GAO, Yan CAO, Xiaoyang GUO, Jia ZHUANG a Chunmei ZHANG, 2020. Portland cement-based penetrating electrically conductive composition for protection against electrocorrosion: a review. *Functional Materials*. 2014, 27(4), 218-228. ISSN 22182993. Dostupné z: doi:10.15407/fm28.01.121

- [55] Pluhin O., Plugin A., Plugin D., Borziak O., Dudin O. The effect of structural characteristics on electrical and physical properties of electrically conductive compositions based on mineral binders. *Matec Web of Conferences* 2017. Dostupné z: doi.102910.1051/matecconf/201711601013
- [56] Lopanov A.N., Fanina E.A., Guzeeva O.N. Cement-quartz electrically conductive composites based on graphite dispersions. *1031ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences* 2014. Strana: 2250-2253.
- [57] KIM, G.M., S.M. PARK, G.U. RYU, H.K. LEE, Aseel B. AL.ZUBAIDI, Ghufraan K. HAMMOD, Zheng LV a Xuanhui QU, 2017. Electrical characteristics of hierarchical conductive pathways in cementitious composites incorporating CNT and carbon fiber: Computational model and case study. *Cement and Concrete Composites*. 2014, 82(5), 165-175. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2017.06.004
- [58] YEHA, S. a J. HOST. Conductive concrete for cathodic protection of bridge decks. *ACI Materials Journal*. 2010, 107(6), 577-585. Dostupné z: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-78650033603&>
- [59] MAMUNYA, Y., L. MATZUI, L. VOVCHENKO, O. MARUZHENKO, V. OLIYNYK, S. PUSZ, B. KUMANEK a U. SZELUGA. Influence of conductive nano – and microfiller distribution on electrical conductivity and EMI shielding properties of polymer/carbon composites. *Composites Science and Technology*. 2019. Strana 51-59. Dostupné z: doi.10.1016/j.compscitech.2018.11.037
- [60] COSARINSKY, Guillermo, Javier FAVA, Marta RUCH, Adrián BONOMI, Aseel B. AL.ZUBAIDI, Ghufraan K. HAMMOD, Zheng LV a Xuanhui QU, 2015. Material Characterization by Electrical Conductivity Assessment Using Impedance Analysis: Computational model and case study. *Procedia Materials Science*. 2014, 9(5), 156-162. ISSN 22118128. Dostupné z: doi:10.1016/j.mspro.2015.04.020
- [61] GOMES, Chandima, Arturo Galvan DIEGO, Marta RUCH, Adrián BONOMI, Aseel B. AL.ZUBAIDI, Ghufraan K. HAMMOD, Zheng LV a Xuanhui QU, 2011. Lightning protection scenarios of communication tower sites; human hazards and equipment damage: Computational model and case study. *Safety Science*. 2014, 49(10), 1355-1364. ISSN 09257535. Dostupné z: doi:10.1016/j.ssci.2011.05.006
- [62] AZHARI, Faezeh, Nemkumar BANTHIA, Marta RUCH, Adrián BONOMI, Aseel B. AL.ZUBAIDI, Ghufraan K. HAMMOD, Zheng LV a Xuanhui QU, 2012. Cement-based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for piezoresistive sensing: Computational model and case study. *Cement and Concrete Composites*. 2014, 34(7), 866-873. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2012.04.007

- [63] LÓPEZ-PERNÍA, C., C. MUÑOZ-FERREIRO, C. GONZÁLEZ-ORELLANA, A. MORALES-RODRÍGUEZ, Á. GALLARDO-LÓPEZ, R. POYATO, Zheng LV a Xuanhui QU, 2018. Optimizing the homogenization technique for graphene nanoplatelet/yttria tetragonal zirconia composites: Influence on the microstructure and the electrical conductivity. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014, 767(7), 994-1002. ISSN 09258388. Dostupné z: doi:10.1016/j.jallcom.2018.07.199
- [64] Whittington H., McCarter J., Forde M., The conduction of electricity through concrete, *Mag. Concr. Res.* 33 (114) (1981) 48–60.
- [65] Lunak, M., Kusak, I., Chobola, Z. Carbon Admixtures Influence on the Electrical Properties of Slag Mortars Focusing on Alternating Conductivity and Permittivity. *Procedia Engineering* 2016, Volume 151, pp. 236–240. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.pro-1159> eng.2016.07.359
- [66] Po-Hsiu Chen, D.D.L. Chung, Comparative evaluation of cement-matrix composites with distributed versus networked exfoliated graphite. *Carbon* 2013, Volume 63, pp. 446–453.
- [67] GUO, Wenhao, Jie HU, Yangyang WANG, Zhangmin ZHANG, Suhong YIN, Jiangxiong WEI, Qijun YU a Xuanhui QU, 2017. Preparation and performance of conductive mortar based on lightweight conductive aggregates: Influence on the microstructure and the electrical conductivity. *Construction and Building Materials*. 2014, 156(7), 340-350. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.08.186
- [68] NAYAK, Sumeru, Sumanta DAS, Yangyang WANG, Zhangmin ZHANG, Suhong YIN, Jiangxiong WEI, Qijun YU a Xuanhui QU, 2019. Spatial damage sensing ability of metallic particulate-reinforced cementitious composites: Insights from electrical resistance tomography. *Construction and Building Materials*. 2014, 175(7), 340-350. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2019.107817
- [69] NORAMBUENA-CONTRERAS, J., J. QUILODRAN, I. GONZALEZ-TORRE, M. CHAVEZ, R. BORINAGA-TREVIÑO, Jiangxiong WEI, Qijun YU a Xuanhui QU, 2018. Electrical and thermal characterisation of cement-based mortars containing recycled metallic waste: Insights from electrical resistance tomography. *Journal of Cleaner Production*. 2014, 190(7), 737-751. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2018.04.176
- [70] ROVNANÍK, P., I. KUSÁK, P. BAYER, P. SCHMID, L. FIALA, Jiangxiong WEI, Qijun YU a Xuanhui QU, 2019. Comparison of electrical and self-sensing properties of Portland cement and alkali-activated slag mortars: Insights from electrical resistance tomography. *Cement and Concrete Research*. 2014, 118(7), 84-91. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2019.02.009

- [71] BRAGANÇA, Mariana O.G.P., Kleber F. PORTELLA, Marcelle M. BONATO, Cláudia E.B. MARINO, L. FIALA, Jiangxiong WEI, Qijun YU a Xuanhui QU, 2014. Electrochemical impedance behavior of mortar subjected to a sulfate environment – A comparison with chloride exposure models: Insights from electrical resistance tomography. *Construction and Building Materials*. 2014, 68(7), 650-658. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.06.040
- [72] ČSN EN 1097-6. Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva: Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti. Český normalizační institut, 2014.
- [73] ČSN EN 1097-3. Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva: Část 3. Stanovení sypané hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [74] ČSN EN 13055 (721505). Pórovité kamenivo. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [75] ISO 9257:1995(E) Určování specifické plochy povrchu pevných látek adsorpcí plynu použitím BET metody.
- [76] BARTON, L. M. et al.: Tailored porous materials, *Chem. Mater.* 1999, Vol. 11, No. 10, p. 2633-2656.
- [77] ČSN EN 196-6 (722100) Metody zkoušení cementu - Část 6: Stanovení jemnosti mletí. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2019.
- [78] ČSN EN 933-1 (721193). Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [79] ISO 13320:2009. Particle size analysis – Laser diffraction methods. 2009.
- [80] PAN, Linchao, Baozhen GE, Fugen ZHANG, Cláudia E.B. MARINO, L. FIALA, Jiangxiong WEI, Qijun YU a Xuanhui QU, 2017. Indetermination of particle sizing by laser diffraction in the anomalous size ranges: Insights from electrical resistance tomography. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2014, 199(7), 20-25. ISSN 00224073. Dostupné z: doi:10.1016/j.jqsrt.2017.05.022
- [81] ČSN EN 1015-3. Zkušební metody malt pro zdivo – Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím stráscacího stolku) Praha: Český normalizační institut, 2000.

- [82] ČSN EN IEC 62561-7 ED.2 (357605) Součásti systémů ochrany před bleskem (LPSC) - Část 7: Požadavky na směsi zlepšující uzemnění Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2019.
- [83] ČSN EN 12390-5 (731302) Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020.
- [84] ČSN EN 12390-4 (731302) Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 4: Pevnost v tlaku - Požadavky na zkušební lisy. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [85] <https://www.olympus-ims.com/cs/insight/what-is-a-digital-microscope/>
- [86] IDRIS, Abubakr M., Adel A. EL-ZAHHAR, Fugen ZHANG, Cláudia E.B. MARINO, L. FIALA, Jiangxiong WEI, Qijun YU a Xuanhui QU, 2019. Indicative properties measurements by SEM, SEM-EDX and XRD for initial homogeneity tests of new certified reference materials: Insights from electrical resistance tomography. *Microchemical Journal*. 2014, 146(7), 429-433. ISSN 0026265X. Dostupné z: doi:10.1016/j.microc.2019.01.032
- [87] KIM, Ji-Su, Jong Hak KIM, Tong-Seok HAN, Cláudia E.B. MARINO, L. FIALA, Jiangxiong WEI, Qijun YU a Xuanhui QU, 2019. Microstructure characterization of cement paste from micro-CT and correlations with mechanical properties evaluated from virtual and real experiments: Insights from electrical resistance tomography. *Materials Characterization*. 2014, 155(7), 429-433. ISSN 10445803. Dostupné z: doi:10.1016/j.matchar.2019.109807
- [88] Česko moravský cement a.s. [online]. Technický list CEM I 42,5 R Mokrá. 2020 [cit. 01.01.2022]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/baleny-cement/cemi425r>
- [89] ČSN EN 196-1 (722100). Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti, Praha: Česká agentura pro standartizaci, 2019
- [90] MASIHI, Mohsen, Reza SHAMS a Peter R. KING. Pore level characterization of Micro-CT images using percolation theory. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022, 211. ISSN 09204105. Dostupné z: doi:10.1016/j.petrol.2022.110113
- [91] MATSUTANI, Shigeki, Yoshiyuki SHIMOSAKO a Yunhong WANG. Fractal structure of equipotential curves on a continuum percolation model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2012, 391(23), 5802-5809. ISSN 03784371. Dostupné z: doi:10.1016/j.physa.2012.06.056

## SEZNAM OBRÁZKŮ

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obrázek 1: Typy kompozitů [6].....                                                               | 17 |
| Obrázek 2: Příklady různých druhů uhlíkových trubiček [43].....                                  | 27 |
| Obrázek 3: a) částice grafitu, b) grafitová vlákna, c) a d) grafitové vločky [48]                | 29 |
| Obrázek 4: Průběh zkoušky Nasákavosti WA5 (foto autora) .....                                    | 49 |
| Obrázek 5: Schéma typického nastavení laserových difraktometrů [80] .....                        | 50 |
| Obrázek 6: Připravené sáčky suchých směsí (foto autora) .....                                    | 50 |
| Obrázek 7: Přípravek PTP6 s umístěnými elektrodami a protikus přípravku ...                      | 52 |
| Obrázek 8: Přípravek PTP6 a elektrody EDP, kóty v mm .....                                       | 52 |
| Obrázek 9: Průběh měření Impedance suché směsi při stlačení (foto autora).                       | 53 |
| Obrázek 10: Měděná elektroda (foto autora).....                                                  | 54 |
| Obrázek 11: Vzájemná vzdálenost elektrod ve zkušebním tělesu .....                               | 54 |
| Obrázek 12: Naplněná forma (foto autora).....                                                    | 55 |
| Obrázek 13: Označení zatvrdlých těles po vyjmutí z formy po 28 dnech zrání<br>(foto autora)..... | 55 |
| Obrázek 14: Vážení hmotnosti zkušebních těles a měření impedance (foto<br>autora).....           | 57 |
| Obrázek 15: Digitální mikroskop Keyence VHX-7000 .....                                           | 59 |
| Obrázek 16: Pohled na vzorky umístěné v pracovní komoře mikroskopu MIRA3<br>.....                | 60 |
| Obrázek 17: Proces zalisování kartuše .....                                                      | 61 |
| Obrázek 18: Detail normového písku (foto autora).....                                            | 64 |
| Obrázek 19: Condufit C 4 (foto autora) .....                                                     | 66 |
| Obrázek 20: Detail částic Condufit C 4 .....                                                     | 66 |
| Obrázek 21: Micrographite C 4 (foto autora).....                                                 | 67 |
| Obrázek 22: Detail částic Micrographite C 4 .....                                                | 67 |
| Obrázek 23: Micrographite U C 4 (foto autora) .....                                              | 68 |
| Obrázek 24: Detail částic Micrographite U C 4.....                                               | 68 |
| Obrázek 25: Condufit F 8 (foto autora).....                                                      | 69 |
| Obrázek 26: Detail částic Condufit F 8.....                                                      | 69 |
| Obrázek 27: Micrographite F 10 (foto autora) .....                                               | 70 |
| Obrázek 28: Detail částic Micrographite F 10 .....                                               | 70 |

|                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Obrázek 29: Vulcan XC605 (foto autora) .....                                                    | 71  |
| Obrázek 30: Detail částic Vulcan XC605 při zvětšení 10 000× (foto autora)....                   | 71  |
| Obrázek 31: plnivo Filtr mazačka (foto autora).....                                             | 72  |
| Obrázek 32: Supragraphite C 63 (foto autora) .....                                              | 73  |
| Obrázek 33: Detail částic Supragraphite C 63 .....                                              | 73  |
| Obrázek 34: plnivo Odpad vysavač (foto autora) .....                                            | 74  |
| Obrázek 35: Supragraphite C 300 (foto autora) .....                                             | 75  |
| Obrázek 36: Detail částic Supragraphite C 300 .....                                             | 75  |
| Obrázek 37: Petrolejový koks C 63 (foto autora).....                                            | 76  |
| Obrázek 38:Detail částic Petrolejový koks C 63.....                                             | 76  |
| Obrázek 39: Supragraphite U C 700 .....                                                         | 77  |
| Obrázek 40: Detail částic Supragraphite U C 700 při zvětšení 200× (foto autora)<br>.....        | 77  |
| Obrázek 41: Snímek ze SEM zv. 2000× vzorku MF10-SCP-13 (foto autora). 110                       |     |
| Obrázek 42: Snímek ze SEM zv. 2000× vzorku MF10-SCP-4 (foto autora)... 110                      |     |
| Obrázek 43: Snímek ze SEM zv. 2000× vzorku MF10-ZCP-13 (foto autora). 111                       |     |
| Obrázek 44: Snímek ze SEM zv. 2000× vzorku MF10-ZCP-4 (foto autora)... 111                      |     |
| Obrázek 45: Snímek ze SEM zv. 5000× vzorku MF10-ZCP-13 (foto autora). 111                       |     |
| Obrázek 46: Snímek ze SEM zv. 5000× vzorku MF10-ZCP-4 (foto autora)... 111                      |     |
| Obrázek 47: Snímek z EDX .....                                                                  | 112 |
| Obrázek 48: Snímek z EDX .....                                                                  | 112 |
| Obrázek 49: Snímek z EDX .....                                                                  | 112 |
| Obrázek 50: Snímek z EDX .....                                                                  | 112 |
| Obrázek 51: Snímek z digitálního mikroskopu vzorku MF10-ZCP-13 (foto<br>autora).....            | 113 |
| Obrázek 52: Snímek z digitálního mikroskopu vzorku MF10-ZCP-4 (foto autora)<br>.....            | 113 |
| Obrázek 53: Snímek z digitálního mikroskopu vzorku MF10-ZCP-4, indikace<br>fenolftaleinem.....  | 114 |
| Obrázek 54: Snímek z digitálního mikroskopu vzorku MF10-ZCP-13, indikace<br>fenolftaleinem..... | 114 |
| Obrázek 55: Snímek z Mikro-CT vzorku MF10-SCP-4 (foto autora) .....                             | 115 |

|                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------|-----|
| Obrázek 56: Snímek z Mikro-CT vzorku MF10-SCP-13 (foto autora) ..... | 115 |
| Obrázek 57: Snímek z Mikro-CT vzorku MF10-ZCP-4 (foto autora) .....  | 116 |
| Obrázek 58: Snímek z Mikro-CT vzorku MF10-ZCP-13 (foto autora) ..... | 116 |

## SEZNAM GRAFŮ

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Graf 1: Křivky distribuce části všech uvažovaných elektrovodivých plniv.....                                                         | 78 |
| Graf 2: Rezistivita při napětí 420 kPa pro všechna uvažovaná elektrovodivá<br>plniva.....                                            | 79 |
| Graf 3: Nasákavost všech uvažovaných elektrovodivých plniv .....                                                                     | 79 |
| Graf 4: Objemová hmotnost všech variant suchých past při napětí 420 kPa ...                                                          | 84 |
| Graf 5: Rezistivita všech variant suchých past při napětí 420 kPa .....                                                              | 85 |
| Graf 6: Přibližné stanovení perkolačního prahu pro Condufit C 4 v suché pastě<br>.....                                               | 86 |
| Graf 7: Faktor SZR pro Condufit C 4 v suché pastě.....                                                                               | 86 |
| Graf 8: Přibližné stanovení perkolačního prahu pro Micrographite F 10 v suché<br>pastě .....                                         | 86 |
| Graf 9: Faktor SZR pro Micrographite F 10 v suché pastě.....                                                                         | 86 |
| Graf 10: Přibližné stanovení perkolačního prahu pro Supragraphite C 63 v<br>suché pastě.....                                         | 87 |
| Graf 11: Faktor SZR pro Supragraphite C 63 v suché pastě.....                                                                        | 87 |
| Graf 12: Přibližné stanovení perkolačního prahu pro Odpad vysavač v suché<br>pastě .....                                             | 87 |
| Graf 13: Faktor SZR pro Odpad vysavač v suché pastě .....                                                                            | 87 |
| Graf 14: Přibližné stanovení perkolačního prahu pro Supragraphite C 300 v<br>suché pastě.....                                        | 88 |
| Graf 15: Faktor SZR pro Supragraphite C 300 v suché pastě.....                                                                       | 88 |
| Graf 16: Přibližné stanovení perkolačního prahu pro Supragraphite U C 700 v<br>suché pastě.....                                      | 88 |
| Graf 17: Faktor SZR pro Supragraphite U C 700 v suché pastě .....                                                                    | 88 |
| Graf 18: Rezistivita všech variant suchých malt ve srovnání se suchými pastami<br>s použitím stejných plniv při napětí 420 kPa ..... | 91 |
| Graf 19: Přibližné stanovení perkolačního prahu pro Micrographite F 10 v suché<br>maltě .....                                        | 92 |
| Graf 20: Faktor SZR pro Micrographite F10 v suché pastě.....                                                                         | 92 |
| Graf 21: Přibližné stanovení perkolačního prahu pro Supragraphite C 300 v<br>suché maltě.....                                        | 92 |

|                                                                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Graf 22: Faktor SZR pro Supragraphite C 300 v suché maltě.....                                                                                 | 92  |
| Graf 23: Objemová hmotnost všech variant suchých malt ve srovnání se suchými pastami s použitím stejných plniv při napětí 420 kPa.....         | 93  |
| Graf 24: Rezistivita všech variant vysušených zatvrdlých cementových past po 28 dnech zrání .....                                              | 98  |
| Graf 25: Přibližné stanovení perkolačního prahu pro Condufit C 4 v zatvrdlé pastě .....                                                        | 100 |
| Graf 26: Faktor SZR pro Condufit C 4 v zatvrdlé pastě.....                                                                                     | 100 |
| Graf 27: Faktor SZR pro Micrographite F 10 v zatvrdlé pastě.....                                                                               | 100 |
| Graf 28: Přibližné stanovení perkolačního prahu pro Micrographite F 10 v zatvrdlé pastě.....                                                   | 100 |
| Graf 29: Faktor SZR pro Supragraphite C 63 v zatvrdlé pastě.....                                                                               | 101 |
| Graf 30: Přibližné stanovení perkolačního prahu pro Supragraphite C 63 v zatvrdlé pastě.....                                                   | 101 |
| Graf 31: Faktor SZR pro Odpad vysavač v zatvrdlé pastě .....                                                                                   | 101 |
| Graf 32: Přibližné stanovení perkolačního prahu pro Odpad vysavač v zatvrdlé pastě .....                                                       | 101 |
| Graf 33: Faktor SZR pro Supragraphite C 300 v zatvrdlé pastě.....                                                                              | 102 |
| Graf 34: Přibližné stanovení perkolačního prahu pro Supragraphite C 300 v zatvrdlé pastě.....                                                  | 102 |
| Graf 35: Přibližné stanovení perkolačního prahu pro Supragraphite U C 700 v zatvrdlé pastě.....                                                | 102 |
| Graf 36: Faktor SZR pro Supragraphite U C 700 v zatvrdlé pastě .....                                                                           | 102 |
| Graf 37: Srovnání perkolačních prahů v suché cementové pastě a perkolačních prahů ve vysušené zatvrdlé cementové pastě pro všechna plniva..... | 103 |
| Graf 38: Objemová hmotnost všech variant zatvrdlých cementových past ....                                                                      | 105 |
| Graf 39: Objemová hmotnost všech variant zatvrdlých cementových past ....                                                                      | 106 |
| Graf 40: Pevnost v tahu ohybem všech variant zatvrdlých cementových past                                                                       | 107 |
| Graf 41: Pevnost v tlaku všech variant zatvrdlých cementových past.....                                                                        | 109 |
| Graf 42: Pevnost v tlaku všech variant zatvrdlých cementových past.....                                                                        | 122 |
| Graf 43: Přibližné stanovení perkolačního prahu pro Micrographite F 10 v zatvrdlé maltě.....                                                   | 123 |

|                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Graf 44: Faktor SZR pro Micrographite F10 v zatvrdlé maltě .....                           | 123 |
| Graf 45: Přibližné stanovení perkolačního prahu Supragraphite C 300 v zatvrdlé maltě ..... | 123 |
| Graf 46: Faktor SZR pro Supragraphite C 300 v zatvrdlé maltě .....                         | 123 |
| Graf 47: Srovnání perkolačních prahů v suchých směsích a zatvrdlých kompozitech .....      | 124 |
| Graf 48: Objemová hmotnost vybraných variant zatvrdlých malt a cementových past .....      | 125 |
| Graf 49: Objemová hmotnost vybraných variant vysušených zatvrdlých .....                   | 125 |
| Graf 50: Pevnost v tahu ohybem vybraných variant zatvrdlých malt a cementových past .....  | 126 |
| Graf 51: Pevnost v tlaku vybraných variant zatvrdlých malt a cementových past .....        | 127 |

## SEZNAM TABULEK

|                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabulka 1: Základní charakteristiky cementu CEM I 42,5 R [88].....                       | 63  |
| Tabulka 2: Zjišťované vlastnosti cementu CEM I 42,5 R.....                               | 63  |
| Tabulka 3: Zjišťované parametry normového písku .....                                    | 64  |
| Tabulka 4: Přehled hlavních parametrů uvažovaných elektrovedivých plniv....              | 65  |
| Tabulka 5: Zjišťované parametry plniva Condufit C 4 .....                                | 66  |
| Tabulka 6: Zjišťované parametry plniva Micrographite C 4 .....                           | 67  |
| Tabulka 7: Zjišťované parametry plniva Micrographite U C 4.....                          | 68  |
| Tabulka 8: Zjišťované parametry plniva Condufit F 8 .....                                | 69  |
| Tabulka 9: Zjišťované parametry plniva Micrographite F 10.....                           | 70  |
| Tabulka 10: Zjišťované parametry plniva Vulcan XC605 .....                               | 71  |
| Tabulka 11: Zjišťované parametry plniva Filtr mazačka .....                              | 72  |
| Tabulka 12: Zjišťované parametry plniva Supragraphite C 63 .....                         | 73  |
| Tabulka 13: Zjišťované parametry plniva Odpad vysavač.....                               | 74  |
| Tabulka 14: Zjišťované parametry plniva Supragraphite C 300 .....                        | 75  |
| Tabulka 15: Zjišťované parametry plniva Petrolejový koks C 63 .....                      | 76  |
| Tabulka 16: Zjišťované parametry plniva Supragraphite U C 700.....                       | 77  |
| Tabulka 17: Rozdělení do kategorií a hlavní sledované vlastnosti vybraných<br>plniv..... | 82  |
| Tabulka 18: Označení a složení receptur a jejich variant suchých směsí .....             | 83  |
| Tabulka 20: Objemová hmotnost všech variant suchých past při napětí 420 kPa<br>.....     | 84  |
| Tabulka 19: Rezistivita všech variant suchých past při napětí 420 kPa .....              | 85  |
| Tabulka 21: Označení a složení receptur a jejich variant suchých malt .....              | 90  |
| Tabulka 22: Označení a složení receptur a jejich variant cementových past ...            | 97  |
| Tabulka 23: Rezistivita všech variant vysušených zatvrdlých cementových past<br>.....    | 98  |
| Tabulka 24: Objemová hmotnost všech variant zatvrdlých cementových past105               |     |
| Tabulka 25: Objemová hmotnost všech variant zatvrdlých cementových past106               |     |
| Tabulka 26: Pevnost v tahu ohybem všech variant zatvrdlých cementových past<br>.....     | 108 |
| Tabulka 27: Pevnost v tlaku všech variant zatvrdlých cementových past .....              | 109 |
| Tabulka 28: Označení a složení receptur a jejich variant zatvrdlých malt .....           | 121 |

