



# 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

# ELEKTRICKY VODIVÉ KOMPOZITY NA BÁZI DRUHOTNÝCH SUROVIN

ELECTRICALLY CONDUCTIVE COMPOSITES BASED ON SECONDARY RAW MATERIALS

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Šimon Baránek

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. VÍT ČERNÝ, Ph.D.

BRNO 2021



# 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. Šimon Baránek
<b>Název</b>	Elektricky vodivé kompozity na bázi druhotných surovin
<b>Vedoucí práce</b>	Ing. Vít Černý, Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	31. 3. 2020
<b>Datum odevzdání</b>	15. 1. 2021

V Brně dne 31. 3. 2020

---

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

---

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

## PODKLADY A LITERATURA

- Monteiro, A.O.; Cachim, P.B.; Costa, P.M.F.J.; Electrical Properties of Cement-based Composites Containing Carbon Black Particles, 2015
- Hou, Z.; Li, Z.; Wang, J.; Electrical conductivity of the carbon fiber conductive concrete, 2007
- Wen, S.; Chung, D.D.L., Partial replacement of carbon fiber by carbon black in multifunctional cement–matrix composites, 2007
- Chen, B.; Wu, K.; Yao, W.; Conductivity of carbon fiber reinforced cement-based composites, 2004
- Velay-Lizancos, M.; Azenha, M., Martínez-Lage, I.; & Vázquez-Burgo, P.; Addition of biomass ash in concrete: Effects on E-Modulus, electrical conductivity at early ages and their correlation, 2017
- 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, 1019
- Výzkumné zprávy a protokoly ústavu THD, příspěvky ze sborníků konferencí, odborné články, časopisy, normy.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Vývoj elektricky vodivého cementového kompozitu je složitým vědeckým a technickým problémem. Elektrické vodivosti silikátového kompozitu lze obecně dosáhnout začleněním vstupních surovin obsahujících uhlík (saze, uhlíková vlákna, grafen atp.) do receptury materiálu. Cílem diplomové práce bude výzkum elektricky vodivého silikátového kompozitu na bázi druhotných surovin.

1. Na základě studia odborné literatury zpracujte rešerši poznatků, týkajících se problematiky vodivých kompozitů.
2. V rámci rešeršní činnosti se zaměřte na složení surovinových směsí a na charakter používaných elektricky vodivých plniv.
3. Sestavte soubor potenciálně vhodných primárních a zejména druhotných surovin pro experimentální činnost.
4. Z dostupných informačních zdrojů sestavte metodiku postupu experimentálního vývoje elektricky vodivého kompozitu.
5. Proveďte analýzu vlastností primárních a druhotných surovin pro experimentální činnost, zejména z hlediska elektrické vodivosti.
6. Navrhněte a ověřte základní surovinové varianty elektricky vodivých kompozitů. Zhodnotte dominantní vlivy na charakter výsledných kompozitů a vyberte vhodnou směs pro ověření využitelnosti druhotných surovin.
7. Navrhněte a ověřte surovinové varianty elektricky vodivých kompozitů s využitím druhotných surovin a určete optimální variantu.

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).

---

Ing. Vít Černý, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

## ABSTRAKT

Elektro vodivé kompozity jsou novodobé materiály, které nacházejí čím dál větší uplatnění ve většině oblastí průmyslu, například ve stavebnictví můžou tyto materiály sloužit jako senzory pro monitorování změn v konstrukci. Cílem práce byl výzkum elektricky vodivého silikátového kompozitu na bázi druhotných surovin. Návrh tohoto kompozitu probíhal na základě vývoje vlastních směsí a experimentálního ověření vlivu složení. V úvodu byla provedena podrobná analýza 15ti vstupních surovin. Bylo otestováno 5 jemných a 2 hrubé typy elektricky vodivých primárních plniv jejichž naměřená impedance se pohybovala v rozmezí 1-2  $\Omega$ . Na základě impedance vytvořených kompozitů s těmito plnivými, byl vybrán kompozit s plnivem Condufit C4, který dosahoval impedance 13,3  $\Omega$  jakož to zástupce s jemným typem plniva a kompozit s plnivem Supragraphite C300, který dosahoval impedance 249,3  $\Omega$  jakož to zástupce s hrubým typem plniva. Následně byly substituovány jednotlivé komponenty primární směsi. Byla provedena náhrada cementu vysokoteplotním popílkem v množství 20, 30 a 40 %, náhrada kameniva obdobné frakce ocelovými pilinami a náhrada primárních elektricky vodivých plniv za druhotná v množství 30 a 50 %. Všechny navržené náhrady snižovaly impedanci kompozitu. Nejúčinnější náhradou pro snížení impedance byla náhrada odpadním grafitem (snížení až o 92 %), která také mírně zlepšila mechanické vlastnosti kompozitu. U ostatních typů náhrad došlo k poklesům pevnosti až o 50 %. Výsledkem této práce je optimalizovaný elektro vodivý kompozit na bázi druhotných surovin s jemným typem plniva Condufit C4 s 30 % náhradou odpadním grafitem „odpad vysavač“ který dosahuje impedance 5,5  $\Omega$ . Jako dílčí cíl této práce byl ověřen vliv vlhkosti na impedanci kompozitů, kdy jsou výsledky při použití hrubého typu plniva významně ovlivněny vlhkostí a výsledky s využitím jemného typu plniva nikoliv.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Elektro vodivé kompozity, silikátový kompozit, grafitový prášek, substituce, druhotná surovina, vysokoteplotní popílek, odpadní grafit, optimalizace, impedance.

## ABSTRACT

Electroconductive composites are modern materials that are commonly used in many industries such as the construction industry among others. For example these materials can be useful as sensors for monitoring changes in constructions. The aim of this thesis is the research of electrically conductive silicate composite based on secondary raw materials. The design of this composite is based on the development of its own mixtures and experimental verification of the effect of the structure. The introduction part consists of a detailed analysis of 15 materials. Samples of the 5 fine and 2 coarse electrically conductive fillers were tested. The measured impedance of these fillers was in the range of 1-2  $\Omega$ . Composite with filler Condufit C4 was selected as representative for type of fine fillers with a measured impedance of 13.3  $\Omega$ . Composite with filler Supragraphite C300 was selected as representative for type of coarse fillers with a measured impedance of 249.3  $\Omega$ . The selection of the composites was based on the impedance of the fabricated composites with these fillers. Subsequently, the individual components of the primary mixture were substituted. The cement was replaced by high-temperature fly ash in the amount of 20, 30, and 40 %, the aggregate of a similar fraction was replaced by steel sawdust, and the primary electrically conductive fillers were replaced by secondary ones in the amount of 30 and 50 %. All proposed replacements reduced the impedance of the composite. The most effective replacement for impedance reduction was replacement with waste graphite (up to 92 % reduction), which also slightly improved the mechanical properties of the composite. On the other hand, different types of replacement caused decreases in strength by up to 50 %. The result of this thesis is an optimized electrically conductive composite based on secondary raw materials with a fine type of filler Condufit C4 with 30 % replacement by waste graphite "odpad vysavač" which achieves an impedance of 5.5  $\Omega$ . The partial goal of this thesis is a verification of the influence of moisture on the impedance of composites. Results are significantly affected by moisture when using the coarse type of filler and when using the fine type of filler are not.

## KEYWORDS

Electrically conductive composites, silicate composite, graphite powder, substitution, secondary raw material, high temperature fly ash, waste graphite, optimization, impedance.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

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.

## PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Elektricky vodivé kompozity na bázi druhotných surovin* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 14. 1. 2021

---

Bc. Šimon Baránek

autor práce

## PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Elektricky vodivé kompozity na bázi druhotných surovin* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 14. 1. 2021

---

Bc. Šimon Baránek

autor práce

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat především vedoucímu této diplomové práce Ing. Vítovi Černému, Ph.D. za věnovaný čas, odborné vedení, za věcné rady, trpělivost, a především přátelský přístup. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jindřichu Melicharovi, Ph.D. a doktorandům Ing. Radkovi Hermannovi, Ing. Petrovi Figalovi za rady tipy a návrhy, předání zkušeností, a především za přátelskou spolupráci.

V neposlední řadě chci poděkovat také přátelům, rodině, pivu, skateboardingu a všem na které jsem si nevzpomněl, bez kterých by to nešlo.

Diplomová práce byla vytvořena s využitím infrastruktury Centra AdMaS a za finanční podpory Grantové agentury České republiky v rámci projektu č. 20-09072J "Tvorba struktury pokročilých silikátových kompozitů se sníženou impedancí".



# OBSAH

1	ÚVOD .....	13
2	TEORETICKÁ ČÁST .....	14
2.1	Kompozitní materiály.....	14
2.1.1	Matrice.....	15
2.1.2	Plniva.....	15
2.2	Elektro vodivé kompozitní materiály.....	16
2.3	Principy vedení elektrického proudu v elektro-vodivých kompozitech.....	17
2.3.1	Přímé kontaktní vedení.....	18
2.3.2	Přeskokové vedení, tunelové vedení.....	18
2.3.3	Iontová vodivost.....	18
2.3.4	Dielektrické vlastnosti kompozitních materiálů .....	19
2.3.5	Perkolační teorie.....	19
2.4	Měrné veličiny spojené s vodivostí materiálů .....	22
2.4.1	Vodivost.....	22
2.4.2	Rezistivita .....	22
2.4.3	Impedance.....	23
2.5	Využití elektro vodivých kompozitů.....	23
2.5.1	Elektricky vyhřívaný silniční beton .....	23
2.5.2	Odporové sledování kvality betonu neboli SHM (strukturnal Health Monitoring).....	24
2.5.3	Katodická ochrana výztuže.....	24
2.5.4	Využití elektro vodivých kompozitů pro monitorování dopravní situace 25	
2.5.5	Stínění EMI (elektromagnetická interference – rušení signálů) .....	25
2.5.6	Další možné využití.....	26
2.6	Elektricky vodivá plniva vhodná pro kompozitní materiály.....	26
2.7	Druhy elektricky vodivých plniv a jejich vlastnosti .....	27
2.7.1	Uhlíkové nano trubičky (CNT carbon nano tubes): .....	27
2.7.2	Uhlíková vlákna (CF Carbon fiber).....	27
2.7.3	Saze (CB-Carbon Black) .....	28

2.7.4	Grafen (Graphene) .....	29
2.7.5	Grafit (GP-Graphite powder).....	30
2.7.6	Antracit (Anthracite) .....	30
2.7.7	Ocelová vlákna (Steel fibers).....	31
2.7.8	Mikrosilika (Silica fume) .....	32
2.7.9	Koks (Coke).....	32
2.8	Druhotné suroviny pro vodivé kompozitní materiály .....	33
2.8.1	Druhotné suroviny.....	33
2.8.2	Vhodné druhotné suroviny pro elektro vodivé kompozity.....	33
2.9	Současné zkušenosti s vývojem vodivého kompozitu .....	34
3	CÍL PRÁCE .....	35
4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	36
4.1	Metodika práce.....	36
4.1.1	ETAPA I : Vlastnosti a analýza vstupních surovin .....	38
4.1.2	ETAPA II : Návrh a ověření základních surovinových variant elektricky vodivých kompozitu na bázi primárních surovin.....	39
4.1.3	ETAPA III: Návrh elektro vodivého kompozitu na bázi druhotných surovin .....	41
4.2	Metodika zkoušení surovin.....	43
4.2.1	Měření impedance práškových surovin .....	43
4.2.2	Sypná hmotnost volně sypaného kameniva .....	45
4.2.3	Sypná hmotnost setřeseného kameniva.....	46
4.2.4	SEM ( <i>scanning electron microscope</i> ) .....	46
4.2.5	Měrný povrch.....	47
4.2.6	Nasákavost surovin .....	48
4.2.7	Měrná hmotnost.....	49
4.2.8	Objemová hmotnost.....	49
4.2.9	Stanovení distribuce částic a síťový rozbor.....	49
4.3	Metodika zkoušení kompozitů a cementových past .....	49
4.3.1	Stanovení zpracovatelnosti čerstvé směsi.....	49
4.3.2	Výroba a uložení zkušebních vzorků .....	50
4.3.3	Měření impedance nově vytvořených těles.....	51

4.3.4	Ověření mechanických vlastností .....	53
4.4	ETAPA I: Vlastnosti a analýza vstupních surovin .....	54
4.4.1	Výběr vhodných vstupních surovin z dostupných zdrojů .....	54
4.4.2	Analýza vstupních surovin .....	55
4.4.2.1	Pojiva .....	55
4.4.2.2	Plniva .....	56
4.4.2.3	Přísady .....	58
4.4.2.4	Primární funkční plniva .....	59
4.4.2.5	Druhotné funkční plniva .....	67
4.4.2.6	Druhotné suroviny pro náhradu cementu .....	70
4.4.3	Shrnutí ETAPY I .....	71
4.5	ETAPA II: Návrh a ověření základních surovinových variant elektricky vodivých kompozitu na bázi primárních surovin .....	75
4.5.1	Návrh referenční směsi .....	75
4.5.2	Optimalizace dávkování funkčních plniv v kompozitu .....	76
4.5.3	Ověření elektro vodivých vlastností cementové pasty s primárními plnivami .....	79
4.5.4	Ověření elektro vodivých vlastností kompozitu s obsahem primárních plniv .....	83
4.5.5	Vyhodnocení ETAPY II .....	88
4.6	ETAPA III: Vývoj vodivého kompozitu na bázi druhotných surovin .....	90
4.6.1	Částečná náhrada cementu .....	90
4.6.1.1	Vliv částečné náhrady cementu na impedanci kompozitu .....	91
4.6.1.2	Vliv částečné náhrady cementu na mechanické vlastnosti kompozitu .....	94
4.6.1.3	Shrnutí vlivu náhrady cementu .....	98
4.6.2	Náhrada kameniva .....	99
4.6.2.1	Vliv náhrady kameniva na impedanci kompozitu .....	100
4.6.2.2	Vliv náhrady kameniva na mechanické vlastnosti kompozitu ...	102
4.6.2.3	Shrnutí vlivu náhrady kameniva .....	106

4.6.3	Částečná náhrada primárních funkčních plniv .....	107
4.6.3.1	Vliv částečné náhrady primárních funkčních plniv na impedanci kompozitu .....	108
4.6.3.2	Vliv částečné náhrady primárních funkčních plniv na mechanické vlastnosti kompozitu .....	111
4.6.3.3	Shrnutí vlivu náhrady funkčních plniv .....	116
4.6.4	Shrnutí výsledků a stanovení vhodných kombinací náhrad .....	117
4.6.5	Ověření a výběr kompozitního materiálu s optimální kombinací náhrad druhotnými surovinami.....	117
4.6.5.1	Ověření elektro vodivých vlastností.....	118
4.6.5.2	Ověření mechanických vlastností.....	120
4.6.5.3	Shrnutí výsledků nově navržených kompozitů na bázi druhotných surovin ...	123
4.6.6	Vyhodnocení ETAPY III .....	123
5	ZÁVĚR.....	125
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	128
	SEZNAM TABULEK.....	133
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	136
	SEZNAM GRAFŮ .....	138

# 1 ÚVOD

Elektro vodivé kompozitní materiály jsou novodobý typ materiálu, který nachází uplatnění téměř ve všech odvětvích průmyslu. Výhoda těchto kompozitů spočívá především v možnosti modifikace jejich vlastností, čímž se také rozšiřuje jejich možné využití.

Ve stavebnictví se tyto materiály stávají klíčovým prvkem například pro monitorování degradace konstrukcí staveb, odstínění bludných proudů z elektrifikačních sítí, odstínění elektro magnetického záření na operačních sálech, katodické ochraně před vlhkostí, ochranou budov před přepětím, či stínění signálu pro vězeňské zařízení.

Tato práce je zaměřena na vývoj elektro vodivého kompozitu na bázi cementového pojiva.

Rostoucí ekologické a sociální povědomí vynucuje pro stavební průmysl klást větší důraz na životní prostředí a udržitelnost nově vznikajících materiálů. To také má podpořit vhodnou spotřebu přírodních zdrojů, recyklaci a opětovné využití odpadních materiálů a surovin.

Vzhledem k těmto skutečnostem bude proveden výzkum v oblasti možnosti využití druhotných a odpadních surovin pro tvorbu elektro vodivých kompozitů.

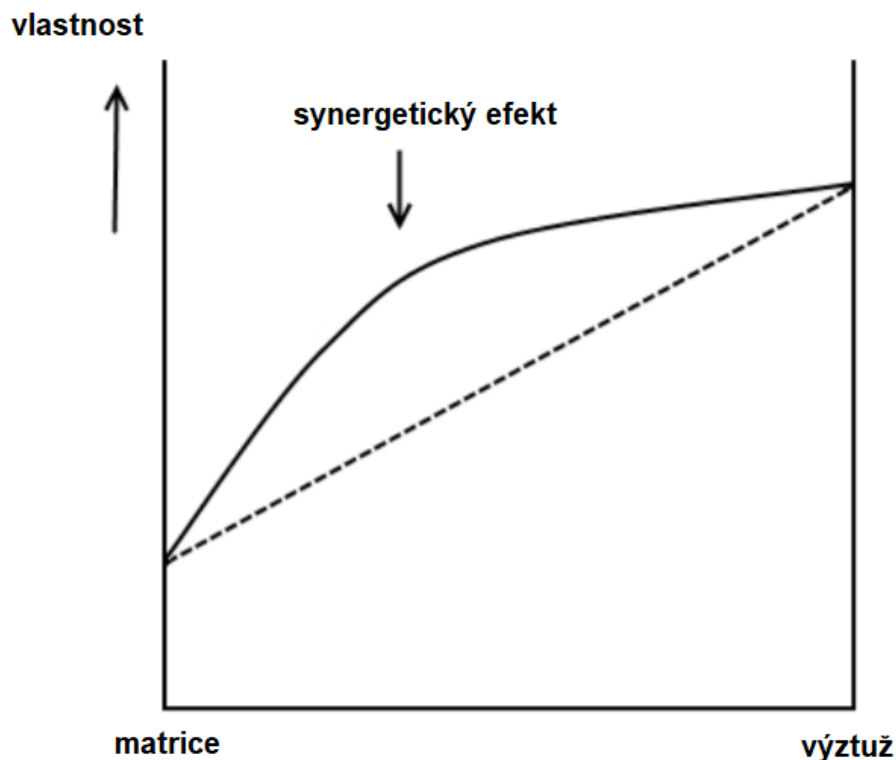
Jelikož tyto materiály nejsou zatím v praxi běžné a nejsou pro ně stanoveny závazné požadavky, dávají této diplomové práci vhodný prostor pro jejich vývoj a výzkum.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Kompozitní materiály

V moderní době, kdy už vlastnosti stávajících materiálů jsou nedostačující, bývají nahrazovány kompozitními materiály, tyto materiály jsou poměrně novodobé a znamenaly revoluci ve většině oblastí průmyslu. Kompozitní materiály neboli kompozity jsou materiály, které jsou vytvořeny z dvou a více fází (složek), každá tato fáze má většinou odlišné vlastnosti a plní v materiálu rozdílnou funkci. Většina kompozitních materiálů je tvořeno z tak zvané matrice a plniva, případně nosné výztuže. Dle použité matrice se následně odvíjí výrobní proces, například pro polymerní matrice jsou typické laminace, tlakové vytlačování a tažení, u kovových matric se používá odlévání a válcování, pro silikátové kompozity jsou typické lití do forem, nebo předem připravených otvorů. Díky vícefázovému složení lze jejich mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti v širokém rozsahu modifikovat.

Kompozitní materiály využívají synergetického efektu jeho složek, který umožňuje spojení těchto vlastností k optimálnímu požadavku. [1]



Obrázek č. 1 Synergetický efekt složení kompozitního materiálu [1]

### 2.1.1 Matrice

Matrice má především za úkol pojít všechny komponenty v jeden celistvý materiál, tvoří kontinuální část materiálu a zastává funkci pojiva. Její funkcí je také udržovat požadovaný tvar a má také vliv na konečný vzhled materiálu. Matrice se podílí na mechanických a fyzikálních vlastnostech celého kompozitního materiálu. Dále má také za úkol chránit plniva a výztuž před vnějšími vlivy, určuje tepelnou vodivost, ohnivzdornost kompozitu a jiné. Podle materiálu matrice můžeme rozdělit matrice na:

- Kovy (Al, Ag, Fe, Mg, Ti, Co, Cu, Ni atd. popřípadě jejich slitiny)
- Nekovy
  - anorganické (silikáty, keramika, sklo, a jiné)
  - organické (polymery, pryskyřice, epoxidy a jiné) [1]

### 2.1.2 Plniva

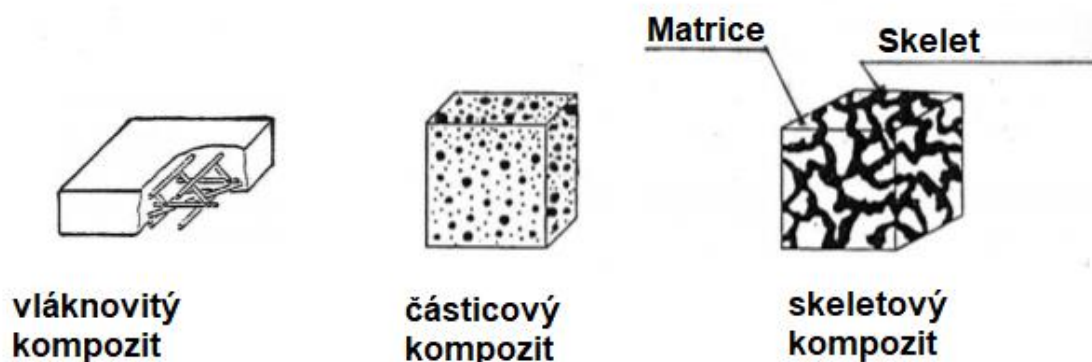
Plniva dávají danému kompozitnímu materiálu především mechanické vlastnosti jako je pevnost, mechanická odolnost, objemová hmotnost aj., také se používají pro snížení celkové ceny materiálu. Dále ovlivňují celou řadu vlastností jako je elektrická a tepelná vodivost. Plniva se vyrábí, nebo jsou tvořeny téměř ze všech možných druhů materiálů jako je například přírodní kámen, keramika, kovy, polymery, textilie přírodní suroviny, odpady aj. Plniva tvoří ve struktuře kompozitu diskontinuální fázi a jejich množství a distribuce v matici má zásadní vliv na chování kompozitu. [1]

Dle velikosti částic lze plniva rozdělit na:

- Mikro-kompozity (přibližně 10 až 102  $\mu\text{m}$ ) nejčastěji metalurgie, slitiny
- Makro-kompozity nejvyužívanější ve stavebnictví např. železobeton
- Nano-kompozity obsahují částice v nano rozměrech [1]

Dle geometrie daných plniv je můžeme rozdělit na :

- Vlákňové, jehlicovité
- částicové
- skeletové [1]



Obrázek č. 2 Základní typy kompozitních materiálů dle druhu plniva  
(obrázek autora)

Výše uvedené typy plniv lze také vhodně kombinovat pro dosažení lepších vlastností a synergickému efektu viz. obrázek č.1.

## 2.2 Elektro vodivé kompozitní materiály

Elektro vodivý kompozit lze definovat jako kompozitní materiál na silikátové bázi pojiva, který obsahuje určité množství elektronicky vodivých složek k dosažení stabilní a relativně vysoké elektrické vodivosti. Elektrická vodivost souvisí s rezistivitou neboli odporem, jedná se o převrácenou hodnotu. U pevných materiálů můžeme elektrickou vodivost rozdělit na vodivost povrchovou a vnitřní. Povrchová elektrická vodivost závisí především na vlhkosti materiálu, zatímco vnitřní vodivost souvisí se strukturou, množstvím a charakterem použitých vodivých komponent.

Vodivost v kompozitních materiálech závisí na mobilitě elektronů. Materiály na cementové bázi mají obvykle rezistivitu  $6.54$  až  $11.4 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ , lze tedy říct že nejsou ani dobrý vodič jako je například měď, která má rezistivitu přibližně  $1,7 \Omega \cdot \text{cm}$  ale ani izolant například teflon s přibližnou rezistivitou  $1 \times 10^{15}$  až  $1 \times 10^{20}$ . Přidáním vodivých komponentů jako jsou například saze, grafit, uhlíková a ocelová vlákna lze významně snížit jeho rezistivitu při zachování dobrých mechanických vlastností.

Klíčem k vynikající elektro vodivosti kompozitního materiálu je vytvoření dokonale elektricky vodivé sítě v jeho struktuře. Čím je tato vodivá síť silnější tím je také větší elektrická vodivost materiálu, s tím je také spojena maximální síla elektrického proudu, který jí může projít. Jakmile je v kompozitním materiálu celistvá propojená vodivá struktura, sníží se významně odpor samotného



materiálu, tato hranice se nazývá perkolační práh a má za následek, že následné přidání materiálu již nemá vliv na rezistivitu. Elektro vodivou síť lze nejlépe vytvořit z materiálů které jsou vodivé a mají jehlicovitý, podlouhlý tvar díky němu snadno převedou elektrický proud nevodivou maticí na delší vzdálenost, například uhlíkové nano trubičky, ocelová vlákna aj. Problém nastává, když tyto jehlicovité komponenty nejsou v přímém kontaktu, proto je vhodná kombinace použití s více druhy vodivých elementů nebo zvýšení jejich podílu v materiálu. Dále má na vodivost kompozitu vliv především hutnost, obsah vzduchových dutin, směrová orientace plniva, či drátků a také jejich rozptýlení v kompozitu. [2][3][4]

### **2.3 Principy vedení elektrického proudu v elektro-vodivých kompozitech**

Mezi základní typy elektrického vedení ve vodivých kompozitních materiálech patří přímé kontaktní vedení, tunelové nebo přeskokové vedené a iontové vedení. Elektrony procházejí vodivými elementy materiálu (vodivým plnivem), zatímco ionty pocházejí hmotou matrice, která zde působí jako elektrolyt. Dále je třeba říct, že vedení elektronů je účinné pouze u ocelových vláken a uhlíkových plniv, jako jsou uhlíková vlákna, uhlíkové nano trubičky / nanovlákna a saze.[2][3][4]

Je třeba také poznamenat, že skutečný mechanismus elektrického vedení vodivých kompozitních materiálů je ve své podstatě velmi složitý systém. Níže uvedené typy vodivosti koexistují v kompozitu a vzájemně spolu souvisejí. Vztah stejnosměrného elektrického odporu a času může naznačovat, mezi vedením tunelovým nebo přeskokovým a iontovým vedením, který z nich dominuje v elektrické vodivosti kompozitu. Když je dominantní iontové vedení, stejnosměrný elektrický odpor se očividně zvyšuje s dobou měření v důsledku polarizačního efektu; mezitím je elektrický odpor střídavého proudu konstantní. Navíc vztah proud-napětí může poskytnout indikaci, zda je elektrická vodivost kompozitu způsobená tunelováním/přeskokem nebo přímým kontaktem sousedních vodivých plniv. Vztah lineárního proudu a napětí naznačuje, že přímý kontakt sousedních vodivých plniv je dominantním vodivým mechanismem. Naproti tomu přeskoková vodivost by indukovala k nelineárnímu vztahu mezi proudem a napětím v elektrické vodivosti tohoto kompozitu.[5][6]

Veškeré elektro vodivé vlastnosti kompozitu přímo souvisí s charakterem a vlastnostmi plniva i matrice a vzájemné interakce mezi nimi, proto je nejjednodušším způsobem, jak tyto vlastnosti ověřit je pomocí experimentů. [2][3][9][10]

### **2.3.1 Přímé kontaktní vedení**

Tento typ vedení je způsoben přímým kontaktem sousedních vodivých částic, čímž vytváří vodivé spojení. Vedení je zde spojeno s pohybem elektronů, které protékají vodivými elementy, vzájemně spojenými s dalšími částicemi. Tento způsob vedení je nejstabilnější a nejlépe ovlivnitelný. Pro dosažení přímého kontaktního náboje materiálem je za potřebí dostatečně rozvinuté vodivé a vzájemně propojené sítě. Tento typ vedení nejvíce ovlivňuje množství vodivých komponent, a jejich distribuce v matrici. [6][8][17][18]

### **2.3.2 Přeskokové vedení, tunelové vedení**

K přeskokovému vedení dochází, když elektrony skočí přes energetické bariéry mezi vodivými komponenty v betonové matrici. Tunelové a přeskokové vedené jsou spojeny s přenosem elektronů mezi vodivými částicemi které nejsou v přímém, vzájemném kontaktu ale jsou přesto dostatečně blízko aby mohl elektron přeskočit. Tento způsob vedení přispívá k elektrické vodivosti kompozitním materiálům s různými vodivými plnivy kulovitěho tvaru. Pokud je vzdálenost mezi vodivými částicemi menší než 10 nm, může pak materiálem procházet elektrický proud, protože vzdálenost je už natolik nízká, že elektrony mohou přecházet skrz energetické bariéry oddělující vodivé částice. Pro tento typ vedení jsou nejvhodnější ostrohranná plniva jako jsou grafen, či nano trubičky. [18][19]

### **2.3.3 Iontová vodivost**

Hydratovaná cementová pasta obsahuje kromě hydratovaného C-S-H gelu křemičitanu vápenatého a dalších pevných fází i různé dutiny. Voda vyplňující tyto dutiny nebo póry může rozpouštět iontové částice, především  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{OH}^-$ , z pevných fází, což vede k určitému iontovému vedení propojenými kapilárními póry. Protože iontové vedení je spojené s pohybem iontů v roztoku

pórů, iontová vodivost se mění v obzvláště širokém rozmezí, protože materiály na silikátové bázi obsahují podstatné množství volné vody.

V suchých podmínkách se cementová matrice blíží izolačnímu materiálu.

Mnoho výzkumů prokázalo, že elektrické vedení ve vodivých kompozitech, zejména ve vodivém betonu s koncentrací plniva pod prahovou hodnotou perkolace, zahrnuje iontové vedení. Iontové vedení vede k elektrické polarizaci, která během měření odporu indukuje zvýšení měřeného stejnosměrného elektrického odporu vodivého kompozitního materiálu. Polarizace silně závisí na typu a koncentraci vodivého plniva a složkách betonové matrice. Dále je také potřeba zmínit že iontová vodivost s rostoucí teplotou silně vzroste. [8][9][18][19]

### **2.3.4 Dielektrické vlastnosti kompozitních materiálů**

Silikátová matrice kompozitu je dielektrikum, což je izolant, který má schopnost polarizace. Dielektrikum samo o sobě neobsahuje žádné volné elektrické náboje, a jeví se jako vodivě neutrální. Díky tomu že je matrice složena z velkého množství elementárních částic, které elektrický náboj obsahují, jako je například  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{OH}^-$ , a další ionty. Pomocí externího elektrického pole, které působí na tyto elementární částice lze změnit rozložení elektrického náboje v kompozitu, tento jev se nazývá polarizace. [19]

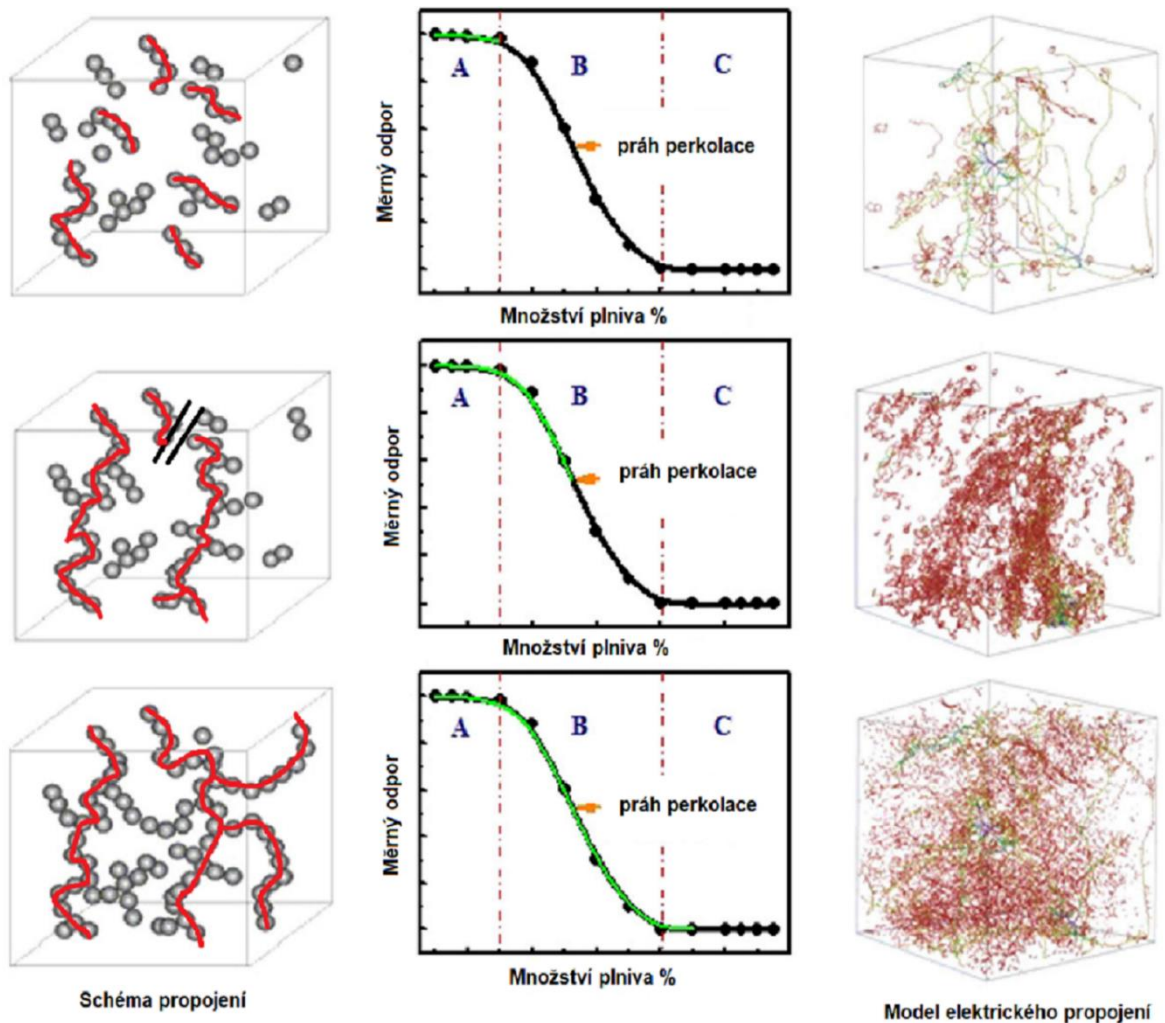
### **2.3.5 Perkolační teorie**

Bylo zjištěno, že elektrická vodivost závisí především na množství, typu a tvaru částic jejich chemickém složení, dispergaci v matrici a teplotě. Dle některých studií nastává přenos nábojů podél řetězce vodivých částic, které jsou v přímém kontaktu. Jiná teorie vychází z toho, že vedení se uskutečňuje hlavně tepelnou emisí elektronů štěrbinami mezi sousedními částicemi. Přenos nábojů mezi částicemi oddělenými nevodivou vrstvou matrice lze popsat přeskokovým mechanismem. Podle perkolační teorie se nosiče náboje pohybují mezi sousedními částicemi přeskokem přes energetickou bariéru, přičemž jejich střední volná dráha je určena vzdáleností přeskokových míst. [11][19]

Hlavním faktorem určujícím vodivost daného kompozitního materiálu je perkolační práh, jedná se o kritický procentuální obsah částic plniva, při kterém se začne daný materiál chovat jako vodič, z toho vyplývá že Perkolační práh je

vyjádřen v objemových procentech použitého elektro vodivého komponentu z celkového množství hmoty použité pro tvorbu materiálu.

Zásadní informaci o vodivosti kompozitního materiálu vypovídá perkolační křivka, jedná se o závislost elektrické vodivosti, popřípadě odporu na množství vodivého plniva v matrici. U většiny materiálů má tradiční esovitý charakter, v inflexním bodu křivky můžeme odečíst kritickou koncentraci, resp. perkolační práh. Zvyšováním obsahu částic v matrici při koncentraci, kdy se částice začnou dotýkat a vytváří makroskopickou síť vodivých řetězců (oblast perkolace) vodivost vzroste o několik řádů skokem a postupně se pak blíží k vodivosti plniva a elektrický proud se zde předává kontaktem. Pokud není v materiálu dosaženo perkolačního prahu, vnitřní struktura je sice vodivá ale převládá přeskokové šíření proudu, které je méně spolehlivé. Po překročení perkolačního prahu, vodivost kompozitního materiálu dále stoupá ale výrazně pomaleji. Dvojitá perkolace vzniká u kompozitních materiálů důsledkem více fázového složení, protože je práh perkolace jiný na rozhraní matrice/vlákno, vlákno/plnivo atd. Pro výrobu elektro vodivého kompozitního materiálu, je tedy vhodné volit množství elektricky vodivých komponent okolo prahu perkolace z hlediska spolehlivosti elektro vodivých vlastností při výrobě a ekonomickým faktorům pro využití elektricky vodivého plniva. [9][10][11][18]



Obrázek č. 3 Graf zobrazující perkolační křivku, perkolační práh a její oblasti vodivosti.[18]

Obrázek č.3 znázorňuje průběh perkolační křivky závislé na měrném odporu který s přidáváním elektricky vodivých elementů klesá, křivku lze rozdělit do tří oblastí:

- **Oblast A (izolant – pod perkolačním prahem):** kompozit již obsahuje malé množství vodivých elementů, avšak částice jsou od sebe daleko a jsou izolované, kompozitní materiál se jeví jako zcela nevodivý.
- **Oblast B (perkolace):** v kompozitu je větší množství vodivých komponent, vodivé částice v některých oblastech již tvoří propojenou strukturu, avšak není zcela propojená celým materiálem. Při silnějším proudu dochází k přeskokovému nebo tunelovému vedení. Měrný odpor začíná prudce klesat s dalším přidáním množstvím vodivých částic.

Vodivost v oblasti perkolačního prahu, ovlivňuje řada faktorů. Je to zejména distribuce plniva, jeho tvar či interakce mezi plnivem a matricí

- **Oblast C (vodivost–nad perkolačním prahem):** v matrici je již dosaženo perkolačního prahu, vodivé komponenty tvoří zcela propojenou a stabilní síť, dalším přidáním většího množství vodivých komponent se měrný odpor snižuje již výrazně méně a odpor kompozitu se blíží k odporu samotného elektro vodivého plniva, tvoří se další možné vodivé cesty a zvyšuje se tak stabilita vodivosti. [18]

## 2.4 Měrné veličiny spojené s vodivostí materiálů

### 2.4.1 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. [17][21]

### 2.4.2 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  $\text{Fe}=8,81 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ), polovodiče (např. křemík  $\text{Si} 3 \times 10^3 \Omega \cdot m$ ) a izolanty (např. sklo  $10^{11}$  až  $10^{16}$ ). [21]

### 2.4.3 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 měřicí přístroj. [17]

## 2.5 Využití elektro vodivých kompozitů

Vodivé kompozity lze rozdělit na dva druhy, vodivý vlákno kompozit a kompozity obsahující vodivé plnivo. V praxi se však nejčastěji využívá jejich kombinace pro dosažení synergetického působení.

Vodivé kompozity vyztužené vlákny vykazují vylepšené mechanické vlastnosti jako je pevnost v tlaku a v tahu, na druhou stranu mají sníženou vodivost kvůli malému kontaktu vlákno-vlákno tyto oblasti, které nenapojují elektro vodivou síť, vytvářejí „slepu cestu“ mezi vodivými materiály, jako jsou uhlíková a ocelová vlákna.

Kompozity obsahující vodivé plniva vykazují zvýšenou vodivost s hodnotou odporu 10-30  $\Omega \cdot \text{cm}$ , ale mají relativně nízkou pevnost v tlaku (méně než 25 MPa) která závisí na množství a typu daného plniva. Díky velkému měrnému povrchu těchto plniv je také zapotřebí vyšší obsah vody požadovaný během míchání k vyrovnání absorpce vodivými agregáty, jako je grafit, saze nebo koks. Zvýšení vodního součinitele vede k výraznému poklesu pevnosti v tlaku.

Největší potenciál využití vodivých kompozitů je v civilních strukturách. Díky schopnosti detekovat vnitřní napětí, přetvoření, praskání a poškození, samo snímací beton může nahradit zabudované nebo připojené senzory nebo detektory, které jsou nevýhodné díky vysoké ceně, nízké životnosti, omezeným snímacím objemem a degradaci. [3][4][9][14]

### 2.5.1 Elektricky vyhříváný silniční beton

Přibližně 10 až 15 % dopravních nehod jsou způsobeny ledem nebo sněhem na silnici. Betonové vozovky, a především mostovky jsou náchylné k

hromadění ledu. Použití posypových solí a chemikálií k odmrazování je účinnou metodou pro odstraňování ledu, ale způsobuje poškození betonu a korozi výztužné oceli v betonových konstrukcích. Sníh a led lze z vozovky odklízet buď mechanicky, nebo chemicky a tato údržba je poměrně drahá a nešetrná. Bylo prokázáno že třífázový kompozitní vodivý beton složený z ocelových vláken, uhlíkových vláken a grafitu lze využít jako efektivní materiál pro silniční povrch a zlepšení bezpečnosti na vozovkách v zimním období. Kompozit s měrným odporem do 400  $\Omega \cdot \text{cm}$  poskytuje uspokojivé tepelné účinky s ohledem na ekonomický faktor, které splňují požadavky na odmrazování vozovky. [3][4]

### **2.5.2 Odporové sledování kvality betonu neboli SHM (strukturnal Health Monitoring)**

Elektrický měrný odpor kvantifikuje schopnost materiálu postavit se proti toku elektrického proudu. Tato fyzikální charakteristika souvisí s povahou materiálu, homogenitou jeho pórovitostí a schopnosti vést elektrický proud. Cílem SHM je nepřetržitě kontrolovat strukturální chování konstrukce za různých povětrnostních podmínek, provozního zatížení a informovat inženýry o důležitých parametrech, jako jsou mechanické vlastnosti, rychlost koroze, vlhkost, PH, napětí, přetvoření nebo praskliny. Elektricky vodivé kompozity zde mohou sehrát důležitou roli k předcházení závažným nehodám civilních infrastruktur jakož jsou mosty, přehrady a silnice. Pro relevantní výsledky tohoto monitorování je za potřebí dlouhodobého sledování, vlhkost a další vnější povětrnostní vlivy mohou mít negativní vliv na výsledky. [6][9][14]

### **2.5.3 Katodická ochrana výztuže**

Katodická ochrana je jedna z předních metod ochrany nebo prevence proti korozi výztuže. Koroze je anodická reakce, která je výsledkem elektrochemických procesů na úrovni výztužné oceli. Tato metoda lze rozdělit na metodu, kdy je používán kov jako obětovaná anoda a výztuž jako chráněný kov (katoda), druhá metoda spočívá v použití anody z jiného vodivého materiálu s ochranným proudem, který je přiveden z externího zdroje stejnosměrného proudu. Sherif Yehia a Joshua Host (2010)<sup>[15]</sup> použili elektro vodivý kompozitní beton jako anodu, ze kterého byla následně odlita horní vrstva mostovky. Výsledky z tohoto výzkumu prokázaly že elektro vodivé kompozitní materiály jsou vhodným



materiálem pro tvorbu anody, v katodické ochraně výztuže typu ICCP (impressed current cathodic protection).[15]

#### **2.5.4 Využití elektro vodivých kompozitů pro monitorování dopravní situace**

Monitorování provozu je kritický element řízení dopravy. Stávající senzory, které se používají ke shromažďování a zpracování dat z provozu jsou ve většině případů zabudovány v chodníku nebo podél krajnice vozovky, díky tomu se snižuje jak životnost vozovky, tak i životnost samostatných senzorů. Samodetekující vodivý beton poskytuje nový způsob vývoje senzorů detekce vozidel a dopravní situace. Senzory vyrobené z elektro vodivých betonů mají hned několik výhod oproti běžným detektorům, jako je snadná instalace a údržba, široká detekční oblast, nízké náklady, vysoká odolnost proti rušení, dlouhá životnost a dobrá kompatibilita s konstrukcemi chodníků, protože jsou vyrobeny také z betonových materiálů. Senzory na bázi vodivých kompozitů dokážou detekovat mnoho důležitých provozních dat, jako jsou rychlosti toku provozu, rychlost vozidel, hustota provozu, a dokonce i vážení. [14][15]

#### **2.5.5 Stínění EMI (elektromagnetická interference – rušení signálů)**

Elektro vodivé kompozity se používají také k blokování elektromagnetického záření, zejména rádiových vln a mikrovln, za účelem ochrany elektroniky, zajištění budov proti mobilním telefonům a pro odrážení elektromagnetických forem sledování. Tyto opatření se nejvíce používají v nemocnicích na jednotkách intenzivní péče, kde by tyto signály mohly narušit jejich správnou funkčnost, ve vojenských prostorách, věznicích ale také například v automotive pro správné fungování vnitřní elektrotechniky.

Bylo zjištěno že efekt stínění odpovídá elektro vodivým schopnostem materiálu. Díky možnostem modifikace kompozitních materiálů pro EMI stínění lze upravovat stínění pouze pro požadované frekvenční pásma, což ostatní materiály neumožňují. [7][14][16]

### 2.5.6 Další možné využití

Dále se zkouší elektro vodivé kompozitních materiály pro aplikace jako snímače napětí, skladování energie, solární články, elektrody, super kondenzátory a inteligentní konstrukce. [10][10]

## 2.6 Elektricky vodivá plniva vhodná pro kompozitní materiály

Plniva představují diskontinuální fázi v kompozitních materiálech. Zavedení plniv do matrice lze upravovat mnoho fyzikálních, chemických i mechanických vlastností kompozitního materiálu, jako např. objemová hmotnost, pevnost v tlaku, pevnost v tahu, objemová stálost, tepelnou a elektrickou vodivost, propustnost par a plynů, nasákavost a mnoho dalších charakteristik. Dalším přínosem plniv může být snížení nákladů na výrobu.

Plniva pro použití v silikátových kompozitech můžeme nejlépe rozdělit dle tvaru a velikosti. Tvar zrna plniva je popsán štíhlostním poměrem, který je dán nejdelším rozměrem částice  $l$  a šířkou částice  $d$ . Plniva můžeme dle štíhlostního rozměru zařadit do symetrických s kulovým tvarem je-li jejich délka přibližně rovna šířce ( $l=d$ ) nebo jehlicovitý se štíhlostním poměrem ( $1 < l/d < 1000$ ).

Dle velikosti částic plniva můžeme rozdělit na hrubá se zrny od 125 mm do 4 mm, drobná s velikostí zrn do 4 mm včetně. U drobného kameniva je možno dále vyčlenit filer, což je kamenivo s velkým obsahem (minimálně 70 %) jemných částic pod 0,063 mm a nanočástice s velikostí 1 nm až 100 nm.

Jako elektro vodivá plniva se nejčastěji využívá plniv s vysokým obsahem uhlíku (nad 90 %) jako jsou například saze, uhlíkový prášek (grafit), mikro silika, uhlíková vlákna, uhlíkové nano trubičky a nanočástice jako je třeba grafen. Jako nejúčinnější se prokázala kombinace elektro vodivých plniv kulovitěho tvaru s jehlicovými trubičkami. Jelikož tyto plniva většinou výrazně snižují pevnost v tlaku i tahu je vhodné je dále kombinovat s vlákny ocelovými, které také přispívají ke snížení rezistivity materiálu.[3][9]

## **2.7 Druhy elektricky vodivých plniv a jejich vlastnosti**

### **2.7.1 Uhlíkové nano trubičky (CNT carbon nano tubes):**

Nano trubičky jsou vhodné v kombinaci s dalšími vodivými komponenty, kde zlepšují kontinuitu struktury mezi nimi a celkovou stabilitu elektrického odporu.

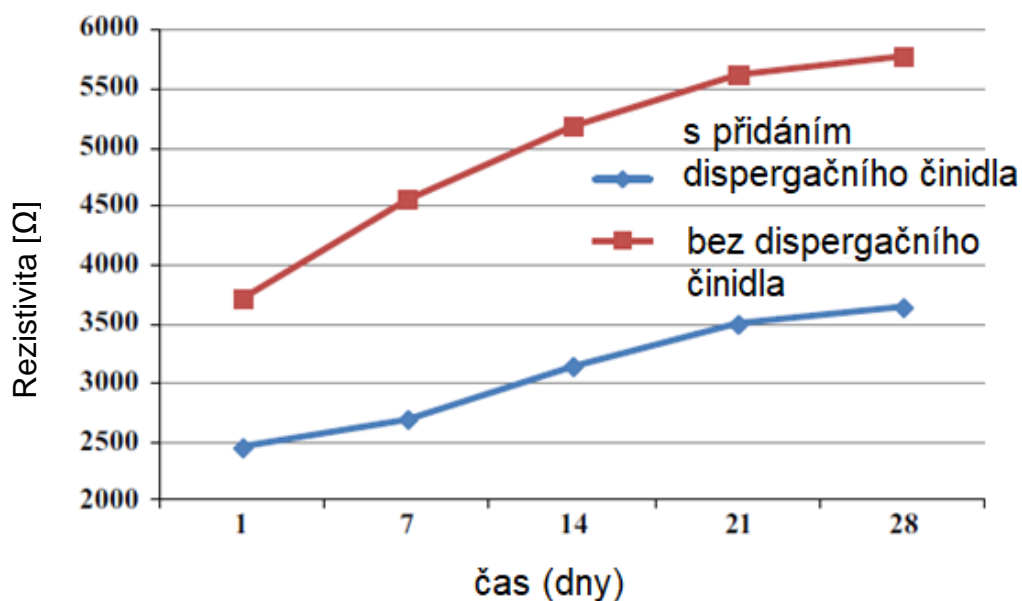
Pro el. vodivost CNT, velmi závisí na stupni rozmíchání, a dále na úhlu orientace uhlíkové roviny k dutině, dávkuje se buď objemově (cca 1 %) nebo hmotnostně (cca 0,005 %), dispergují se ultrazvukem v nosném mediu s povrchově aktivními látkami. Nejvíce se používají CNT o průměru 20-200  $\mu\text{m}$  s měrným povrchem 90-120  $\text{m}^2/\text{g}$ . Díky velkému měrnému povrchu mají náchylnost na tvoření shluků a fázově tak rozdělovat kompozit. Uhlíkové nano trubičky mají hydrofobní povrch, a proto mohou snižovat pevnost v tlaku kvůli nízké adhezi k cementové maltě a významně ovlivňovat konzistenci. Dále mají také menší vliv na tvorbu mikro trhlinek a díky tvaru mají lepší elektro vodivé vlastnosti jak grafitový prášek. Mezi další výhody využití nano trubiček je že zvyšují modul pružnosti a dokážou proud přenášet i při zatížení kde pomáhají odstranit mezery ve vedení způsobené mikro-trhlinami. Mezi nevýhody patří vysoká cena, která i při malých dávkách velice ovlivňuje výslednou cenu kompozitu. Odpor ( $1 \cdot 10^{-10} \Omega \cdot \text{m}$ ). [7][12][20]

### **2.7.2 Uhlíková vlákna (CF Carbon fiber)**

Uhlíkové vlákno patří mezi mikrokrytalické grafitové materiály, které se skládají z organických vláken prostřednictvím karbonizace a grafitizace. Uhlíková vlákna vynikají vysokou pevností v tahu (4-6 GPa), dobrou tepelnou vodivostí, která je u uhlíkových vláken stabilní jak za vysokých, tak i nízkých teplot, odolnosti proti únavě a nízkým koeficientem tepelné roztažnosti. Uhlíková vlákna v kompozitu také snižují autogenní smršťování a tvorbu hydratačních trhlin až o 20 %, což pomáhá k celistvosti a hutné, elektricky vodivé struktuře. Mezi nevýhody těchto vláken patří možné vnášení vzduchu do struktury, který je adsorbován na povrchu vláken, vysoká cena, poměrně obtížné rozptýlení vláken v matrici a ve většině případů nutnosti přidání dispergátoru.

Nejdůležitějším faktorem pro používání uhlíkových vláken jakožto vodivého materiálu je jejich distribuce v matrici, čím jsou vlákna delší a mají

menší průměr tím je těžší je v kompozitu rozptýlit. Obvyklé dávkování pro uhlíková vlákna jsou v řádu 0,2-1 % objemově, tj. 0,5-4 % hmotnostně z cementu, avšak nejvhodnější dávka je okolo 0,4-0,5 % obj. z cementu. Nejúčinnější byly shledány CF o délce 0,6 mm, které snížily hodnotu el. odporu až o 2 řády. Použití uhlíkových vláken však lze dokázat snížení rezistivity až na  $150 \Omega \cdot \text{cm}$ , přičemž odpor samotných vláken je  $(1,8 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot \text{m})$ . [3][7]



Obrázek č. 4 Porovnání závislosti rezistivity v čase v kompozitu s vlákny s dispergačním činidlem a bez, (převzato a upraveno) [3]

### 2.7.3 Saze (CB-Carbon Black)

Saze jsou tmavé prachovité částice, které vznikají při spalování organických paliv na bázi uhlíku za nedostatku kyslíku neboli při nedokonalého spalování. Dalším způsobem výroby spočívá v tepelném rozkladu nejčastěji zemního plynu, acetyleny nebo topných olejů.

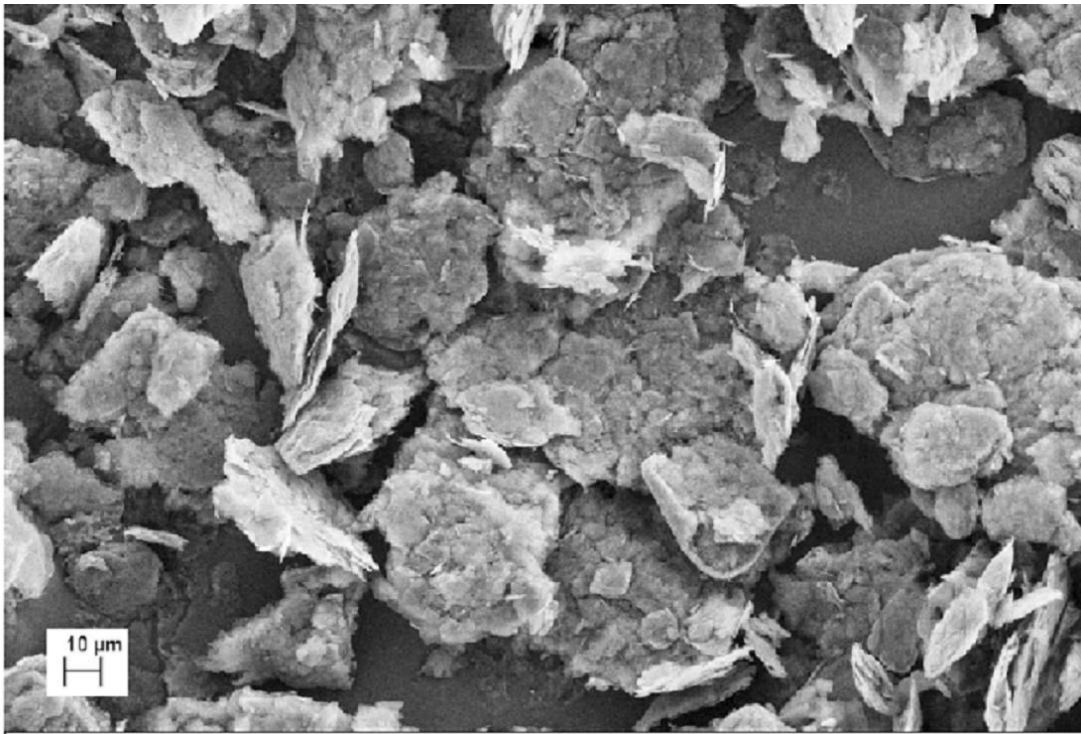
Skládají se z téměř kulatých primárních částic, které se shlukují do větších agregátů.

Pro použití jako plniva v kompozitních materiálech, velmi dobře tvoří propojenou strukturu, díky nepravidelnému tvaru částic. Jejich elektrická vodivost závisí především na fyzických a chemických vlastnostech daných sazí, které se liší technologií výroby i vstupními materiály. Při vyšších dávkách má sklony k tvorbě pórů a shluků, které negativně ovlivňují el. vodivost a vytvářejí nehomogenitu v kompozitu. Dále také snižují pevnost v tlaku a v tahu. Samy

osobě nemají velký efekt, ale v kombinaci například s CF dokážou zvýšit vodivost 2-10 x. Značnou výhodou je cena a dostupnost. Mimo jiné se také používají jako přísada pro snížení propustnosti vůči vodě a plynům a zlepšení zpracovatelnosti směsí nebo jako plnivo do kaučukových pneumatik, do inkoustů a tonerů. [7][9]

#### **2.7.4 Grafen (Graphene)**

Jeden z nejnovějších elektro vodivých materiálů na trhu. Jedná se o nanočástice uhlíku, které tvoří dvourozměrné lístečky. Vyrábí se pomocí štěpení krystalického grafitu, v suspenzi pomocí ultrazvuku. Druhou variantou výroby je grafit z oxidovat na oxidy uhlíku, které se dobře dělí, a následně se zredukují ve vodě, tato metoda je efektivnější ale mnohem dražší, v poslední době jsou i pokusy o alternativní způsoby výroby například Muramatsu a spol.<sup>[13]</sup>, navrhli výrobu z rýžových slupek. Grafen má jedinečnou kombinaci elektrických, optických, tepelně a elektro vodivých vlastností. Oblast použití grafenu je velmi široká, nachází uplatnění v biotechnologii, strojírenství, letectví, vesmírných programech, nano elektronice, medicíně, energetickém průmyslu aj. Materiály na bázi grafenových mono vrstev by mohly poskytnou nejcitlivější indikátory energetické intenzity a výkonu díky svým vodivým vlastnostem. Měrný povrch těchto nanočástic je teoreticky odhadnut na 2500 až 3000 m<sup>2</sup> / g a dokážou snížit odpor kompozitu až o 57 % oproti použití grafitového prášku. Mezi nevýhody tohoto nanomateriálu jsou především vysoká cena, problémy se zpracovatelností a nutnost použití vhodných ochranných pomůcek, díky velikosti a charakteru částic je zdraví nebezpečný. Musí se pro použití upravovat speciálními technologickými postupy jako je například rozmíchávání do suspenze pomocí ultrazvukových homogenizátorů. [13][13][14][20]



Obrázek č. 5 SEM foto nanočástic grafenu [20]

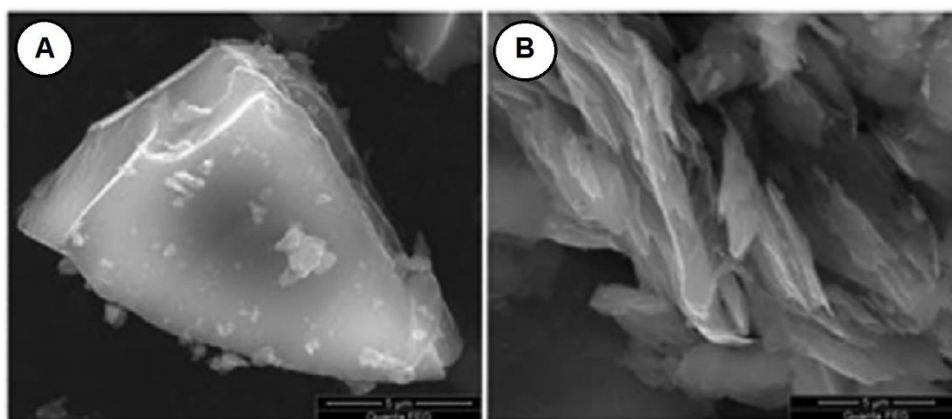
### 2.7.5 Grafit (GP-Graphite powder)

Grafit má dobré elektro vodivé vlastnosti, nejčastěji se využívá ve formě prášku, dobře se rozmíchává i dávkuje. Grafitový prášek významně snižuje pevnost v tlaku i tahu díky vysoké adsorbční kapacitě a špatné adhezi k cementovému tmelu stejně jako saze. Jelikož se jedná o částice s nízkým poměrem stran je potřeba aby se zásadně zvýšila vodivost kompozitu vyšších dávek okolo 10 % hmotnostně z celkového množství surovin, přičemž optimální dávka je okolo 7 % při zachování dobrých mechanických vlastností, Když je dávka grafitu větší než 20 %, pevnost v tlaku se sníží až na méně než 2 MPa. Odpor samotného prášku je  $(9,09 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m)$ . [5][7]

### 2.7.6 Antracit (Anthracite)

Antracit je běžné, vysokouhlíkaté uhlí, které obsahuje nejnižší obsah těkavých látek a nejvyšší obsah uhlíku který může dosahovat až 98 % oproti ostatním druhům jakožto je například hnědé uhlí, které se běžně používá v domácnostech s obsahem uhlíku do 80 %. Má podobné vlastnosti jako grafit a grafen

Velikost částic surového antracitu se pohybuje okolo 5  $\mu\text{m}$  a jsou nepravidelného tvaru. Antracit lze pro využití do elektro vodivých kompozitů tepelně upravit a zlepšit tak jeho vlastnosti. Antracit je možné upravit při teplotě na 2000  $^{\circ}\text{C}$  v  $\text{N}_2$  atmosféře, tím to technologickým postupem se rozpadne na mikro destičky podobné grafenu a je vhodnější pro tvorbu elektro vodivých materiálů. [16]



Obrázek č. 6 SEM snímky: A) surový antracit, B) tepelně upravený antracit [16]

Dávkování antracitu se pohybuje stejně jako uhlíku od 4-20 % obj. dle požadovaných výsledných vlastností výsledného kompozitu.

### 2.7.7 Ocelová vlákna (Steel fibers)

Ocelová vlákna mají velmi pozitivní vliv na mechanické vlastnosti kompozitu, především na pevnost v tahu za ohybu nebo pevnost ve smyku. Pro tvorbu elektro vodivých kompozitů se využívají jen zřídka. Ocelová vlákna jako samostatný vodivý element nejsou vhodná, protože cementová matrice na povrchu ocelového vlákna vytvoří pasivní film, který zvyšuje rezistivitu. Po jednom roce se rezistivita ocelových vláken vyztuženého betonu zvýší téměř 60 x. Zvýšené dávky vláken také způsobují shlukování, které má za následek špatnou zpracovatelnost směsi. Ocelová vlákna jsou vhodná pro použití v kombinaci s dalšími vodivými materiály jako jsou například uhlíkové nano trubičky a grafit. Vodivý efekt závisí stejně jako u CF na distribuci v cementovém tmelu, dále na průměru a délce vlákna. Další nevýhodou je možné vnášení vody díky absorpci na povrchu vlákna. Vodivost v polymerních kompozitech s časem klesá díky rzi. Mezi výhody patří především cenová dostupnost a vylepšení

mechanických vlastností. Díky svým vlastnostem se hodí pro odporově vyhřívané kompozity a uzemnění. [3][7]

### **2.7.8 Mikrosilika (Silica fume)**

Mikrosilika neboli křemičitý úlet, vzniká při výrobě elementárního křemíku nebo Ferro křemičitých slitin a řadí se mezi pucolány. Jedná se o tmavě šedé až bílé, velmi malé kulovité částice o rozměru 0,1 – 0,2  $\mu\text{m}$  s velmi vysokým měrným povrchem okolo 20 000  $\text{m}^2/\text{kg}$  a jsou složeny převážně z amorfního oxidu křemičitého 85-98 %. Objemová hmotnost je přibližně 200  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Dávkování mikrosiliky se pohybuje v rozmezí 3-8 % z hmotnosti cementu. Mezi nevýhody můžeme zmínit vysokou cenu která se pohybuje nad 20 000 Kč za 1 tunu.[23]

Využívá se především pro vylepšení chemických i mechanických vlastností, zlepšení voděodolnosti, chemické odolnosti a celkové trvanlivosti materiálu. Dále také snižuje riziko „bleed“ efektu, snižuje potřebné množství cementu a omezuje alkalicko-křemičitou reakci ASR.

Používá se především pro vysokopevnostní a vysokohodnotné betony a malty, betony a malty do agresivního prostředí, vysoce namáhané konstrukce, sanační hmoty, omítky.[23][26]

### **2.7.9 Koks (Coke)**

Koks je další modifikací uhlí, na rozdíl od antracitu je matný, vzniká při teplotách nad 1000  $^{\circ}\text{C}$  z nízko sirného černého uhlí v pecích tzv. „koksárny“ s omezeným přístupem kyslíku, nebo se získává z ropy. Koks je ocelově šedý, tvrdý, pórovitý materiál, který se skládá z téměř čistého uhlíku (až 99,5 %) a jeho spalováním vzniká téměř čistý  $\text{CO}_2$ . Dle vzniku můžeme rozlišit dva základní druhy koksu, na metalurgický (velmi čistý, vzniká z uhlí) a petrolejářský koks, který vzniká při zpracování ropy, tento druh se většinou upravuje tzv. kalcinací.

Petrolejový koks se používá především jako materiál při výrobě grafitových elektrod, uhlíkových pastových produktů používaných v mnoha aplikacích včetně elektrod a anod. Metalurgický koks se používá jako palivo a jako redukční činidlo např. ve vysoké peci nebo k výrobě železa. [24][25]



## 2.8 Druhotné suroviny pro vodivé kompozitní materiály

### 2.8.1 Druhotné suroviny

Druhotné suroviny jsou významnou součástí surovinové základny pro většinu druhů průmyslu. Díky využívání druhotných surovin je možné snížit spotřebu primárních surovin, které jsou ve většině případů neobnovitelné. Druhotné suroviny rovnocenně nahrazují a zároveň usnadňují technologické procesy při výrobě různých materiálů, a tak snižují energetickou i materiálovou náročnost produktů. [27][28]

Za druhotnou surovinu lze považovat suroviny vytvořené lidskou činností, které přestaly být odpadem nebo odpadem nejsou. Druhotná surovina slouží jako vstup pro výrobu a nahrazuje primární surovinu. Většinou mají charakter vedlejších produktů výroby, které splnily podmínky a kritéria, pro další použití. Druhotné suroviny můžeme dle vzniku rozdělit na:

- vedlejší produkty,
- upravené odpady,
- materiály získané z výrobků podléhajících zpětnému odběru a z dalších výrobků s ukončenou životností,
- nespotřebované vstupní suroviny a materiály předávané k novému využití

Mezi druhotné suroviny využívané ve stavebnictví patří například: vysokoteplotní popílek, křemičitý úlet, vysokopecní struska, ocelářská struska, [27][28]

### 2.8.2 Vhodné druhotné suroviny pro elektro vodivé kompozity

Druhotné suroviny vhodné pro použití ve výrobě elektro vodivých kompozitních materiálů můžeme rozdělit na tři skupiny:

- **Částečná náhrada cementu:** nejvhodnější náhradou cementu, která může vylepšit také elektrické vlastnosti kompozitu je vysokoteplotní popílek. Vlastnosti a složení popílků je proměnlivé a závisí na složení spalovaného uhlí, technologii a procesu spalování. Popílek je díky jeho složení považován za technogenní pucolán a přispívá k dlouho dobým pevnostem cementové matrice a díky obsahu zbytkového uhlíku zvyšuje

také elektro vodivé vlastnosti. Popílek dále zlepšuje odolnost vůči chemicky agresivnímu prostředí, odolnost vůči tlakové vodě, a snižuje vývin hydratačního tepla pro použití v masivních konstrukcích. [28]

- **Náhrada kameniva:** jako náhradu kameniva je vhodné použít materiály s odpovídající frakcí a nejlépe i s podobnými mechanickými vlastnostmi.
- **Částečná náhrada plniva:** vhodné jsou zejména suroviny s vysokým obsahem uhlíku. Pro náhradu elektro vodivého plniva je vhodný například odpadní grafit, který vzniká při výrobě primárního grafitu. Dále lze využít vodivých surovin na bázi železa, mědi nebo jiných vodivých materiálů.

## 2.9 Současné zkušenosti s vývojem vodivého kompozitu

Pro účely SHM (Struktural Health Monitoring), Monteiro a spol (2015)<sup>[9]</sup> testovali směsi malt s přidáním grafitu. Malta, která byla použita, byla složena z cementu CEM I a křemičitého písku v poměru 1:3 s vodním součinitelem  $w_c=0,5$ . Byly zkoušeny dávky grafitu 0 %, 4 % a 10 %. Super plastifikátor byl použit v různých procentech jako činidlo redukující vodu, čímž kompenzuje nedostatek vody potřebné pro hydrataci cementu (způsobený přidáním nanočástic CB, které mají vysokou adsorpční kapacitu). Pro každou kompozici byla vytvořena sada vzorků za účelem studia jejich elektrického měrného odporu a pevnosti v tahu / tlaku. Zkoušky byly prováděny na tělesech 40x40x160mm po 28mi dnech. Vodivé vlastnosti kompozitu byly sledovány pomocí 4 elektrod kterými byly měděné plíšky ve vzdálenostech 4 cm. [9]

Rhee, I. a spol <sup>[14]</sup> zkoušeni aplikaci grafenu do elektro vodivých malt na bázi cementu. Cementová malta se skládala z cementu, písku, mikro siliky s vodním poměrem  $w_c=0,5$  za použití plastifikátoru přidali 0,2 - 0,4 - 0,6 - 0,8 % obj. grafenu vyrobeného z rýžových slupek. Suchá směs byla míchána 10 minut a následně byla vytvořena tělesa krychle o straně 50 mm, které byly zkoušeny po 28mi dnech a po vysušení na 80 °C. Jako elektrody byly použity měděné destičky. V tomto výzkumu byly ověřeny elektro vodivé schopnosti grafenu v kombinaci s uhlíkovými nano trubičkami. [14]

### 3 CÍL PRÁCE

Cílem této diplomové práce je vývoj a výzkum silikátového kompozitního materiálu se sníženou impedancí na bázi druhotných surovin.

Primárním cílem je navrhnout a ověřit možnosti využití druhotných surovin pro tvorbu elektro vodivých kompozitů a zjištění jejich vlivu na elektro vodivé vlastnosti.

Dosažení hlavního cíle práce je podmíněno splněním dílčího cíle. Tím je nalezením optimální surovinové směsi na bázi primárních surovin. Cílem jsou dvě základní směsi, jedna na bázi jemných plniv a druhá na bázi hrubých plniv. Cílem je demonstrace základního vlivu zrnitosti na vodivé vlastnosti kompozitu. Po nastavení základních směsí je cílem prokázat vliv substituce jednotlivých složek kompozitu na jeho impedanci. Cílem je nahradit pojivovou složku, kamenivo a také primární vodivá plniva.

Dalším z dílčích cílů bude prokázání vlivu vlhkosti na elektro vodivé vlastnosti kompozitu.

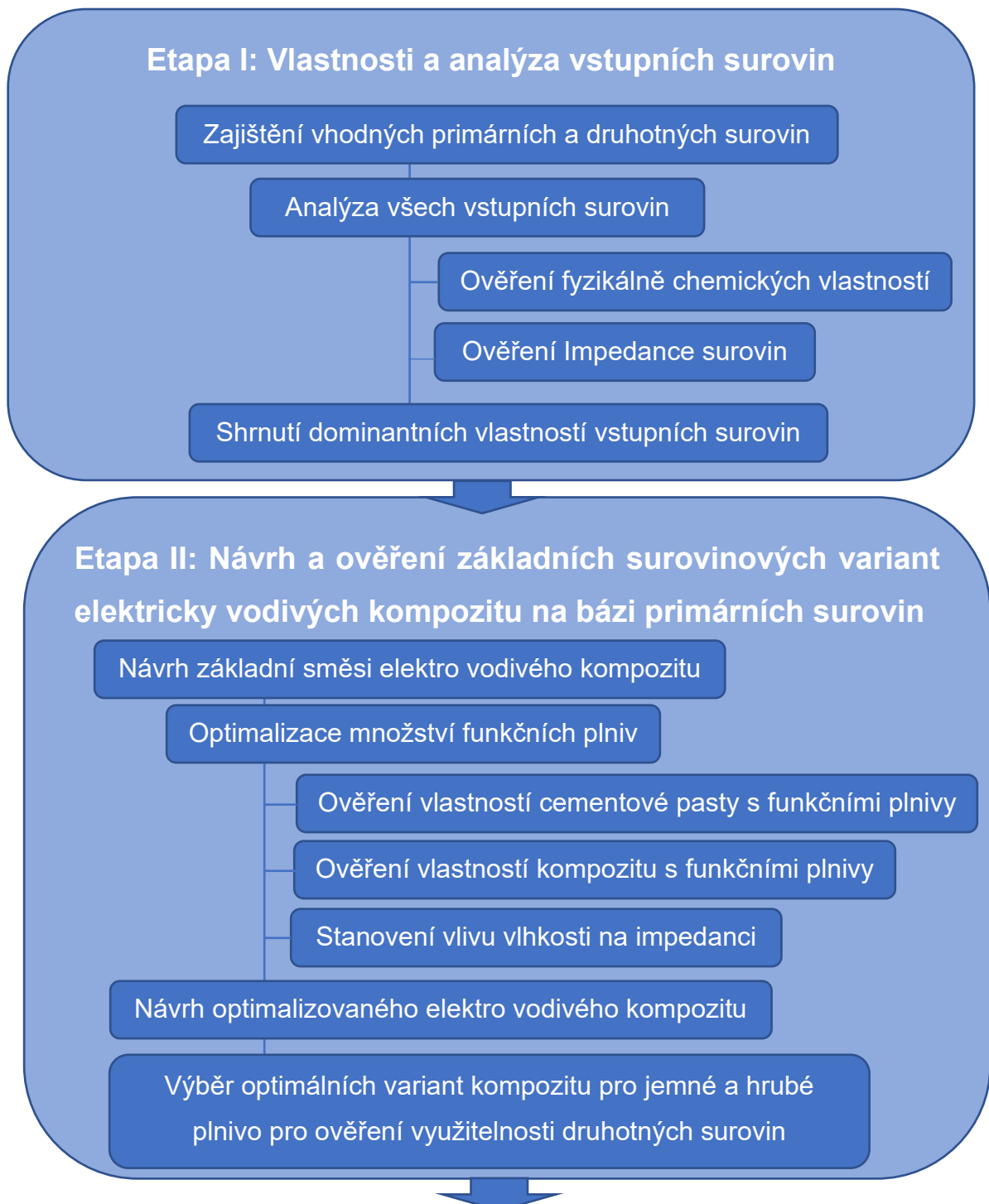
Závěrečným cílem práce je dosažení optimální kombinace náhrad jednotlivých komponent směsi, tak aby bylo dosaženo co nejnižší hodnoty impedance při zachování uspokojivých pevností kompozitu.

Poznatky uvedené v této diplomové práci budou dále využity pro budoucí elementární výzkum a experimenty v oblasti elektro vodivých kompozitních materiálů.

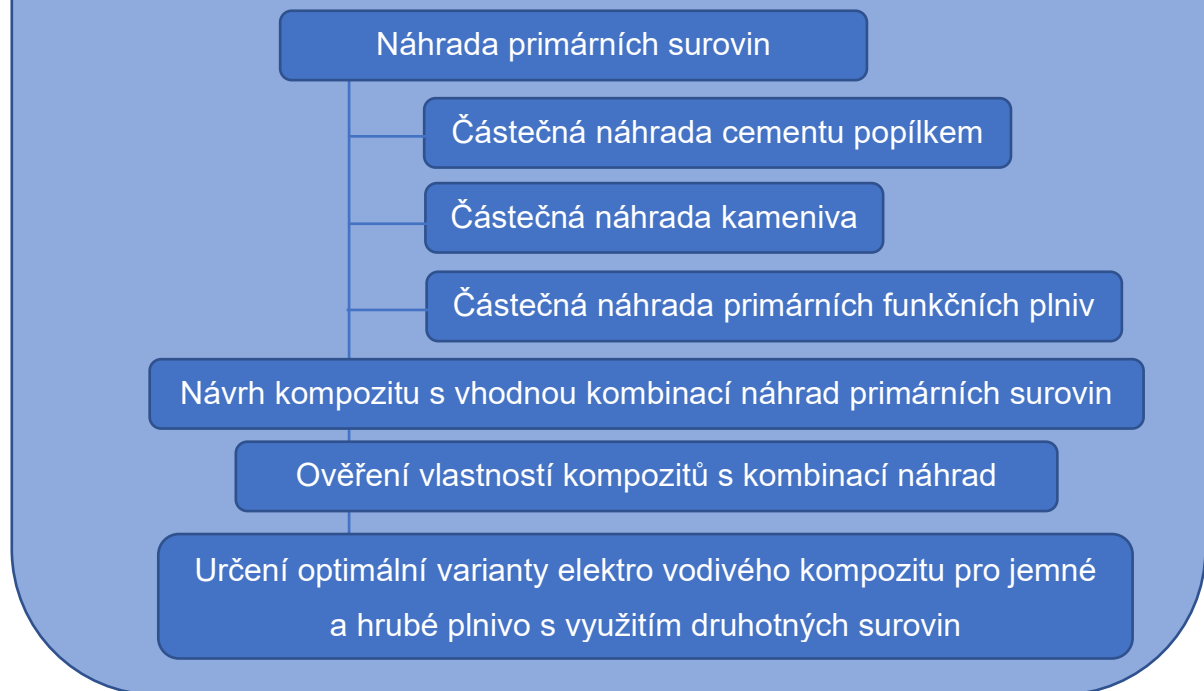
## 4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 4.1 Metodika práce

Experimentální část byla tematicky rozdělena do tří základních etap. První etapa bude zaměřena na analýzu vstupních surovin, druhá bude zaměřena na návrh elektro vodivého kompozitu z primárních surovin. Třetí etapa bude zaměřena na náhradu primárních surovin druhotnými. Stručné představení etap je popsáno ve schématu níže:



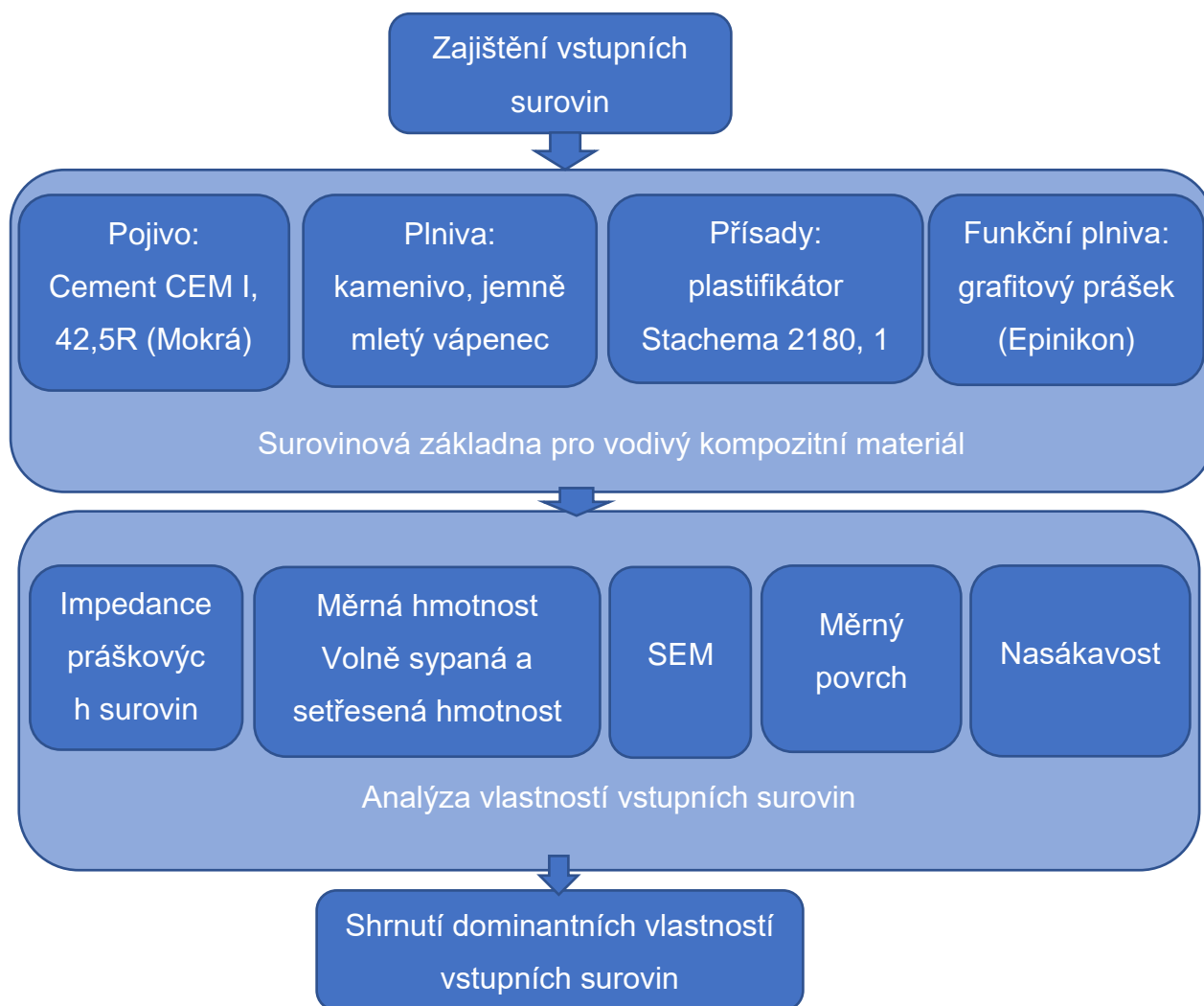
### Etapa III: Návrh elektro vodivého kompozitu na bázi druhotných surovin



Obrázek č. 7 Schéma metodiky práce

Jednotlivé etapy a jejich části jsou podrobněji popsány v následujících odstavcích

#### 4.1.1 ETAPA I : Vlastnosti a analýza vstupních surovin

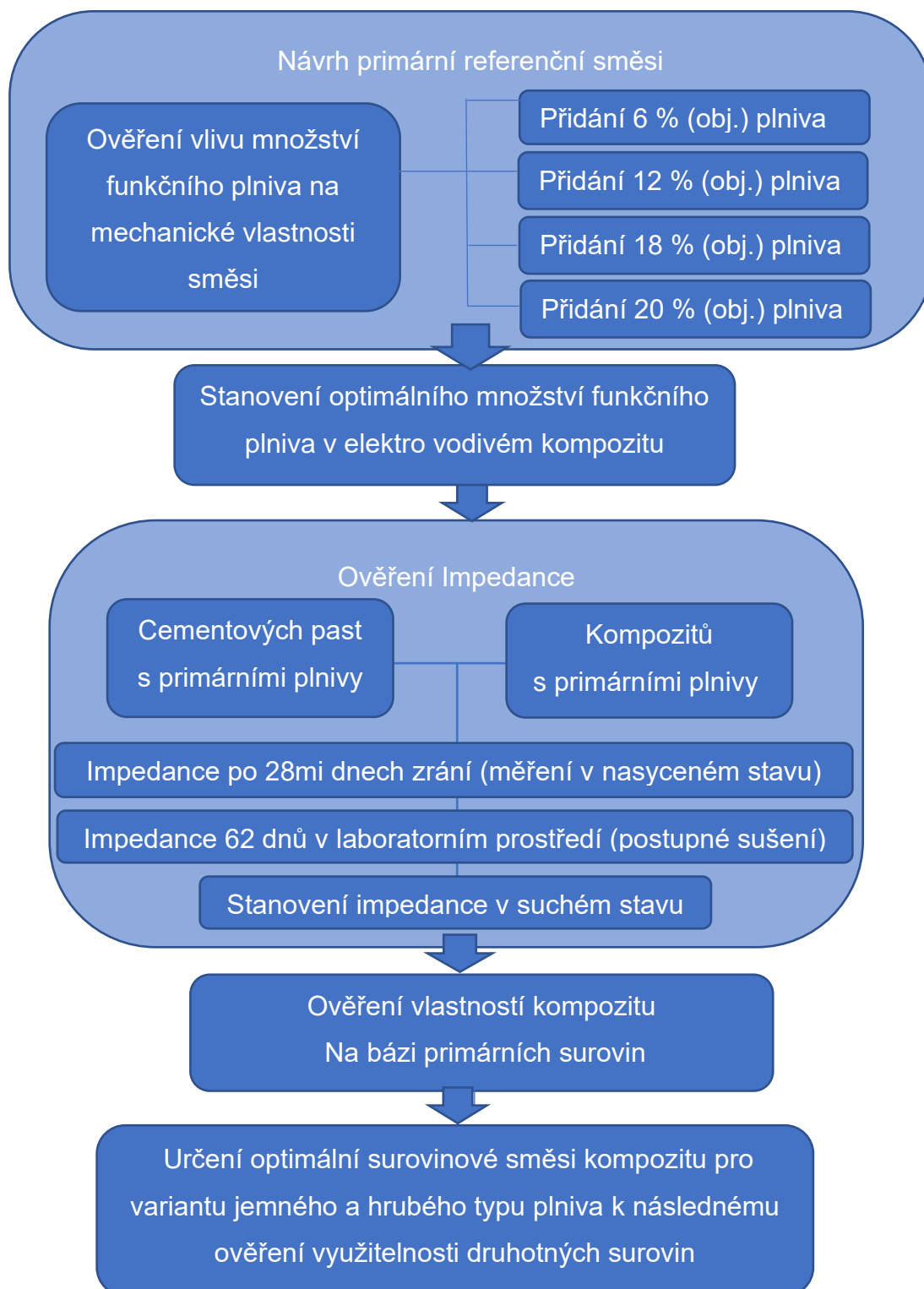


Obrázek č.8 Schéma ETAPY I

V první etapě experimentální části jsou definovány všechny vstupní suroviny použité v praktické části. Surovinová báze se bude skládat z cementu CEM I 42,5 R jakožto pojiva, dále plniva, kterými budou Provodínské písky různých frakcí a jemně mletý vápenec. Jako přísada bude použit plastifikátor od společnosti Stachema a jako funkční plniva budou použity hrubé i jemné typy grafitových prášků od společnosti Epinikon a.s.

Dále v této etapě stanovena impedance samotných surovin, měrná hmotnost, volně sypaná a setřesená hmotnost, vzorky budou zkoumány pomocí elektronového mikroskopu, dále bude stanoven měrný povrch metodou BET a nasákavost surovin pomocí Büchnerovy nálevky. V závěru etapy budou shrnuty nejdůležitější vlastnosti vstupních surovin.

#### 4.1.2 ETAPA II : Návrh a ověření základních surovinových variant elektricky vodivých kompozitu na bázi primárních surovin



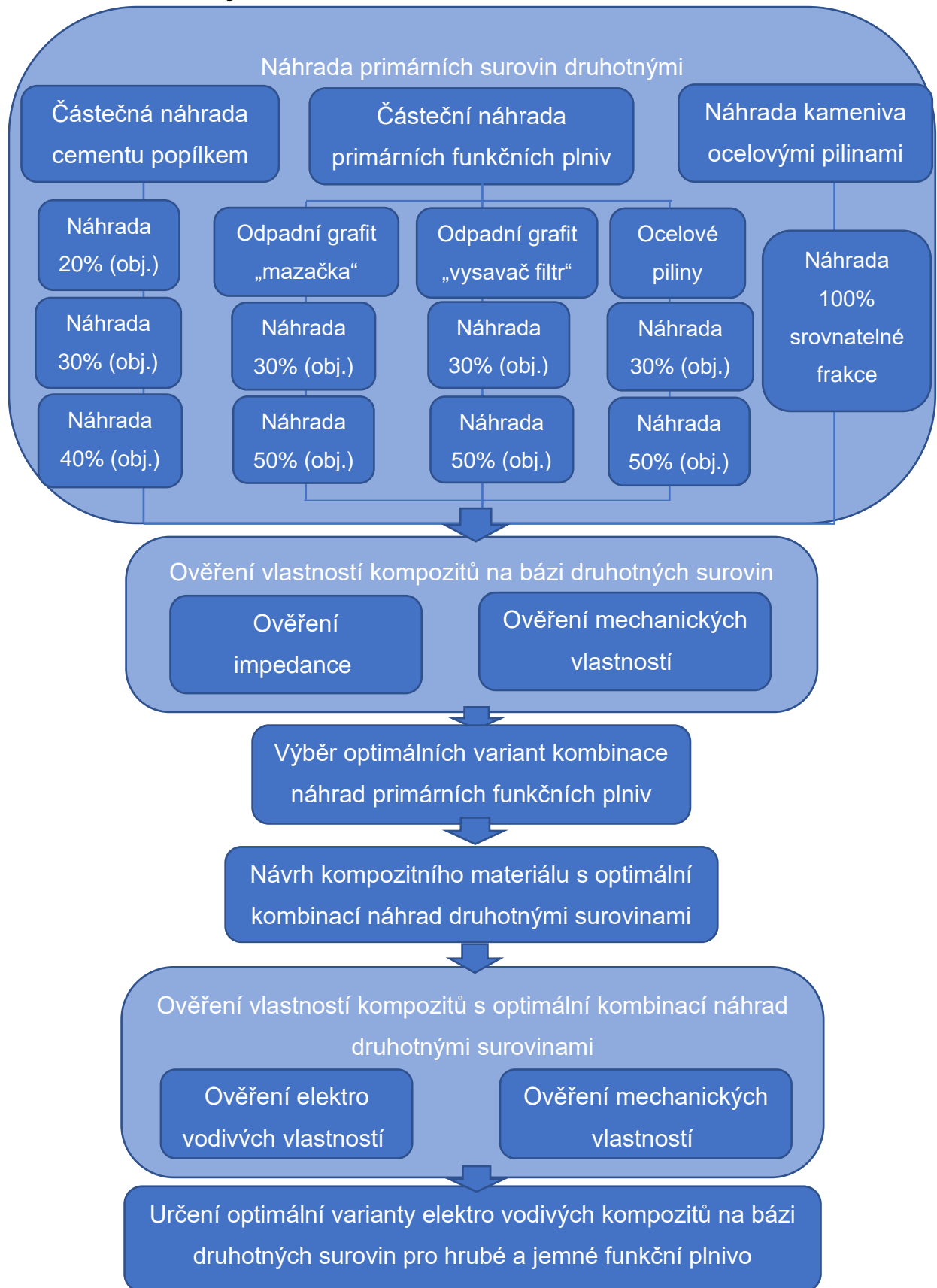
Obrázek č. 9 Schéma ETAPY II

V druhé etapě experimentální části bude navržena referenční směs na bázi primárních surovin. Následně budou nastaveny optimální dávky funkčních plniv v kompozitním materiálu pro zachování požadovaných mechanických vlastností.

Dále bude ověřena impedance cementových past s obsahem primárních plniv a impedance kompozitů s obsahem primárních plniv po 28mi dnech uložení ve vodním prostředí. Následně bude impedance měřena po dobu dalších 62 dnů v laboratorním prostředí. Na konci tohoto měření budou vzorky vysušeny a stanovena impedance v suchém stavu. Na základě těchto výsledku bude vybrána optimální surovinová směs kompozitu pro variantu jemného a hrubého typu plniva. V další etapě budou u těchto vybraných směsí otestovány možnosti náhrady primárních surovin za druhotné.



### 4.1.3 ETAPA III: Návrh elektro vodivého kompozitu na bázi druhotných surovin



Obrázek č. 10 Schéma ETAPY III

V třetí etapě experimentální části budou navrženy náhrady primárních surovin kompozitu za druhotné. Bude provedena částečná náhrada cementu CEM I 42,5 R Mokrý vysokoteplotním popílkem ArcelorMittal, náhrada kameniva odpadními ocelovými pilinami a náhrada primárních funkčních plniv odpadními grafity a ocelovými pilinami. Množství náhrady bude optimalizováno pro dosažení vhodných vlastností.

Na závěr této etapy budou vytvořeny kompozity s nejvhodnější kombinací náhrady cementu, kameniva a funkčního plniva za druhotné suroviny.

Budou ověřena jejich impedance i mechanické vlastnosti a bude určena optimální varianta elektro vodivého kompozitu na bázi druhotných surovin.

## 4.2 Metodika zkoušení surovin

### 4.2.1 Měření impedance práškových surovin

Impedance samotných práškových surovin je jedna ze důležitých vlastností funkčních plniv i ostatních vstupních materiálů, která nám může pomoci ve výběru nejvhodnějších surovin pro dosažení optimálních elektro vodivých vlastností. Impedance surovin závisí na chemickém složení, povrchové úpravě, schopnosti hutnit se a charakteru zrn zkoušeného materiálu, z tohoto hlediska je impedance zkoušena pouze na práškových surovinách.

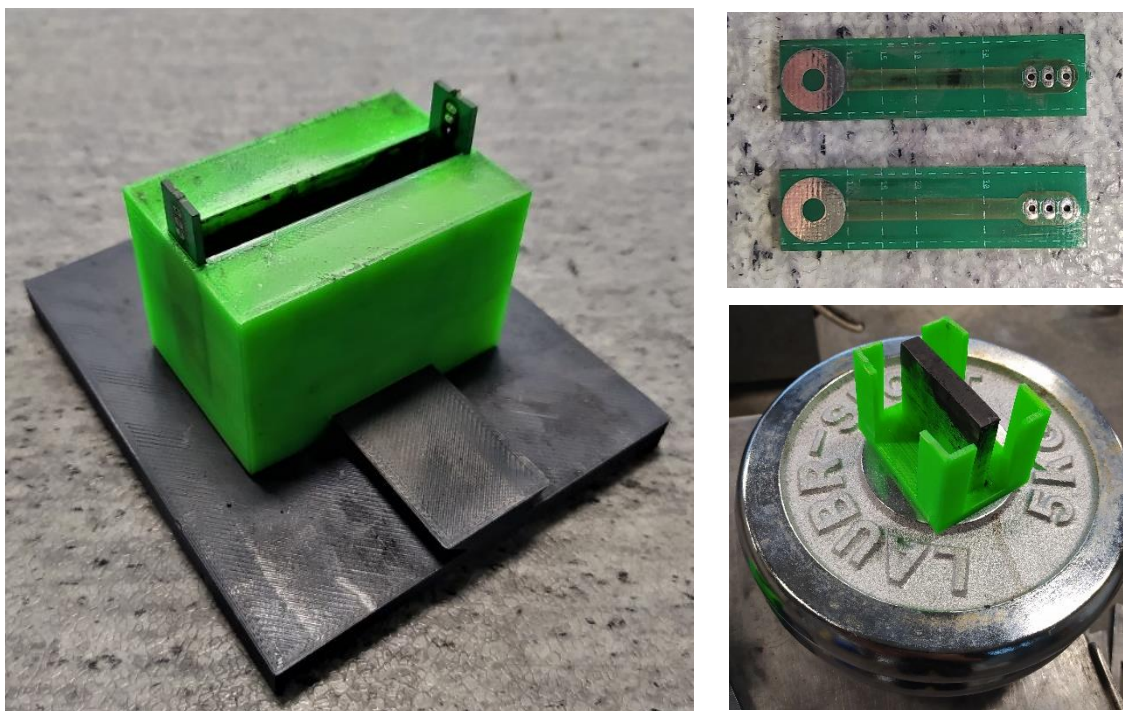
Jelikož nejsou dostupné předepsané normy a postupy pro tento typ měření, byla pro ověření impedance vytvořena vlastní metoda. Bylo dbáno na jednoduchost možnost opakovatelnosti měření. Pro měření byly vyrobeny měřící pomůcky, které byly následně připojeny k přístroji pro měření impedance.

#### **Pomůcky:**

1. Měřící přípravek s elektrodami (Obrázek č. 11)
2. Horní část přípravku s 10 kg závažím
3. Vibrační stůl (Obrázek č. 12)
4. Měřící přístroj GW Instek LCR-6020 (Obrázek č. 13)

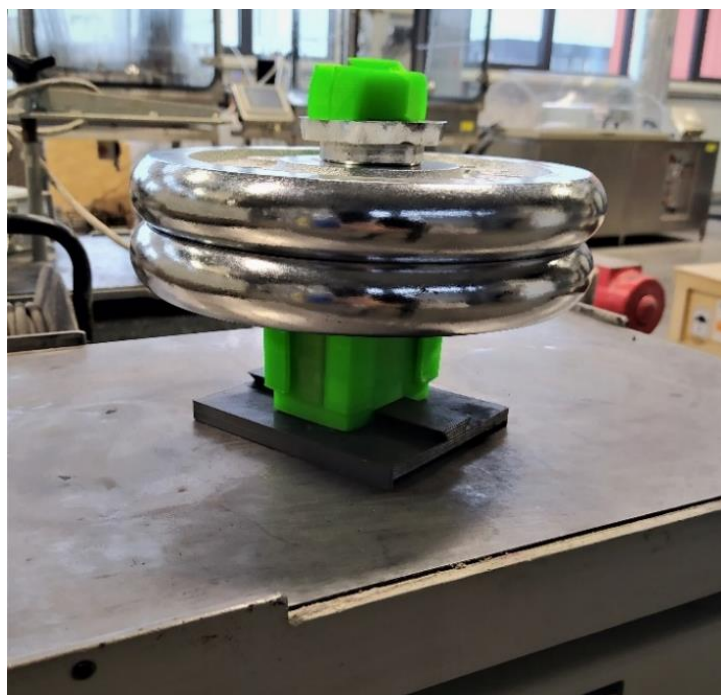
#### **Postup měření:**

1. Dílčí navážka se vloží do připraveného přípravku s elektrodami a mírně se stlačí dusátkem, přípravek se naplní přibližně do 70% kapacity přípravku.
2. Na přípravek se zatíží tlakem 100 N
3. Pomocí vibračního stolu se vzorek hutní pod tlakem 100 N po dobu 2 minut. Viz obrázek č.13.
4. Pomocí stolního měřícího přístroje GW Instek LCR-6020 se změří impedance suroviny.



Obrázek č. 11 Na levé straně přípravek pro měření impedance práškových surovin, nahoře vpravo detail elektrod, dole vpravo detail vrchní části přípravku se závažím pro docílení hutnicího zatížení. (foto autora)

Přípravek pro měření impedance (Obrázek č. 11) byl vytvořen pomocí 3D tisku z nevodivého plastu PTEG, měřicí komora je 1 cm široká a 5 cm hluboká, do přípravku jsou dále vloženy dvě protilehlé elektrody vzdálené 8 cm, které jsou po zhutnění suroviny následně připojeny k měřicímu přístroji.



Obrázek č. 12 Měřicí přípravek se vzorkem při hutnění na vibračním stole (foto autora)



Obrázek č. 13 Měření impedance grafitového prášku, Foto autora

Měřicí přístroj GW Instek LCR 6020 (Obrázek č. 12) měří přímo impedanci v  $[\Omega]$  fázový úhel ve  $[\circ]$  který, popisuje fázový posun mezi napětím a proudem tento přístroj bude následně použit i při stanovení impedance zkušebních vzorků.

#### 4.2.2 Sypná hmotnost volně sypaného kameniva

Sypná hmotnost volně sypaného kameniva byla stanovena dle normy ČSN EN 1097-3. Byla použita nádoba o objemu 1 litru, vyhovující pro kamenivo do  $D_{\max} = 4$  mm. [29]



### 4.2.3 Sypná hmotnost setřeseného kameniva

Sypná hmotnost setřeseného kameniva byla stanovena dle normy ČSN EN 1097-3, obdobně jako sypná hmotnost volně sypaného kameniva s rozdílem, že vzorek byl následně zhuštěn vibrací na vibračním stole. Měření bylo provedeno na váze s přesností na 2 desetinná místa viz. obrázek níže.



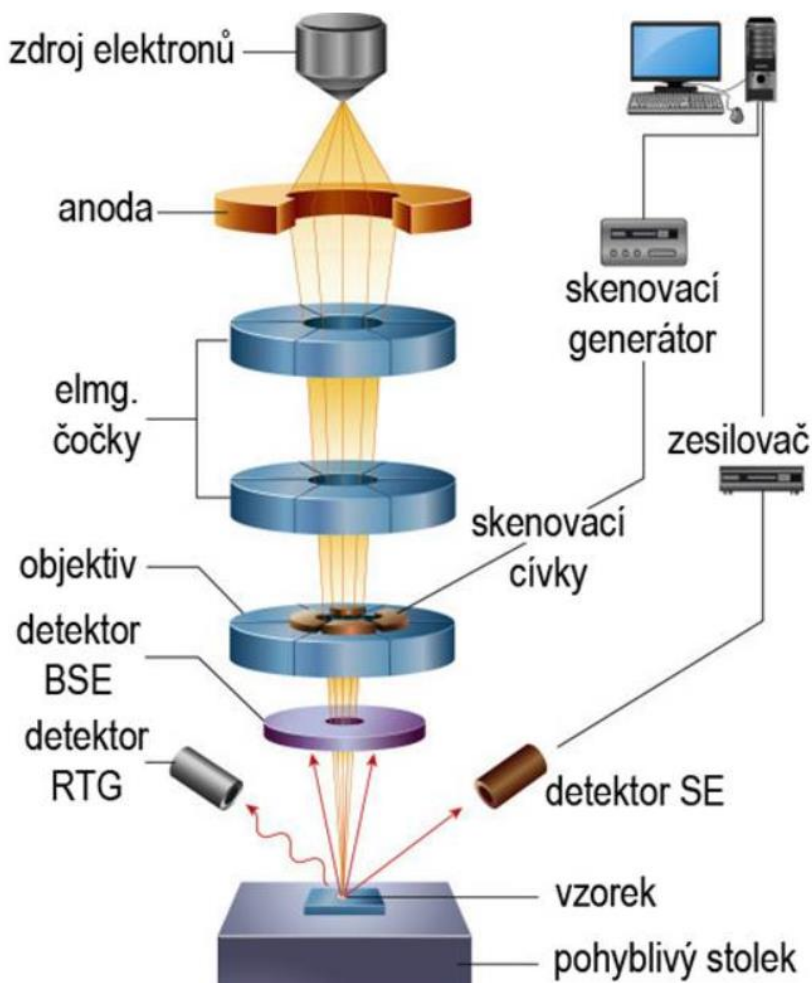
Obrázek č. 14 Měření sypných hmotností kameniva (foto autora)

### 4.2.4 SEM (scanning electron microscope)

Pomocí skenovacího elektronového mikroskopu byly analyzovány povrchové struktury částic funkčních plniv. Tato technologie využívá úzkého svazku paprsků elektronů, který vzniká v elektronové trysce pod velkým napětí (0,1 -30 kV), vzorek včetně paprsku je v hlubokém vakuu. Tryska bývá nejčastěji z wolframu. Když proud elektronů dopadne na vzorek, vytváří různé interakce, které jsou zachyceny pomocí detektorů a následně vyhodnoceny počítačem.

Názorný princip fungování elektronového mikroskopu je znázorněn níže. Výstupem je černobílý obraz povrchu částic. Tato technologie umožňuje zvětšení až 1 000 000x. SEM se v dnešní době hojně využívá v biologii, nanotechnologii i v jiných odvětvích. [30][31]

Snímky pořízené z toho mikroskopu nám mohou pomoci v objasnění některých vlastností, analýzy povrchu částic a chování funkčních plniv. Pro naše účely bylo použito zvětšení 50 až 10 000x.



Obrázek č. 15 Schéma skenovacího elektronového mikroskopu, převzato z [30]

#### 4.2.5 Měrný povrch

Měrný povrch funkčních plniv byl stanoven pomocí metody BET dle normy ISO 9277:1995 (E). Tato metoda využívá jednovrstvé či více vrstvé fyzisorpce molekul plynu jako je například dusík, na povrch testovaného materiálu při sníženém tlaku. Objem na adsorbovaného plynu se následně vyhodnotí. [32]

#### 4.2.6 Nasákavost surovin

Nasákavost byla stanovena pouze u funkčních plniv a druhotných surovin, které nejsou obvyklou součástí silikátových kompozitů. Protože funkční plniva jsou velmi jemné práškové suroviny, jejich nasákavost byla stanovena pomocí měřící soustavy s Büchnerovou nálevkou a vývěvou (Obrázek č. 16) dle ČSN EN 13055 (D). Nasákavost je značena  $WA(t)$ , kde „t“ vyjadřuje čas po který je nechán vzorek nasycen, v měření byl použit obvyklý čas  $t = 5$  minut. [33]



Obrázek č. 16 Měření nasákavosti dle ČSN EN 13055 (D) (foto autora)



#### **4.2.7 Měrná hmotnost**

Byla stanovena pomocí heliového pyknometru AccuPyc II 1340 Pycnometer, Tato pyknometrická metoda využívá pro stanovování měrných hmotností inertních plynů, jako např. hélia, či dusíku. Tato metoda je přesnější než stávající metoda využívající vody nebo lihu jakožto měřicího média. Měrná hmotnost částic se vypočte z poměru hmotnosti a objemu

#### **4.2.8 Objemová hmotnost**

Objemová hmotnost byla stanovena pomocí pyknometrické metody, měření bylo provedeno v lihu, kvůli špatné smáčivosti funkčních plniv. Celé měření bylo v souladu s normou ČSN EN 1097-6. [35]

#### **4.2.9 Stanovení distribuce částic a síťový rozbor**

Pro funkční plniva byla stanovena granulometrie, V případě dvou hrubých grafitů (Supragraphite UC 700 a Supragraphite C300) byla stanovena síťovým rozbořem v souladu s ČSN EN 933-1 na normové sadě sít. [34]

U Ostatních funkčních plniv byla granulometrie, kvůli velké jemnosti a charakteru částic, stanovena zrnitost metodou laserové difrakční analýzy v souladu s ISO 13320:2009 zařízením Malvern Mastersizer 2000. Princip této metody spočívá v neustálém toku částic vzorku, které osvětluje laserový paprsek, ten se následně ohýbá či rozpadá (difraktuje), následně ohnuté paprsky vytváří tak zvaný difrakční obraz, který je zachycen pomocí Fourierovy čočky. Z tohoto obrazu je pomocí Fourierovy transformace v počítači vytvořena křivka zrnitosti. Výhodou této metody je především možnost určit zastoupení velmi jemných částic, a možností rozdělení křivky dle libovolných frakcí. [36][37]

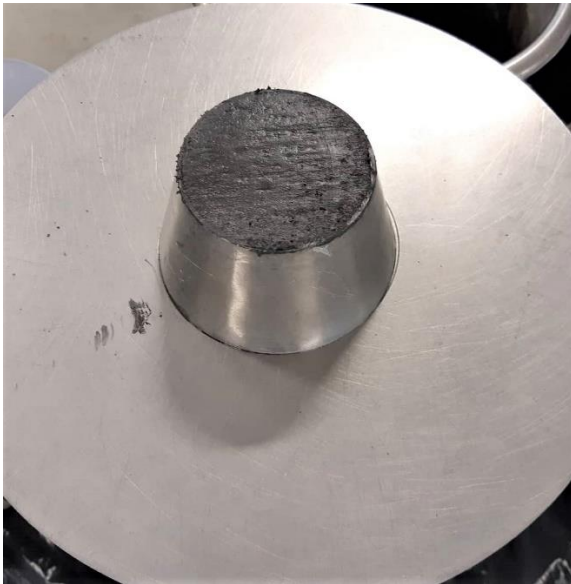
### **4.3 Metodika zkoušení kompozitů a cementových past**

#### **4.3.1 Stanovení zpracovatelnosti čerstvé směsi**

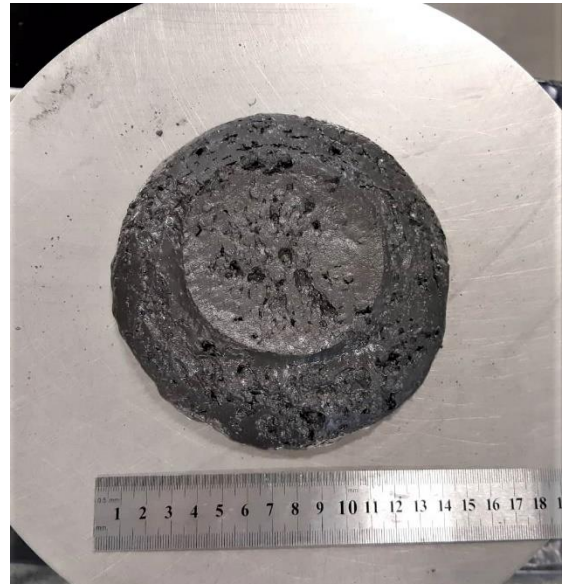
Při navrhování a optimalizace receptur bylo cílem zachovat stejnou zpracovatelnost čerstvé směsi. Toho bylo docíleno vhodným dávkováním záměsové vody. Zpracovatelnost směsí byla stanovena pomocí střešovacího stolku, který se běžně využívá při stanovení konzistence čerstvé malty. Byl využit

normový komolý jehlan o výšce 60 mm o spodním vnitřním průměru 100 mm a vnitřním horním průměru 70 mm včetně násypky dle ČSN EN 1015-3. Jediný rozdíl oproti normovému postupu je odlišná amplituda střešacího stolku. [46]

jakožto vhodná zpracovatelnost, bylo stanoveno rozlití  $150 \pm 10$  mm viz. obrázky následující obrázky.



Obrázek č. 17 naplněný komolý jehlan na zkoušku zpracovatelnosti (foto autora)



Obrázek č. 18 rozlití směsi při zkoušce zpracovatelnosti (foto autora)

#### 4.3.2 Výroba a uložení zkušebních vzorků

Dávkování bylo prováděno vždy po jednotlivých složkách směsi, nejprve byly dávkovány všechny suché materiály, které byly spolu homogenizovány v míchačce po dobu 2 minut. Záměsová voda byla dávkována postupně tak, aby byla suchá směs prvně navlhčena, poté se přidala plastifikační přísada rozmíchaná v 50 ml vody pro docílení vhodného rozptýlení. Následně se dodal zbytek vody potřebný k dosažení potřebné konzistence. Po zamíchání po dobu nejméně dalších 2 minut byla ověřena požadovaná zpracovatelnost hmoty na střešacím stolku.

Směs byla následně uložena do trojforem  $3 \times (40 \times 40 \times 160)$  mm) v obdobně jako v ČSN EN 196-1 a zhutněna na vibračním stole, v případě směsi kompozitního materiálu vibrační stůl neměl na hutnění směsi vliv a byla zhutněna mechanicky pomocí ploché stěrky. Po naplnění forem byly formy překryty neprodyšnou folií kvůli zamezení možného odpařování záměsové vody.

Následně byly vzorky po odformování uloženy do vodního prostředí, kde zrály 7 až 28 dní. [45]

Pro stanovení impedance, byly z připravených směsí past a směsí kompozitních materiálů vyrobena zkušební tělesa s rozměry 40x40x160 mm do kterých, byly vloženy měděné elektrody vzdálené od sebe 12 cm a 2 cm od kraje z každé strany viz následující obrázek. Pro ověření pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku byly zhotoveny tělesa s rozměry 40x40x160 mm bez elektrod.



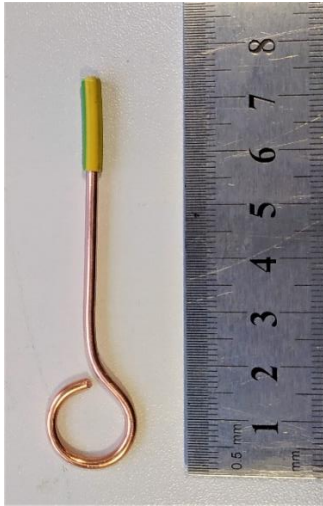
Obrázek č. 19 Troj forma se vzorky osazenými elektrodami pro měření impedance

#### 4.3.3 Měření impedance nově vytvořených těles

Stanovení impedance zkušebních vzorků bylo provedeno dle vlastní metody. Od každé receptury byla jedna trojforma se třemi tělesy osazena vyrobenými měděnými elektrodami, které byly od sebe vzdáleny 12 cm viz obrázek č.37. Tyto elektrody byly vyrobeny z měděného drátu o průměru 2,5 mm, který byl pomocí přípravku vytvarován. Na elektrodách byl záměrně ponechán 1,5 cm izolace kvůli zachování čisté části pro budoucí měření (viz Obrázek č. 20 na straně 52). Tyto elektrody byly vloženy do čerstvé směsi uložené ve formě, pomocí pravítka bylo docíleno přesné vzdálenosti 12 cm a okolí bylo pečlivě ztuhněno tak aby docházelo k přímému kontaktu s hmotou.

Impedance byla měřena po 7mi a 28mi dnech v nasyceném i vysušeném stavu. Měření v nasyceném stavu bude provedeno po vyjmutí vzorku z vody a následně bude povrchově osušen. Při stanovení impedance v suchém stavu budou vzorky vysušeny na 90 °C do konstantní hmotnosti.





Obrázek č. 20 Detail elektrody pro měření impedance (foto autora)



Obrázek č. 21 Těleso s elektrodami (foto autora)

Výhodou této metody měření impedance je zaručený plný a přímý kontakt materiálu s elektrodami a také velmi dobré zajištění elektrod proti vytrhnutí nebo ztráty kontaktu díky objemovým změnám materiálu.



Obrázek č. 22 Měření impedance těles pomocí přístroje GW Instek LCR-6020 (foto autora)

#### 4.3.4 Ověření mechanických vlastností

Na zkušebních tělesech ve ztvrdlém stavu byla stanovena pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu po 7 a 28 dnech zrání.

Pevnosti v tahu za ohybu byly stanoveny na zkušebních vzorcích o rozměrech 40x40x160 mm pomocí třibodového ohybu s rozpětím podpor 100 mm v souladu s ČSN EN 12390-5. Tělesa byly porušena tak aby nebyly namáhány způsobem, který by mohl narušit výsledky zkoušky pevnosti v tlaku. Následně byla zaznamenána maximální síla vyvozená při porušení vzorku a přepočtena na pevnost v tahu pomocí vztahu :

$$f_{cf} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2}$$

Kde je:

$f_{cf}$  pevnost v tahu za ohybu [MPa], zaokrouhleno na 0,1

F maximální síla při porušení vzorku [N]

l rozpětí podpor v [mm]

$d_1$  a  $d_2$  rozměry příčného řezu [mm] [47]

Na zlomcích těles ze stanovení pevnosti v tahu za ohybu byla stanovena pevnost v tlaku v souladu s ČSN EN 12390-4. Následně byla maximální vyvozená síla při porušení vzorku přepočítána na pevnost v tlaku pomocí vztahu:

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

Kde je:

$f_c$  pevnost v tlaku [MPa]

$F_c$  maximální zatěžovací síla při porušení [N]

A zkoušená plocha o velikosti 1600 mm<sup>2</sup> [48]

## **4.4 ETAPA I: Vlastnosti a analýza vstupních surovin**

V následujících odstavcích jsou uvedeny výsledky zkoušek a analýz provedených na vstupních surovinách. Jsou zde uvedeny všechny jejich dominantní vlastnosti včetně fotodokumentace jejich částic

### **4.4.1 Výběr vhodných vstupních surovin z dostupných zdrojů**

Vstupní suroviny byly vybrány na základě lokální dostupnosti, poznatků zpracovaných v teoretické části, vědeckých článků a odborných prací. Hlavním záměrem výběru nejvhodnějších surovin je dosažení co nejnižší možné impedance budoucího kompozitu při zachování použitelnosti s využitím druhotných surovin.

Kompozitní materiál na bázi silikátových pojiv se obvykle skládá z pojiva, nejčastěji cementu, dále kameniva v různých frakcích a plniva. Pro dosažení co nejnižší impedance je stěžejní množství použitého funkčního plniva na bázi uhlíku.

Směs navrhovaného elektro vodivého kompozitu se bude skládat z cementu CEM I 42,5 R, směsi kameniva a mikro mletého vápence, která bude navrhována pomocí ideální křivky zrnitosti dle Fullera, grafitového prášku, který bude použit jako funkční plnivo od společnosti Epinikon a.s. a plastifikační přísady od firmy Stachema.

Na vstupních surovinách budou provedeny měření impedance, měrná hmotnost pomocí heliového pyknometru, volně sypaná a setřesená hmotnost, objemová hmotnost, nasákavost práškových surovin pomocí Büchnerovy nálevky, budou pořízeny snímky SEM (scanning electron microscope) pro zjištění charakteru povrchu částic a jejich typu, a byl stanoven měrný povrch pomocí BET analýzy. Analýza vstupních surovin je především zaměřena na funkční plniva.

## 4.4.2 Analýza vstupních surovin

### 4.4.2.1 Pojiva

Jako pojivo pro námi navrhovaný silikátový kompozitní materiál byl zvolen portlandský cement. Portlandský cement je nejvíce využívaný druh cementu. Cementy patří mezi hydraulická pojiva a díky tomu po smíchání s vodou tuhnou i tvrdnou na vzduchu i ve vodě. Jelikož se v této práci bude cement nahrazovat druhotnými surovinami byl zvolen portlandský cement CEM I, který se skládá pouze z jedné hlavní složky, a to portlandského slínku (95-100 %), dále sádrovce (0-5 %), který zde slouží jako regulátor tuhnutí. Díky čistému složení je vhodný pro použití příměsí jako je popílek nebo struska. [39]

#### **Cement CEM I 42,5 R (Mokrý):**

K výrobě navržených elektro vodivých kompozitních materiálů byl použit Cement CEM I 42,5 R (Mokrý) od společnosti Česko Moravský Cement a.s. Tento cement je vhodný pro příprava betonu, malty, injektážní malty a jiných směsí pro stavění a pro výrobu stavebních výrobků, dále je vhodný pro betonové, železobetonové i předepnuté stavební konstrukce, drobné betonové dílce a velkorozměrové dílce, které jsou vystaveny velkému mechanickému zatížení. Jelikož se jedná o cement s označením R (rapid) má rychlejší nárůst pevností než běžný cement obdobné třídy. Základní vlastnosti cementu CEM I 42,5 R mokrý dle výrobce jsou shrnuty v tabulce č. 1, vybrané vlastnosti důležité pro tuto práci jsou uvedeny v tabulce č.2. [40]



Obrázek č. 23 Detailní foto cementu CEM I 42,5R Mokrý, jeden dílek = 1 mm (foto autora)

Tabulka č. 1 Základní charakteristiky cementu CEM I 42,5R Hranice dle EN 197-1 [40]

<b>základní charakteristiky :</b>	<b>Požadavky:</b>
Cement pro obecné použití příměsí a složení	CEM I
Pevnost v tlaku počáteční pevnost [MPa]	≥ 20,0
Pevnost v tlaku normalizovaná pevnost [MPa]	≥ 42,5 , ≤ 62,5
Počátek tuhnutí [min]	≥ 60
Objemová stálost [mm]	≤ 10,0
Nerozpustný zbytek [% hmot.]	≤ 5,0
Ztráta žíháním [% hmot.]	≤ 5,0
Obsah síranů (jako SO <sub>3</sub> ) [% hmot.]	≤ 4,0
Obsah chloridů [% hmot.]	≤ 0,1

Tabulka č. 2 Vybrané vlastnosti cementu CEM I 42,5 R Hranice

<b>Vybrané vlastnosti</b>	<b>CEM I 42,5R Mokrá</b>
Měrný povrch [m <sup>2</sup> /Kg]	Max. 350
Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	3100
Impedance [Ω]	7,76·10 <sup>6</sup>

#### 4.4.2.2 Plniva

##### Provodínské Písky

Tyto písky byly vybrány na základě jejich čistoty (podíl křemene nad 95 %), dostupnosti a možnosti výběru úzkých frakcí. Všechny písky jsou od společnosti Provodínské písky a.s. Velikost zrn byla zvolena od 0,1 do 4,0 mm, která je vhodná pro rozměry testovacích vzorků. Byly vybrány písky PR 1.6-4, PR 30/31 a PR 35. Vlastnosti a specifikace vybraných písků jsou uvedeny v tabulkách následujících tabulkách a také jsou vyfoceny detailní snímky. [41]

##### Písek PR 1.6–4



Obrázek č. 24 Detailní foto písku PR 1.6-4, jeden dílek =1 mm (foto autora)



Tabulka č. 3 Vybrané vlastnosti písku PR 1.6-4

<b>Vybrané vlastnosti:</b>	<b>PR 1.6-4</b>
Sypná hmotnost volně sypaná [kg/m <sup>3</sup> ]	1540
Sypná hmotnost setřeseného kameniva [kg/m <sup>3</sup> ]	1590
Nasákavost WA(5) [%]	3
Objemová hmotnost (pyknometricky) [kg/m <sup>3</sup> ]	3120
Velikost zrn [mm]	1,4 - 4

### **Písek PR 30/31**



Obrázek č. 25 Detailní foto písku PR 30/31, jeden dílek = 1 mm (foto autora)

Tabulka č. 4 Vybrané vlastnosti písku PR 30/31

<b>Vybrané vlastnosti:</b>	<b>PR30/31</b>
Sypná hmotnost volně sypaná [kg/m <sup>3</sup> ]	1460
Sypná hmotnost setřeseného kameniva [kg/m <sup>3</sup> ]	1600
Nasákavost WA(5) [%]	4
Objemová hmotnost (pyknometricky) [kg/m <sup>3</sup> ]	2630
Velikost zrn [mm]	0,3 - 1

### **Písek PR 35**



Obrázek č. 26 detailní foto písku PR 35, jeden dílek = 1 mm (foto autora)

Tabulka č. 5 Vybrané vlastnosti písku PR 35

<b>Vybrané vlastnosti:</b>	<b>PR 35</b>
Sypná hmotnost volně sypaná [kg/m <sup>3</sup> ]	1380
Sypná hmotnost setřeseného kameniva [kg/m <sup>3</sup> ]	1470
Nasákavost WA(5) [%]	11
Objemová hmotnost (pyknometricky) [kg/m <sup>3</sup> ]	3380
Velikost zrn [mm]	0,1 - 0,3

## Vápenec

Jako filer pro referenční směsi byl použit jemně mletý vápenec VBS 40 od společnosti LB Cemix s.r.o. z Výrobní Kotouč Štramberk. Vápenec VBS 40 je svou granulometrií vhodný do betonu, Vybrané vlastnosti tohoto vápence jsou uvedeny v tabulce č.7. [42]



Obrázek č. 27 Detailní foto Vápence VBS 40, jeden dílek =1 mm (foto autora)

Tabulka č. 6 Vybrané vlastnosti Vápence VBS 40

<b>Vybrané vlastnosti:</b>	<b>Vápenec VBS 40</b>
Sypná hmotnost volně sypaná [kg/m <sup>3</sup> ]	1050
Sypná hmotnost setřeseného kameniva [kg/m <sup>3</sup> ]	1190
Nasákavost WA(5) [%]	22
Objemová hmotnost (pyknometricky) [kg/m <sup>3</sup> ]	2660
Impedance [ $\Omega$ ]	$33,10 \cdot 10^6$
Velikost zrn [mm]	0 - 0,4

### 4.4.2.3 Přísady

#### Plastifikační přísada STACHEMENT 2180.1

Byla zvolena superplastifikační vodo redukující přísada na bázi polykarboxylátu od společnosti Stachema. STACHEMENT 2180.1 se používá při výrobě prefabrikovaných betonových dílců. Výrobek lze po odzkoušení aplikovat

i při výrobě transport betonu, SCC, monolitických betonových konstrukcí, lehkého betonu, průmyslových podlah a jiné. Vlastnosti této plastifikační přísady jsou uvedeny v tabulce č.8. [43]

Tabulka č. 7 Vlastnosti plastifikační přísady STACHEMENT 2180.1 [43]

<b>Vybrané vlastnosti:</b>	<b>STACHEMENT 2180.1</b>
Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	1055 ± 20
Obsah sušiny [% hmot.]	25 ± 2
Maximální obsah chloridů [% hmot.]	0,1
Maximální obsah alkálií [% ekv. Na <sub>2</sub> O]	2
Doporučená dávka [% z hmot. Cementu]	0,4 - 1,4

#### 4.4.2.4 Primární funkční plniva

Jakožto funkční primární plniva byly vybrány grafitové prášky od firmy Epinikon a.s. Byly vybrány syntetické i přírodní typy, různých frakcí, přičemž byly zastoupeny nejhrubší i nejjemnější typy. Grafitové prášky mají rozdílný obsah uhlíku a některé mají dle sdělení producenta vylepšené elektro vodivé vlastnosti.

Použité grafitové prášky jsou rozděleny v následující tabulce.

Tabulka č. 8 Základní rozdělení použitých grafitových prášků

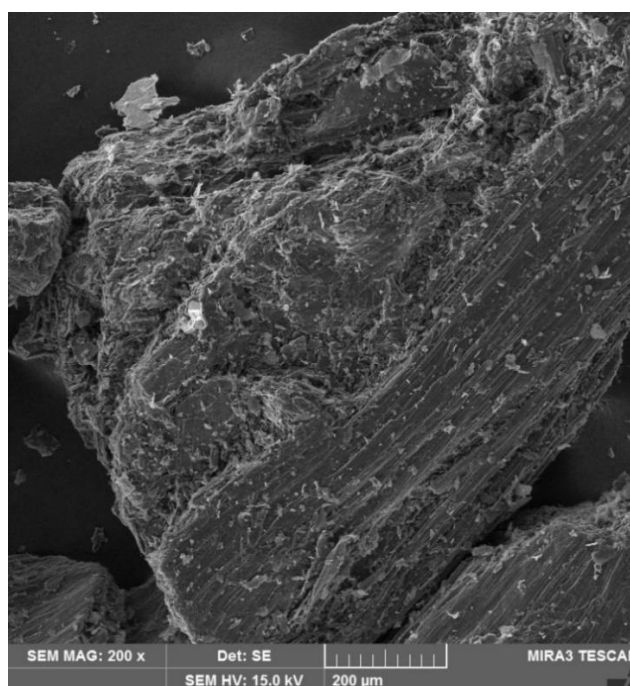
<b>Typ plniva:</b>	<b>Název:</b>	<b>Geneze:</b>	<b>Poznámka:</b>
<b>Hrubý</b>	Supragraphite UC700	Syntetický	-
	Supragraphite C300	Přírodní	
<b>Jemný</b>	Micrographite F10	Přírodní	
	Micrographite C4	Přírodní	
	Micrographite UC4	Syntetický	
	Condufit F8	Přírodní	
	Condufit C4	Přírodní	

## Supragraphite UC 700

Grafitový prášek vyráběný firmou Epinikon a.s. Jedná se o synteticky vyrobený grafit, který se skládá z minimálně 99 % uhlíku a maximálně 1 % popela. Velikost průměru zrn dle výrobce je 0,15 mm – 2,8 mm.



Obrázek č. 28 Detailní foto Supragraphite UC 700, jeden díl= 1 mm, (foto autora)



Obrázek č. 29 SEM foto částice Supragraphite UC 700 (foto autora)

Tabulka č. 9 Vybrané vlastnosti grafitu Supragraphite UC 700

Vybrané vlastnosti:	Supragraphite UC 700
Sypná hmotnost volně sypaná [kg/m <sup>3</sup> ]	740
Sypná hmotnost setřeseného kameniva [kg/m <sup>3</sup> ]	830
Nasákavost WA(5) [%]	11
Objemová hmotnost (pyknometricky) [kg/m <sup>3</sup> ]	2050
Měrná hmotnost (heliový pyknometr) [kg/m <sup>3</sup> ]	2200
Měrný povrch [m <sup>2</sup> /Kg]	237
Impedance [Ω]	0,51
Typ částic	Nepravidelné

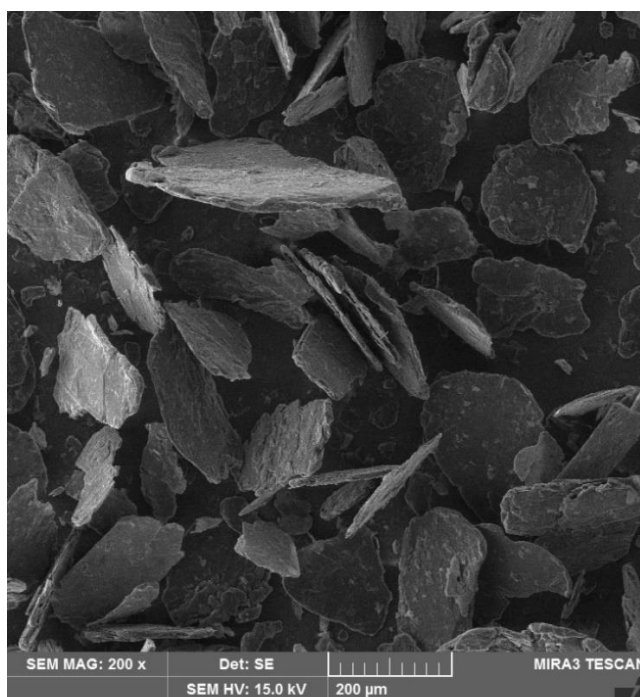


## Supragraphite C300

Supragraphite C300 je vločkový přírodní grafit od společnosti Epinikon a.s. je vyrobený v Jižních Čechách. Tento grafitový prášek je složen z minimálně 99,5 % uhlíku, maximálně 0,5 % popelu. Maximální vlhkost je 0,5 %. Zrnitost udávaná výrobcem je 60-80 % částic o průměru nad 100  $\mu\text{m}$ .



Obrázek č. 30 Detailní foto Supragraphite C300, jeden díl= 1 mm, (foto autora)



Obrázek č. 31 SEM foto částic Supragraphite C300, (foto autora)

Tabulka č. 10 Vybrané vlastnosti grafitu Supragraphite C300

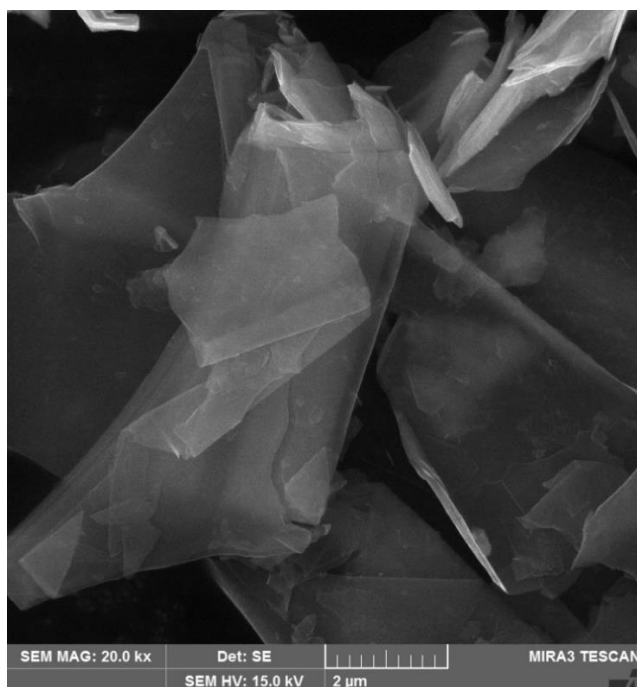
Vybrané vlastnosti	Supragraphite C 300
Sypná hmotnost volně sypaná [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	450
Sypná hmotnost setřeseného kameniva [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	550
Nasákavost WA(5) [%]	26
Objemová hmotnost (pyknometricky) [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	2200
Měrná hmotnost (heliový pyknometr) [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	2250
Měrný povrch [ $\text{m}^2/\text{Kg}$ ]	1194
Impedance [ $\Omega$ ]	0,90
Typ částic	Ploché vločky

## Micrographite F10

Micrographite F10 je mikro mletý přírodní grafit od společnosti Epinikon a.s. Tento mikro mletý grafitový prášek je složen z minimálně 96 % uhlíku, maximálně 4 % popelu. Maximální vlhkost je 0,5 %. Zrnitost udávaná výrobcem 50 % částic 7,0 – 11,0  $\mu\text{m}$ .



Obrázek č. 32 Detailní foto Micrographite F10, jeden díl= 1 mm, (foto autora)



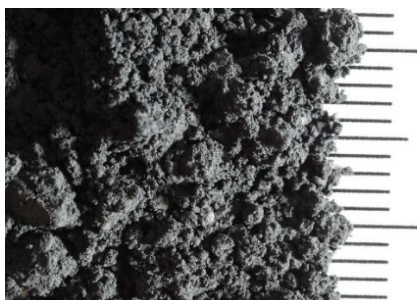
Obrázek č. 33 SEM foto částic Micrographite F10, (foto autora)

Tabulka č. 11 Vybrané vlastnosti grafitu Micrographite F10

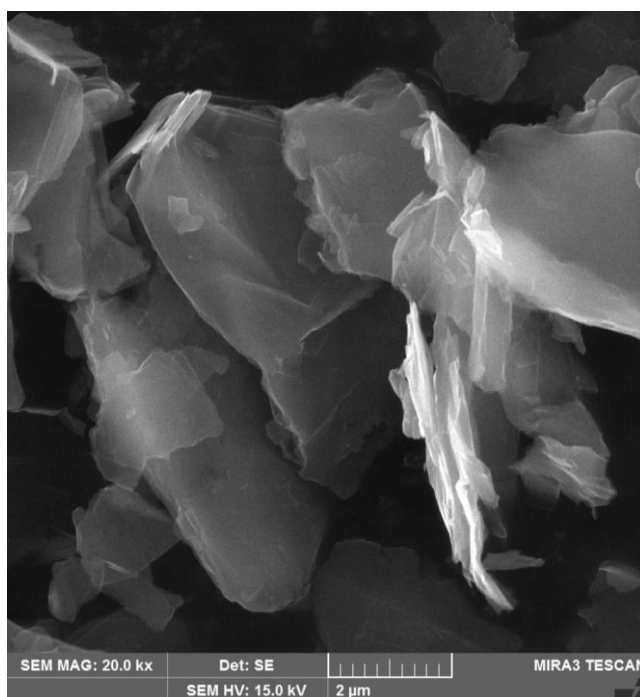
<b>Vybrané vlastnosti:</b>	<b>Micrographite F10</b>
Sypná hmotnost volně sypaná [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	200
Sypná hmotnost setřeseného kameniva [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	240
Nasákavost WA(5) [%]	132
Objemová hmotnost (pyknometricky) [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	2050
Měrná hmotnost (heliový pyknometr) [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	2490
Měrný povrch [ $\text{m}^2/\text{Kg}$ ]	6287
Impedance [ $\Omega$ ]	1,09
Typ částic	Ploché, nepravidelné

## Micrographite UC4

Micrographite UC4 je syntetický mikro mletý grafitový prášek. Tento mikro mletý grafitový prášek je složen z minimálně 99,0 % uhlíku, maximálně 1,0 % popelu. Maximální vlhkost je 0,5 %. Velikost částic, udávaná výrobcem je 3,5 – 5,0  $\mu\text{m}$



Obrázek č. 34 Detailní foto Micrographite UC4, jeden díl= 1 mm, (foto autora)



Obrázek č. 35 SEM foto částic Micrographite UC4, (foto autora)

Tabulka č. 12 Vybrané vlastnosti grafitu Micrographite UC4

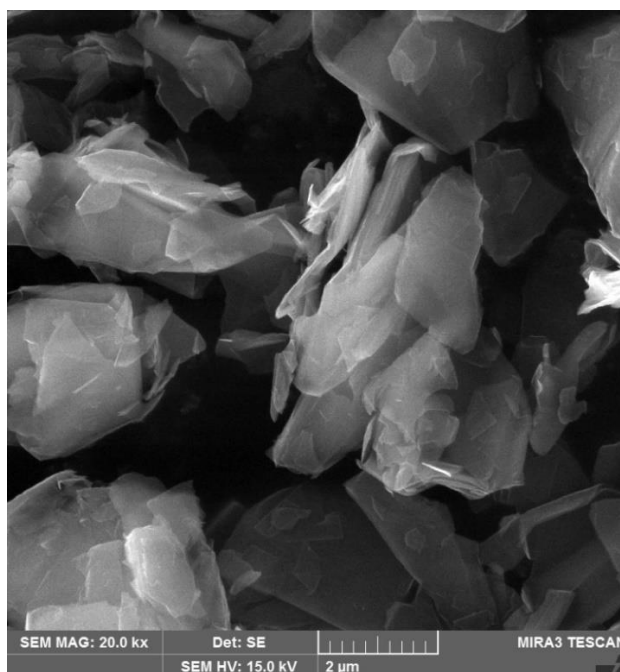
<b>Vybrané vlastnosti:</b>	<b>Micrographite UC 4</b>
Sypná hmotnost volně sypaná [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	170
Sypná hmotnost setřeseného kameniva [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	220
Nasákavost WA(5) [%]	174
Objemová hmotnost (pyknometricky) [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	2060
Měrná hmotnost (heliový pyknometr) [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	2650
Měrný povrch [ $\text{m}^2/\text{Kg}$ ]	12454
Impedance [ $\Omega$ ]	1,13
Typ částic	Ploché, nepravidelné

## Micrographite C4

Micrographite C4 je mikro mletý přírodní grafit od společnosti EPINIKON a.s. Tento mikro mletý grafitový prášek je složen z minimálně 99,5 % uhlíku, maximálně 0,5 % popelu. Maximální vlhkost je 0,5 %. Zrnitost udávaná výrobcem je 50 % částic o průměru 3,5 – 5,0  $\mu\text{m}$ .



Obrázek č. 36 Detailní foto Micrographite C4, jeden díl= 1 mm, (foto autora)



Obrázek č. 37 SEM foto částic Micrographite C4, (foto autora)

Tabulka č. 13 Vybrané vlastnosti grafitu Micrographite C4

<b>Vybrané vlastnosti:</b>	<b>Micrographite C4</b>
Sypná hmotnost volně sypaná [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	150
Sypná hmotnost setřeseného kameniva [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	190
Nasákavost WA(5) [%]	172
Objemová hmotnost (pyknometricky) [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	2100
Měrná hmotnost (heliový pyknometr) [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	2500
Měrný povrch [ $\text{m}^2/\text{Kg}$ ]	11933
Impedance [ $\Omega$ ]	1,66
Typ částic	Nepravidelné

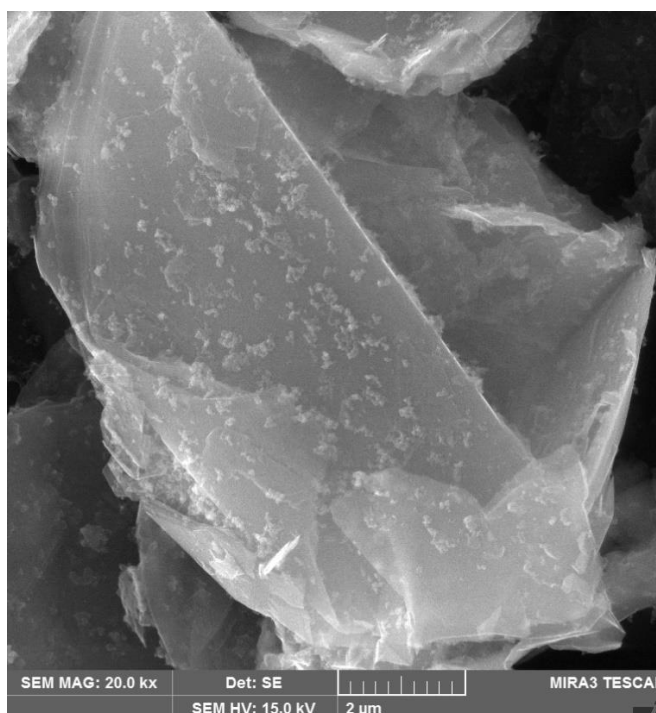


## Condufit F8

Condufit F8 je mikro mletý přírodní grafit s vylepšenými elektro vodivými vlastnostmi od společnosti EPINIKON a.s. Tento mikro mletý grafitový prášek je složen z minimálně 96,0 % uhlíku, maximálně 4,0 % popelu. Maximální vlhkost je 0,5 %. Zrnitost udávaná výrobcem je 50 % částic o průměru 7,0 – 9,0  $\mu\text{m}$ .



Obrázek č. 38 Detailní foto Condufit F8, jeden díl= 1 mm, (foto autora)



Obrázek č. 39 SEM foto částice Condufit F8, (foto autora)

Tabulka č. 14 Vybrané vlastnosti grafitu Condufit F8

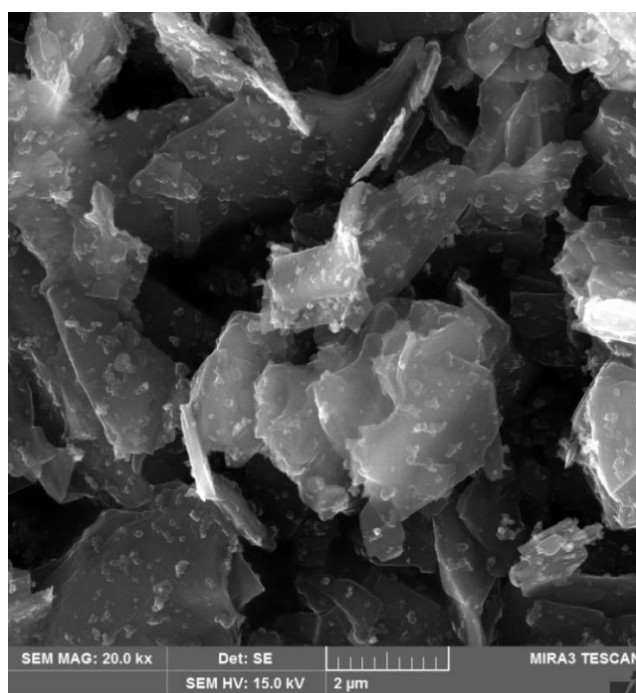
Vybrané vlastnosti:	Condufit F8
Sypná hmotnost volně sypaná [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	190
Sypná hmotnost setřeseného kameniva [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	250
Nasákavost WA(5) [%]	215
Objemová hmotnost (pyknometricky) [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	2150
Měrná hmotnost (heliový pyknometr) [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	2400
Měrný povrch [ $\text{m}^2/\text{Kg}$ ]	16094
Impedance [ $\Omega$ ]	0,99
Typ částic	Nepravidelné s hrubým povrchem

## Condufit C4

Condufit C4 je mikro mletý přírodní grafit s vylepšenými elektro vodivými vlastnostmi od společnosti EPINIKON a.s. Tento mikro mletý grafitový prášek je složen z minimálně 99,5 % uhlíku, maximálně 0,5 % popelu. Maximální vlhkost je 0,5 %. Zrnitost udávaná výrobcem je 50 % částic o průměru 3,5 – 5,0  $\mu\text{m}$ .



Obrázek č. 40 Detailní foto Condufit C4, jeden díl= 1 mm, (foto autora)



Obrázek č. 41 SEM foto částic Condufit C4, (foto autora)

Tabulka č. 15 Vybrané vlastnosti grafitu Condufit C4

<b>Vybrané vlastnosti:</b>	<b>Condufit C4</b>
Sypná hmotnost volně sypaná [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	180
Sypná hmotnost setřeseného kameniva [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	230
Nasákavost WA(5) [%]	190
Objemová hmotnost (pyknometricky) [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	2100
Měrná hmotnost (heliový pyknometr) [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	2410
Měrný povrch [ $\text{m}^2/\text{Kg}$ ]	20418
Impedance [ $\Omega$ ]	1,43
Typ částic	Nepravidelné s hrubým povrchem

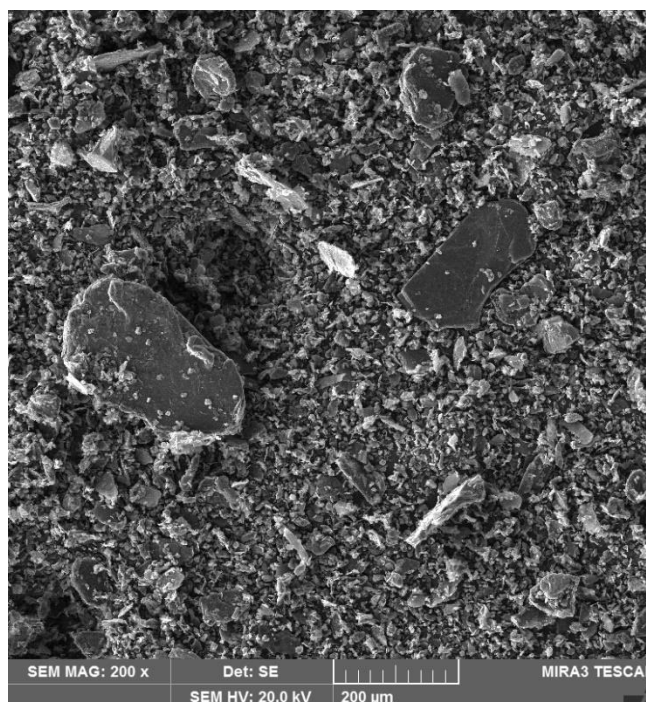
#### 4.4.2.5 Druhotné funkční plniva

##### Odpadní grafit „filtr mazačka“

Tento druh odpadního grafitového prášku je směs jemných grafitových prášků s možností minimálního množství příměsí dalších prášků jako je například celulóza. Tento typ odpadního grafitu dodala také společnost EPINIKON a.s.



Obrázek č. 42 Detailní foto „filtr mazačka“, jeden díl= 1 mm, (foto autora)



Obrázek č. 43 SEM foto částic odpadního grafitu „filtr mazačka“, (foto autora)

Tabulka č. 16 Vybrané vlastnosti odpadního grafitu „filtr mazačka“

Vybrané vlastnosti:	Odpadní grafit „filtr mazačka“
Sypná hmotnost volně sypaná [kg/m <sup>3</sup> ]	450
Sypná hmotnost setřeseného kameniva [kg/m <sup>3</sup> ]	540
Nasákavost WA(5) [%]	105
Objemová hmotnost (pyknometricky) [kg/m <sup>3</sup> ]	2310
Impedance [Ω]	0,76
Typ částic	Nepravidelné, různé

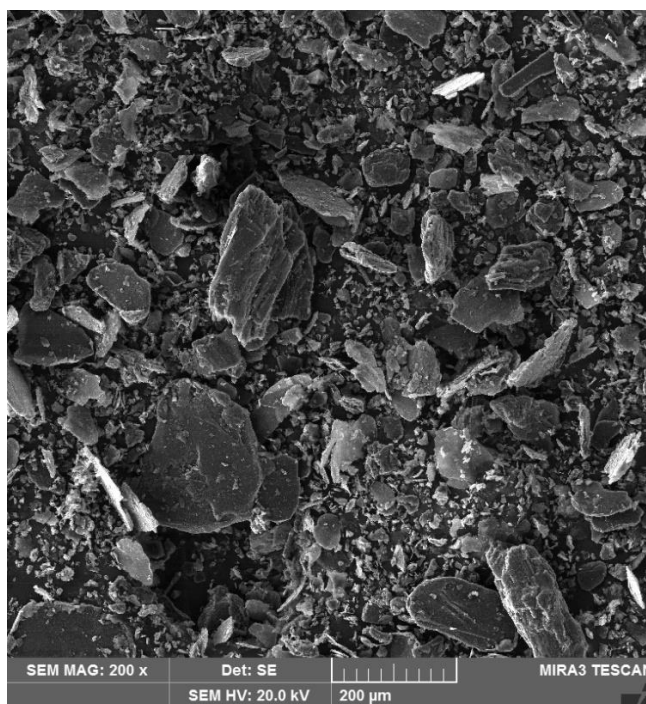


## Odpadní grafit „odpad vysavač“

Jedná se o odpadní grafitový prášek, který je vysáváný z podlah výrobních hal společnosti EPINIKON a.s. která vyrábí výše uvedené primární grafity. Skládá se tedy z více druhů grafitu a je zde i možnost znečištění prachem či jinými cizími částicemi.



Obrázek č. 44 Detailní foto „odpad vysavač“, jeden díl= 1 mm, (foto autora)



Obrázek č. 45 SEM foto částic odpadního grafitu „odpad vysavač“ (foto autora)

Tabulka č. 17 Vybrané vlastnosti odpadního grafitu „odpad vysavač“

Vybrané vlastnosti:	Odpadní grafit „odpad vysavač“
Sypná hmotnost volně sypaná [kg/m <sup>3</sup> ]	440
Sypná hmotnost setřeseného kameniva [kg/m <sup>3</sup> ]	540
Nasákavost WA(5) [%]	91
Objemová hmotnost (pyknometricky) [kg/m <sup>3</sup> ]	2080
Impedance [Ω]	0,53
Typ částic	Nepravidelné, různé

## Ocelové piliny

Tyto ocelové piliny vznikají jako odpadní produkt při řezání a frézování hutních výrobků společnosti Feron. Tyto částice jsou tvořeny z plochých delších vláken, které jsou stočeny do kulových částic o velikosti 1,0-5,0 mm.

Ocelové piliny jsou složeny ze stavebních a konstrukčních ocelí. Díky jejich složení a potenciální elektro vodivé vlastnosti byly vybrány jakožto možná druhotná surovina vhodná pro tvorbu elektro vodivých kompozitů. Nevýhodou této suroviny je že při vzniku těchto pilin se používá mazivo, které je nutno před následným zpracováním odstranit. Odstranění tohoto maziva bude provedeno za pomoci saponátu ve vodě, ve které se tyto piliny promyjí a následně propláchnou čistou vodou přímo před vložení do směsi.



Obrázek č. 46 Detailní foto ocelových pilin, jeden dílek =1 mm (foto autora)



Obrázek č. 47 Detailní foto částic ocelových pilin, (foto autora)

Tabulka č. 18 Vybrané vlastnosti ocelových pilin

Vybrané vlastnosti:	Ocelové piliny
Sypná hmotnost volně sypaná [kg/m <sup>3</sup> ]	310
Sypná hmotnost setřeseného kameniva [kg/m <sup>3</sup> ]	420
Nasákavost WA(5) [%]	10
Objemová hmotnost (pyknometricky) [kg/m <sup>3</sup> ]	3330
Impedance [Ω]	0,19
Typ částic	Plochá spirálovitě stočená vlákna

#### 4.4.2.6 Druhotné suroviny pro náhradu cementu

##### Vysokoteplotní popílek ArcelorMittal

Tento černouhelný popílek vzniká při teplotě 1200-1700 °C v teplárně Arcelormittal Ostrava. Popílek ArcelorMittal byl zvolen na základě vyšší ztráty žíhání (22 %) oproti běžnému popílku do betonu se ztrátou žíhání do 5 %. Zvýšený obsah nedopalu v popílku může potenciálně snižovat impedanci. Vyšší ztráta žíháním může také nepříznivě ovlivňovat trvanlivost kompozitu, na tento faktor bude dán zřetel v budoucím výzkumu.

Popílek je obecně tvořen krystalickými i amorfními fázemi a skládá se z kulovitých částic. Samotný popílek nemá hydraulické vlastnosti. Smícháním s hydroxidem vápenatým však reaguje a vytváří podobné produkty, které vznikají při hydrataci portlandského cementu. Vlastnosti popílku jsou uvedeny v následující tabulce.



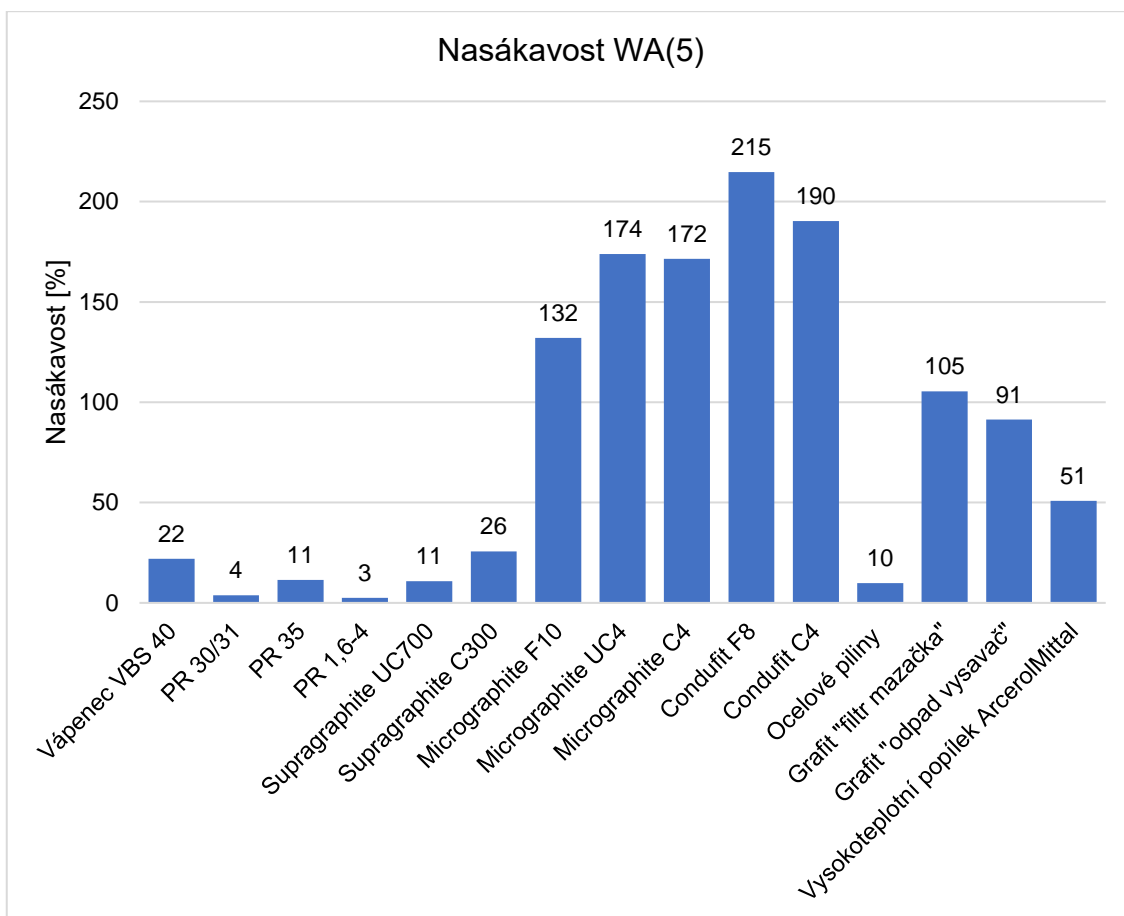
Obrázek č. 48 Detailní foto popílku ArcelorMittal, jeden dílek = 1 mm (foto autora)

Tabulka č. 19 Vybrané vlastnosti popílku ArcelorMittal (AM)

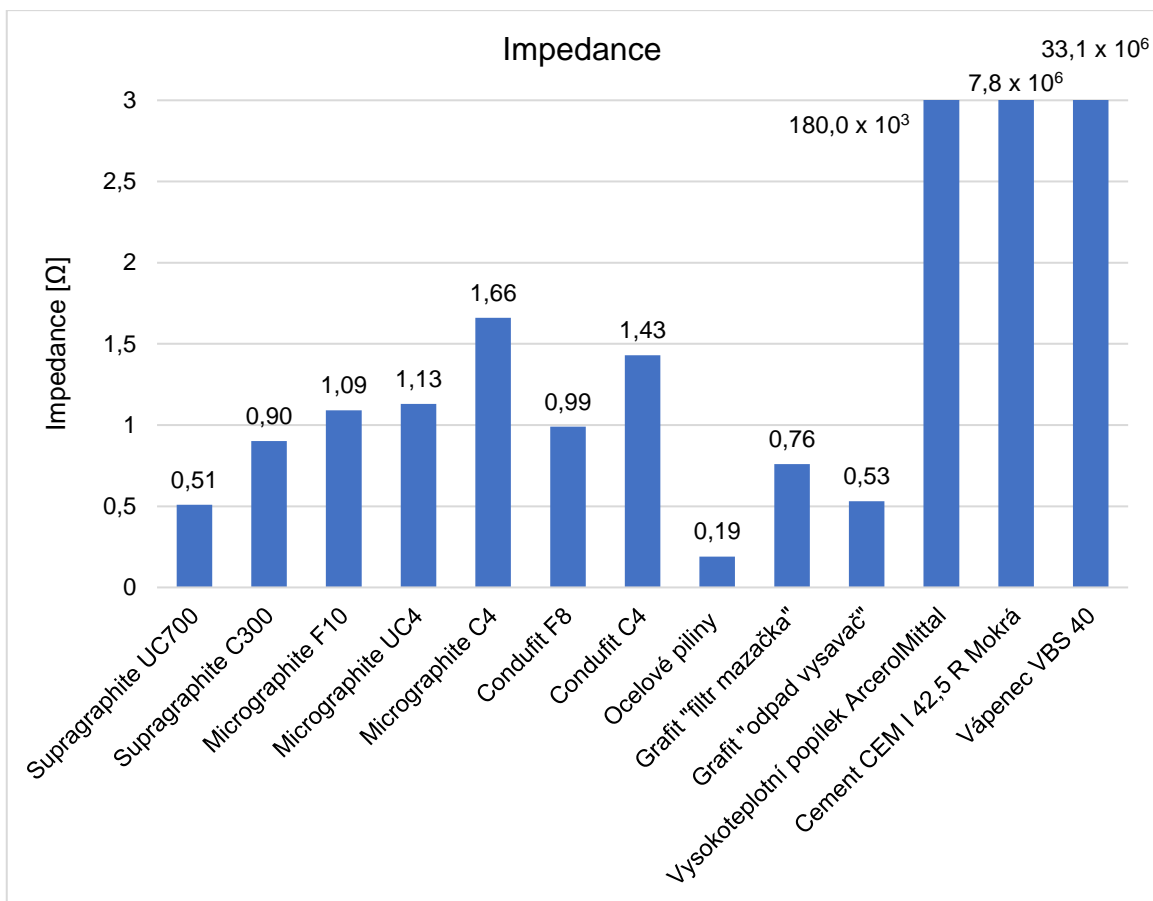
Vybrané vlastnosti:	Popílek ArcelorMittal (AM)
Sypná hmotnost volně sypaná [kg/m <sup>3</sup> ]	470
Sypná hmotnost setřeseného kameniva [kg/m <sup>3</sup> ]	800
Objemová hmotnost (pyknometricky) [kg/m <sup>3</sup> ]	1980
Nasákavost WA(5) [%]	51
Impedance [Ω]	180,02 x 10 <sup>3</sup>
Měrný povrch [m <sup>2</sup> /Kg]	390
Velikost zrn [mm]	< 0,125
Ztráta žíháním [% hmot.]	22,2
Obsah aktivního SiO <sub>2</sub> [% hmot.]	36

#### 4.4.3 Shrnutí ETAPY I

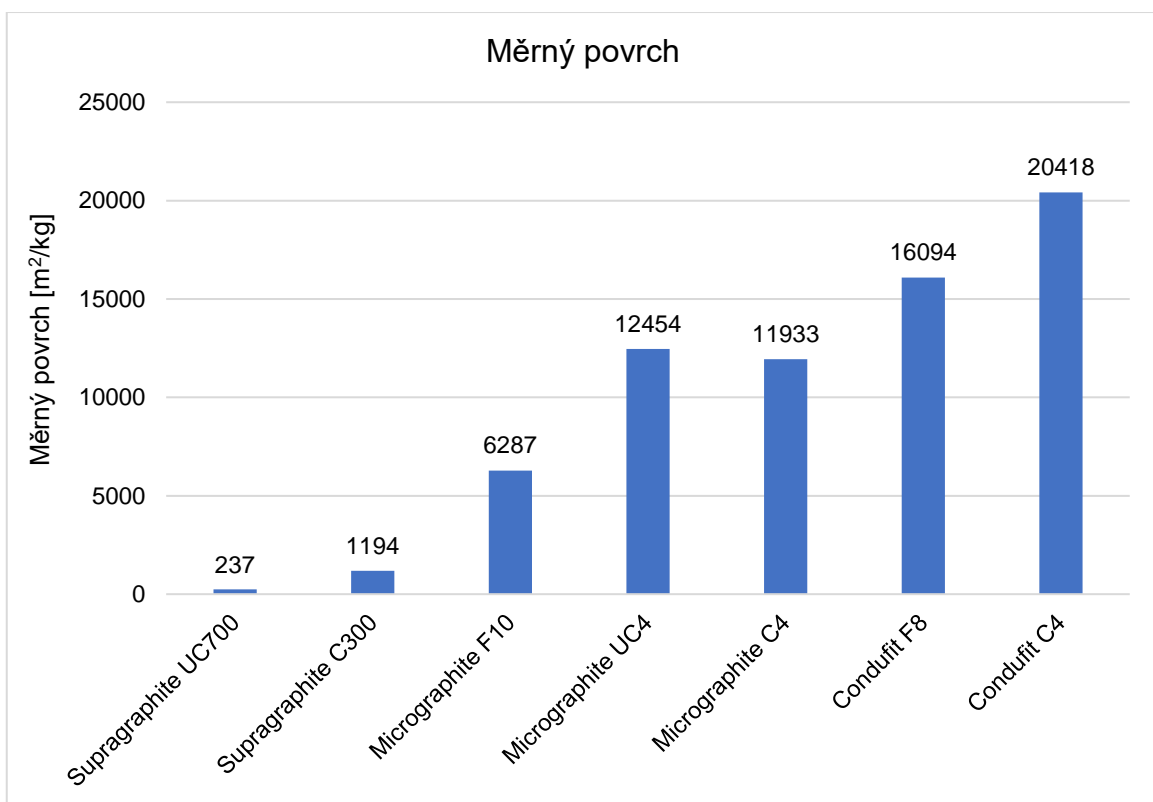
Na vstupních surovinách byly stanoveny jejich dominantní vlastnosti. Nejdůležitějšími parametry pro dosažení vhodných vlastností kompozitu jsou nasákavost surovin, impedance samotné suroviny, měrný povrch, velikost a typ částic. Dominantní vlastnosti vstupních surovin jsou shrnuty v následujících grafech.



Graf č. 1 Srovnání nasákavosti vybraných vstupních surovin

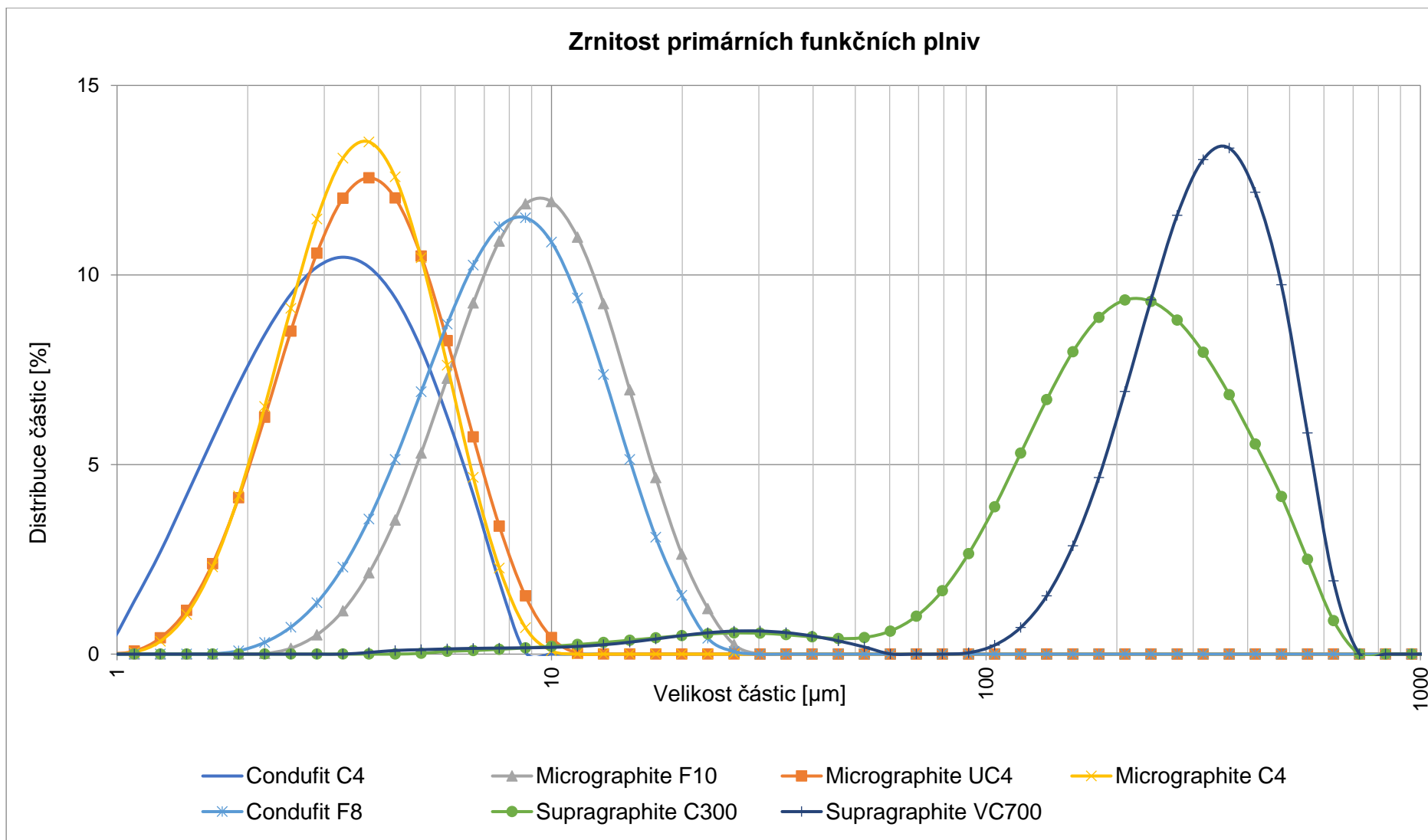


Graf č. 2 Srovnání impedance vstupních surovin



Graf č. 3 Srovnání měrného povrchu primárních elektro vodivých plniv





Graf č. 4 Srovnání zrnitosti primárních elektricky vodivých plniv

Nasákavost bude ve směsích významně ovlivňovat množství záměsové vody a tím také celkovou zpracovatelnost směsi. Dále bude ovlivňovat pórovitost kompozitu, která stoupá s rostoucím množstvím použité vody ve směsi. Nejnižší nasákavost mají použité písky, z funkčních plniv ocelové piliny a odpadní grafity.

Impedance vstupních surovin byla stanovena i na ostatních práškových surovinách. V porovnání s nevodivými surovinami jako je například cement nebo vápenec mají funkční elektro vodivá plniva impedanci nižší až o 6 řádů. Z primárních funkčních plniv měly nejnižší hodnoty impedance grafit Supragraphite C300 z hrubých typů grafitu a Condufit F8 z jemných typů grafitu. Všeobecně se impedance primárních funkčních plniv pohybuje okolo hodnoty 1  $\Omega$ .

Měrný povrch částic funkčních plniv souvisí s jejich vysokou nasákavostí a bude dále sledováno, zda bude ovlivňovat i hodnoty impedance kompozitu.

Velikost a typ částic bude mít především vliv na hutnění směsi a schopnost vést elektrický proud. Z částic funkčních plniv je zapotřebí ve směsi vytvořit rovnoměrnou, elektricky propojenou strukturu což může být ovlivněno typem částic. Z tohoto důvodu jsou v surovinách zahrnuti jak nepravidelné, tak ploché či vláknovité částice.

Z druhotných surovin dosáhly nejnižší hodnoty impedance ocelové piliny s hodnotou 0,19  $\Omega$ . Odpadní grafity „odpad vysavač“ a „filtr mazačka“ vykazují nižší hodnoty impedance než primární grafitové prášky. Impedance těchto odpadních grafitů se pohybuje okolo 0,6-0,8  $\Omega$ .

Zajímavým výsledkem je hodnota impedance popílku se ztrátou žíháním 22 %, která byla stanovena na 180,02 x 10<sup>3</sup>  $\Omega$ , jelikož tento popílek bude dále využit při částečné náhradě cementu. Pro srovnání byly změřeny i jiné druhy popílku se ztrátou žíháním do 5 % u kterých se hodnoty impedance pohybují 4-20 x 10<sup>6</sup>  $\Omega$ .

## 4.5 ETAPA II: Návrh a ověření základních surovinových variant elektricky vodivých kompozitu na bázi primárních surovin

V druhé etapě bude navržena referenční směs kompozitu. Budou zde ověřeny elektro vodivé vlastnosti primárních funkčních plniv v cementové pastě a v kompozitní matici. Následně bude optimalizováno množství funkčního plniva v kompozitním materiálu při zachování požadovaných mechanických vlastností směsi. Na závěr této etapy budou vybrány dvě varianty směsí elektro vodivého kompozitu na bázi primárních funkčních plniv z čehož jedna varianta je s hrubým typem plniva a druhá s jemným typem.

### 4.5.1 Návrh referenční směsi

Referenční směs byla navržena jako silikátový kompozit s drobným kamenivem, jemným fillerem a plastifikační přísadou. Jako pojivo byl zvolen portlandský cement CEM I 42,5R Mokrý. Dále byly použity kameniva od společnosti Provodínské písků a.s. o velikosti částic 0-4 mm, jako filler byl použit jemně mletý vápenec VBS40 a jako plastifikační přísada Stachement 2180.1, všechny suroviny jsou blíže specifikovány v první etapě.

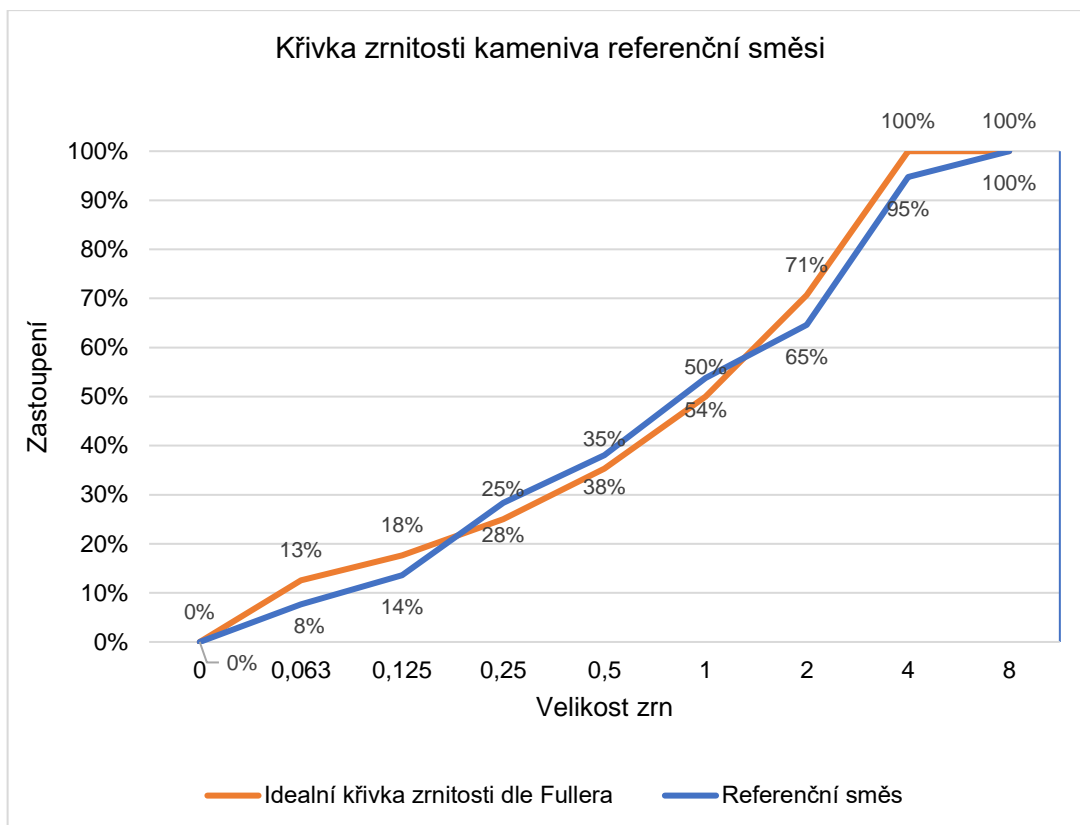
Z kameniv a filleru byla složena křivka zrnitosti tak, aby byla co nejvíce přiblížena ideální křivce zrnitosti dle Fullera <sup>[49]</sup>. V následující tabulce je uvedeno složení referenční směsi.

Tabulka č. 20 Složení referenční směsi

Složka:	Množství [hm. %]
Portlandský cement CEM I 42,5R	21,0
Mikro mletý vápenec	8,4
Směs křemičitých písků 0-4 mm	70,45
Plastifikační přísada	0,15

Složení referenční směsi bylo navrženo pro dosažení pevnosti v tlaku od 50 do až 70 MPa po 7mi dnech, díky čemuž lze následně pozorovat velmi vysoký rozdíl mezi vlastnostmi jednotlivých nově navržených směsí s přidavkem funkčních plniv.

V následujícím grafu je znázorněna křivka zrnitosti, která byla využita pro přípravu referenční směsi.



*Graf č. 5 Křivka zrnitosti referenční směsi*

#### 4.5.2 Optimalizace dávkování funkčních plniv v kompozitu

Cílem této optimalizace bylo zjištění maximálního množství funkčního plniva při zachování použitelnosti materiálu s ohledem na mechanické vlastnosti.

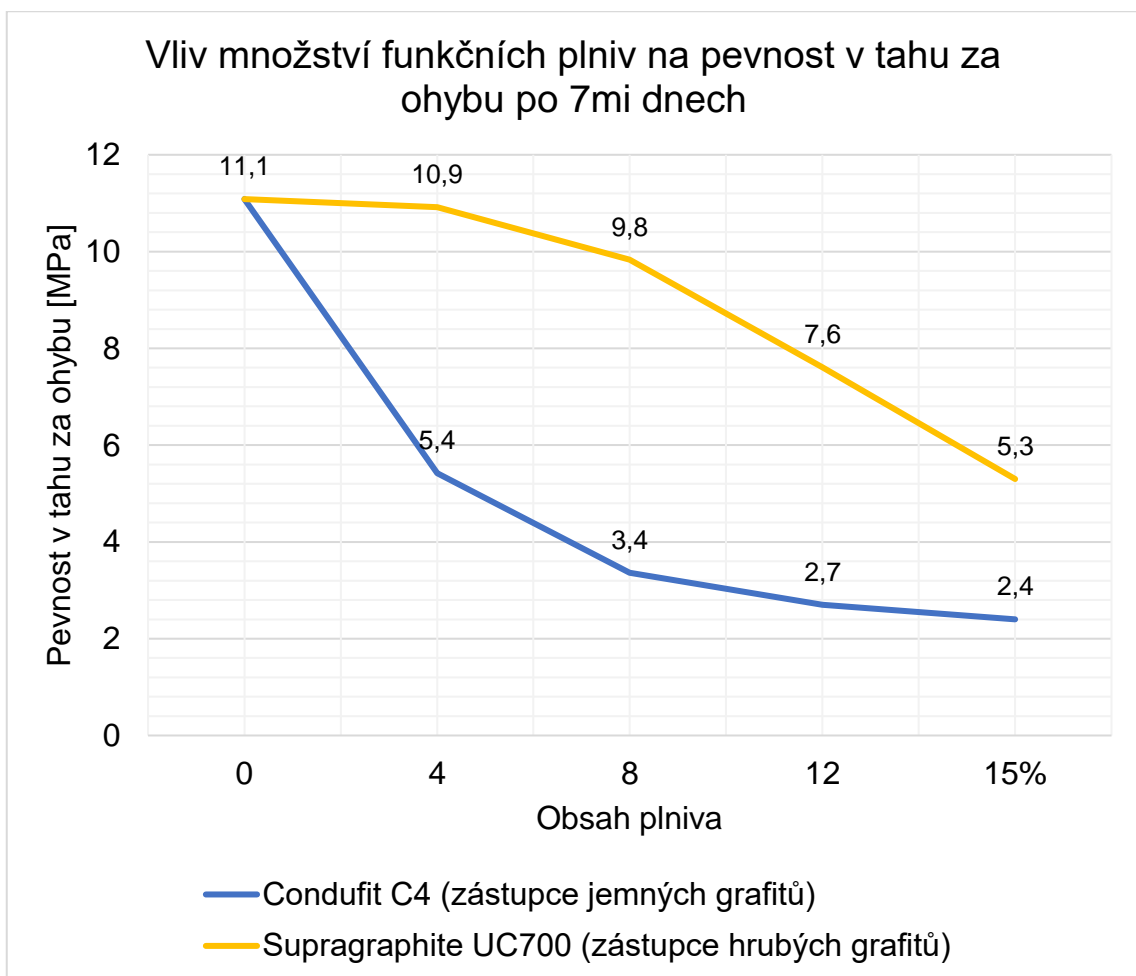
Množství funkčního plniva má zásadní vliv na elektro vodivé ale i na mechanické vlastnosti kompozitu. Z tohoto důvodu bylo vyzkoušeno dávkování těchto plniv. Pro budoucí možnosti nahrazování primárních plniv bylo zapotřebí dosáhnout takového množství plniva, které přesahuje oblast perkolačního prahu. Pro grafitový prášek je tato hodnota okolo 10-12 % hmotnostně<sup>[5]</sup>, přičemž při dávkách nad 20 % hmotnostně dochází k významnému poklesu pevností materiálu, záleží ovšem na druhu grafitu a velikosti zrn. [5][7]

Byly navrženy směsi s obsahem vybraných zástupců funkčních plniv, pro ověření vlivu množství přísady na mechanické vlastnosti byl vybrán nejhrubší typ grafitu Supragraphite UC 700 a jako zástupce jemných grafitů Condufit C4. Bylo zvoleno množství příměsi grafitu 6/12/18/20 % objemově (tj.4/8/12/15 % hmotnostně), přesné složení je uvedeno v následující tabulce. Směsi byly odladěny na stejnou zpracovatelnost na střešacím stolku dle ČSN EN 1015-3. Požadované rozlití bylo 150±10 mm.

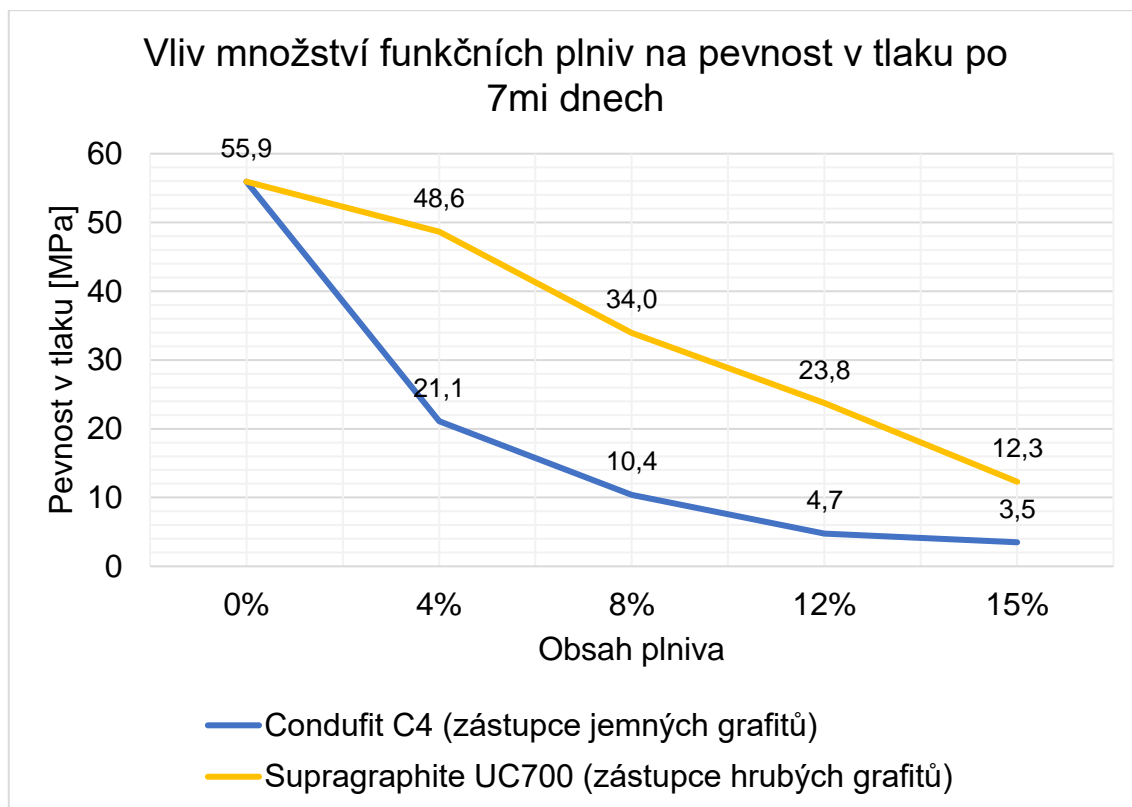
Tabulka č. 21 Složení směsí pro optimalizaci dávkování

Složka:	Označení směsi :				
	REF	4 %	8 %	12 %	15 %
	Množství [hm. %]				
Portlandský cement CEM I 42,5R	21,0	20,2	19,3	18,5	17,8
Mikro mletý vápenec	8,4	8,1	7,7	7,4	7,1
Směs křemičitých písků 0-4 mm	70,5	67,6	64,8	62,0	59,9
Plastifikační přísada	0,15	0,14	0,14	0,13	0,12
Funkční plnivo	0	4	8	12	15

S přidáním funkčních plniv významně klesá pevnost. Sledované vlastnosti byly pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku po 7mi dnech, výsledky jsou uvedeny v Graf č. 7 a v **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**



Graf č. 6 Vliv množství funkčních plniv na pevnost v tahu za ohybu po 7mi dnech



*Graf č. 7 Vliv množství funkčního plniva na pevnost v tlaku*

Z výše uvedených grafů je zřejmé že množství plniva výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti kompozitu. Avšak pro účely této práce jsou nejdůležitějším faktorem elektro vodivé vlastnosti. Požadavek na mechanické vlastnosti je proto velmi nízký a byl interně nastaven na minimálně 3 MPa v tlaku a 1,5 MPa v tahu z ohybu po 7mi dnech.

Do další etapy je počítáno s náhradami funkčních plniv, které mohou výrazně změnit elektro vodivé vlastnosti materiálu, jelikož výsledky z grafu č.3 a č.2 jsou výsledky pevností po 7mi dnech a počítá se s následným nárůstem pevností. Pro následující experimenty bude zvoleno jakožto optimální dávka množství grafitu, 15 % hmotnostně (20 % objemově) pro zajištění dostatečné rezervy v elektro vodivých vlastnostech pro náhradu primárních surovin.

### 4.5.3 Ověření elektro vodivých vlastností cementové pasty s primárními plnivý

Pro nejjednodušší ověření elektro vodivých vlastností primárních funkčních plniv v silikátovém kompozitu bylo navrženo zakomponování těchto plniv do samostatné cementové pasty. Bylo nahrazeno vždy 30 % hmotnostně (40 % objemově) cementu v pastě funkčním plnivem, pro srovnání byl použit i vápenec jakožto příklad nevodivého plniva. Směs byla vždy namíchána při zachování stejné zpracovatelnosti. Zpracovatelnost byla laděna pomocí rozlití na střešacím stolku dle ČSN EN 1015-3, požadované rozlití bylo 150±10 mm. Složení cementových směsí je uvedeno v následující tabulce.

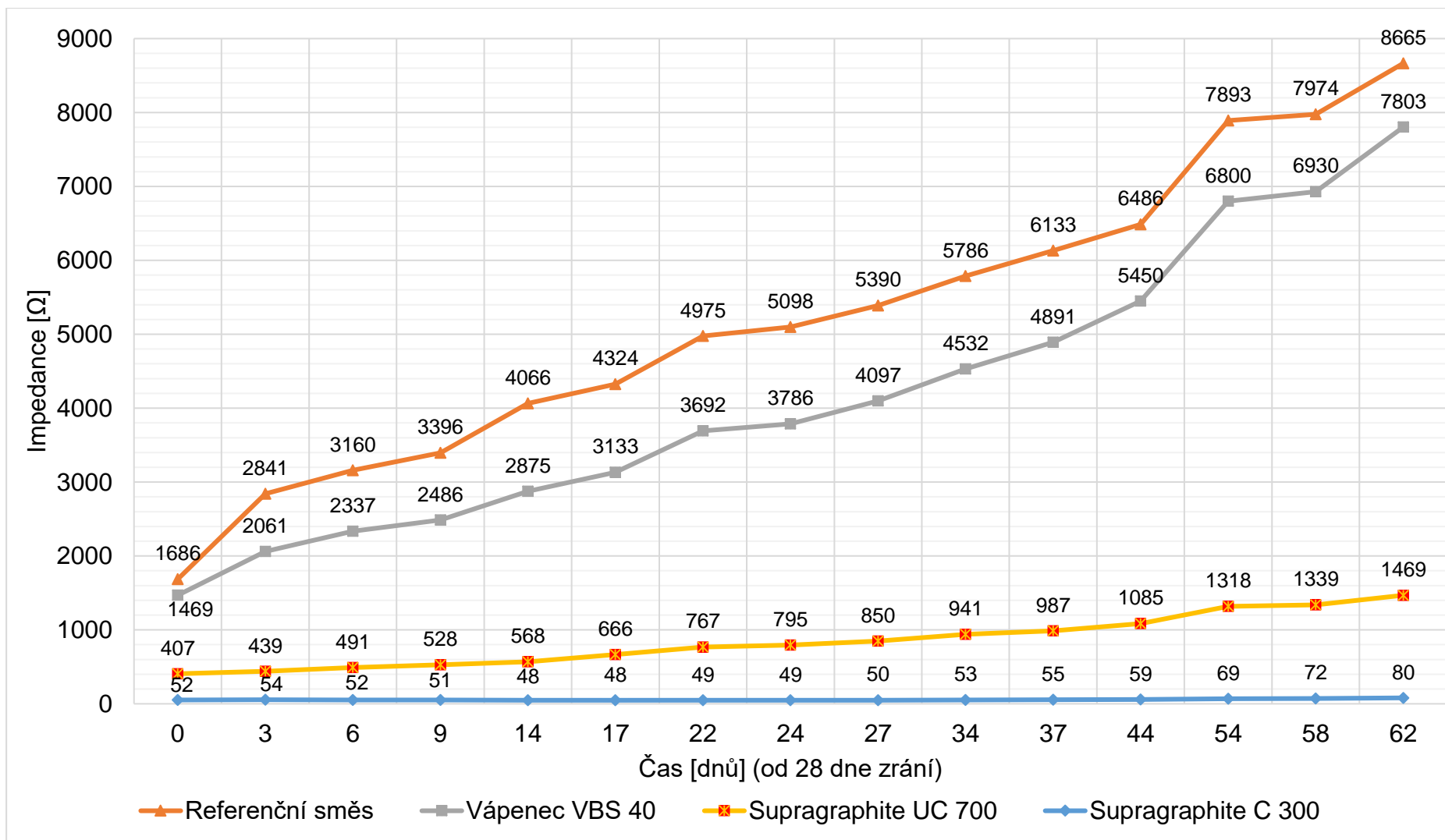
Tabulka č. 22 Složení cementových past s příměsí funkčního plniva

Druh příměsi	Množství cementu: CEM I 42,5 R Mokrý	Množství příměsi
Referenční směs	100 %	0
Vápenec VBS 40	70 %	30 %
Supragraphite UC 700	70 %	30 %
Supragraphite C 300	70 %	30 %
Micrographite F 10	70 %	30 %
Micrographite UC 4	70 %	30 %
Micrographite C 4	70 %	30 %
Condufit F8	70 %	30 %
Condufit C4	70 %	30 %

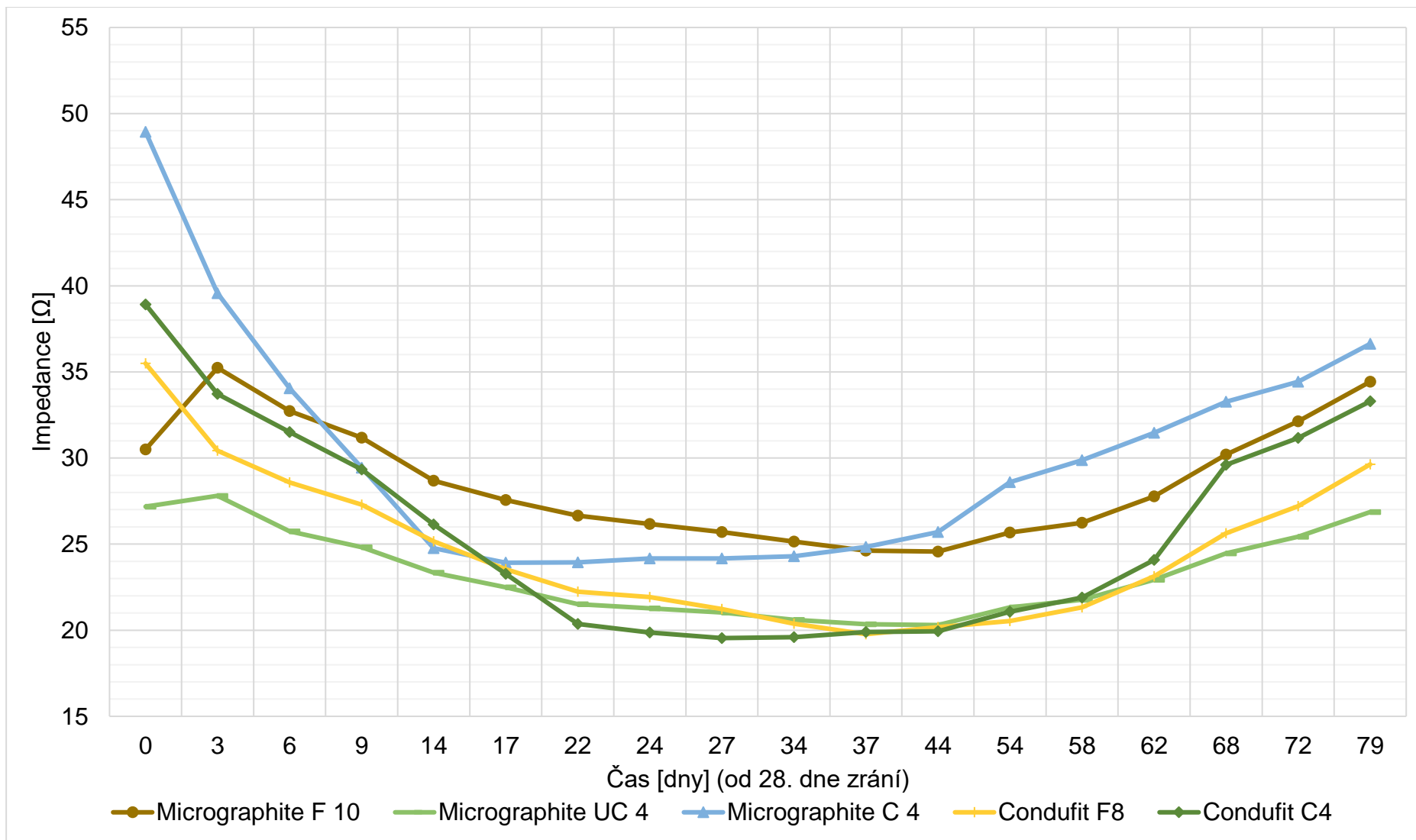
Impedance byla stanovena po 28mi dnech zrání vzorků, které byly v nasyceném stavu a následně byla měřena po dobu 62 dní (do 90 dne od namíchání) viz grafy č.4 a 5.

Zároveň byla sledována také vlhkost vzorků v čase po 28mi dnech zrání kdy byly vzorky v nasyceném stavu a byly vyjmuty do laboratorního prostředí viz graf č.6.

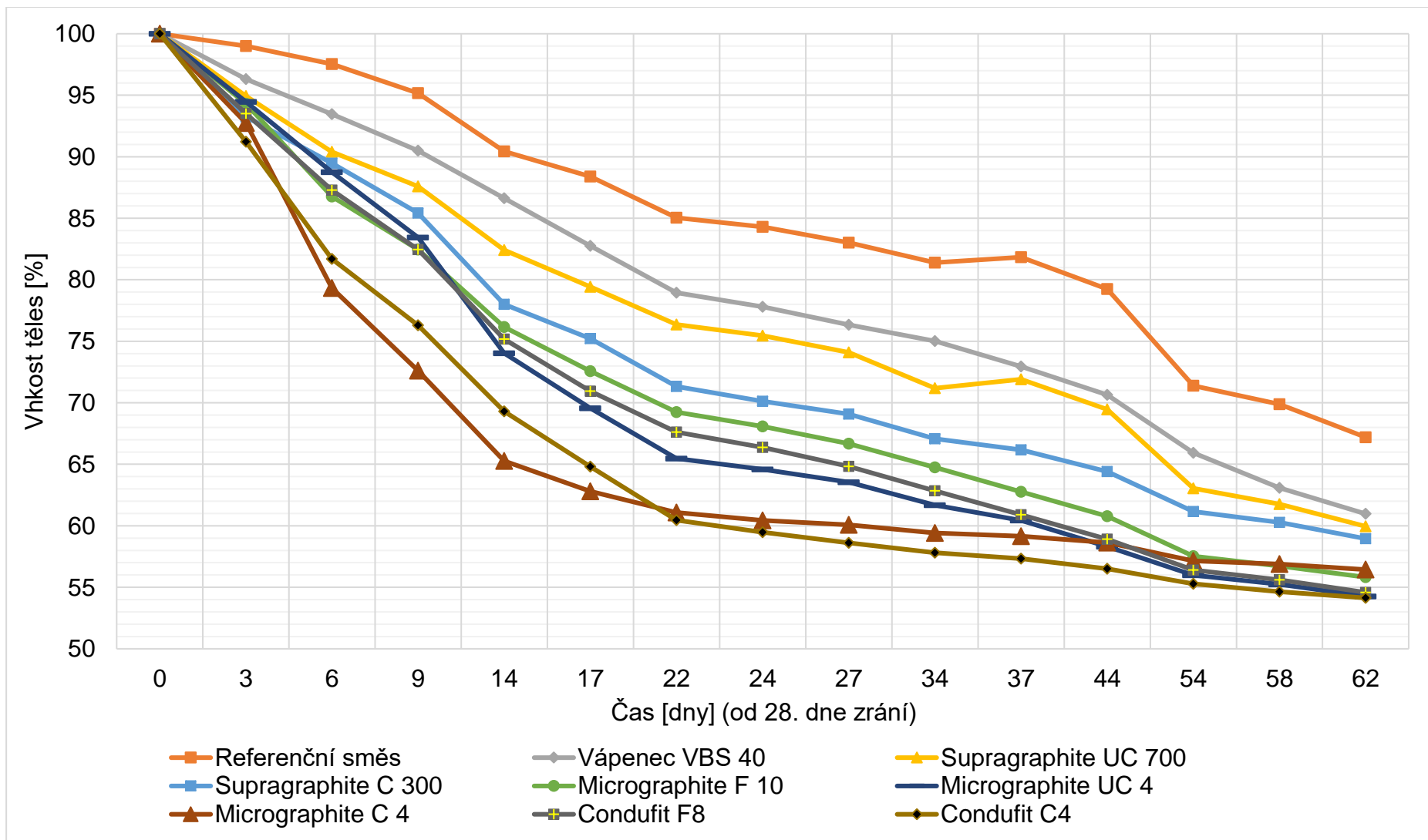




Graf č. 8 Impedance cementových past s hrubým typem plniva, referenční směsi bez plniva, a s vápencem jakožto plniva v závislosti na čase



Graf č. 9 Impedance cementových past s jemným typem plniva v závislosti na čase (hodnoty jsou uvedeny v příloze)



Graf č. 10 Vlhkost vzorků cementových past v průběhu měření impedance v závislosti na čase (hodnoty jsou uvedeny v příloze)

Dle výsledků z výše uvedených grafů bylo zjištěno že jemné typy plniv vykazují nižší hodnoty impedance než hrubá plniva, i přesto hrubá plniva výrazně snižují hodnoty impedance oproti referenční směsi. Jako nejvhodnější primární funkční plniva v cementové pastě byly Supragraphite C300 jakožto zástupce hrubého typu plniva a Condufit C4 jakožto zástupce pro jemný typ plniva.

Supragraphite C300 vykazuje oproti druhému hrubému plnivu (Supragraphite UC700) 18krát nižší hodnoty impedance a také měl nižší hodnoty vlhkosti.

Condufit C4 vykazuje nejnižší hodnoty impedance spolu s grafitem Micrographite UC4, avšak hodnoty vlhkosti byly nejnižší v cementové pastě s plnivem typu Condufit C4.

Dle trendů uvedených v (Graf č. 8, Graf č. 10) je patrné, že s klesajícím množstvím vody pro směsi bez funkčních plniv impedance razantně roste. U jemného typu plniva s klesajícím množstvím vody ve vzorku hodnoty impedance klesají a po přibližně 30. dnu měření impedance roste, při neustálém úbytku vody ve vzorku.

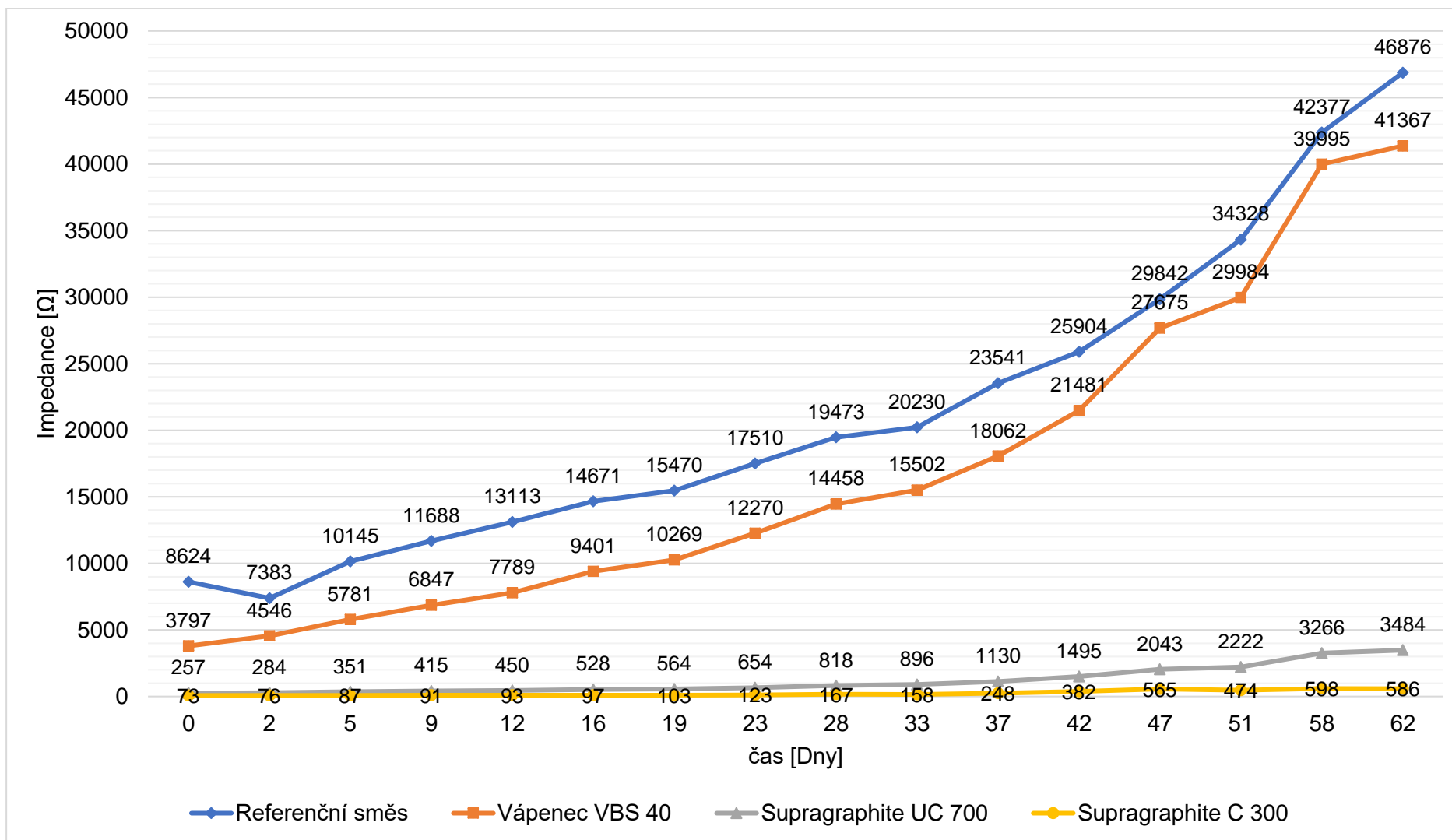
#### 4.5.4 Ověření elektro vodivých vlastností kompozitu s obsahem primárních plniv

Dalším krokem bylo ověření elektro vodivých vlastností funkčních plniv v navrhnuté referenční směsi. Důvodem tohoto ověření je, že nevodivé částice kameniva mohou ovlivňovat vedení elektrického proudu. K referenční směsi uvedené v (Tabulka č. 20 Složení referenční směsi) bylo přidáno 20 % objemově (15 % hmotnostně) funkčního plniva jakožto příměsi. Směs byla také vlhčena na stejnou zpracovatelnost, která byla ověřena na stříšacím stolku dle ČSN EN 1015-3. Požadované rozlití bylo  $150 \pm 10$  mm.

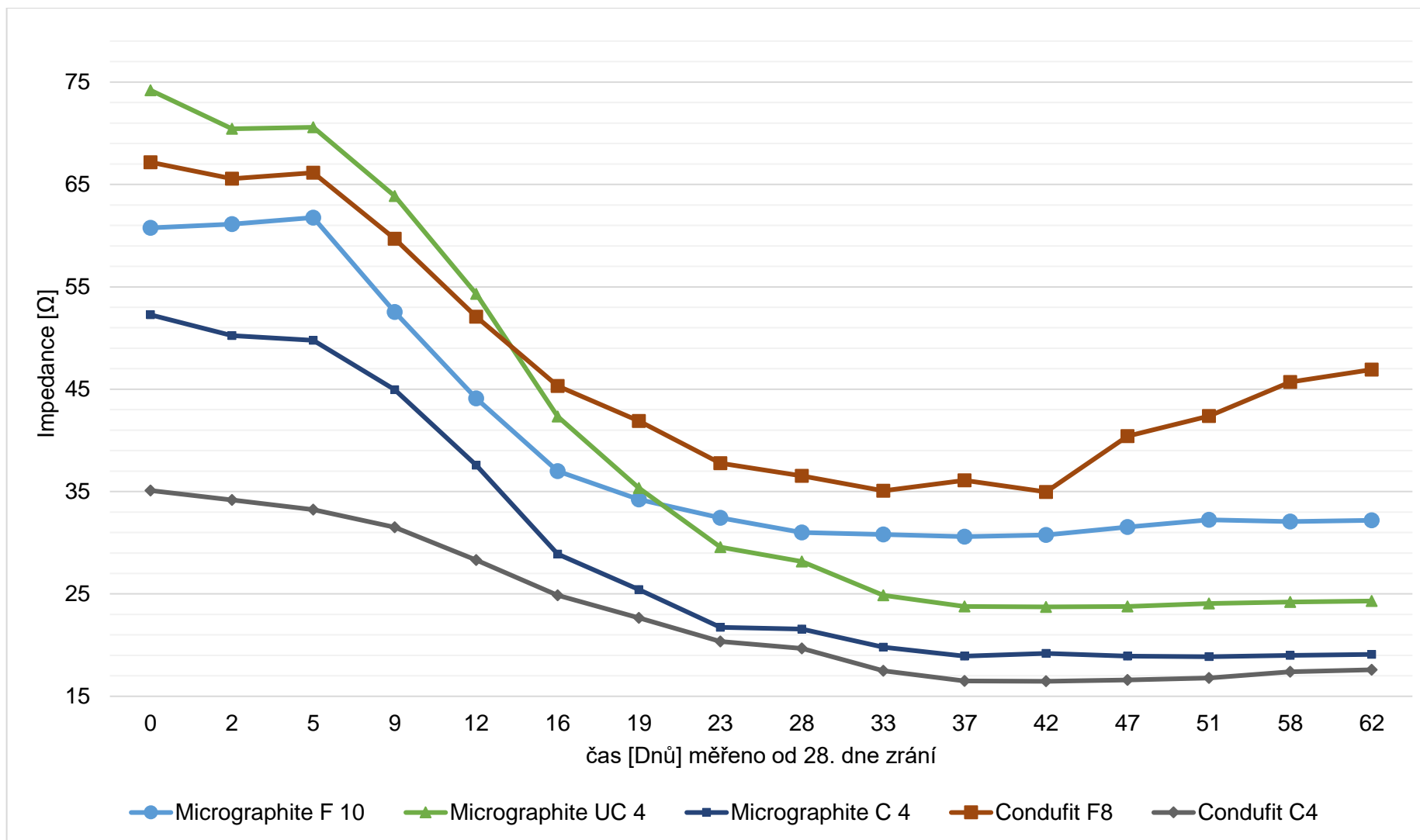
Tabulka č. 23 Složení směsi pro ověření elektro vodivých vlastností plniv v kompozitu.

Složka:	Množství [hm. %]
Portlandský cement CEM I 42,5R	17,8
Mikro mletý vápenec	7,1
Směs křemičitých písků 0-4 mm	59,9
Plastifikační přísada	0,12
Funkční plnivo	15,0

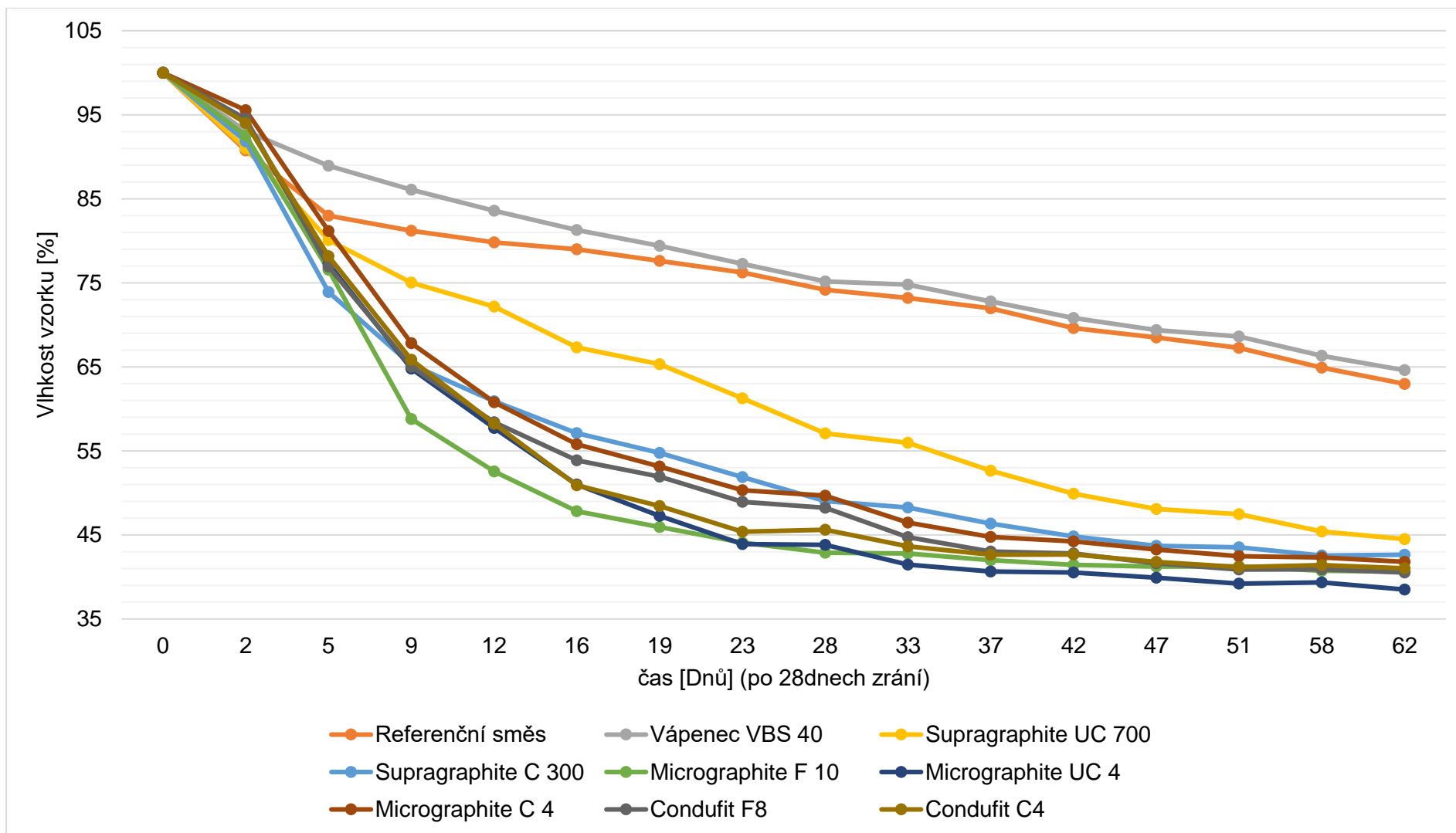
V následujících grafech jsou znázorněny průběhy impedance a vlhkosti v čase kompozitů s použitými druhy primárních plniv.



Graf č. 11 Impedance kompozitů s hrubým typem plniva, referenční směsi bez plniva, a s vápencem jakožto plniva v závislosti na čase

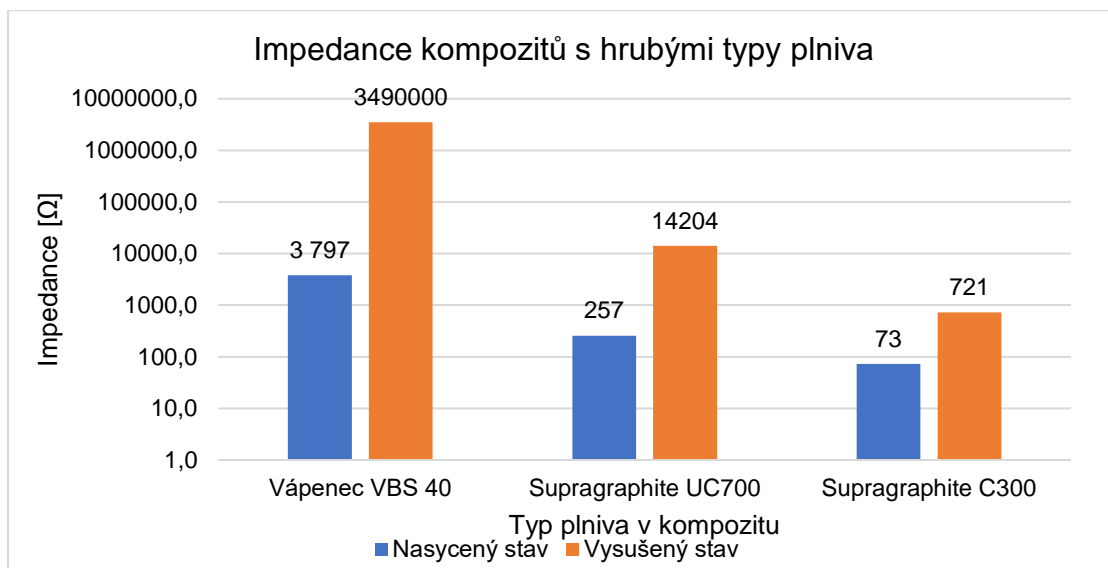


Graf č. 12 Impedance kompozitů s jemným typem plniva v závislosti na čase (hodnoty jsou uvedeny v příloze)

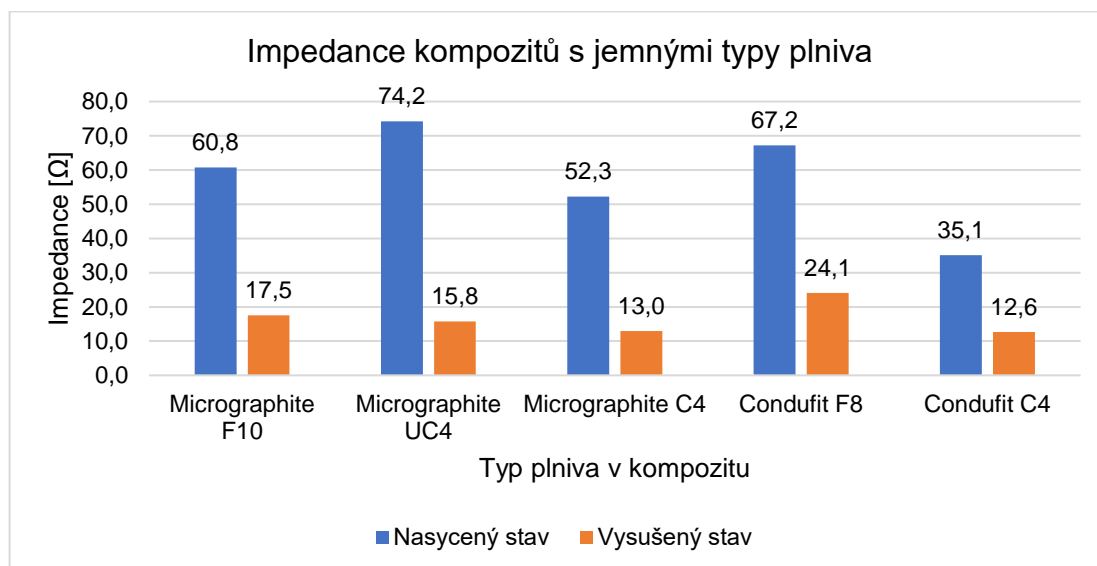


Graf č. 13 Vlhkost vzorků kompozitů v průběhu měření impedance v závislosti na čase (hodnoty jsou uvedeny v příloze)





Graf č. 14 Srovnání impedance kompozitů na bázi hrubých primárních plniv



Graf č. 15 Srovnání impedance kompozitů na bázi jemných primárních plniv

Trendy impedance jsou podobné v cementové pastě i v kompozitu. Dle výsledků uvedených výše bylo potvrzeno že i ve zkoušené kompozitní matici jemné typy plniv vykazují nižší hodnoty impedance než hrubé typy plniv. přesto i hrubé typy plniv výrazně snižují impedanci vůči referenčnímu kompozitu bez funkčních plniv nebo kompozitu s vápencem jakožto nevodivého plniva.

Jako nejvhodnější primární funkční plniva byla vyhodnocena na základě výsledků z měření (Graf č. 11, Graf č. 12, Graf č. 14, Graf č. 15) pro hrubý typ plniva Supragraphite C300 a pro jemný typ plniva Condufit C4. Oba tyto grafity vykazují trvale nejnižší hodnoty impedance ve své zrnitostní kategorii.

Dle výsledků v (Graf č. 13) je zřejmé, že s klesajícím množstvím vody pro kompozity bez funkčních plniv impedance razantně roste. U kompozitu s obsahem jemného typu plniva s klesajícím množstvím vody ve vzorku hodnoty impedance klesají a po přibližně 30. dnech měření impedance roste při neustálém úbytku vody ve vzorku. U kompozitů s hrubým typem plniva s úbytkem vlhkosti impedance roste.

#### **4.5.5 Vyhodnocení ETAPY II**

Na základě výsledku trendů z grafu č.6,7 a výsledků z této etapy uvedené v části: Ověření elektro vodivých vlastností kompozitu s obsahem primárních plniv bylo vybráno jako vhodné množství funkčního plniva 15 % hmotnostně tj. (20 % objemově) z důvodů docílení vysoké vodivosti kompozitu na bázi primárních surovin. Vysoká elektrická vodivost tohoto materiálu poskytne do budoucna vhodnou rezervu v elektro vodivých vlastnostech pro náhrady primárních surovin a zároveň poskytuje nezbytně nutné minimální pevnosti (1,5 MPa v tahu za ohybu, 3 MPa v tlaku).

Jakožto nejvhodnější plniva pro další etapu byla vybrána na základě měření impedancí uvedených v experimentech výše. Byli vybráni zástupci pro hrubý a jemný typ funkčního plniva.

Jakožto zástupce pro hrubý grafit byl vybrán Supragraphite C300. Z jemných grafitů byl vybrán grafitový prášek Condufit C4 s vylepšenými elektro vodivými vlastnostmi, které souvisí s upraveným povrchem částic. Tato funkční plniva dosahují nejnižších hodnot impedance jak v cementové pastě, tak i v kompozitní matici.

Vlhkost materiálu významně ovlivňuje elektro vodivé vlastnosti. U kompozitu bez funkčních plniv se vlivem snižující se vlhkosti, významně zvyšuje hodnota impedance.

Pro kompozity s obsahem hrubého typu funkčního plniva se také vlivem snižující se vlhkosti zvyšují hodnoty impedance, při 50 % ztrátě vlhkosti se může zvýšit impedance až 10 ti násobně.

U kompozitů s obsahem jemného typu funkčního plniva se vlivem snižující se vlhkosti impedance snižuje. Snižování vlhkosti o 50 % se impedance sníží přibližně 2,5krát, s následným snižováním vlhkosti pod úroveň 50 % maximální vlhkosti se je ve většině případů impedance téměř konstantní nebo se mírně navyšuje.

V následujících tabulkách je uvedeno složení a vlastnosti optimalizované varianty kompozitů, na bázi primárních surovin pro ověření využitelnosti druhotných surovin, které budou využity v ETAPĚ III jako referenční směsi:

Tabulka č. 24 Vybrané směsi kompozitu na bázi primárních surovin pro ověření využitelnosti druhotných surovin

Složka	Kompozit s hrubým typem plniva	Kompozit s jemným typem plniva
	Množství [hm. %]	Množství [hm. %]
Portlandský cement CEM I 42,5R	17,8	17,8
Mikro mletý vápenec	7,1	7,1
Směs křemičitých písků 0-4 mm	59,9	59,9
Plastifikační přísada	0,12	0,12
Funkční plnivo	15,0 (Supragraphite C300)	15,0 (Condufit C4)

Tabulka č. 25 Hodnoty impedance vybraných směsí

Impedance				
Druh kompozitu	7 d nasycený stav	7 d suchý stav	28 d nasycený stav	28 d suchý stav
Condufit C4 (s jemným typem plniva)	21,5	9,5	23,3	13,3
Supragraphite C300 (s hrubým typem plniva)	24,5	86,6	22,9	249,3

Tabulka č. 26 Hodnoty pevnosti v tahu za ohybu vybraných směsí

Pevnost v tahu za ohybu			
Druh kompozitu	7 d nasycený stav	28 d nasycený stav	28 d suchý stav
Condufit C4 (s jemným typem plniva)	2,4	3,1	4,6
Supragraphite C300 (s hrubým typem plniva)	2,0	3,3	3,7

Tabulka č. 27 Hodnoty pevnosti v tlaku vybraných směsí

Pevnost v tlaku			
Druh kompozitu	7 d nasycený stav	28 d nasycený stav	28 d suchý stav
Condufit C4 (s jemným typem plniva)	3,5	4,5	8,6
Supragraphite C300 (s hrubým typem plniva)	3,4	4,5	6

## 4.6 ETAPA III: Vývoj vodivého kompozitu na bázi druhotných surovin

V této etapě budou vytvořeny směsi kompozitního materiálu s obsahem primárního plniva Supragraphite C 300 a Condufit C4 v množství 20 % objemově (15 % hmotnostně) na základě výsledků z Etapy II.

Následně budou nahrazovány primární suroviny kompozitu za druhotné. Bude zde provedena částečná náhrada cementu vysokoteplotním popílkem ArcelorMittal, náhrada kameniva odpadními ocelovými pilinami a částečná náhrada primárního plniva odpadními grafity („odpad vysavač“, „filtr mazačka“) a ocelovými pilinami. Na těchto směsích bude ověřena impedance a mechanické vlastnosti. Dále budou vybrány nejvhodnější možné kombinace náhrad, z kterých se budou skládat finální směsi či směs. Na závěr této etapy je ověřena impedance a mechanické vlastnosti finálních směsí, a je určeny optimální varianty kompozitu na bázi druhotných surovin pro jemný typ plniva a hrubý typ plniva.

### 4.6.1 Částečná náhrada cementu

Jakožto náhradou cementu byl zvolen vysokoteplotní popílek ArcelorMittal s vyšší ztrátou žíháním.

Vysokoteplotní popílek se běžně používá jako částečná náhrada cementu v betonových směsích. Obvyklá dávka pro běžné použití se pohybuje v rozmezí 15-35% náhrady z hmotnosti cementu. [50]

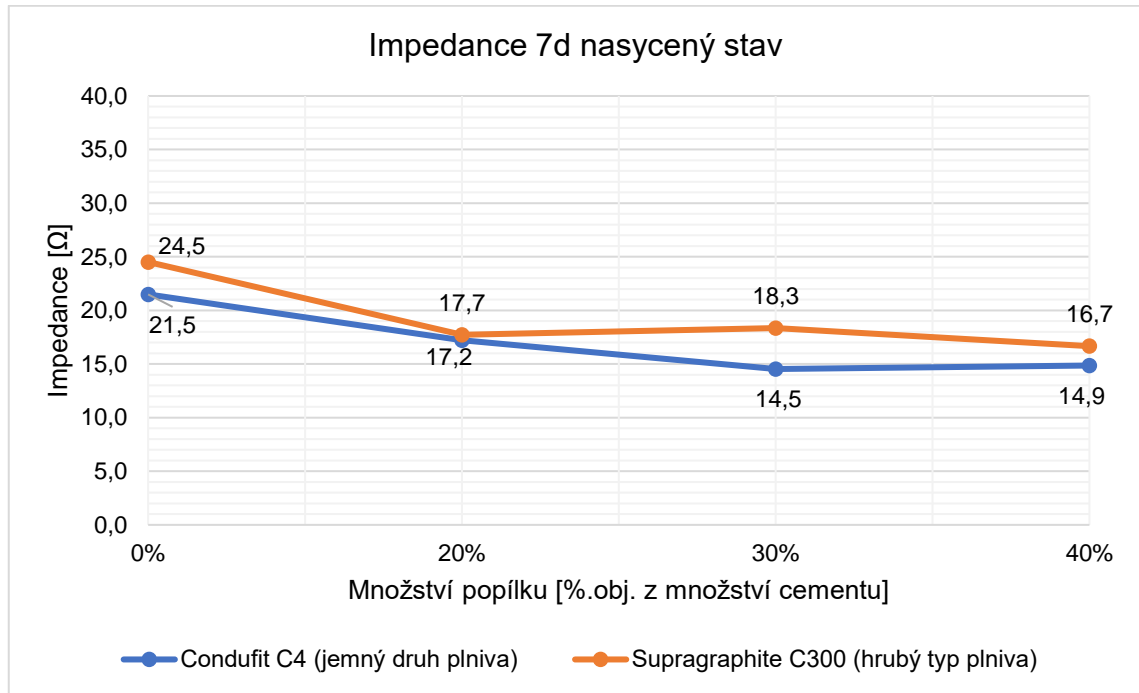
Byla navržena náhrada v množství 20, 30 a 40 % z objemu cementu tj. (přibližně 15, 25 a 35 % hmotnostně). Složení receptur je uvedeno v následující tabulce.

Tabulka č. 28 Složení směsí pro ověření možnosti částečné náhrady cementu

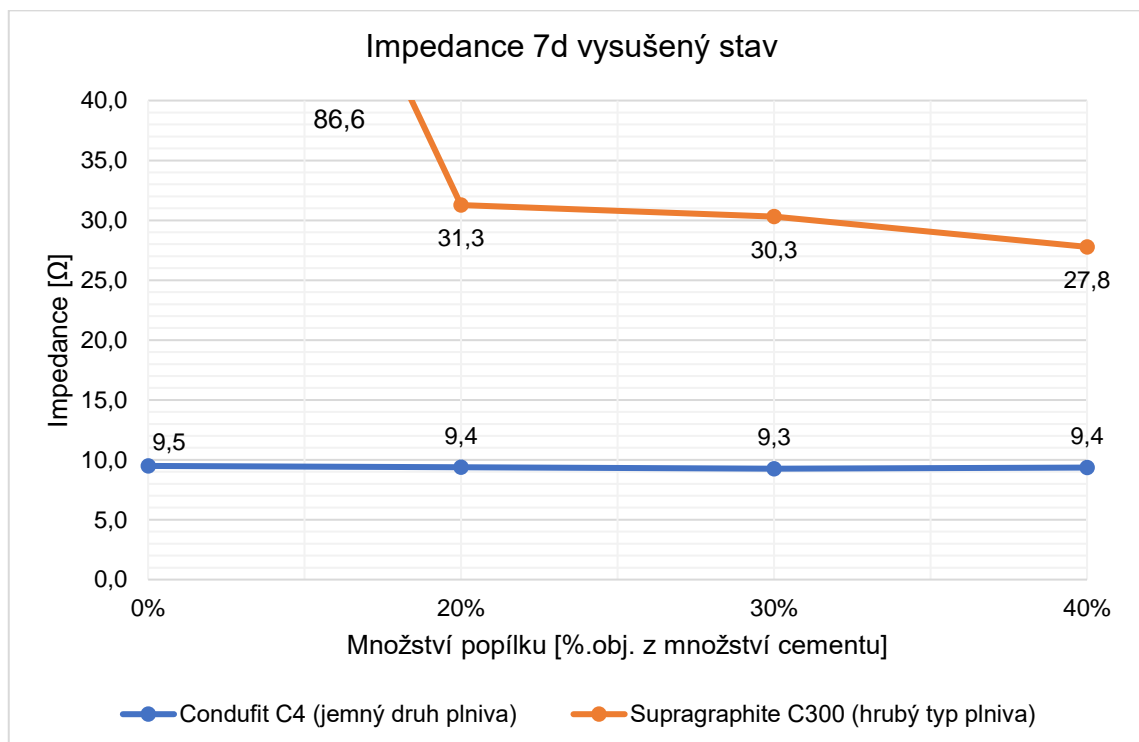
Složka:	Označení směsi			
	REF	20 %	30 %	40 %
	Množství [hm. %]			
Portlandský cement CEM I 42,5R	17,8	15,0	13,7	12,3
Popílek ArcelorMittal	0,0	2,8	4,1	5,5
Mikro mletý vápenec	7,1	7,1	7,1	7,1
Směs křemičitých písků 0-4 mm	59,9	59,9	59,9	59,9
Plastifikační přísada	0,12	0,12	0,12	0,12
Funkční plnivo	15,0	15,0	15,0	15,0

#### 4.6.1.1 Vliv částečné náhrady cementu na impedanci kompozitu

Impedance byla stanovena po 7mi a 28mi dnech v nasyceném i vysušeném stavu. Výsledky jsou uvedeny v následujících grafech a tabulkách.



Graf č. 16 Vliv náhrady cementu popílkem na impedanci nasyceného kompozitu po 7mi dnech



Graf č. 17 Vliv náhrady cementu popílkem na impedanci vysušeného kompozitu po 7 dmi dnech

Tabulka č. 29 Vliv náhrady cementu popílkem na impedanci po 7mi dnech v nasyceném stavu

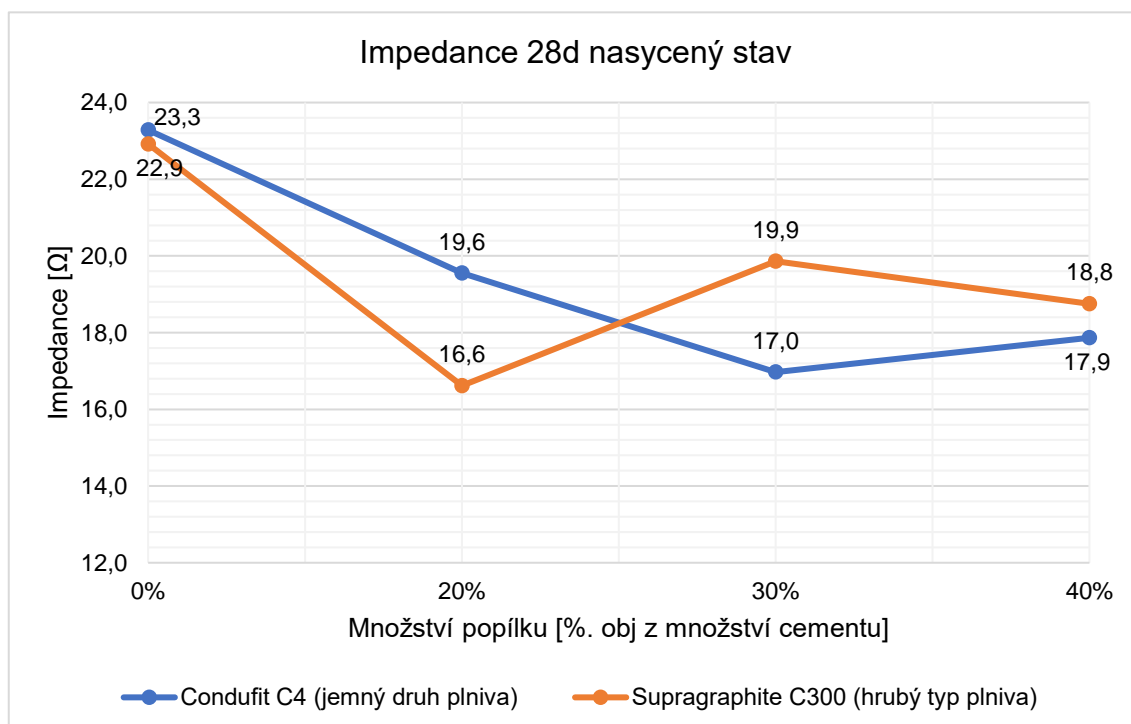
Impedance 7 d nasycený stav	Množství náhrady		
Druh kompozitu	20 %	30 %	40 %
Condufit C4 (s jemným typem plniva)	-20,0 %	-32,6 %	-30,7 %
Supragraphite C300 (s hrubým typem plniva)	-27,8 %	-25,3 %	-93,2 %

Tabulka č. 30 Vliv náhrady cementu popílkem na impedanci po 7mi dnech v suchém stavu

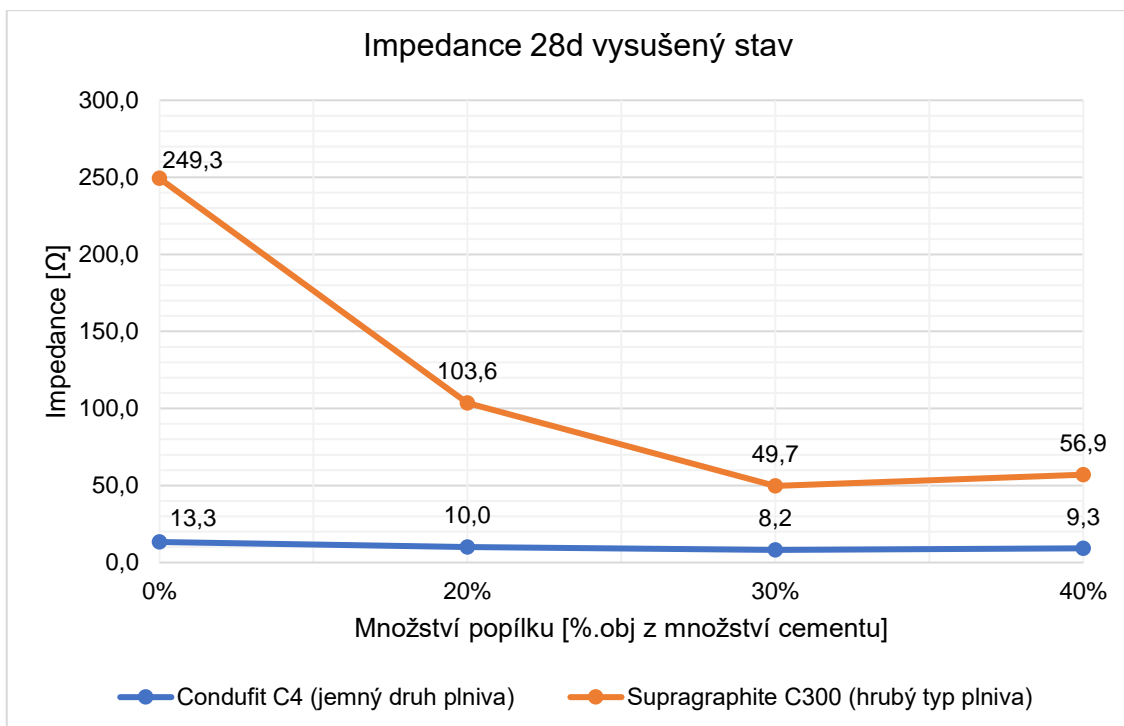
Impedance 7 d suchý stav	Množství náhrady		
Druh kompozitu	20 %	30 %	40 %
Condufit C4 (s jemným typem plniva)	-1,1 %	-2,1 %	-1,1 %
Supragraphite C300 (s hrubým typem plniva)	-63,9 %	-65,0 %	-67,9 %

Po 7mi dnech u vzorků s částečnou náhradou cementu vysokoteplotním popílkem, výrazně klesla impedance obou kompozitů v nasyceném stavu. V suchém stavu je výrazný pokles zaznamenán pouze u kompozitu s obsahem hrubého typu plniva

Při měření nasycených vzorků, je stanovení impedance výrazně ovlivněna obsahem vody ve vzorku, ale snížení impedance je i přes to znatelné.



Graf č. 18 Vliv náhrady cementu popílkem na impedanci nasyceného kompozitu po 28mi dnech



*Graf č. 19 Vliv náhrady cementu popílkem na impedanci vysušeného kompozitu po 28mi dnech*

*Tabulka č. 31 Vliv náhrady cementu popílkem na impedanci po 28mi dnech v nasyceném stavu*

Impedance 28 d nasycený stav	Množství náhrady		
	20 %	30 %	40 %
Druh kompozitu			
Condufit C4 (s jemným typem plniva)	-15,9 %	-27,0 %	-23,2 %
Supragraphite C300 (s hrubým typem plniva)	-27,5 %	-13,1 %	-17,9 %

*Tabulka č. 32 Vliv náhrady cementu popílkem na impedanci po 28mi dnech v suchém stavu*

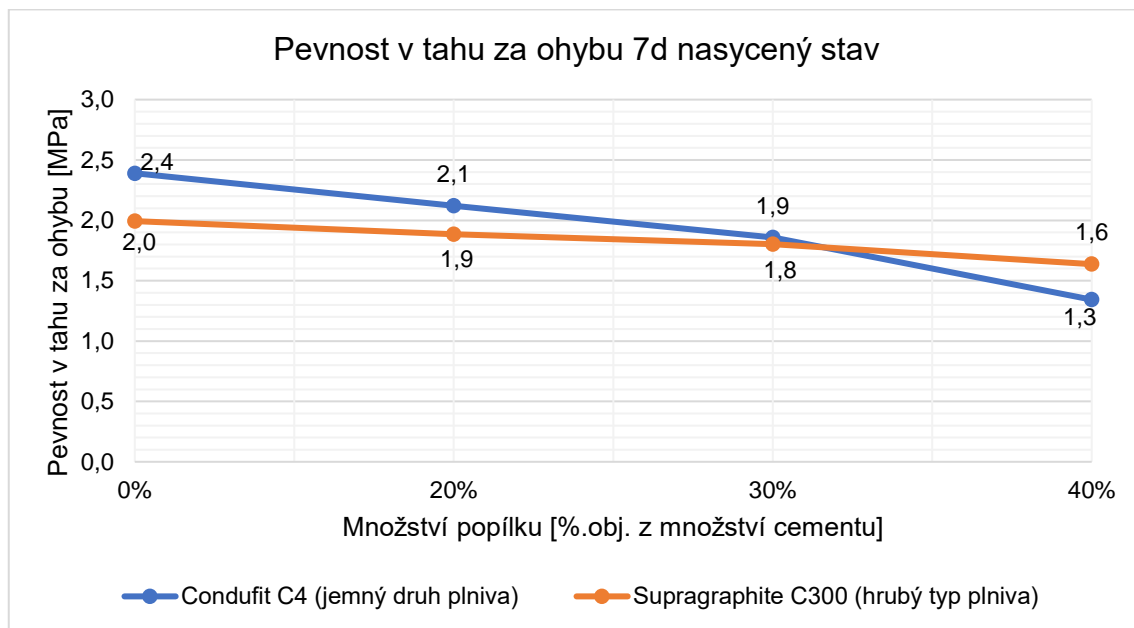
Impedance 28 d suchý stav	Množství náhrady		
	20 %	30 %	40 %
Druh kompozitu			
Condufit C4 (s jemným typem plniva)	-24,8 %	-38,3 %	-30,1 %
Supragraphite C300 (s hrubým typem plniva)	-58,4 %	-80,1 %	-77,2 %

Po 28mi dnech zrání se významně zvýšila impedance u obou typu kompozitů. Impedance stanovená na nasycených vzorcích po 28mi dnech kopíruje trend impedance stanovené po 7mi dnech v nasyceném stavu, impedanci nadále ovlivňuje množství obsažené ve vzorku, ve vysušeném stavu jsou taktéž obdobné trendy v porovnání s impedancí po 7mi dnech.

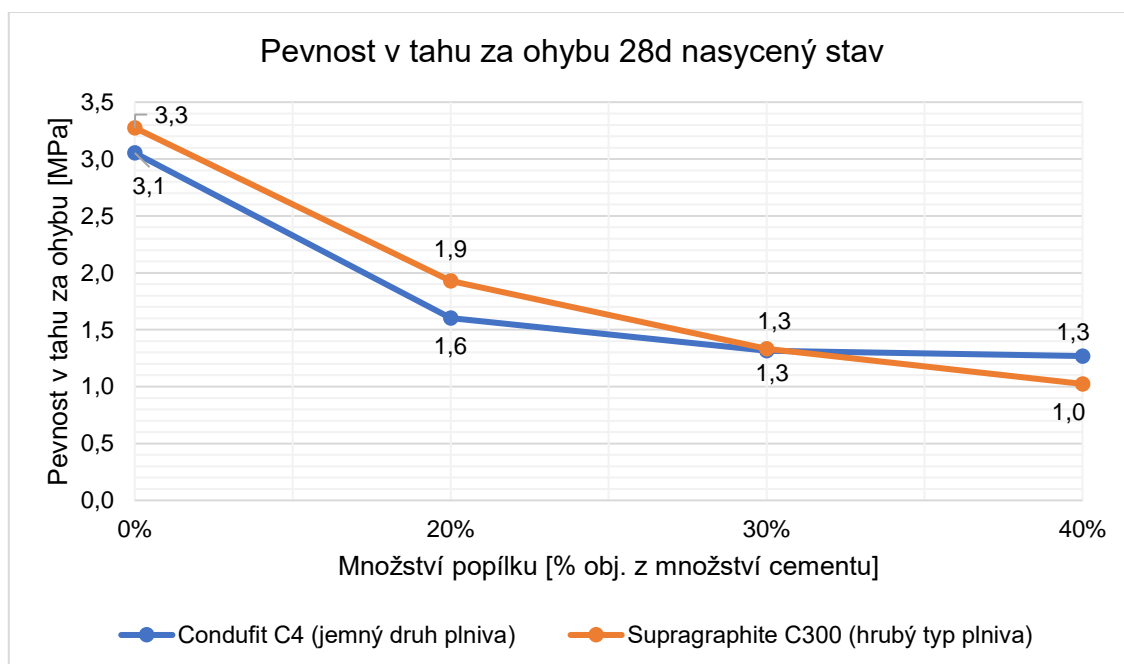


#### 4.6.1.2 Vliv částečné náhrady cementu na mechanické vlastnosti kompozitu

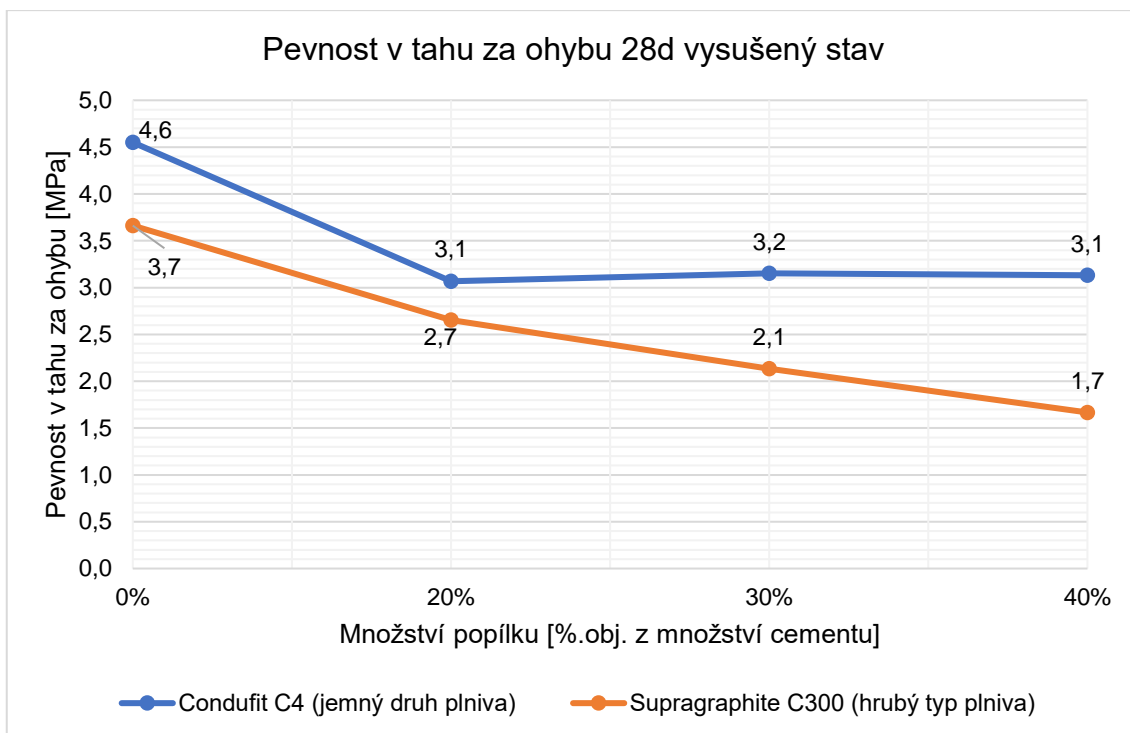
Na vzorcích byla ověřena pevnost v tlaku i v tahu za ohybu. Tyto mechanické vlastnosti byly sledovány po 7mi dnech v nasyceném stavu a po 28 dnech v nasyceném i vysušeném stavu zkušebních těles. Výsledky jsou uvedeny v následujících grafech a tabulkách.



Graf č. 20 Vliv náhrady cementu popílkem na pevnost v tahu za ohybu nasyceného kompozitu po 7mi dnech



Graf č. 21 Vliv náhrady cementu popílkem na pevnost v tahu za ohybu nasyceného kompozitu po 28mi dnech



*Graf č. 22 Vliv náhrady cementu popílkem na pevnost v tahu za ohybu vysušeného kompozitu po 7mi dnech*

*Tabulka č. 33 Vliv náhrady cementu popílkem na pevnost v tahu za ohybu po 7mi dnech v nasyceném stavu*

Pevnost v tahu za ohybu 7 d nasycený stav	Množství náhrady			
	Druh kompozitu	20 %	30 %	40 %
Condufit C4 (s jemným typem plniva)		-12,5 %	-20,8 %	-45,8 %
Supragraphite C300 (s hrubým typem plniva)		-5,0 %	-10,0 %	-20,0 %

*Tabulka č. 34 Vliv náhrady cementu popílkem na pevnost v tahu za ohybu po 28mi dnech v nasyceném stavu*

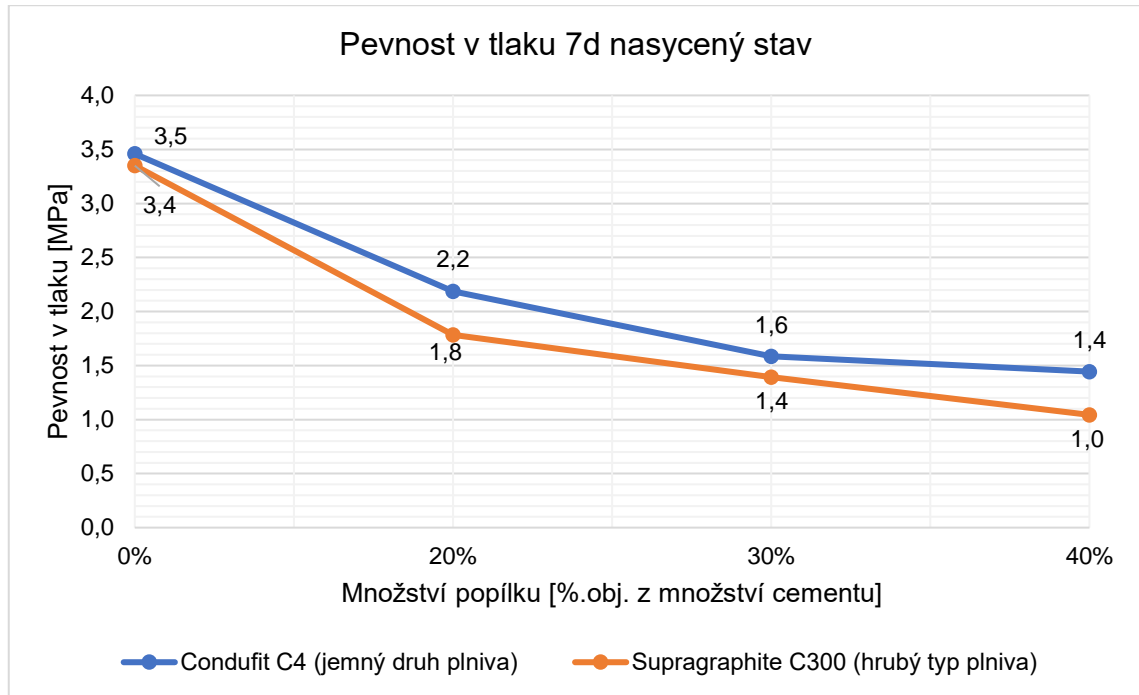
Pevnost v tahu za ohybu 28 d nasycený stav	Množství náhrady			
	Druh kompozitu	20 %	30 %	40 %
Condufit C4 (s jemným typem plniva)		-48,4 %	-58,1 %	-58,1 %
Supragraphite C300 (s hrubým typem plniva)		-42,4 %	-60,6 %	-97,0 %

*Tabulka č. 35 Vliv náhrady cementu popílkem na pevnost v tahu za ohybu po 28mi dnech v suchém stavu*

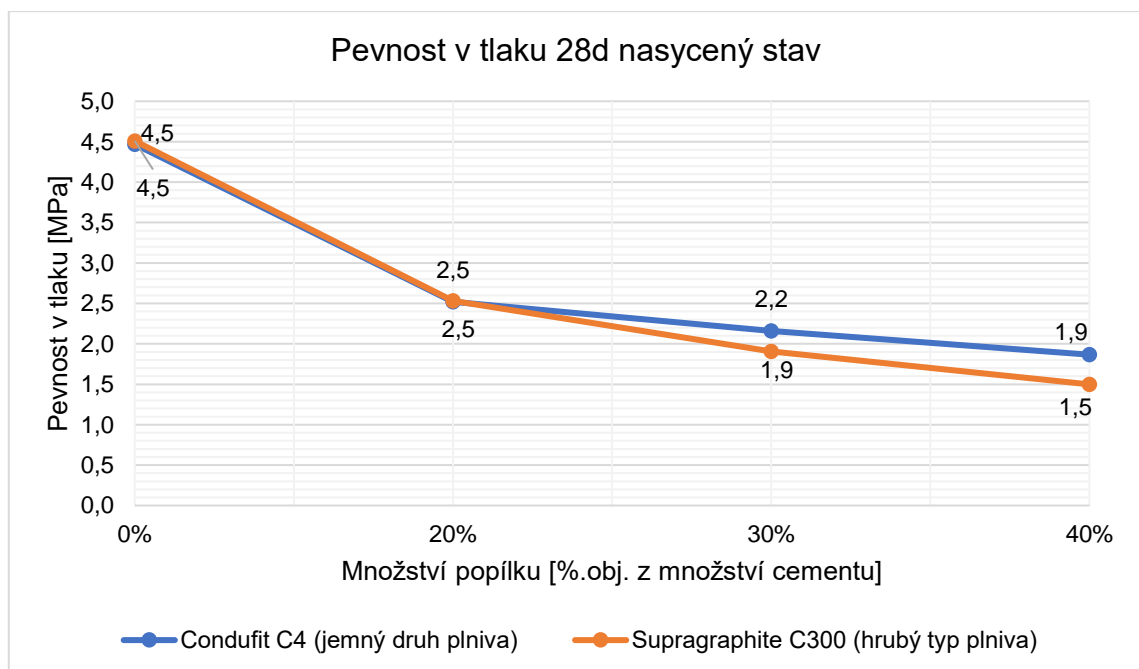
Pevnost v tahu za ohybu 28 d suchý stav	Množství náhrady			
	Druh kompozitu	20 %	30 %	40 %
Condufit C4 (s jemným typem plniva)		-32,6 %	-30,4 %	-32,6 %
Supragraphite C300 (s hrubým typem plniva)		-27,0 %	-43,2 %	-54,1 %

Pevnost v tahu za ohybu s narůstající částečnou náhradou cementu vysokoteplotním popílkem klesá, tyto rozdíly mohou být způsobeny zpomaleným nárůstem pevností, které způsobuje popílek.

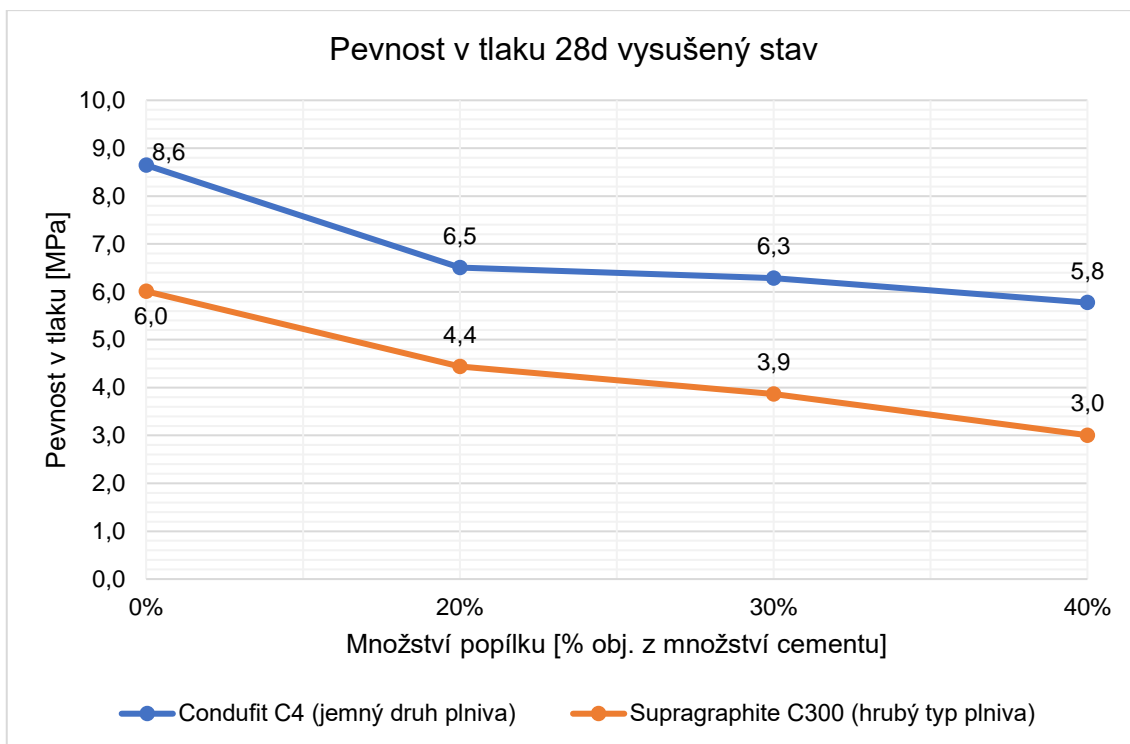
Při vysušení vzorků dochází k urychlení nárůstu pevností vlivem zvýšené teploty a vlhkosti.



*Graf č. 23 Vliv náhrady cementu popílkem na pevnost v tlaku nasyceného kompozitu po 7mi dnech*



*Graf č. 24 Vliv náhrady cementu popílkem na pevnost v tlaku nasyceného kompozitu po 28mi dnech*



*Graf č. 25 Vliv náhrady cementu popílkem na pevnost v tlaku vysušeného kompozitu po 28mi dnech*

*Tabulka č. 36 Vliv náhrady cementu popílkem na pevnost v tlaku po 7mi dnech v nasyceném stavu*

Pevnost v tlaku 7 d nasycený stav Druh kompozitu	Množství náhrady		
	20 %	30 %	40 %
Condufit C4 (s jemným typem plniva)	-37,1 %	-54,3 %	-60,0 %
Supragraphite C300 (s hrubým typem plniva)	-47,1 %	-58,8 %	-70,6 %

*Tabulka č. 37 Vliv náhrady cementu popílkem na pevnost v tlaku po 28mi dnech v nasyceném stavu*

Pevnost v tlaku 28 d nasycený stav Druh kompozitu	Množství náhrady		
	20 %	30 %	40 %
Condufit C4 (s jemným typem plniva)	-44,4 %	-51,1 %	-57,8 %
Supragraphite C300 (s hrubým typem plniva)	-44,4 %	-57,8 %	-66,7 %

*Tabulka č. 38 Vliv náhrady cementu popílkem na pevnost v tlaku po 28mi dnech v suchém stavu*

Pevnost v tlaku 28 d vysušený stav Druh kompozitu	Množství náhrady		
	20 %	30 %	40 %
Condufit C4 (s jemným typem plniva)	-24,4 %	-26,7 %	-32,6 %
Supragraphite C300 (s hrubým typem plniva)	-26,7 %	-35,0 %	-50,0 %

Snížení pevnosti v tlaku je taktéž jako pevnost v tahu za ohybu ovlivněna zpomaleným nárůstem pevností způsobené popílkem.

Po 28mi dnech ve vysušeném stavu opět nejspíš došlo k urychlení hydratačního procesu cementu díky zvýšené teplotě a vlhkosti.

#### **4.6.1.3 Shrnutí vlivu náhrady cementu**

Vysokoteplotní popílek s vyšší ztrátou žíhání je vhodnou druhotnou surovinou pro snížení impedance kompozitů na bázi silikátových pojiv, pro srovnání byla stanovena impedance i pro popílky se ztrátou žíháním pod 5 % která se pohybuje v rozmezích od  $4 \times 10^6$  do  $20 \times 10^6 \Omega$ , přičemž popílek ArcelorMittal se ztrátou žíháním 22 % dosahuje impedance  $180,02 \times 10^3 \Omega$ .

Dle výsledků, uvedených výše, je náhrada cementu popílkem s ohledem na snížení impedance účinnější pro kompozit s hrubým typem plniva. U kompozitu s jemným typem plniva klesly hodnoty impedance po 28mi dnech ve vysušeném stavu přibližně o 30 % u náhrady v kompozitu s obsahem hrubého typu plniva klesla impedance až o 80 % při náhradě cementu vysokoteplotním popílkem.

Vlivem náhrady cementu popílkem dochází ke snížení pevnostem po 7mi i 28mi dnech (přibližně o 50%). Tento pokles pevností je způsoben zpomaleným nárůstem pevností, který je pro popílek typický.

S ohledem na snížení počátečních pevností je zvoleno jako optimální množství náhrady 20 % pro kompozit s hrubým typem plniva, protože u tohoto množství nedošlo k poklesu pevnosti v tahu za ohybu pod hodnotu 1,5 MPa. U kompozitu s jemným typem plniva nebyla náhrada výhodná v porovnání poklesu impedance ku snížení pevností.

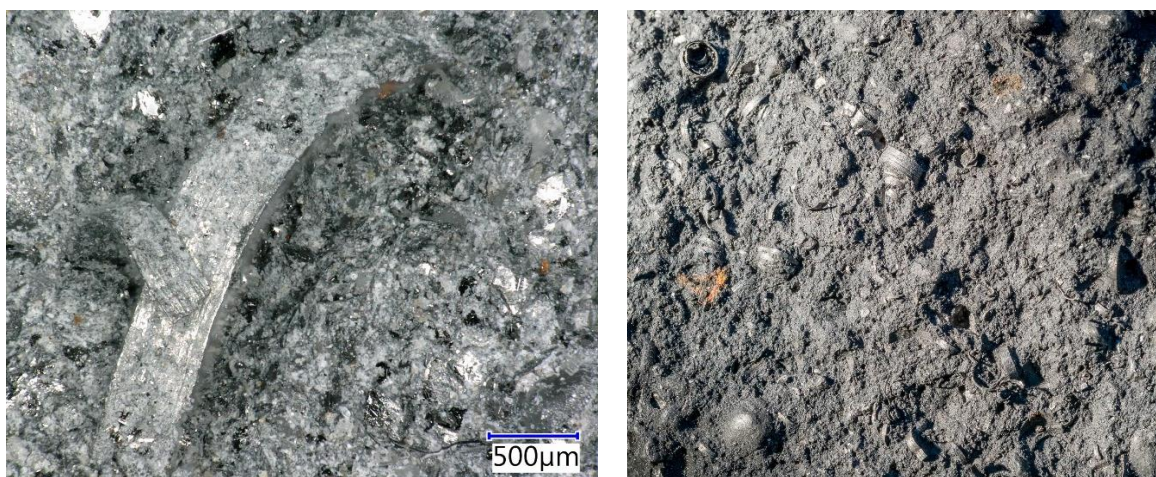
#### 4.6.2 Náhrada kameniva

Jako náhrada kameniva byly navrženy ocelové piliny. Bylo nahrazeno kamenivo srovnatelné frakce, Provoďínský písek PR 1.6-4. Náhrada kameniva byla provedena za 100 % objemu této frakce. Náhrada byla odzkoušena pro obě varianty kompozitu s obsahem jemného typu plniva (Condufit C4) a s obsahem hrubého typu plniva (Supragraphite C300). Složení směsi je uvedeno v tabulce níže.

Tabulka č. 39 Složení směsi pro náhradu kameniva PR 1.6-4 za ocelové piliny

Složka:	Množství [hm. %]
Portlandský cement CEM I 42,5R	17,4
Mikro mletý vápenec	7,0
Ocelové piliny	34,2
Směs křemičitých písků 0-1 mm	26,6
Plastifikační přísada	0,12
Funkční plnivo	14,6

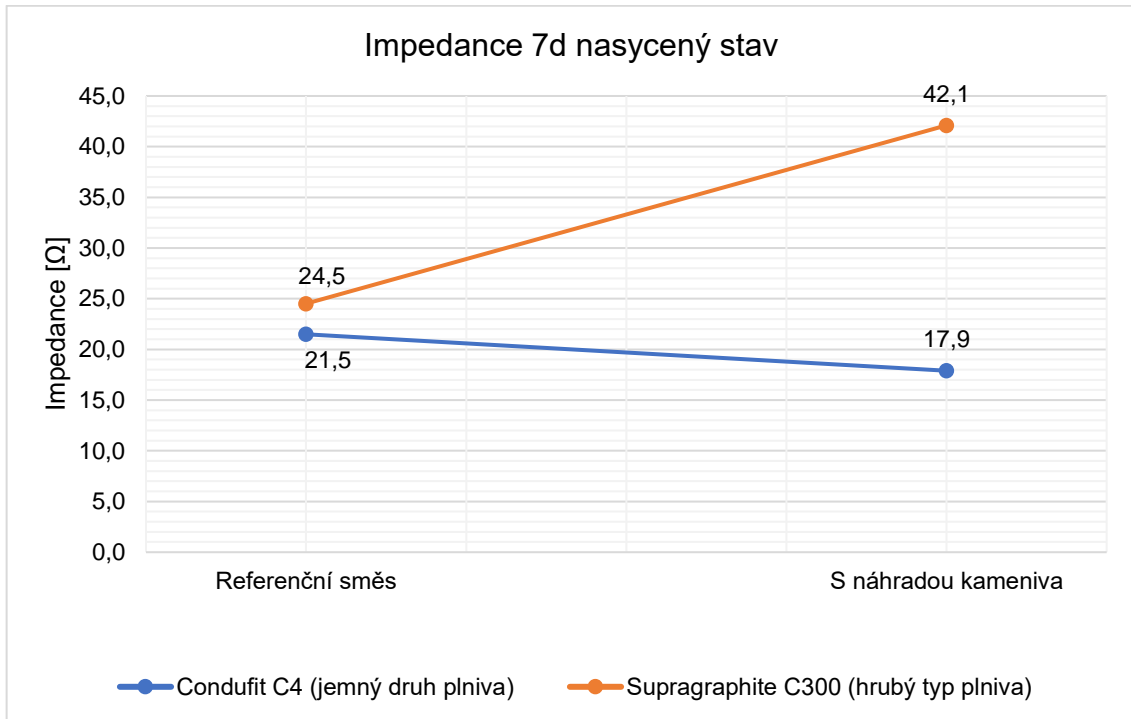
Jak již je zmíněno v Etapě I, piliny jsou obaleny mazivem, které je odstraněno pomocí saponátu. Ověření přilnavosti těchto částic k matici a jejich rozptýlení bylo ověřeno pomocí optického mikroskopu viz. následující obrázek.



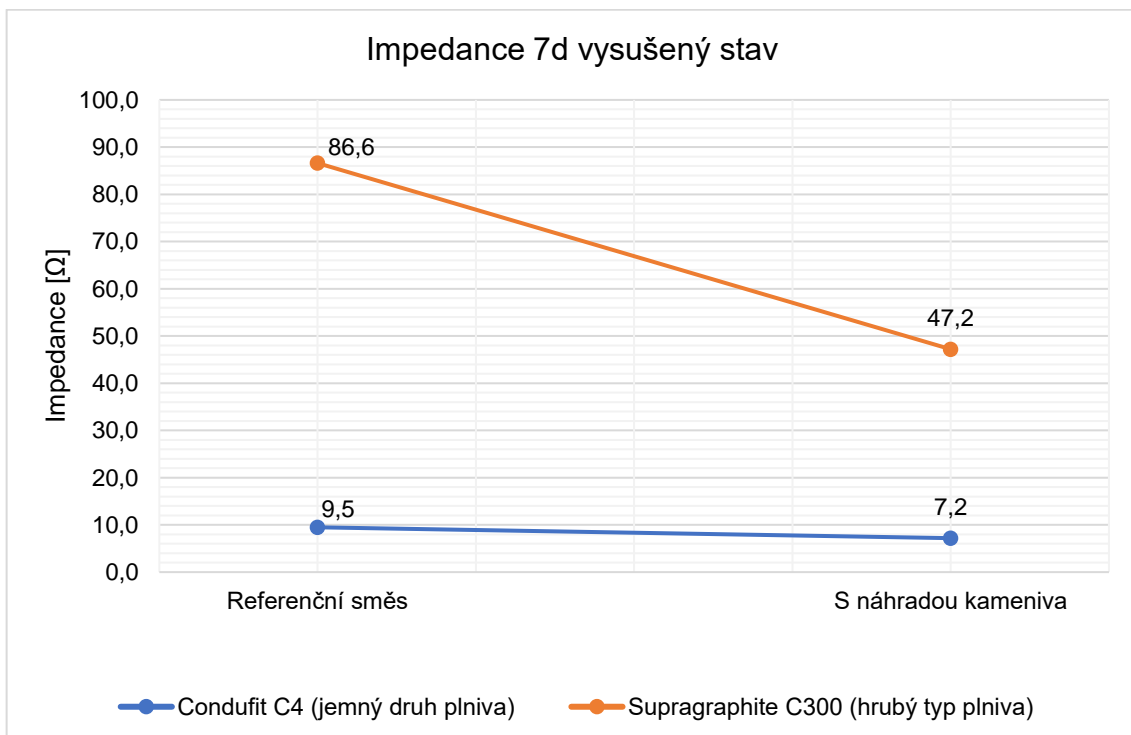
Obrázek č. 49 Detailní snímky zakomponování a rozptýlení ocelových pilin v kompozitu s jemným typem plniva a náhradou kameniva.

#### 4.6.2.1 Vliv náhrady kameniva na impedanci kompozitu

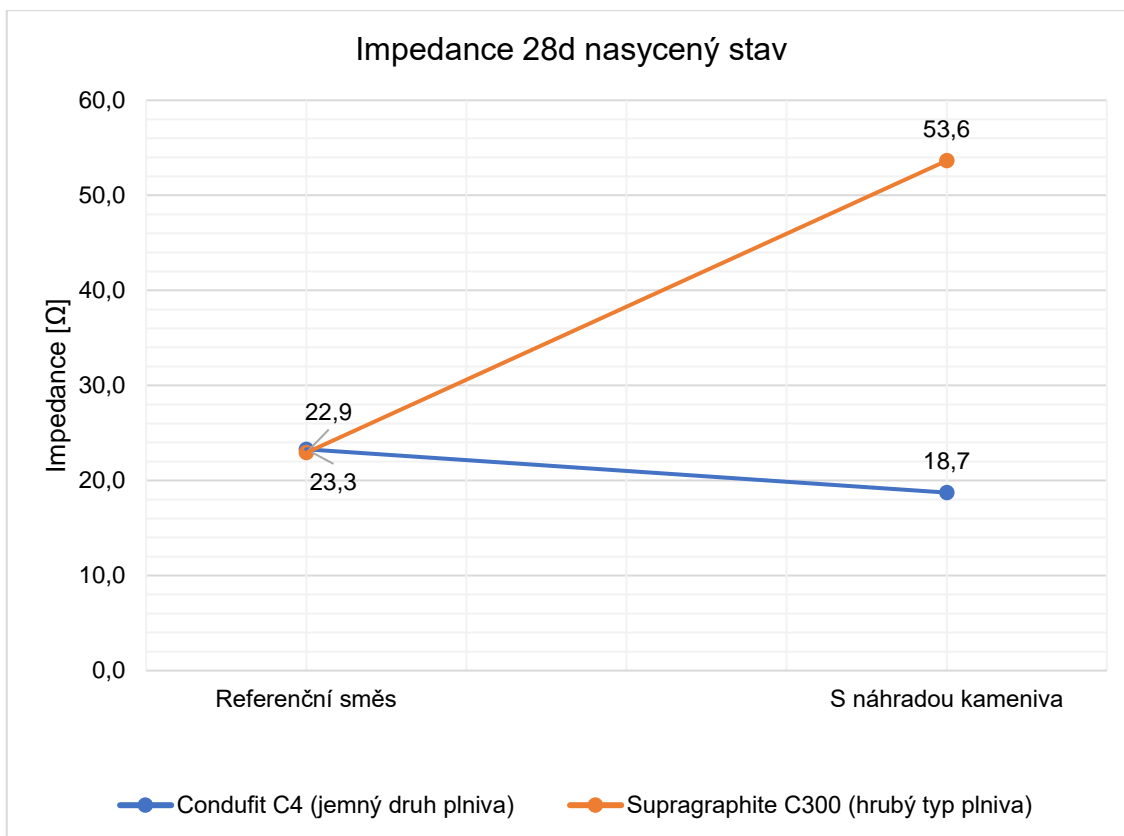
Impedance byla stanovena po 7mi a 28mi dnech v nasyceném i vysušeném stavu. Výsledky jsou uvedeny v následujících grafech a tabulkách



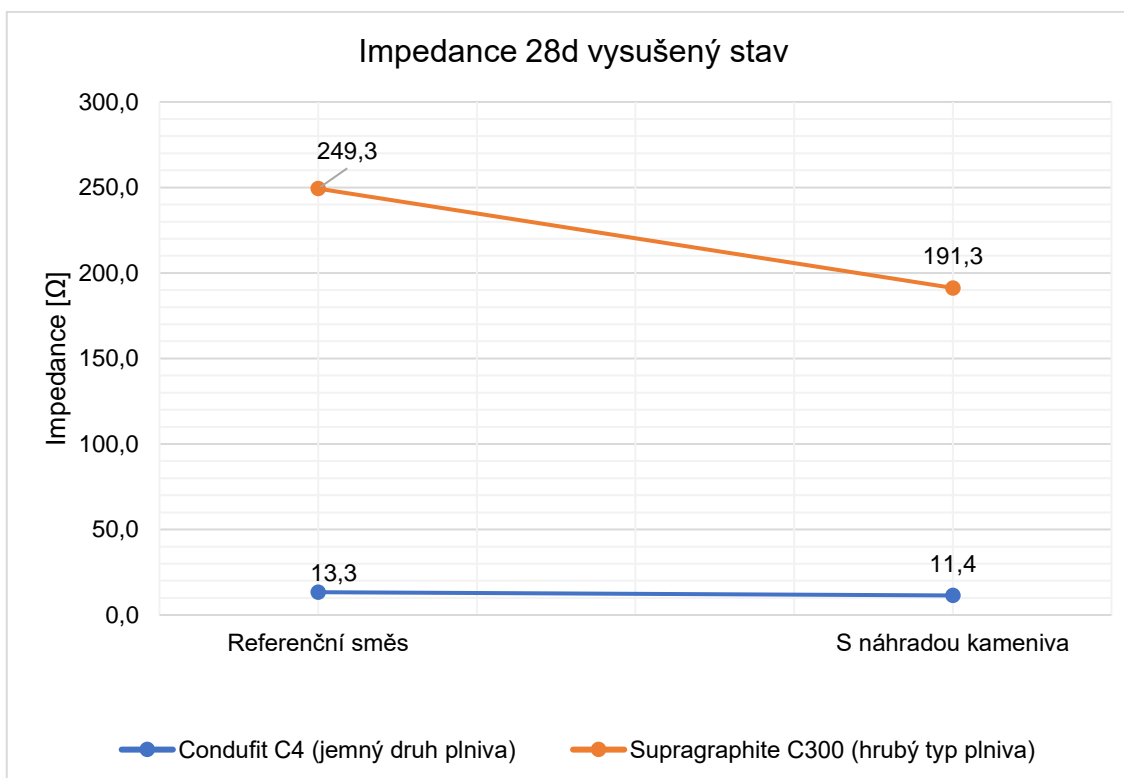
Graf č. 26 Vliv náhrady kameniva PR 1.6-4 za ocelové piliny na impedanci nasyceného kompozitu po 7mi dnech



Graf č. 27 Vliv náhrady kameniva PR 1.6-4 za ocelové piliny na impedanci vysušeného kompozitu po 7mi dnech



Graf č. 28 Vliv náhrady kameniva PR 1.6-4 za ocelové piliny na impedanci nasyceného kompozitu po 28mi dnech



Graf č. 29 Vliv náhrady kameniva PR 1.6-4 za ocelové piliny na impedanci suchého kompozitu po 28mi dnech



Tabulka č. 40 Vliv náhrady kameniva na impedanci kompozitu

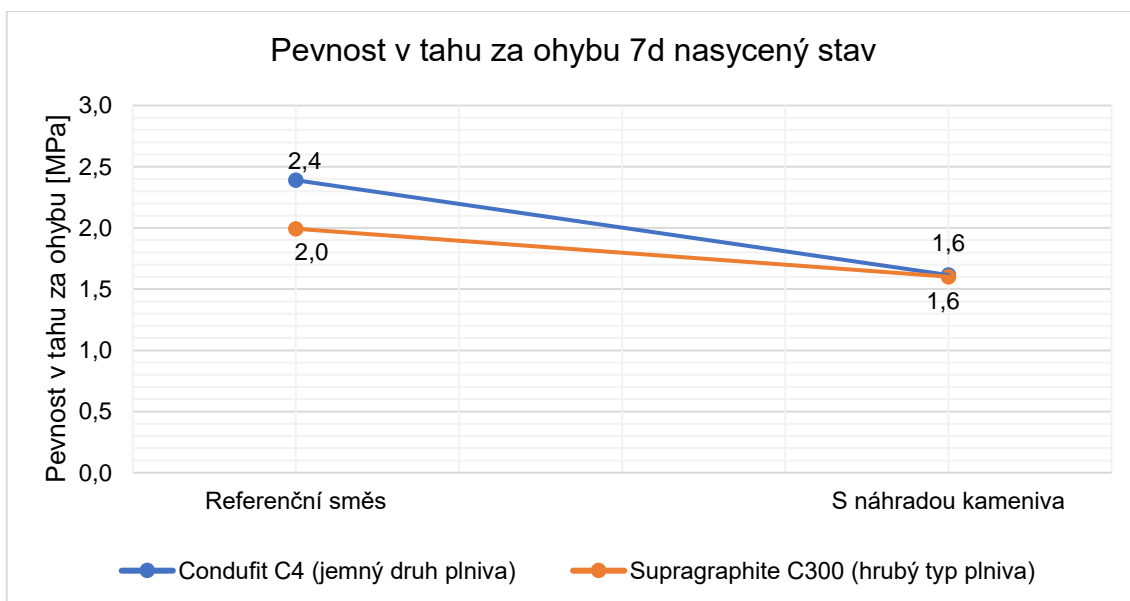
Impedance				
Druh kompozitu	7 d nasycený stav	7 d suchý stav	28 d nasycený stav	28 d suchý stav
Condufit C4 (s jemným typem plniva)	-16,7 %	-24,2 %	-16,1 %	-14,3 %
Supragraphite C300 (s hrubým typem plniva)	+71,8 %	-45,5 %	+134,1 %	-23,3 %

Hodnoty impedance ve vysušeném stavu souvisejí s nižší impedancí ocelových pilin oproti kamenivu PR 1.6-4, zatím co vyšší hodnoty impedance v nasyceném stavu ovlivňuje nasákavost vzorků.

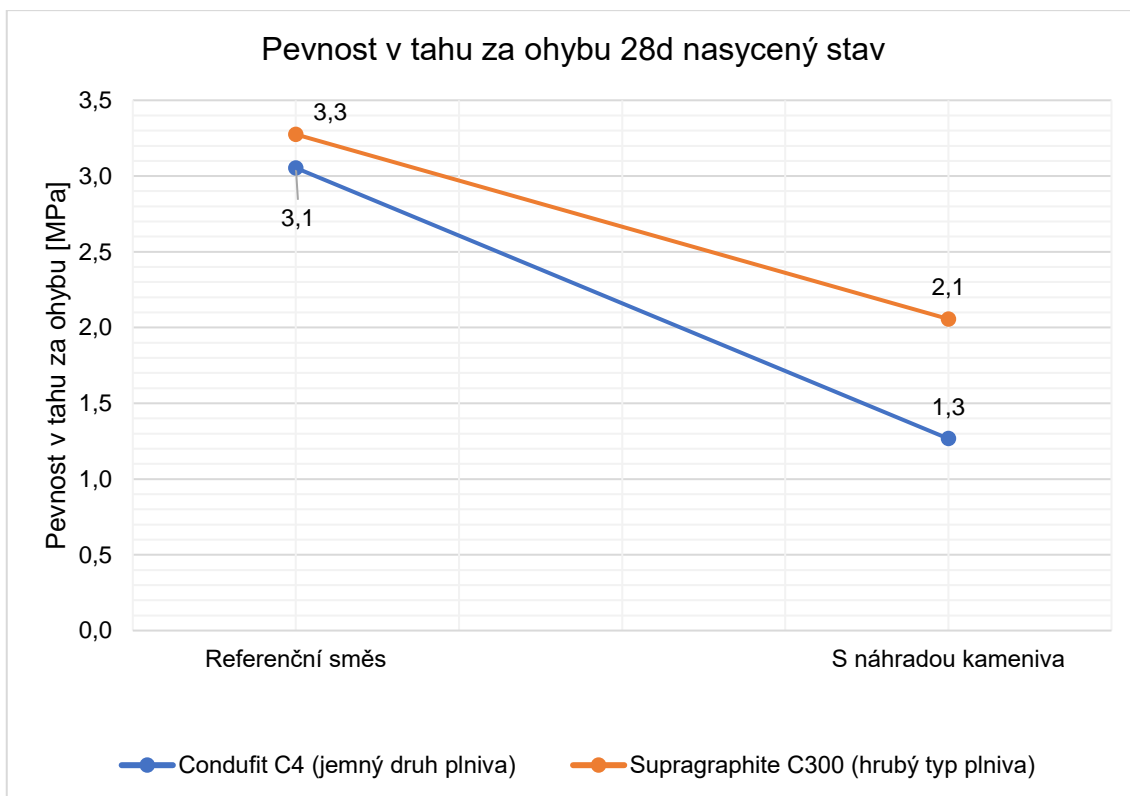
Vzhledem k výsledkům poklesů impedance v suchém stavu po 28 dnech je vhodné nahrazení kameniva u kompozitu s hrubým typem plniva.

#### 4.6.2.2 Vliv náhrady kameniva na mechanické vlastnosti kompozitu

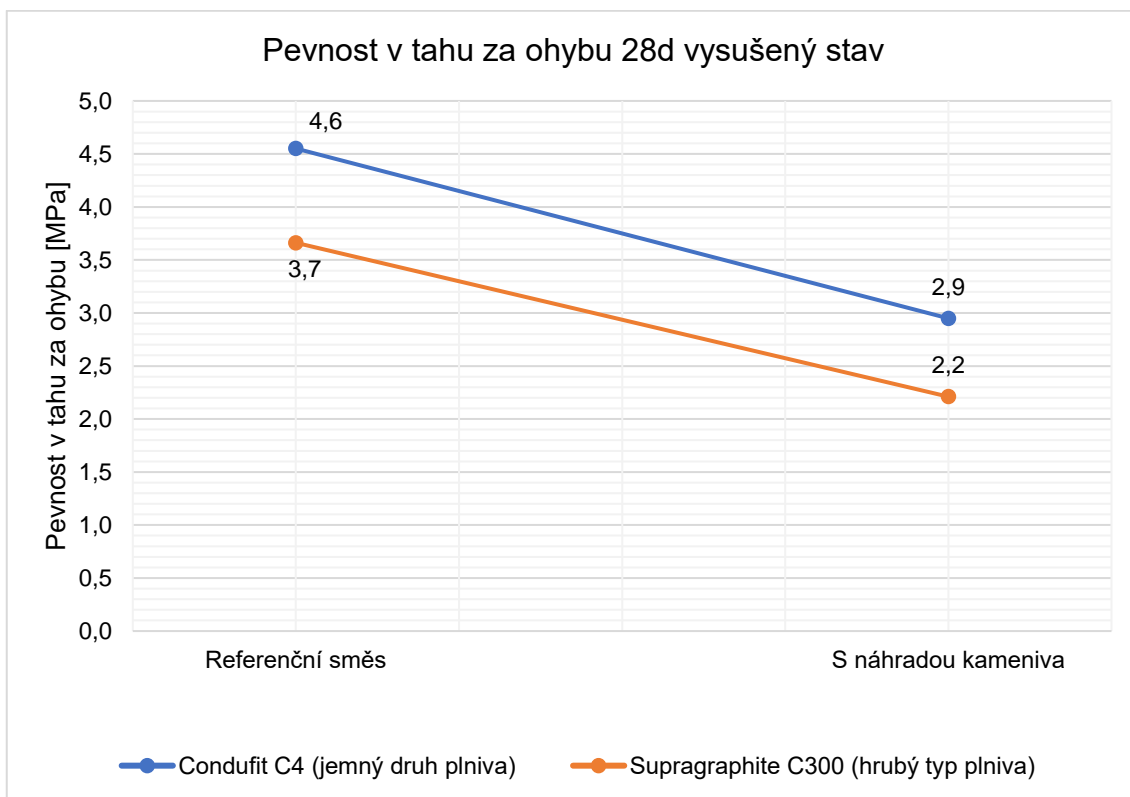
Na vzorcích byla ověřena pevnost v tlaku i v tahu za ohybu. Tyto mechanické vlastnosti byly sledovány po 7mi dnech v nasyceném stavu a po 28 dnech v nasyceném i vysušeném stavu zkušebních těles. Jelikož byla nahrazena největší frakce kameniva a zároveň s největším typem zrn, je predikován významný rozdíl v mechanických vlastnostech oproti referenčním směsím. Výsledky jsou uvedeny v následujících grafech



Graf č. 30 Vliv náhrady kameniva na pevnost v tahu za ohybu nasyceného kompozitu po 7mi dnech



Graf č. 31 Vliv náhrady kameniva na pevnost v tahu za ohybu nasyceného kompozitu po 28mi dnech



Graf č. 32 Vliv náhrady kameniva na pevnost v tahu za ohybu vysušeného kompozitu po 28mi dnech

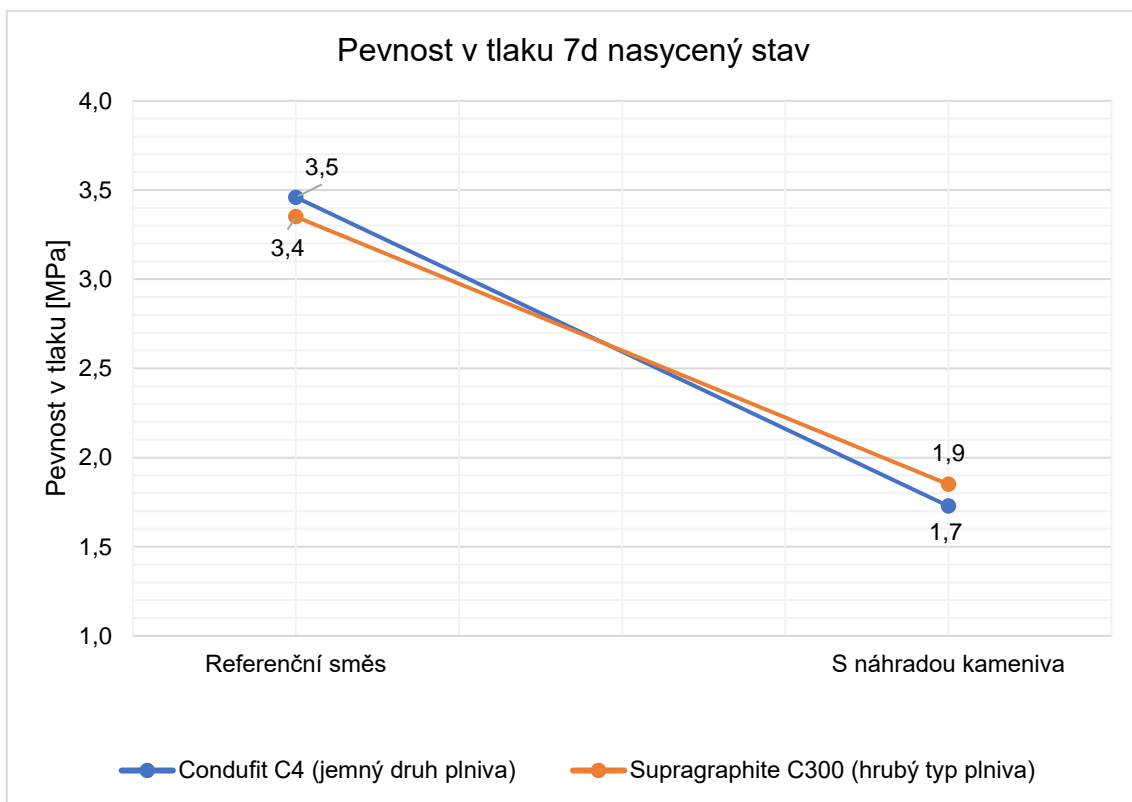
Tabulka č. 41 Vliv náhrady kameniva na pevnost v tahu za ohybu kompozitu

Pevnost v tahu za ohybu			
Druh kompozitu	7 d nasycený stav	28 d nasycený stav	28 d suchý stav
Condufit C4 (s jemným typem plniva)	-33,3 %	-58,1 %	-37,0 %
Supragraphite C300 (s hrubým typem plniva)	-20,0 %	-36,4 %	-40,5 %

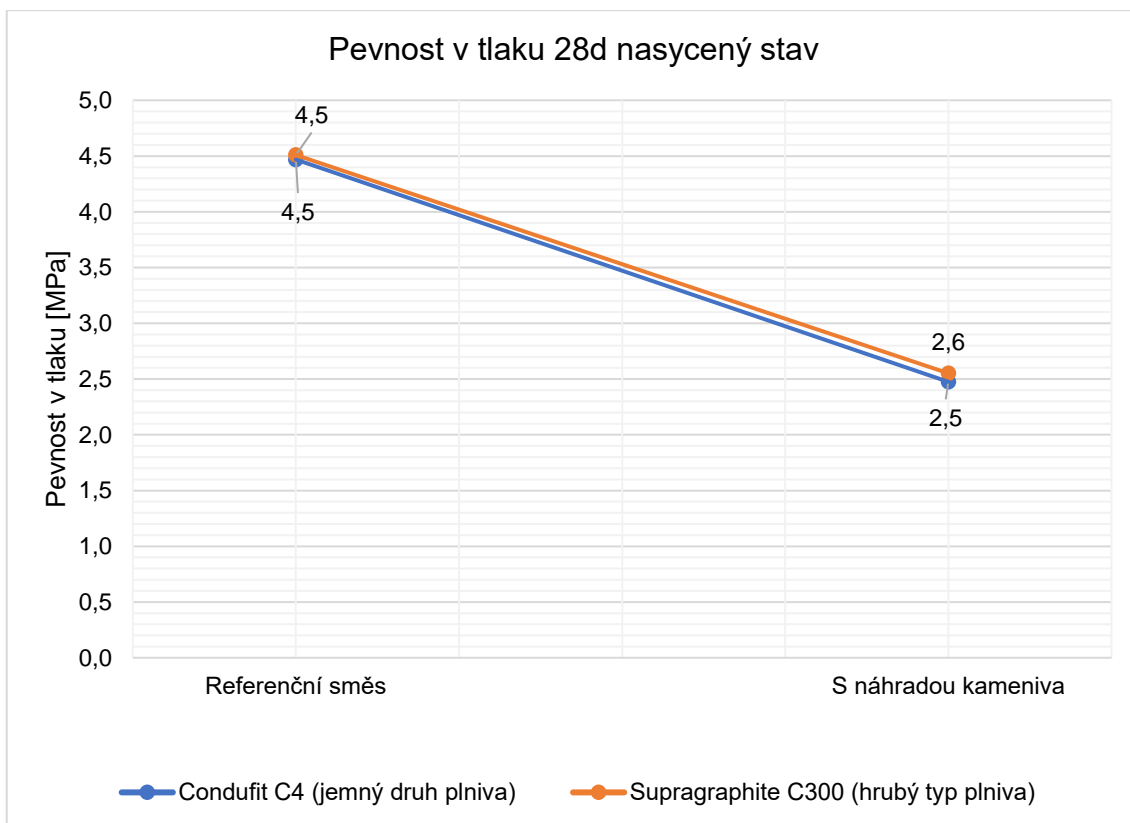
S náhradou kameniva PR 1.6-4 za odpadní ocelové piliny byl ve všech měření zaznamenán pokles pevností v tahu.

Po 28mi dnech ve vysušeném stavu se stejně jako u náhrady cementu popílkem, zvýšily pevnosti v tahu za ohybu vlivem tepelného procesu při sušení vzorků v porovnání s měřením po 28mi dnech v nasyceném stavu

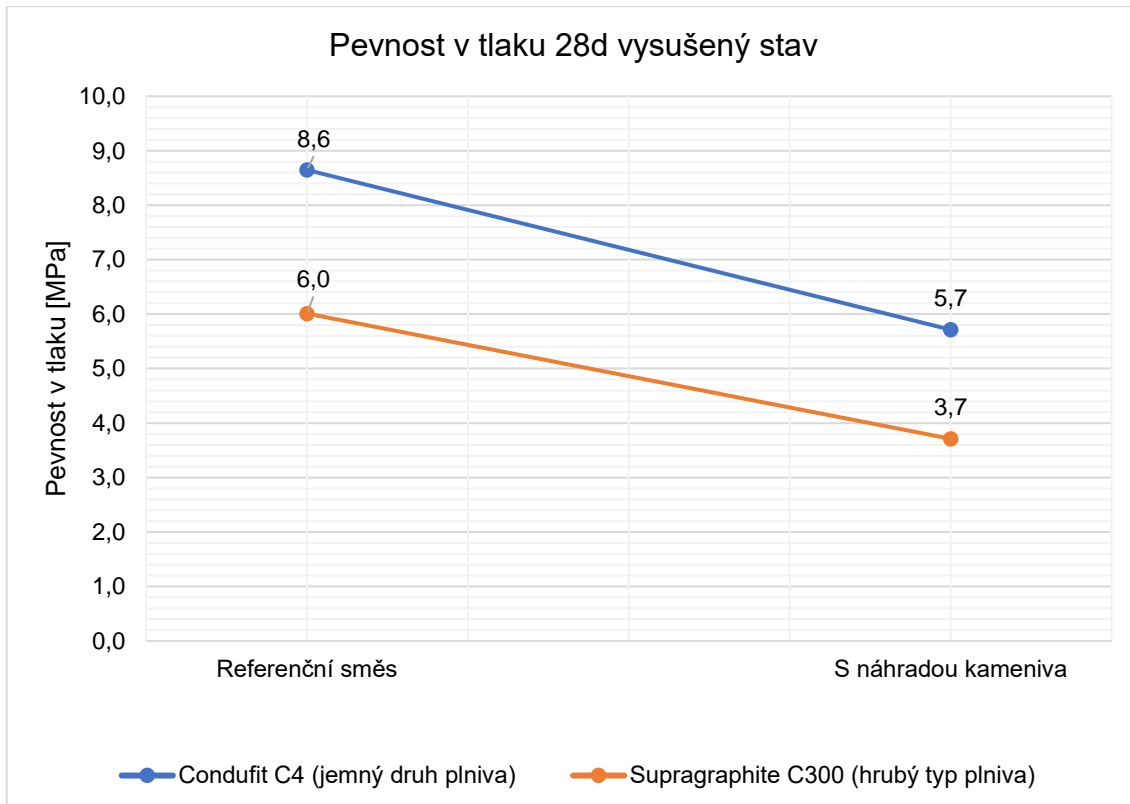
Vzhledem k poklesům v nasyceném stavu je vhodnější náhrada kameniva pro kompozit s hrubým typem plniva.



Graf č. 33 Vliv náhrady kameniva na pevnost v tlaku nasyceného kompozitu po 7mi dnech



Graf č. 34 Vliv náhrady kameniva na pevnost v tlaku nasyceného kompozitu po 28mi dnech



Graf č. 35 Vliv náhrady kameniva na pevnost v tlaku vysušeného kompozitu po 28mi dnech

Tabulka č. 42 Vliv náhrady kameniva na pevnost v tlaku kompozitu

Pevnost v tlaku			
Druh kompozitu	7 d nasycený stav	28 d nasycený stav	28 d suchý stav
Condufit C4 (s jemným typem plniva)	-51,4 %	-44,4 %	-33,7 %
Supragraphite C300 (s hrubým typem plniva)	-44,1 %	-42,2 %	-38,3 %

Pevnost v tlaku s náhradou kameniva PR1.6-4 za ocelové piliny, klesá poměrně konstantně u obou typů kompozitu.

Vzhledem k poklesům v pevnostech v tlaku při nasyceném stavu je vhodnější pro náhradu kameniva PR1.6 stejně jako pro pevnost v tahu ta ohybu kompozit s hrubým typem plniva.

#### 4.6.2.3 Shrnutí vlivu náhrady kameniva

Vlivem náhrady kameniva za ocelové piliny došlo k poklesu impedance v suchém stavu po 7mi dnech o 24 % pro kompozit s jemným typem plniva o a 46 % pro kompozit s hrubým typem plniva. Po 28mi dnech klesla impedance pro kompozit s jemným typem plniva o 14 % a u kompozitu s hrubým typem plniva o 23 %. V nasyceném stavu zvyšují impedanci kompozitu s hrubým typem plniva přibližně dvojnásobně po 7mi i 28mi dnech.

Pevnost v tahu za ohybu se vlivem této náhrady snížila v průměru o 30-40 % ve všech případech a pevnost v tlaku klesla v průměru o 40 % ve všech typech měření vůči kompozitu z primárních surovin

Vzhledem k poměru poklesu impedance a snížení pevností v tlaku i tahu za ohybu, je náhrada kameniva za ocelové piliny vyhodnocena jako nevýhodná pro oba typy kompozitu.

### 4.6.3 Částečná náhrada primárních funkčních plniv

Jako částečná náhrada primárních funkčních plniv byly navrženy odpadní grafitové prášky společnosti Epinikon a.s. Jedná se o odpadní grafit „filtr mazačka“ a „odpad vysavač“ tyto grafity mohou vylepšit elektro vodivé vlastnosti především různorodou distribucí částic, a především snížit spotřebu primárních funkčních plniv. Mezi další alternativní náhradu byly navrženy ocelové piliny, které byly vyzkoušeny také jakožto náhrada kameniva.

Byly navrženy náhrady v množství 30 a 50 % objemu. Obě varianty budou vyzkoušeny na všech třech typech náhrad a budou ověřeny pro kompozit Condufit C4 s jemným typem plniva a pro Supragraphite C300 s hrubým typem plniva, které byly vybrány v etapě II. Složení směsí je uvedeno v následujících tabulkách.

Tabulka č. 43 Složení směsi pro ověření náhrady primárních plniv odpadním grafitem „filtr mazačka“ a „odpad vysavač“

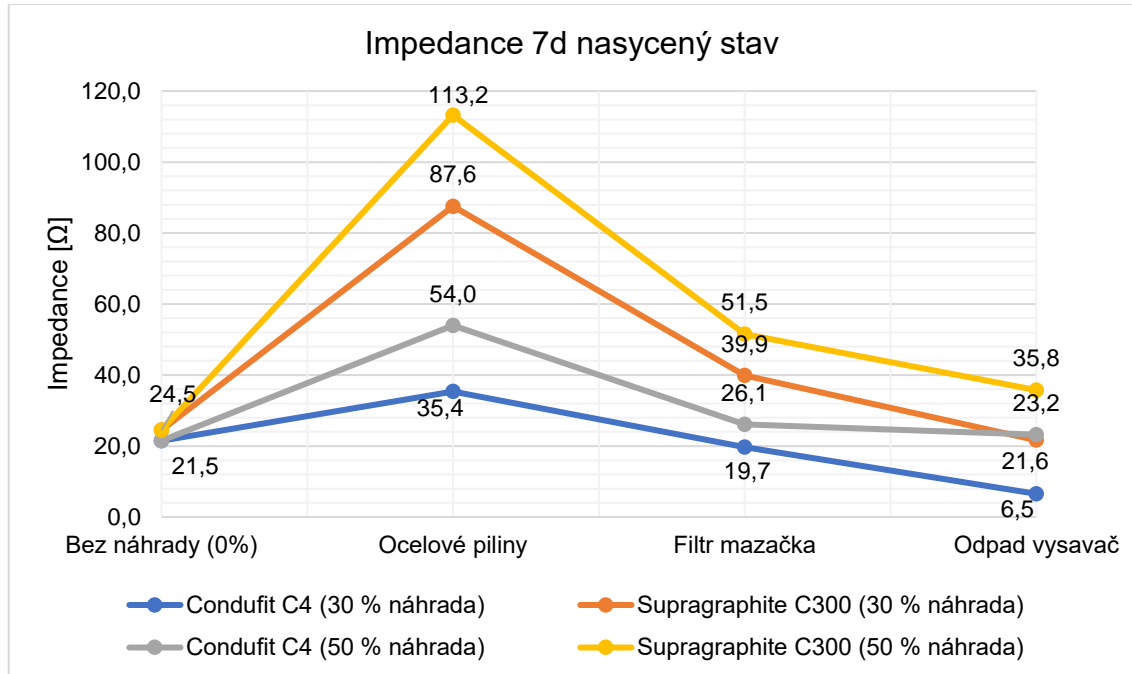
Složka:	Označení směsi :		
	REF 0 %	30 %	50 %
	Množství [hm. %]		
Portlandský cement CEM I 42,5R	17,8	17,8	17,8
Mikro mletý vápenec	7,1	7,1	7,1
Směs křemičitých písků 0-4 mm	59,9	59,9	59,9
Plastifikační přísada Stachement	0,12	0,12	0,12
Funkční plnivo	15,0	10,0	7,5
Odpadní grafit (odpad vysavač/filtr mazačka)	0	5	7,5

Tabulka č. 44 Složení směsi pro ověření náhrady primárních plniv ocelovými pilinami.

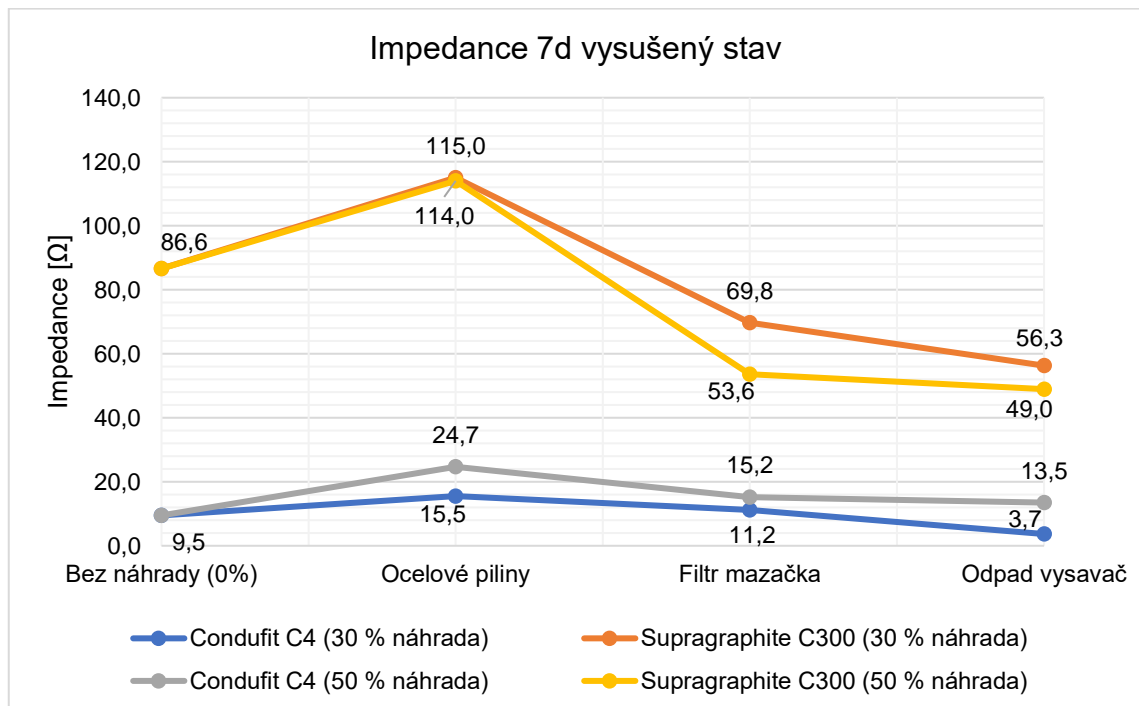
Složka:	Označení směsi :		
	REF 0 %	30 %	50 %
	Množství [hm. %]		
Portlandský cement CEM I 42,5R	17,8	17,3	17,1
Mikro mletý vápenec	7,1	6,9	6,8
Směs křemičitých písků 0-4 mm	59,9	58,2	57,4
Plastifikační přísada Stachement	0,12	0,12	0,12
Funkční plnivo	15,0	9,7	7,1
Odpadní ocelové piliny	0	7,7	11,4

#### 4.6.3.1 Vliv částečné náhrady primárních funkčních plniv na impedanci kompozitu

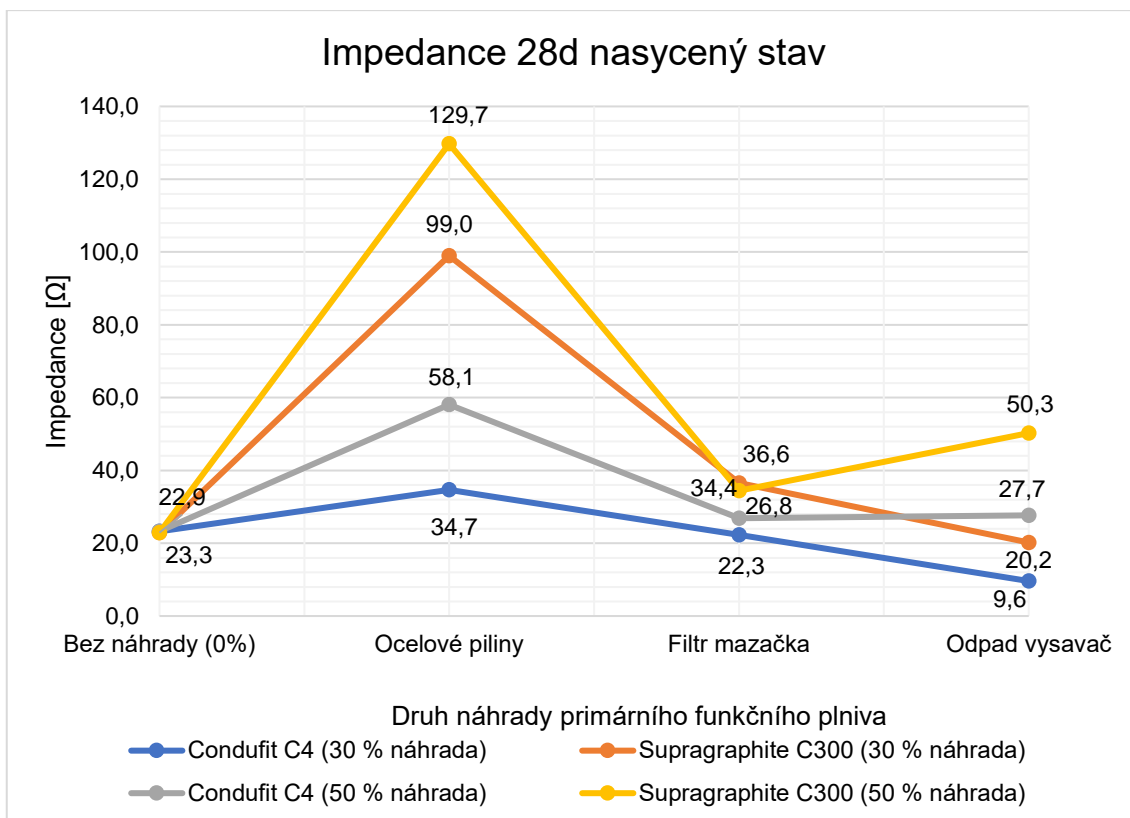
Impedance byla stanovena v suchém i nasyceném stavu po 7mi a 28mi dnech. Výsledky jsou uvedeny v následujících grafech a tabulkách.



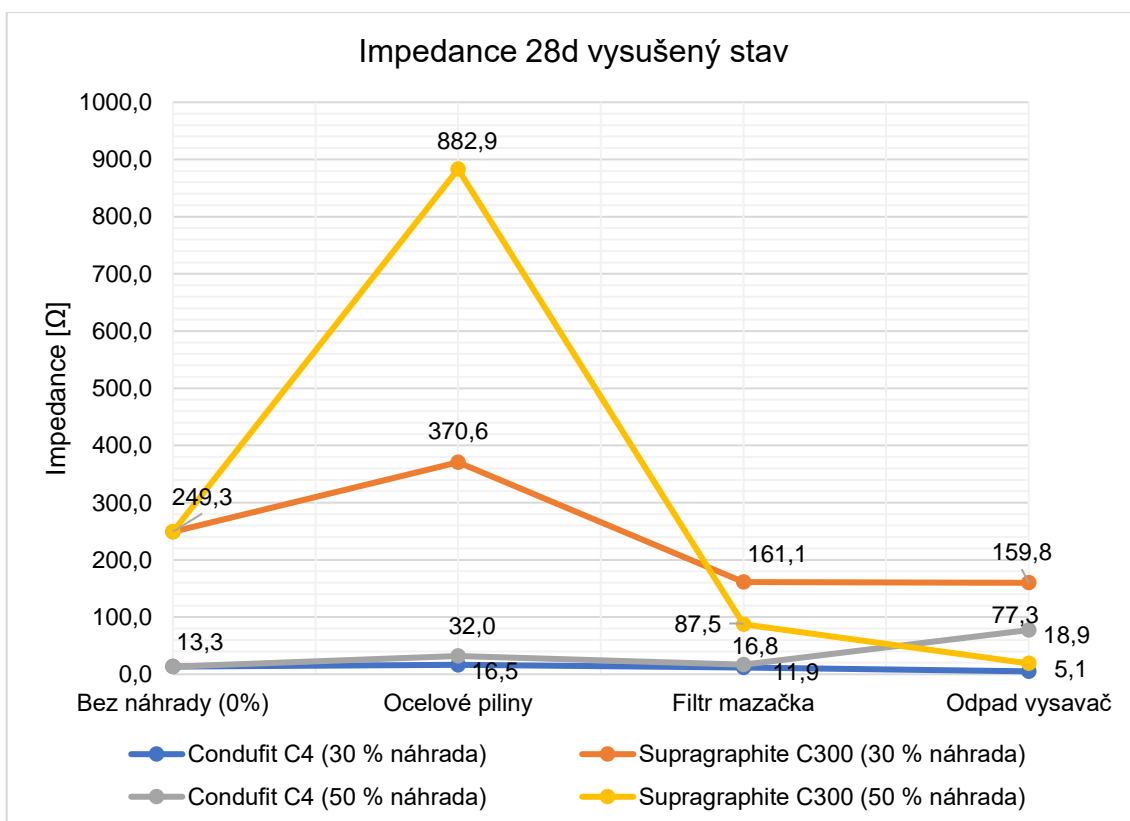
Graf č. 36 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na impedanci nasyceného kompozitu po 7mi dnech



Graf č. 37 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na impedanci vysušeného kompozitu po 7mi dnech



Graf č. 38 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na impedanci nasyceného kompozitu po 28mi dnech



Graf č. 39 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na impedanci vysušeného kompozitu po 28mi dnech



Z výše uvedených grafů je zřejmé že náhrada plniva má poměrně významný vliv na impedanci kompozitu. Ze zkoušených alternativ náhrad plniv jsou nejvhodnější odpadní grafity, které ve většině případů snížily impedanci vlastnosti kompozitu. Náhrad plniv za ocelové piliny impedanci zhoršila.

Po 7mi dnech v nasyceném a vysušeném stavu se vlivem náhrady 30 a 50 % objemově, změnilo hodnoty impedance dle tabulek níže.

*Tabulka č. 45 Vliv náhrady primárního funkčního plniva v množství 30 a 50 % na impedanci nasyceného kompozitu po 7mi dnech*

Impedance 7 d nasycený stav		Typ náhrady		
Množství náhrady	Druh kompozitu	Ocelové piliny	Filtr mazačka	Odpad vysavač
30 %	Condufit C4	+64,7 %	-8,4 %	- 69,7 %
	Supragraphite C300	+257,6 %	+62,9 %	-11,8 %
50 %	Condufit C4	+151,2 %	+21,4 %	+7,9 %
	Supragraphite C300	+362,0 %	+110,2 %	+46,1 %

*Tabulka č. 46 Vliv náhrady primárního funkčního plniva v množství 30 a 50 % na impedanci vysušeného kompozitu po 7mi dnech*

Impedance 7 d suchý stav		Typ náhrady		
Množství náhrady	Druh kompozitu	Ocelové piliny	Filtr mazačka	Odpad vysavač
30 %	Condufit C4	+63,2 %	+17,9 %	-61,1 %
	Supragraphite C300	+32,8 %	-19,4 %	-35,0 %
50 %	Condufit C4	+160,0 %	+60 %	+42,1 %
	Supragraphite C300	+31,6 %	-38,1 %	-43,4 %

Po 28mi dnech v nasyceném i vysušeném stavu vlivem náhrad 30 a 50 % objemově, se změnilo hodnoty impedance dle následujících tabulek

*Tabulka č. 47 Vliv náhrady primárního funkčního plniva v množství 30 a 50 % na impedanci kompozitu v nasyceném stavu po 28mi dnech*

Impedance 28 d nasycený stav		Typ náhrady		
Množství náhrady	Druh kompozitu	Ocelové piliny	Filtr mazačka	Odpad vysavač
30 %	Condufit C4	+48,9 %	-4,3 %	-58,8 %
	Supragraphite C300	+332,3 %	+59,8 %	-11,8 %
50 %	Condufit C4	+149,4 %	+15 %	+18,9 %
	Supragraphite C300	+466,4 %	+50,2 %	+119,7 %

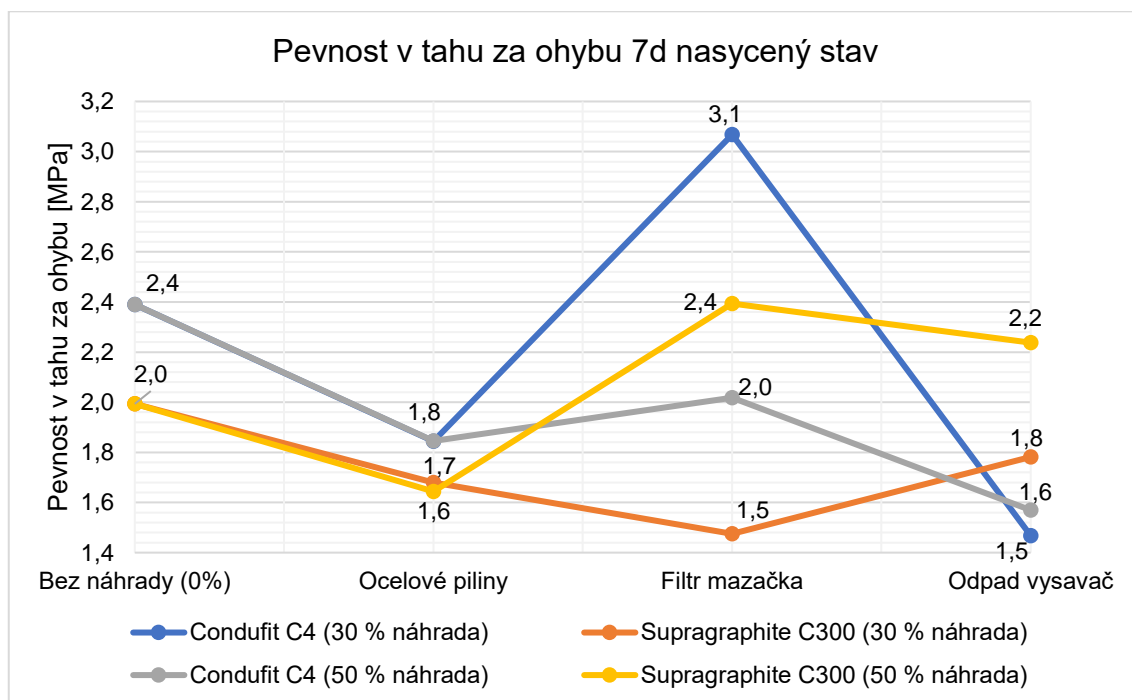
Tabulka č. 48 Vliv náhrady primárního funkčního plniva v množství 30 a 50 % na impedanci vysušeného kompozitu po 28mi dnech

Impedance 28 d vysušený stav		Typ náhrady		
Množství náhrady	Druh kompozitu	Ocelové piliny	Filtr mazačka	Odpad vysavač
30 %	Condufit C4	+24,1 %	-10,5 %	-61,7 %
	Supragraphite C300	+48,7 %	-35,4 %	-35,9 %
50 %	Condufit C4	+140,6 %	+26,3 %	+481,2 %
	Supragraphite C300	+254,2 %	-64,9 %	-92,4 %

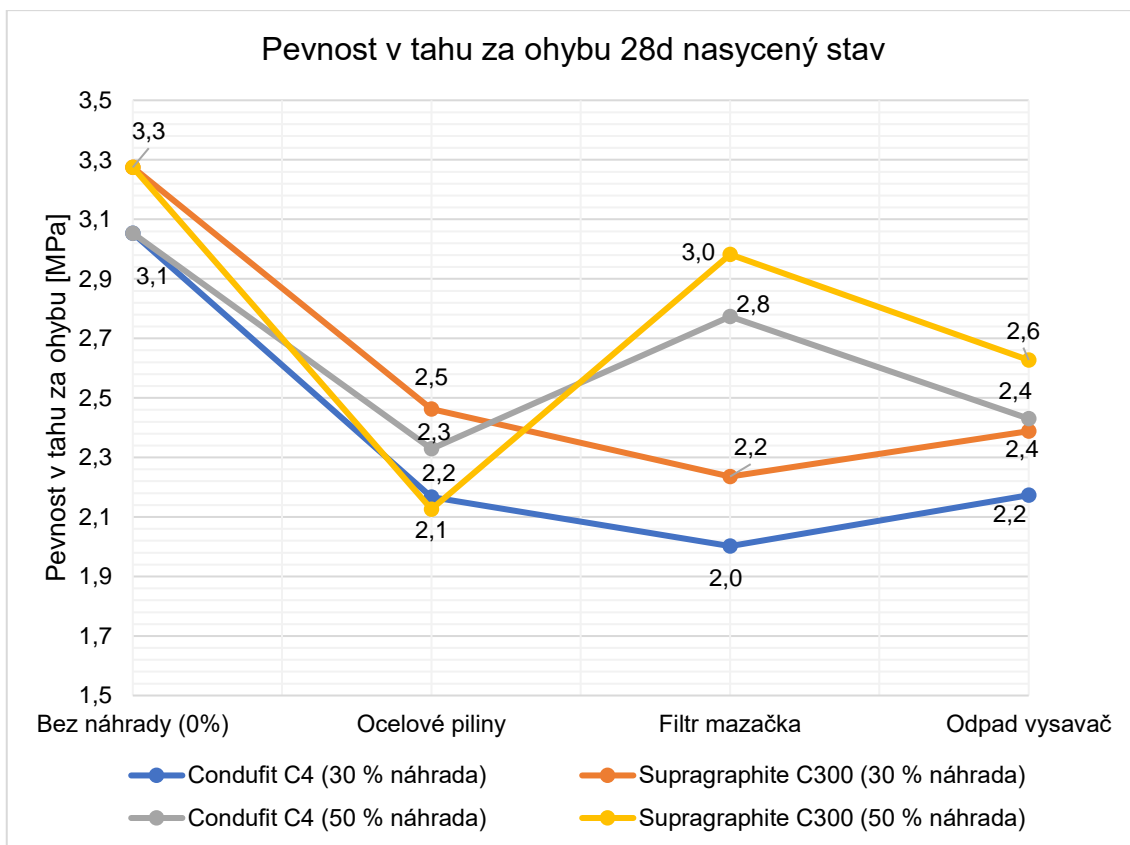
Dle výše uvedených grafů a tabulek bylo vyhodnoceno, že pro kompozit s jemným typem plniva (Condufit C4) je nejvhodnější náhradou primárního funkčního plniva v míře 30 % objemu „odpadu vysavač“. Pro kompozit s hrubým typem plniva (Supragraphite C300) je nejvhodnější 50 % náhrada odpadním grafitem „odpad vysavač“.

#### 4.6.3.2 Vliv částečné náhrady primárních funkčních plniv na mechanické vlastnosti kompozitu

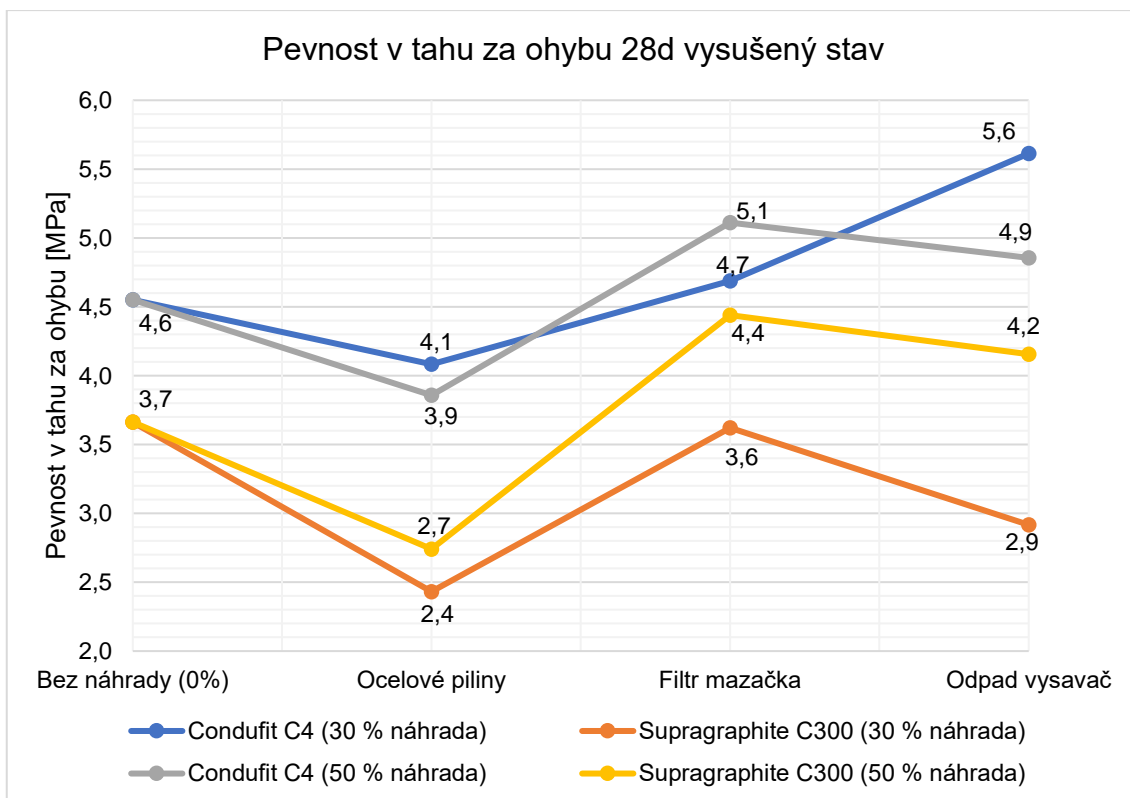
Mechanické vlastnosti byly zkušeny po 7mi dnech v nasyceném stavu a po 28mi dnech v nasyceném i vysušeném stavu. Výsledky jsou uvedeny v následujících grafech a tabulkách.



Graf č. 40 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na pevnost v tahu za ohybu nasyceného kompozitu po 7mi dnech



Graf č. 41 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na pevnost v tahu za ohybu nasyceného kompozitu po 28mi dnech.



Graf č. 42 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na pevnost v tahu za ohybu vysušeného kompozitu po 28mi dnech.

Pevnosti v tahu za ohybu po 7mi dnech v nasyceném stavu a 28mi dnech v nasyceném i vysušeném stavu jsou shrnuty v následujících tabulkách

*Tabulka č. 49 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na pevnost v tahu za ohybu nasyceného kompozitu po 7mi dnech*

Pevnost v tahu za ohybu 7 d nasycený stav		Typ náhrady		
Množství náhrady	Druh kompozitu	Ocelové piliny	Filtr mazačka	Odpad vysavač
30 %	Condufit C4	-25,0 %	+29,2 %	-37,5 %
	Supragraphite C300	-15,0 %	-25,0 %	-10,0 %
50 %	Condufit C4	-25,0 %	-16,7 %	-33,3 %
	Supragraphite C300	-20,0 %	+20,0 %	+10,0 %

*Tabulka č. 50 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na pevnost v tahu za ohybu nasyceného kompozitu po 28mi dnech*

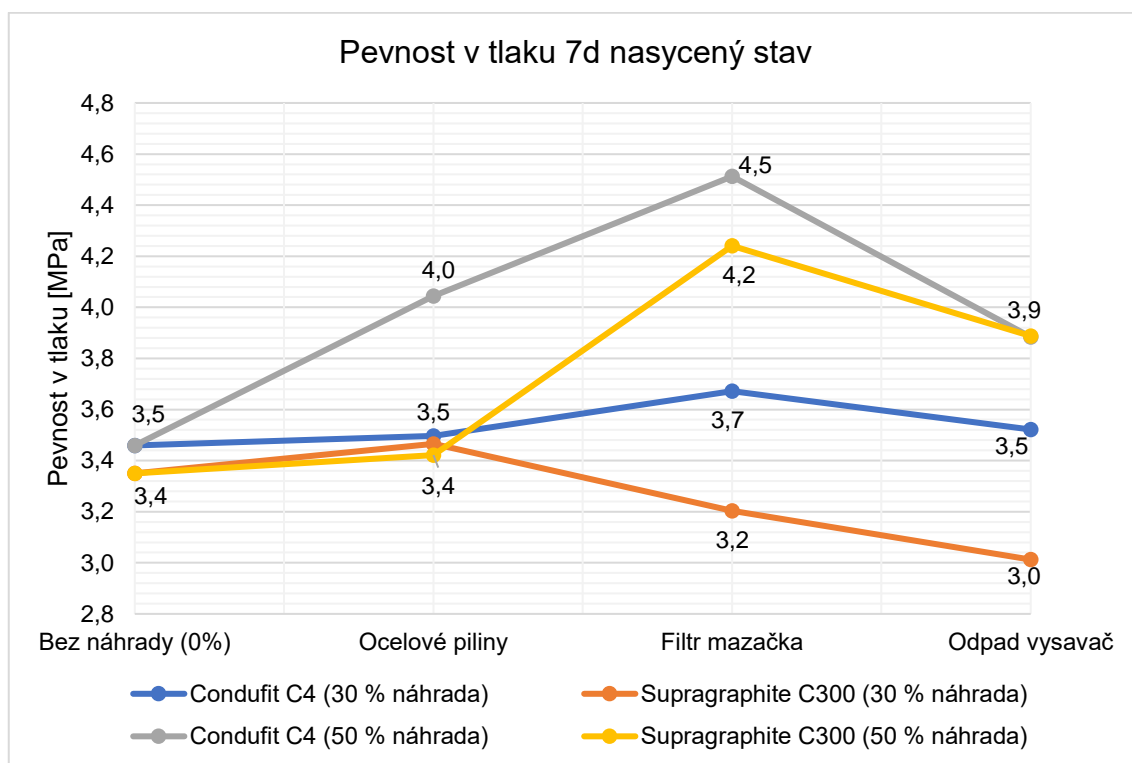
Pevnost v tahu za ohybu 28 d nasycený stav		Typ náhrady		
Množství náhrady	Druh kompozitu	Ocelové piliny	Filtr mazačka	Odpad vysavač
30 %	Condufit C4	-29,0 %	-35,5 %	-29,0 %
	Supragraphite C300	-24,2 %	-33,3 %	-27,3 %
50 %	Condufit C4	-25,8 %	-9,7 %	-22,6 %
	Supragraphite C300	-36,4 %	-9,1 %	-21,2 %

*Tabulka č. 51 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na pevnost v tahu za ohybu vysušeného kompozitu po 28mi dnech*

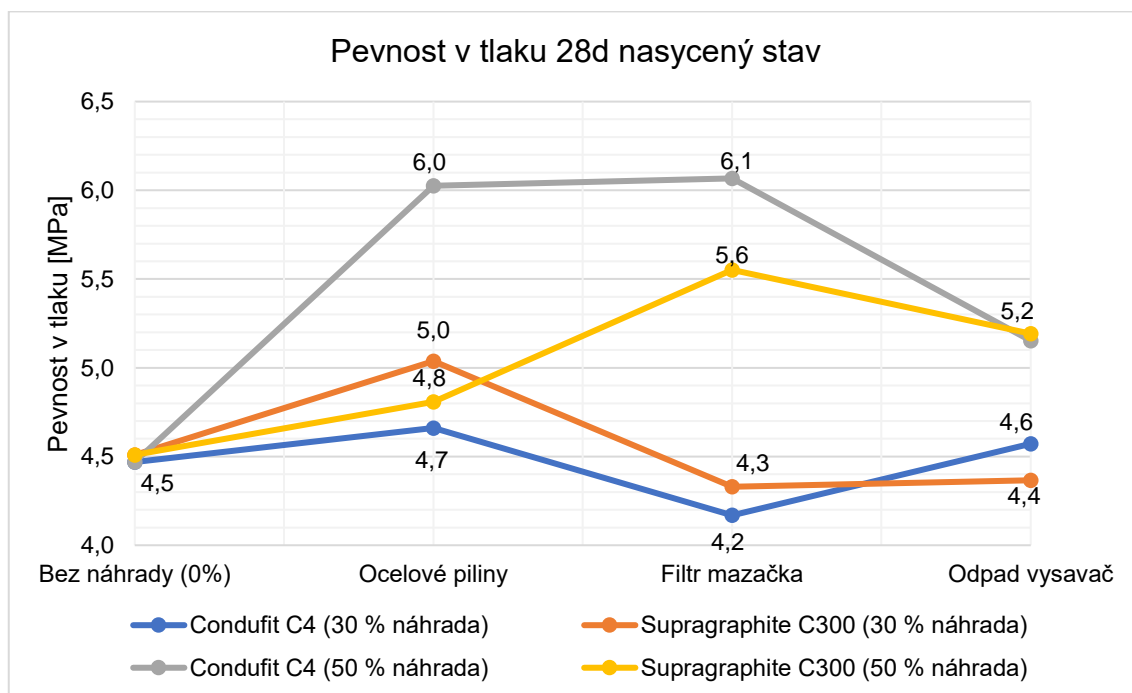
Pevnost v tahu za ohybu 28 d vysušený stav		Typ náhrady		
Množství náhrady	Druh kompozitu	Ocelové piliny	Filtr mazačka	Odpad vysavač
30 %	Condufit C4	-10,9 %	+2,2 %	+21,7 %
	Supragraphite C300	-35,1 %	-2,7 %	-21,6 %
50 %	Condufit C4	-15,2 %	+10,9 %	+6,6 %
	Supragraphite C300	-27,0 %	+18,9 %	+13,5 %

Na základě výsledků uvedených v tabulkách výše, je pro zlepšení pevnosti v tahu za ohybu pro kompozit s jemným typem plniva nejvhodnější náhrada „filtr mazačka“ v náhradě 30 % i 50 %, pro kompozit s hrubým typem plniva je nejvhodnější náhrada „filtr mazačka“ v náhradě 50 %. Celkově lze uvést že s náhradou primárních plniv za odpadní většinou klesá pevnost v tahu.

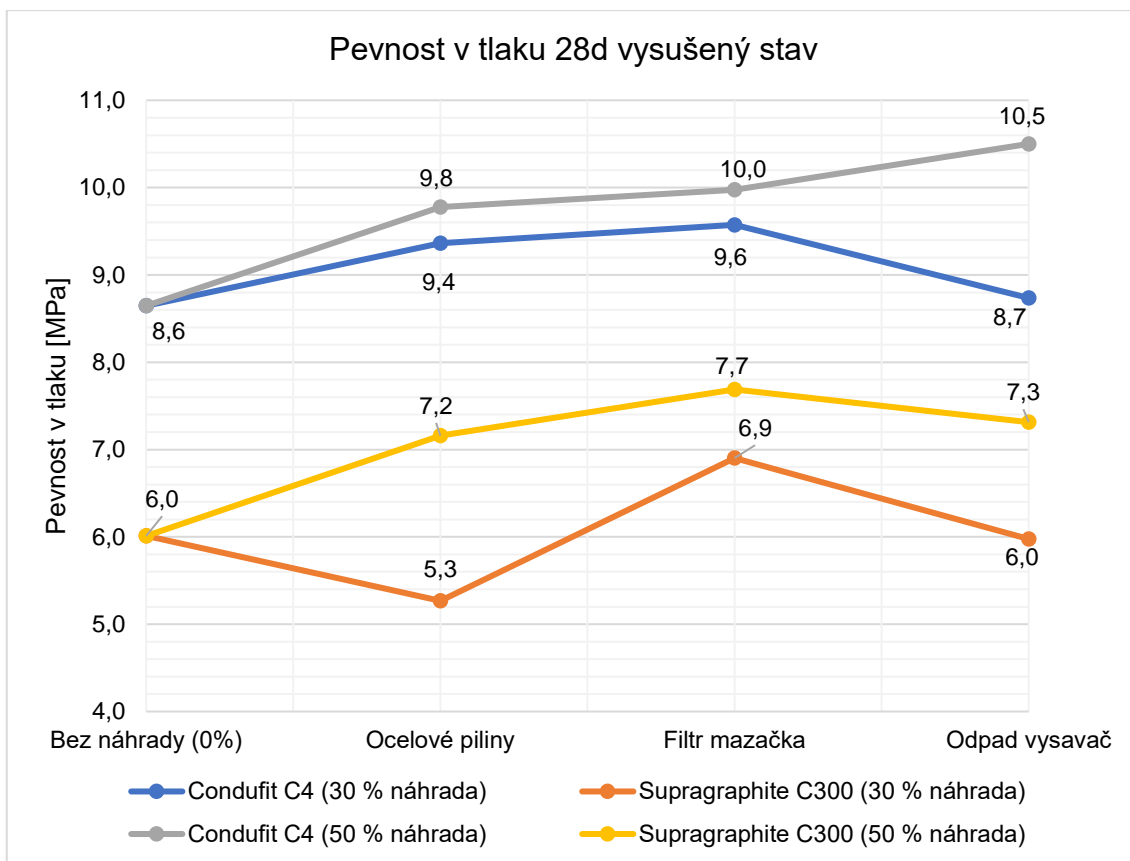
Pevnost v tlaku byla sledována po 7mi dnech v nasyceném stavu a po 28mi dnech v nasyceném i vysušeném stavu výsledky jsou uvedeny v následujících grafech a tabulkách.



*Graf č. 43 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na pevnost v tlaku nasyceného kompozitu po 7mi dnech*



*Graf č. 44 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na pevnost v tlaku nasyceného kompozitu po 28mi dnech*



*Graf č. 45 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na pevnost v tlaku vysušeného kompozitu po 28mi dnech*

Vliv náhrady primárních funkčních plniv na pevnosti v tlaku po 7mi dnech v nasyceném stavu a po 28mi dnech v nasyceném i vysušeném stavu jsou shrnuty v následujících tabulkách

*Tabulka č. 52 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na pevnost v tlaku nasyceného kompozitu po 7mi dnech*

Pevnost v tlaku 7 d nasycený stav		Typ náhrady		
Množství náhrady	Druh kompozitu	Ocelové piliny	Filtr mazačka	Odpad vysavač
30 %	Condufit C4	+0,3 %	+6,1 %	+1,7 %
	Supragraphite C300	+3,6 %	-4,5 %	-10,1 %
50 %	Condufit C4	+16,8 %	+30,3 %	+12,1 %
	Supragraphite C300	+2,1 %	+26,6 %	+15,8 %

Tabulka č. 53 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na pevnost v tlaku nasyceného kompozitu po 28mi dnech

Pevnost v tlaku 28 d nasycený stav		Typ náhrady		
Množství náhrady	Druh kompozitu	Ocelové piliny	Filtr mazačka	Odpad vysavač
30 %	Condufit C4	+4,3 %	-6,7 %	+2,2 %
	Supragraphite C300	+11,8 %	-4,0 %	-3,1 %
50 %	Condufit C4	+34,9 %	+35,8 %	+16,1 %
	Supragraphite C300	+6,7 %	+23,1 %	+14,2 %

Tabulka č. 54 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na pevnost v tlaku vysušeného kompozitu po 28mi dnech

Pevnost plaku 28 d vysušený stav		Typ náhrady		
Množství náhrady	Druh kompozitu	Ocelové piliny	Filtr mazačka	Odpad vysavač
30 %	Condufit C4	+8,2 %	+10,6 %	+1,0 %
	Supragraphite C300	-12,3 %	+14,8 %	-0,5 %
50 %	Condufit C4	+13,1 %	+15,3 %	+21,4 %
	Supragraphite C300	+19,1 %	+28 %	+21 %

Pro zlepšení pevnost v tlaku vlivem náhrady primárního funkčního plniva pro kompozit s jemným typem plniva je nejhodnější variantou odpadní grafit „filtr mazačka“ v náhradě 50 %. Pro kompozit s hrubým typem plniva byla vyhodnocen jako nejhodnější možnost náhrady pro vylepšení pevnosti v tlaku také odpadní grafit „filtr mazačka“ v objemové náhradě 50 %. Je třeba podotknout že náhrada části primárního plniva za odpadní suroviny ve většině případů zvýšila pevnosti v tlaku což může být ovlivněno vhodnější distribucí částic které doplňují křivku zrnitosti.

#### 4.6.3.3 Shrnutí vlivu náhrady funkčních plniv

Jakož to náhrada primárních funkčních plniv se osvědčily odpadní grafity, které významně snižují impedanci kompozitu a zvyšují pevnosti v tlaku. Pro oba typy kompozitu je nejhodnější náhrada odpadní grafitem „odpad vysavač“. Pro kompozit s jemným typem plniva Condufit C4 vlivem náhrady 30 % klesla impedance o 60 % ve všech typech měření vůči referenční směsi z primárních surovin. U kompozitu s hrubým typem plniva se byla nejefektivnější náhrada 50 % při kterém se snížila po 28mi dnech impedance v suchém stavu až o 92 %.

Jedinou nevýhodou této náhrady je pokles pevnosti v tahu, který se pohybuje okolo 20 %.

#### **4.6.4 Shrnutí výsledků a stanovení vhodných kombinací náhrad**

Dle výsledků uvedených v předchozích kapitolách byly vybrány jako nejvhodnější kombinace náhrad.

Náhrada kameniva byla vyhodnocena díky nevyhovujícímu poměru snížení impedance a snížení pevností v tlaku i tahu za ohybu za nevýhodnou.

Pro kompozit s jemným typem plniva (Condufit C4) byla vybrána jako nejvhodnější varianta pouze s náhradou funkčního plniva 30 % odpadním grafitem „odpad vysavač“.

Pro kompozit s hrubým typem plniva (Supragraphite C300) byly vybrány v kombinaci náhrady 20 % cementu vysokoteplotním popílkem a 50 % náhrada primárních plniv odpadní grafitem „odpad vysavač“.

#### **4.6.5 Ověření a výběr kompozitního materiálu s optimální kombinací náhrad druhotnými surovinami**

V této části je navržen kompozit s hrubým typem plniva (Supragraphite C300) s náhradou 20 % cementu vysokoteplotním popílkem a 50% náhradou funkčního plniva za odpadní grafit „odpad vysavač“.

Dle vybraných nejvhodnějších kombinací byla navržena také další směs kompozitu s hrubým typem plniva, kde bude nahrazeno 50 % plniva za primární plnivo Condufit C4 s náhradou 20 % cementu vysokoteplotním popílkem jakožto referenční vzorek na bázi primárních plniv s kombinací jemného i hrubého grafitu.

A dále zůstává potenciálně vhodnou variantou kompozit (Condufit C4) s náhradou 30 % náhradou plniva za „odpad vysavač“. Složení směsí je uvedeno v následující tabulce.



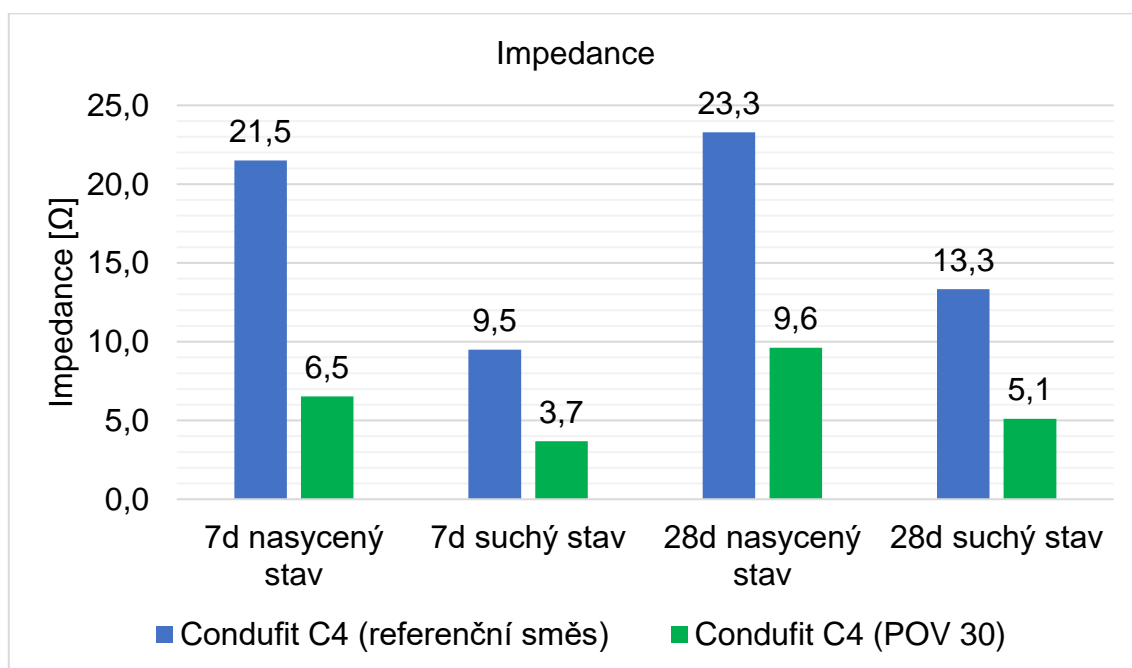
Tabulka č. 55 Složení optimálních variant kompozitu s náhradou primárních surovin

Složka:	Označení směsi		
	Supragraphite C300 (P20 POV 50)	Supragraphite C300 (P20 PC4 50)	Condufit C4 (POV 30)
	Množství [hm. %]		
Portlandský cement CEM I 42,5 R	15,0	15,0	17,8
Popílek ArcelorMittal	2,8	2,8	0
Mikro mletý vápenec	7,1	7,1	7,1
Směs křemičitých písků 0-4 mm	59,9	59,9	59,9
Plastifikační přísada	0,12	0,12	0,12
Funkční primární plnivo	7,5	7,5	10,0
Funkční druhotné plnivo	7,5 (odpad vysavač)	7,5 (Condufit C4)	5,0 (odpad vysavač)

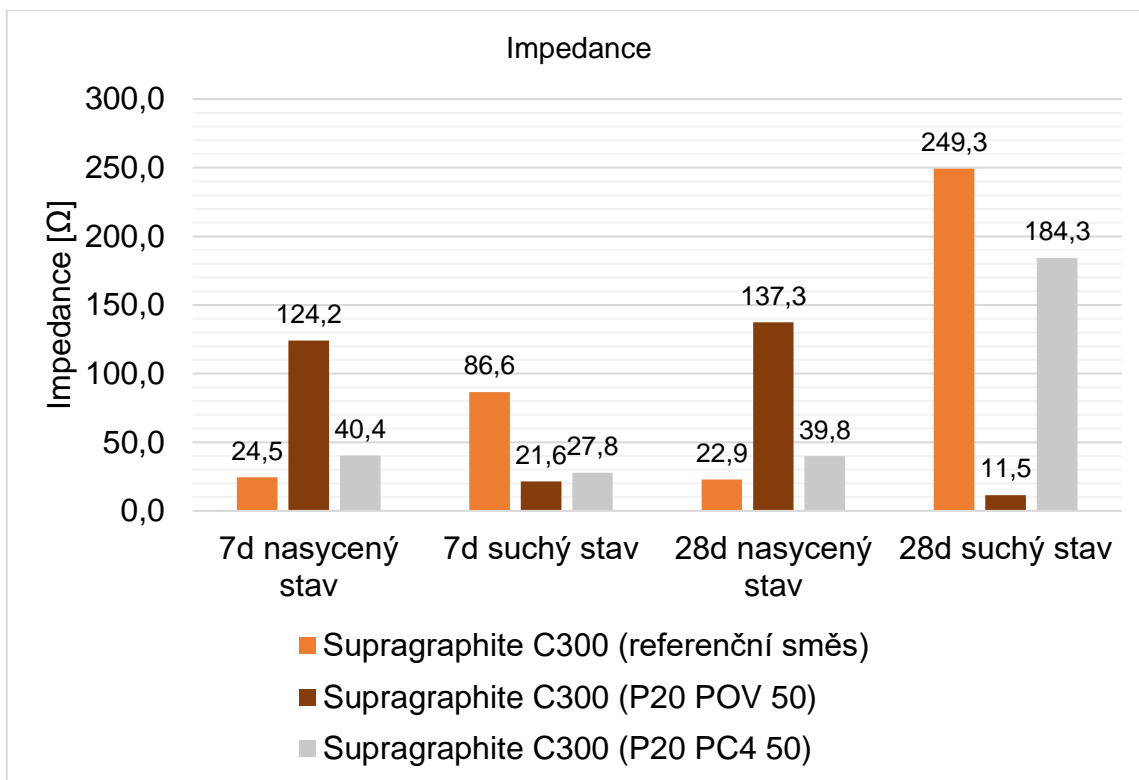
Na nově vytvořených kompozitech je ověřena impedance po 7mi a 28mi dnech v nasyceném i vysušeném stavu. Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku jsou ověřeny po 7mi dnech v nasyceném stavu a po 28mi dnech v nasyceném i vysušeném stavu. K těmto kompozitům jsou přidány výsledky i optimalizovaného kompozitu Condufit C4 POV 30

#### 4.6.5.1 Ověření elektro vodivých vlastností

Výsledky jsou uvedeny v následujících tabulkách a grafech



Graf č. 46 Srovnání impedance kompozitu na bázi primárních surovin s kompozitem s na bázi druhotných surovin pro jemný typ plniv



Graf č. 47 Srovnání impedance kompozitů na bázi primárních surovin s kompozity s obsahem na bázi surovin pro hrubý typ plniv

Vliv využití náhrady primárních surovin za vhodné kombinace druhotných surovin na impedanci kompozitů s hrubým a jemným typem plniva jsou shrnuty v následující tabulce.

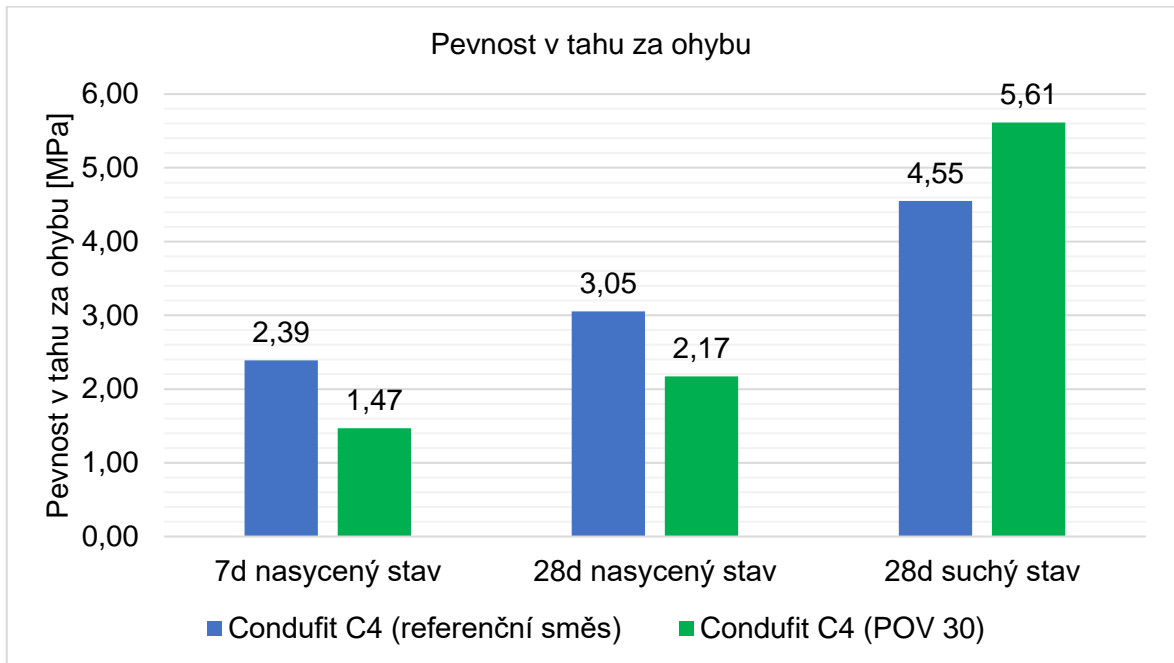
Tabulka č. 56 Zhodnocení impedance kompozitů na bázi druhotných surovin vůči referenčním kompozitům na bázi primárních surovin

Impedance				
Druh kompozitu	7 d nasycený stav	7 d suchý stav	28 d nasycený stav	28 d suchý stav
Condufit C4 (POV 30)	-69,8 %	-61,5 %	-58,8 %	-61,7 %
Supragraphite C300 (P20 POV50)	+413,0 %	-75,1 %	+499,6 %	-95,4 %
Supragraphite C300 (P20 PC4 50)	+66,9 %	-67,9 %	+73,8 %	-26,1 %

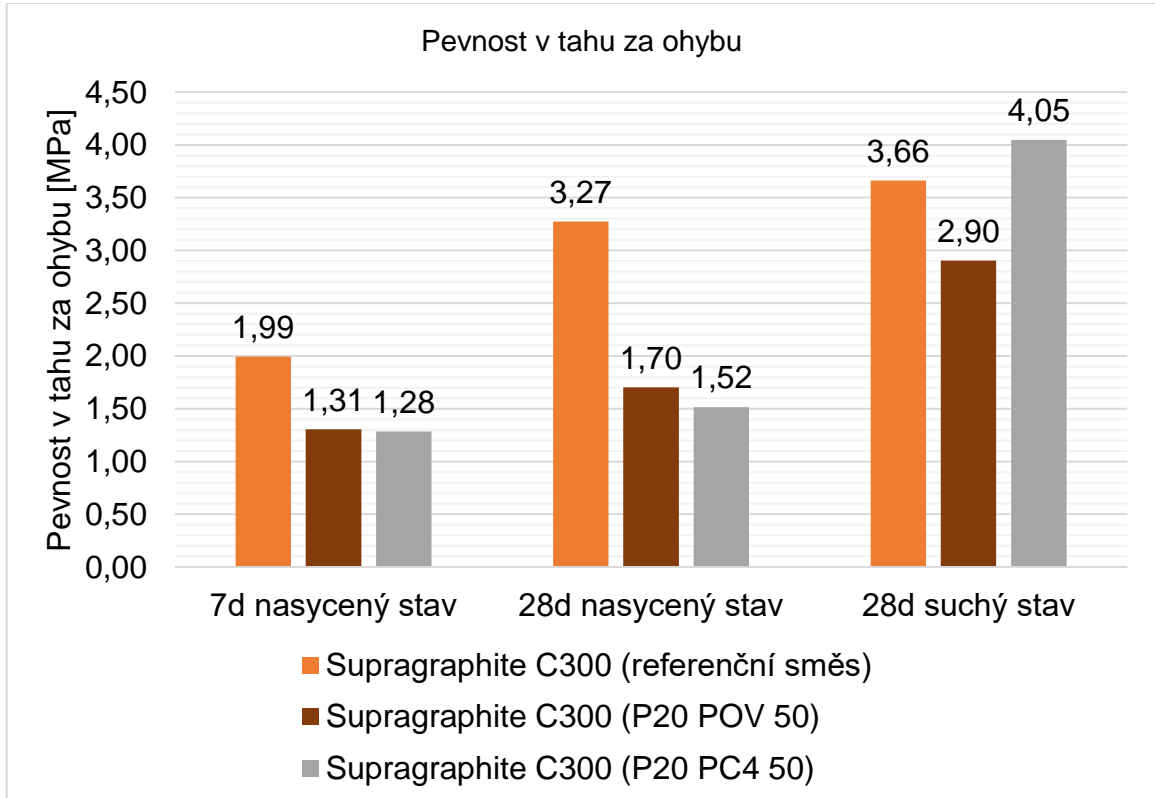
U kompozitu s jemným typem plniva (Condufit C4) bylo dosaženo vlivem částečné náhradě primárních surovin velmi příznivých hodnot impedance, které se většině měření snížily o více než 60 %. U kompozitu s hrubým typem plniva (Supragraphite C300) se vlivem náhrady primárních surovin podařilo snížit hodnoty impedance v suchém stavu až o 95 %. U kompozitu na bázi jemného a hrubého typu primárních plniv se snížila impedance v suchém stavu o 26 %.

#### 4.6.5.2 Ověření mechanických vlastností

Výsledky mechanických vlastností jsou uvedeny v následujících grafech



Graf č. 48 Srovnání pevnosti v tahu za ohybu kompozitu na bázi primárních surovin s kompozitem na bázi druhotných surovin pro jemný typ plniv



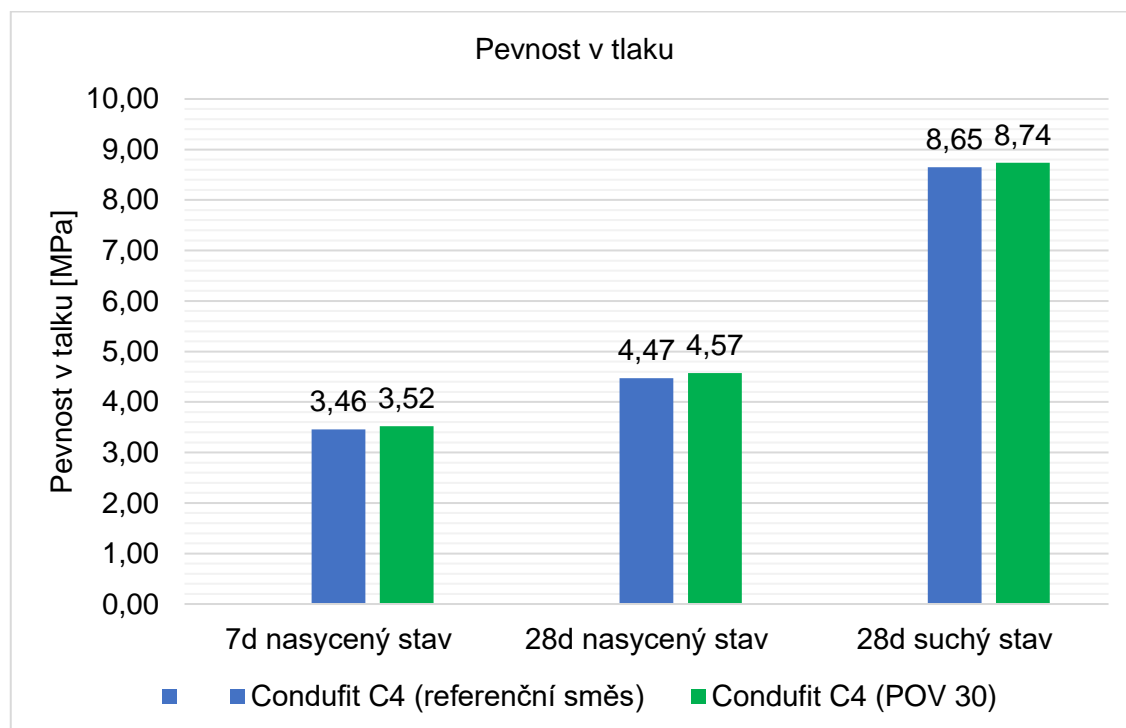
Graf č. 49 Srovnání pevnosti v tahu za ohybu kompozitů na bázi primárních surovin s kompozity na bázi druhotných surovin pro hrubý typ plniv

Vliv využití náhrady primárních surovin za vhodné kombinace druhotných surovin na pevnost v tahu za ohybu kompozitů s hrubým a jemným typem plniva jsou shrnuty v následující tabulce.

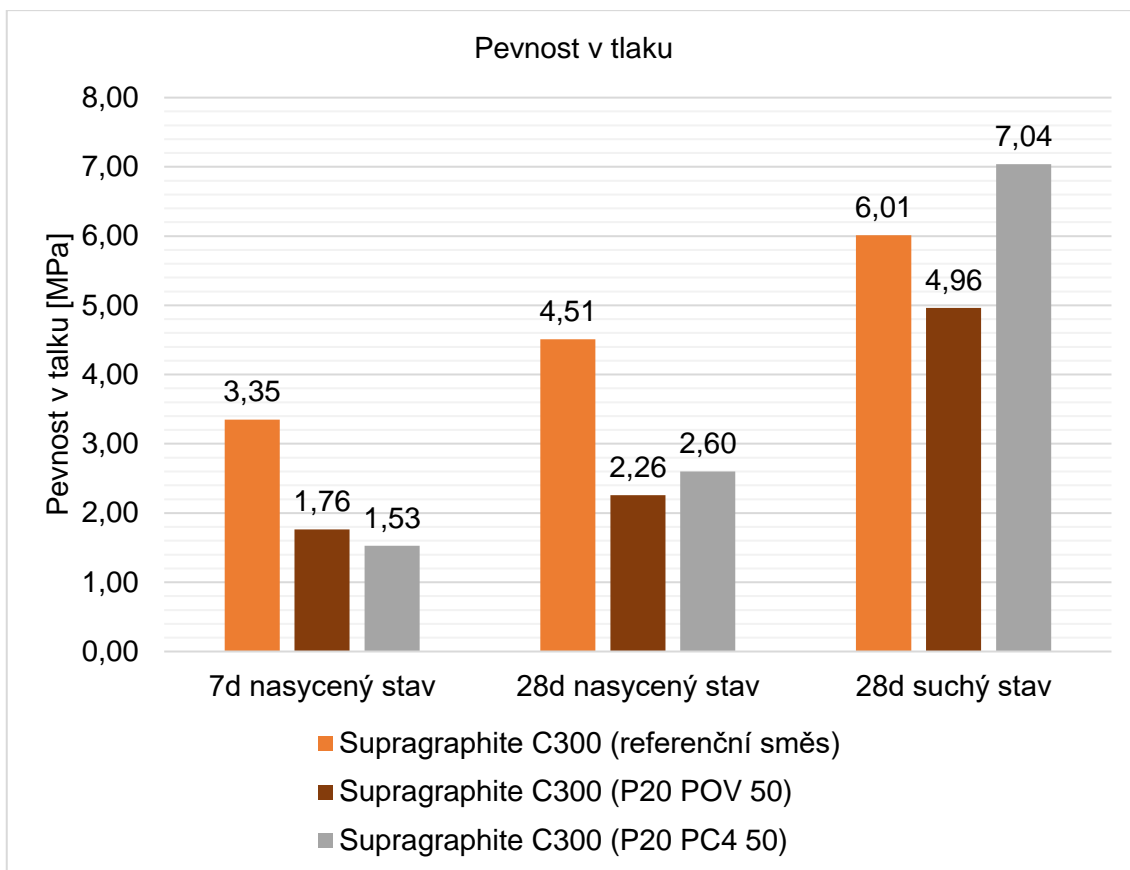
Tabulka č. 57 Zhodnocení pevnosti v tahu za ohybu kompozitů na bázi druhotných surovin vůči referenčním kompozitům na bázi primárních surovin

Pevnost v tahu za ohybu			
Druh kompozitu	7 d nasycený stav	28 d nasycený stav	28 d suchý stav
Condufit C4 (POV 30)	-37,5 %	-29,0 %	+21,7 %
Supragraphite C300 (P20 POV50)	-35,0 %	-48,5 %	-21,6 %
Supragraphite C300 (P20 PC4 50)	-35,0 %	-54,5 %	+8,1 %

Pevnost v tlaku byla zkoušena po 7mi dnech v nasyceném stavu a po 28mi dnech v nasyceném i vysušeném stavu. Výsledky jsou uvedeny v následujících grafech a tabulkách.



Graf č. 50 Srovnání pevnosti tlaku kompozitu na bázi primárních surovin s kompozitem na bázi druhotných surovin pro jemný typ plniv.



*Graf č. 51 Srovnání pevnosti v tlaku kompozitů na bázi primárních surovin s kompozity na bázi druhotných surovin pro hrubý typ plniv*

Vliv využití náhrady primárních surovin za vhodné kombinace druhotných surovin na pevnost v tlaku kompozitů s hrubým a jemným typem plniva jsou shrnuty v následující tabulce.

*Tabulka č. 58 Zhodnocení pevnosti v tlaku kompozitů na bázi druhotných surovin vůči referenčním kompozitům na bázi primárních surovin*

Pevnost v tlaku			
Druh kompozitu	7 d nasycený stav	28 d nasycený stav	28 d suchý stav
Condufit C4 (POV 30)	+1,7 %	+2,2 %	+1,0 %
Supragraphite C300 (P20 POV50)	-47,5 %	-49,9 %	-17,5 %
Supragraphite C300 (P20 PC4 50)	-54,3 %	-42,4 %	+17,1 %

#### **4.6.5.3 Shrnutí výsledků nově navržených kompozitů na bázi druhotných surovin**

U kompozitu „Condufit C4 POV 30“ s jemným typem plniva (Condufit C4) bylo dosaženo vlivem částečné náhrady primárních surovin snížení impedance o 61,7 % dále se snížily pevnosti v tahu za ohybu přibližně o 30 %, ale pevnosti po 28mi dnech ve vysušeném stavu se zvýšily o 21 %. Hodnoty pevnosti v tlaku se díky náhradám primárních surovin mírně zvýšily

U kompozitu „Supragraphite C300 P20 POV 50“ s hrubým typem plniva (Supragraphite C300) se vlivem náhrady primárních surovin za druhotné snížila hodnota impedance až o 95,4 % snížily se také pevnosti v tlaku o 50 % a pevnosti v tahu za ohybu o 48,5 %.

U Kompozitu (Supragraphite P20 PC4 50) na bázi primárních plniv hrubého i jemného typu plniva s 20 % náhradou cementu došlo k poklesu impedance o 26 %, snížení pevnosti v tahu za ohybu o 54,5 % a snížení pevnosti v tlaku o 43,4 %.

#### **4.6.6 Vyhodnocení ETAPY III**

Bylo zjištěno že vysokoteplotní popílek s vyšší ztrátou žíhání je výhodnou druhotnou surovinou pro substituci cementu, pro docílení snížení impedance kompozitu v nasyceném i suchém stavu. Vysokoteplotní popílek snižuje všeobecně pevnosti po 28mi dnech, z tohoto důvodu musí být zváženo jeho využití pro požadované vlastnosti. Popílek má vyšší účinnost na kompozity, které obsahují hrubý typ funkčního plniva, ale snížení impedance je znatelné i na kompozitech s jemným typem plniva. Vhodné množství náhrady je závislé na celkovém množství cementu ve směsi, pro vyvíjený kompozit bylo vhodné množství náhrady 20 % u kompozitu s hrubým typem plniva. Pro využití v kompozitu s jemným typem plniva náhrada cementu nebyla výhodná.

Náhrada části kameniva za ocelové piliny významně snižuje pevnosti v tlaku i v tahu za ohybu daných kompozitů. Snížení impedance bylo zaznamenáno pouze v suchém stavu, přičemž tento pokles nebyl významný, impedance v nasyceném stavu se zvýšila přibližně 2krát. Ocelové piliny nejsou vhodné pro naše typy kompozitů, kvůli přínosu nižšímu poklesu impedance

a vyšší ztrátou pevností, avšak mohly by lépe fungovat s funkčními plnivy jako jsou například uhlíkové trubičky, nebo nano trubičky či v jiném množství.

jakožto náhrada primárních funkčních plniv se nejvíce osvědčily odpadní grafity. Pro kompozity s hrubým i jemným typem plniva významně snížily hodnoty impedance ve vysušeném stavu. Ocelové piliny jakožto náhrada plniva ve všech případech zvýšily hodnoty impedance. Pevnost v tahu za ohybu vlivem náhrady funkčních plniv mírně klesá, avšak pevnost v tlaku se mírně zvyšuje. Zvýšení pevnosti v tlaku je nejspíše způsobeno různorodou distribucí částic odpadních grafitů. Nejvhodnějším druhotným plnivem byl vyhodnocen odpadní grafit „odpad vysavač“. Použitím tohoto odpadního grafitu bylo dosaženo snížení impedance navrhnutých kompozitů až na 5  $\Omega$ .

Jako optimální varianta byla vybrána směs Condufit C4 POV 30, která dosahuje nejnižší impedance ze všech navrhnutých kompozitů (5,1  $\Omega$ ), pevností po 28mi dnech 5,0 MPa v pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu 2,9 MPa. Tato směs vykazuje v suchém stavu o 61 % nižší hodnoty impedance, o 22 % vyšší pevnost v tahu za ohybu a o 1 % vyšší pevnost v tlaku vůči kompozitu na bázi primárních plniv.

Tento kompozit obsahuje jako primární plnivo grafitový prášek Condufit C4, který se vyznačuje malou velikostí částic (85 % v rozmezí 3,5 až 5,0  $\mu\text{m}$ ) a velkým měrným povrchem (20418  $\text{m}^2/\text{kg}$ ), tento grafit byl v množství 30 % nahrazen odpadním grafitem „filtr vysavač“, který se skládá ze směsi různých grafitů. Tento odpadní grafit má oproti ostatním zkoušeným grafitům nižší nasákavost (91 %) a rozličnou zrnitost.

## 5 ZÁVĚR

Cílem této práce byl vývoj elektro vodivého silikátového kompozitu na bázi druhotných surovin.

V teoretické části byla souhrnně zpracována problematika týkající se tvorby elektro vodivých kompozitů. Dále byly vysvětleny principy přenosu elektrického proudu v kompozitech. Byl definován charakter devíti typů používaných elektricky vodivých primárních i druhotných plniv pro vývoj kompozitu s nízkou impedancí. Byly shrnuty výhody, nevýhody a úskalí použití těchto surovin.

V první etapě experimentální části byla provedena podrobná analýza jednotlivých komponent budoucí směsi. Bylo analyzováno pojivo, plniva, filler, 7 primárních elektricky vodivých plniv, 3 druhotné elektricky vodivá plniva a popílek. Na všech vstupních surovinách byla stanovena impedance, která je dominantní vlastností v této práci, dále byly u všech vstupních surovin stanoveny nasákavost, měrný povrch sypané hmotnosti, objemová hmotnost, velikost částic atd.

Jako základní suroviny byly použity cement, mikro mletý vápenec a směs křemičitých písků. Jako primární elektricky vodivá plniva byly použity jemné i hrubé, přírodní i syntetické grafitové prášky. Mezi nimi byly i dva zástupci grafitů se zvýšenou vodivostí, která spočívala zejména ve zvýšení jejich měrného povrchu. Jako druhotná funkční plniva byly použity odpadní grafity „odpad vysavač“ a „filtr mazačka“. Dále byly použity odpadní ocelové piliny a vysokoteplotní popílek s vysokým podílem nedopalu, který byl následně použit jako částečná náhrada cementu. Etapa I tak postavila základ experimentálnímu vývoji optimální směsi s podílem druhotných surovin.

V druhé etapě byla ověřena elektricky vodivá plniva jak v cementové pastě, tak v kompozitu. Dále byly vybrány primární směsi kompozitu pro ověření využitelnosti druhotných surovin a také byl prokázán vliv vlhkosti na impedanci.

Na základě experimentálního ověření maximálního možného dávkování plniv a ohledem na mechanické vlastnosti byla jako optimální varianta zvolena příměs funkčních plniv o hodnotě 15 % (hmotnosti). Toto množství plniva bylo vybráno na základě splnění nezbytné minimální pevnosti v tahu za ohybu (1,5 MPa) a pevnosti v tlaku (3,0 MPa) kompozitu po 7mi dnech zrání.



Na základě poznatků z druhé etapy byly vybrány dvě základní varianty elektro vodivého kompozitu na bázi primárních surovin, jedna s obsahem jemného typu plniva Condufit C4 a jedna s hrubým typem plniva Supragraphite C300 na kterých byly v další etapě této práce ověřeny možnosti využití druhotných surovin. Tyto plniva byla vybrána, protože dosahovala nejnižších hodnot impedance jak v cementové pastě, tak i v kompozitu.

Dále byl názorně prokázán vliv vlhkosti na impedanci kompozitů, kdy jsou výsledky při použití hrubého typu plniva významně ovlivněny vlhkostí a výsledky s využitím jemného typu plniva nikoliv. Jelikož hrubé částice v kompozitu jsou od sebe více vzdáleny potřebují k dosažení nízké impedance přítomnost elektrolytu, který poskytuje voda, vlivem vysušení tedy ztrácí významný obsah funkčních struktur pro převod proudu. Na druhou stranu jemné typy funkčních plniv jsou více v kontaktu a tvoří tak funkční cesty pro el. proud i bez elektrolytu.

Závěrečná etapa diplomové práce se věnovala ověření využitelnosti druhotných surovin jakožto náhrady jednotlivých komponent hmoty.

Bylo zjištěno že náhrada cementu vysokoteplotním popílkem s vyšší ztrátou žíhání snižuje impedanci kompozitů. Významné snížení impedance bylo prokázáno u kompozitu s obsahem hrubého plniva, u kterého došlo k poklesu impedance až o 80 %. U kompozitu s jemným typem plniva klesla impedance po o 40 %. Vlivem náhrady cementu popílkem však dochází ke snížení pevnosti po 28mi dnech v tlaku i v tahu za ohybu přibližně o 30 až 40 % u obou typů kompozitu.

Náhrada kameniva ocelovými pilinami snižovala impedanci kompozitu s jemným typem plniva přibližně o 14 %. U kompozitu s hrubým typem plniva hodnota impedance klesla impedance o 23 %. Bylo zjištěno že vlivem této náhrady významně klesají pevnosti obou typů kompozitu přibližně o 40 až 50 %. Vzhledem k vysoké míře negativ na straně pevností, které nebyly patřičně vyváženy pozitivy na straně impedance nebyla tato surovina dále využita.

Jako náhrada primárních funkčních plniv byl jako nejvhodnější zvolen grafit s označením „odpad vysavač“. Vlivem náhrady jemného ale i hrubého typu grafitu tímto odpadem, klesly hodnoty impedance o 61 % a 92 % vůči kompozitům složených z primárních surovin. Pevnosti v tlaku byly vyšší až o 20 %. A pevnosti v tahu za ohybu byly vyšší přibližně o 10 %.

V závěru práce byly vybrány a ověřeny kompozity se směsí hrubého primárního plniva Supragraphite C300 nahrazeného 50 % grafitem „odpad vysavač“ a s 20 % náhradou cementu popílkem. Výsledný kompozit vykazoval o 95,4 % nižší hodnoty impedance vůči směsi složené z primárních surovin s při snížení pevností v tahu za ohybu o 21 % a pevnosti v tlaku o 17 %.

Druhou hodnocenou směsí byla směs s obsahem jemného typu grafitu Condufit C4 s 30 % náhradou grafitem „odpad vysavač“. Výsledný kompozit dosahoval až o 60 % nižší hodnoty impedance vůči směsi složené z primárních surovin při zvýšení pevnosti v tahu o 22 % a zachování pevnosti v tlaku.

Třetím kompozitem byla varianta na bázi kombinace primárních grafitů. Směs byla složena z hrubého plniva Supragraphite C300 i jemného plniva Condufit C4 s náhradou 20 % cementu popílkem. Výsledný kompozit vykazoval o 26 % nižší hodnoty impedance při zvýšení pevnosti v tahu o 8 % a zvýšení pevnosti v tlaku o 17 %.

Jako optimální varianta kompozitu na bázi druhotných surovin byla zvolena směs „Condufit C4 POV 30“ která dosahuje impedance 5,1  $\Omega$  a pevností po 28mi dnech 5,0 MPa v pevnosti v tlaku, pevnosti v tahu za ohybu 2,9 MPa. Tuto směs kladně ovlivnila 30% náhrada primárního plniva Condufit C4 odpadním grafitem „odpad vysavač“.

Z výše uvedených faktů je zřejmé, že hlavní cíl, vyvinutí elektricky vodivého kompozitu na bázi druhotných surovin byl splněn. Dále byly úspěšně splněny také dílčí cíle práce. Byly vyvinuty směsi na bázi primárních surovin a vybrány optimální varianty pro náhradu druhotnou surovinou. Byl prokázán vliv vlhkosti na impedanci kompozitu, která zvyšuje variabilitu výsledků impedance u kompozitů bez plniv anebo s obsahem hrubého typu elektricky vodivého plniva. Při použití hrubého plniva dále přítomnost vlhkosti významně snižuje impedanci.

Diplomová práce pokládá kvalitní základ pro další výzkum v oblasti elektricky vodivých kompozitů. V další práci by bylo vhodné se zaměřit na využití jiných druhů elektricky vodivých plniv jako jsou například uhlíkové trubičky, uhlíkové nano trubičky či ocelové mikro drátky. Další nezbytnou oblastí budoucího výzkumu je zaměření na zvýšení mechanických vlastností kompozitu a ověření trvanlivosti.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KAREL DAŘOUREK. Kompozitní materiály: Druhy a jejich užití. Liberec: Technická Univerzita v Liberci, 2007.
- [2] 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), 51-67. Dostupné také z: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0027708847&partnerID=40&md5=c591e2774079442c9543872013bcf4cf>
- [3] WU, Jianmin, Jianguo LIU a Fei YANG. Three-phase composite conductive concrete for pavement deicing. ELSEVIER. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, 30 January 2015, 2015(75), 129-135 [cit. 2020-10-25]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.11.004>
- [4] YEHIA, 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>
- [5] 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.
- [6] KIM, G.M., S.M. PARK, G.U. RYU a H.K. LEE. Electrical characteristics of hierarchical conductive pathways in cementitious composites incorporating CNT and carbon fiber. *Construction and Building Materials* [online]. 15 June 2017n. l., 2017(82), 165-175 [cit. 2020-10-25]. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.06.004>
- [7] WEN, Sihai a D.D.L. CHUNG. Partial replacement of carbon fiber by carbon black in multifunctional cement–matrix composites. *Carbon*. 2007, 45(3), 505-513. ISSN 0008-6223. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2006.10.024>
- [8] MACHÁŇ, L. Využití elektrických vlastností kompozitních materiálů s modifikovanou cementovou matricí. Brno, 2015. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [9] 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: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.04.021>

- [10] 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>
- [11] 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
- [12] 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
- [13] 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
- [14] 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
- [15] YEHA, S. a J. HOST. Conductive concrete for cathodic protection of bridge decks. *ACI Materials Journal*. 2010, 107(6), 577-585. Dostupné také z: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-78650033603&partnerID=40&md5=99d72ee28a30eebe3ea2693c631f7004>
- [16] 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, **170**, 51-59. Dostupné z: doi:10.1016/j.compscitech.2018.11.037

- [17] MASNÁ, Michaela a Libor KONÍČEK. *Elektřina a magnetismus: učební text pro distanční formu vzdělávání*. Orlová: Obchodní akademie Orlová, 2006 [i.e. 2007]. Informatika v ekonomice v distanční formě vzdělávání na středních školách. ISBN 978-80-87113-02-8.
- [18] HAN, Baoguo, Xun YU a Jinping OU. *Self-Sensing Concrete in Smart Structures* [online]. Elsevier, 2015 [cit. 2020-10-29]. ISBN 978-0-12-800517-0. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/C2013-0-14456-X>
- [19] 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
- [20] 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
- [21] ERHART, Jiří. *FYZIKA: Měříme rezistivity kovových drátů a závislost odporu vodiče na jeho délce a průřezu*. 1. Liberec: Fakulta přírodovědně-humanitní a pedagogická TU, 2015.
- [22] CALLEGARO, L. Traceable measurements of electrical impedance. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*. 2015, 18(6), 42-46. Dostupné z: doi:10.1109/MIM.2015.7335839
- [23] MELICHAR, T., PROCHÁZKA, D., Impact Study of Fine-Grained Additives from Alternative Raw Materials Sources, *Science and Research, Beton* 6/2011
- [24] KALOČ, M.: Výroba koksu. In Brož, L. et al.: *Hutnictví železa*. Praha: SNTL, 1988, s. 15 – 61.
- [25] *Resorbent: KALCINOVANÝ PETROLEJOVÝ KOKS* [online]. Ostrava, 1999 [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: <https://www.resorbent.cz/o-nas>
- [26] ALMEIDA, A., SICHIERI, E. Mineralogical Study of Polymer Modified Mortar with Silica Fume, *Materials Research*, Vol. 9, 2006, p. 321 – 326.
- [27] KRENÍKOVÁ, Věra. *Odpady a druhotné suroviny I*. Ústí nad Labem: Univerzita Jana Evangelisty Purkyně, Fakulta životního prostředí, 2014. ISBN 978-80-7414-869-9.

- [28] BRANDŠTETR, J., HAVLICA, J., Druhotné suroviny v maltách a betonech pro 21.století. *Silika*, 2001 roč. 11, č. 7-8, s. 241-247.
- [29] 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.
- [30] REICHL, Jiří. Multimediální Encyklopedie fyziky: Skenovací elektronový mikroskop. In: *Encyklopedie Fyziky: Elektronový mikroskop* [online]. Praha: WebArchiv.cz, 2006, 2006 [cit. 2020-12-24]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1675-skenovaci-elektronovy-mikroskop>
- [31] RIOS, M. Developments in scanning electron microscopy for tablet and granule characterization. *Pharmaceutical Technology*. 2008, (SUPPL.), s36-s38. Dostupné také z: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-43749112988&partnerID=40&md5=74784169c6303f10b4a1a6b0f0b489a4>
- [32] ISO 9257:1995(E) Určování specifické plochy povrchu pevných látek adsorpcí plynu použitím BET metody
- [33] ČSN EN 13055 (721505). *Pórovité kamenivo: D) pórovité kamenivo jako vedlejší produkt průmyslových procesů*. Praha: Český normalizační institut, 2017.
- [34] ČSN EN 933-1 (721193). *Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor*. 2012.
- [35] ČSN EN 1097-6. *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva: Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti*. Český normalizační institut, 2014.
- [36] ISO 13320:2009. Particle size analysis - Laser diffraction methods. 2009
- [37] PAN, Linchao, Baozhen GE a Fugen ZHANG. Indetermination of particle sizing by laser diffraction in the anomalous size ranges. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2017, **199**, 20-25. ISSN 0022-4073. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.05.022>
- [38] ČSN EN 206+A1. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Centrum technické normalizace, 2018.

- [39] ČSN EN 197-1. Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [40] Česko moravský cement a.s. [online]. *Technický list CEM I 42,5 R Mokrý*. 2020 [cit. 27.12.2020]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/baleny-cement/cemi425r>
- [41] *Provodínské písky a.s.* [online]. Provodín: Provodínské písky, © 2020 [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://www.pisky.cz/>
- [42] *Cemix: Mleté vápence* [online]. Štramberk: LB Cemix, © 2019 – 2020 [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://www.cemix.cz/kotouc/cz/mlete-vapence>
- [43] *Stachema* [online]. *Technický STACHEMENT 2180.1*. 2017 [cit. 28.12.2020]. Dostupné z: <https://prisadydobetonu.stachema.cz/files/files/TL-Stachement-2180-1.pdf>
- [44] GOLEWSKI, Grzegorz Ludwik. Improvement of fracture toughness of green concrete as a result of addition of coal fly ash. Characterization of fly ash microstructure. Elsevier[online]. 2017, 12 [cit. 2017-12-18]. DOI: 10.1016/j.matchar.2017.11.008. ISBN 10.1016/j.matchar.2017.11.008. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1044580317315905>
- [45] ČSN EN 196-1. Metody zkoušení cementu - Část 7 Zhotovení zkušebních těles. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [46] ČSN EN 1015-3. Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím strásacího stolku). 2000.
- [47] ČSN EN 12390-5. Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. 2009.
- [48] ČSN EN 12390-4. Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 4: Pevnost v tlaku - Požadavky na zkušební lisy. 2001.
- [49] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. Učebnice (VUTIUM). ISBN 80-214-1647-5.
- [50] MALHOTRA, V. M. a P. K. MEHTA. *High-performance, high-volume fly ash concrete: materials, mixture proportioning, properties, construction practice, and case histories*. 2nd ed. Ottawa: Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development, c2005. ISBN 09-731-5072-6.

## SEZNAM TABULEK

Tabulka č. 1 Základní charakteristiky cementu CEM I 42,5R Hranice dle EN 197-1 [40].....	56
Tabulka č. 2 Vybrané vlastnosti cementu CEM I 42,5 R Hranice .....	56
Tabulka č. 3 Vybrané vlastnosti písku PR 1.6-4.....	57
Tabulka č. 4 Vybrané vlastnosti písku PR 30/31 .....	57
Tabulka č. 5 Vybrané vlastnosti písku PR 35 .....	58
Tabulka č. 6 Vybrané vlastnosti Vápence VBS 40 .....	58
Tabulka č. 7 Vlastnosti plastifikační přísady STACHEMENT 2180.1 [43] .....	59
Tabulka č. 8 Základní rozdělení použitých grafitových prášků .....	59
Tabulka č. 9 Vybrané vlastnosti grafitu Supragraphite UC 700 .....	60
Tabulka č. 10 Vybrané vlastnosti grafitu Supragraphite C300 .....	61
Tabulka č. 11 Vybrané vlastnosti grafitu Micrographite F10.....	62
Tabulka č. 12 Vybrané vlastnosti grafitu Micrographite UC4.....	63
Tabulka č. 13 Vybrané vlastnosti grafitu Micrographite C4 .....	64
Tabulka č. 14 Vybrané vlastnosti grafitu Condufit F8 .....	65
Tabulka č. 15 Vybrané vlastnosti grafitu Condufit C4.....	66
Tabulka č. 16 Vybrané vlastnosti odpadního grafitu „filtr mazačka“ .....	67
Tabulka č. 17 Vybrané vlastnosti odpadního grafitu „odpad vysavač“ .....	68
Tabulka č. 18 Vybrané vlastnosti ocelových pilin .....	70
Tabulka č. 19 Vybrané vlastnosti popílku ArcelorMittal (AM) .....	71
Tabulka č. 20 Složení referenční směsi .....	75
Tabulka č. 21 Složení směsí pro optimalizaci dávkování .....	77
Tabulka č. 22 Složení cementových past s příměsí funkčního plniva .....	79
Tabulka č. 23 Složení směsi pro ověření elektro vodivých vlastností plniv v kompozitu.....	83
Tabulka č. 24 Vybrané směsi kompozitu na bázi primárních surovin pro ověření využitelnosti druhotných surovin .....	89
Tabulka č. 25 Hodnoty impedance vybraných směsí .....	89
Tabulka č. 26 Hodnoty pevnosti v tahu za ohybu vybraných směsí.....	89
Tabulka č. 27 Hodnoty pevnosti v tlaku vybraných směsí.....	89
Tabulka č. 28 Složení směsí pro ověření možnosti částečné náhrady cementu .....	90



Tabulka č. 29 Vliv náhrady cementu popílkem na impedanci po 7mi dnech v nasyceném stavu .....	92
Tabulka č. 30 Vliv náhrady cementu popílkem na impedanci po 7mi dnech v suchém stavu .....	92
Tabulka č. 31 Vliv náhrady cementu popílkem na impedanci po 28mi dnech v nasyceném stavu .....	93
Tabulka č. 32 Vliv náhrady cementu popílkem na impedanci po 28mi dnech v suchém stavu .....	93
Tabulka č. 33 Vliv náhrady cementu popílkem na pevnost v tahu za ohybu po 7mi dnech v nasyceném stavu .....	95
Tabulka č. 34 Vliv náhrady cementu popílkem na pevnost v tahu za ohybu po 28mi dnech v nasyceném stavu .....	95
Tabulka č. 35 Vliv náhrady cementu popílkem na pevnost v tahu za ohybu po 28mi dnech v suchém stavu .....	95
Tabulka č. 36 Vliv náhrady cementu popílkem na pevnost v tlaku po 7mi dnech v nasyceném stavu .....	97
Tabulka č. 37 Vliv náhrady cementu popílkem na pevnost v tlaku po 28mi dnech v nasyceném stavu .....	97
Tabulka č. 38 Vliv náhrady cementu popílkem na pevnost v tlaku po 28mi dnech v suchém stavu .....	97
Tabulka č. 39 Složení směsi pro náhradu kameniva PR 1.6-4 za ocelové piliny .....	99
Tabulka č. 40 Vliv náhrady kameniva na impedanci kompozitu .....	102
Tabulka č. 41 Vliv náhrady kameniva na pevnost v tahu za ohybu kompozitu	104
Tabulka č. 42 Vliv náhrady kameniva na pevnost v tlaku kompozitu.....	106
Tabulka č. 43 Složení směsi pro ověření náhrady primárních plniv odpadním grafitem „filtr mazačka“ a „odpad vysavač“ .....	107
Tabulka č. 44 Složení směsi pro ověření náhrady primárních plniv ocelovými pilinami.....	107
Tabulka č. 45 Vliv náhrady primárního funkčního plniva v množství 30 a 50 % na impedanci nasyceného kompozitu po 7mi dnech .....	110
Tabulka č. 46 Vliv náhrady primárního funkčního plniva v množství 30 a 50 % na impedanci vysušeného kompozitu po 7mi dnech .....	110

Tabulka č. 47 Vliv náhrady primárního funkčního plniva v množství 30 a 50 % na impedanci kompozitu v nasyceném stavu po 28mi dnech .....	110
Tabulka č. 48 Vliv náhrady primárního funkčního plniva v množství 30 a 50 % na impedanci vysušeného kompozitu po 28mi dnech .....	111
Tabulka č. 49 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na pevnost v tahu za ohybu nasyceného kompozitu po 7mi dnech .....	113
Tabulka č. 50 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na pevnost v tahu za ohybu nasyceného kompozitu po 28mi dnech .....	113
Tabulka č. 51 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na pevnost v tahu za ohybu vysušeného kompozitu po 28mi dnech.....	113
Tabulka č. 52 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na pevnost v tlaku nasyceného kompozitu po 7mi dnech .....	115
Tabulka č. 53 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na pevnost v tlaku nasyceného kompozitu po 28mi dnech .....	116
Tabulka č. 54 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na pevnost v tlaku vysušeného kompozitu po 28mi dnech .....	116
Tabulka č. 55 Složení optimálních variant kompozitu s náhradou primárních surovin .....	118
Tabulka č. 56 Zhodnocení impedance kompozitů na bázi druhotných surovin vůči referenčním kompozitům na bázi primárních surovin .....	119
Tabulka č. 57 Zhodnocení pevnosti v tahu za ohybu kompozitů na bázi druhotných surovin vůči referenčním kompozitům na bázi primárních surovin .....	121
Tabulka č. 58 Zhodnocení pevnosti v tlaku kompozitů na bázi druhotných surovin vůči referenčním kompozitům na bázi primárních surovin .....	122

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek č. 1 Synergetický efekt složení kompozitního materiálu [1] .....	14
Obrázek č. 2 Základní typy kompozitních materiálů dle druhu plniva (obrázek autora).....	16
Obrázek č. 3 Graf zobrazující perkolační křivku, perkolační práh a její oblasti vodivosti.[18] .....	21
Obrázek č. 4 Porovnání závislosti rezistivity v čase v kompozitu s vlákny s dispergačním činidlem a bez,(převzato a upraveno) [3] .....	28
Obrázek č. 5 SEM foto nanočástic grafitu [20] .....	30
Obrázek č. 6 SEM snímky: A) surový antracit, B) tepelně upravený antracit [16] .....	31
Obrázek č. 7 Schéma metodiky práce .....	37
Obrázek č.8 Schéma ETAPY I .....	38
Obrázek č. 9 Schéma ETAPY II .....	39
Obrázek č. 10 Schéma ETAPY III .....	41
Obrázek č. 11 Na levé straně přípravek pro měření impedance práškových surovin, nahoře vpravo detail elektrod, dole vpravo detail vrchní části přípravku se závažím pro docílení hutnícího zatížení. (foto autora).....	44
Obrázek č. 12 Měřicí přípravek se vzorkem při hutnění na vibračním stole (foto autora).....	44
Obrázek č. 13 Měření impedance grafitového prášku, Foto autora.....	45
Obrázek č. 14 Měření sypných hmotností kameniva (foto autora) .....	46
Obrázek č. 15 Schéma skenovacího elektronového mikroskopu, převzato z [30] .....	47
Obrázek č. 16 Měření nasákavosti dle ČSN EN 13055 (D) (foto autora) .....	48
Obrázek č. 17 naplněný komolý jehlan na zkoušku zpracovatelnosti (foto autora).....	50
Obrázek č. 18 rozlití směsi při zkoušce zpracovatelnosti (foto autora).....	50
Obrázek č. 19 Troj forma se vzorky osazenými elektrodami pro měření impedance.....	51
Obrázek č. 20 Detail elektrody pro měření impedance (foto autora).....	52
Obrázek č. 21 Těleso s elektrodami (foto autora) .....	52
Obrázek č. 22 Měření impedance těles pomocí přístroje GW Instek LCR-6020 .. (foto autora).....	52

Obrázek č. 23 Detailní foto cementu CEM I 42,5R Mokrý, jeden dílek =1 mm (foto autora).....	55
Obrázek č. 24 Detailní foto písku PR 1.6-4, jeden dílek =1 mm (foto autora) ..	56
Obrázek č. 25 Detailní foto písku PR 30/31, jeden dílek =1 mm (foto autora)..	57
Obrázek č. 26 detailní foto písku PR 35, jeden dílek =1 mm (foto autora) .....	57
Obrázek č. 27 Detailní foto Vápence VBS 40, jeden dílek =1 mm (foto autora)	58
Obrázek č. 28 Detailní foto Supragraphite UC 700, jeden díl= 1 mm, (foto autora).....	60
Obrázek č. 29 SEM foto částice Supragraphite UC 700 (foto autora) .....	60
Obrázek č. 30 Detailní foto Supragraphite C300, jeden díl= 1 mm, (foto autora) .....	61
Obrázek č. 31 SEM foto částic Supragraphite C300, (foto autora).....	61
Obrázek č. 32 Detailní foto Micrographite F10, jeden díl= 1 mm, (foto autora)	62
Obrázek č. 33 SEM foto částic Micrographite F10, (foto autora).....	62
Obrázek č. 34 Detailní foto Micrographite UC4, jeden díl= 1 mm, (foto autora)	63
Obrázek č. 35 SEM foto částic Micrographite UC4, (foto autora).....	63
Obrázek č. 36 Detailní foto Micrographite C4, jeden díl= 1 mm, (foto autora)..	64
Obrázek č. 37 SEM foto částic Micrographite C4, (foto autora) .....	64
Obrázek č. 38 Detailní foto Condufit F8, jeden díl= 1 mm, (foto autora) .....	65
Obrázek č. 39 SEM foto částice Condufit F8, (foto autora) .....	65
Obrázek č. 40 Detailní foto Condufit C4, jeden díl= 1 mm, (foto autora).....	66
Obrázek č. 41 SEM foto částic Condufit C4, (foto autora).....	66
Obrázek č. 42 Detailní foto „filtr mazačka“, jeden díl= 1 mm, (foto autora) .....	67
Obrázek č. 43 SEM foto částic odpadního grafitu „filtr mazačka“, (foto autora)	67
Obrázek č. 44 Detailní foto „odpad vysavač“, jeden díl= 1 mm, (foto autora)..	68
Obrázek č. 45 SEM foto částic odpadního grafitu „odpad vysavač“ (foto autora) .....	68
Obrázek č. 46 Detailní foto ocelových pilin, jeden dílek =1 mm (foto autora)...	69
Obrázek č. 47 Detailní foto částic ocelových pilin, (foto autora).....	69
Obrázek č. 48 Detailní foto popílku ArcelorMittal, jeden dílek = 1 mm (foto autora).....	70
Obrázek č. 49 Detailní snímky zakomponování a rozptýlení ocelových pilin v kompozitu s jemným typem plniva a náhradou kameniva. ....	99

## SEZNAM GRAFŮ

Graf č. 1 Srovnání nasákavosti vybraných vstupních surovin .....	71
Graf č. 2 Srovnání impedance vstupních surovin .....	72
Graf č. 3 Srovnání měrného povrchu primárních elektro vodivých plniv .....	72
Graf č. 4 Srovnání zrnitosti primárních elektricky vodivých plniv .....	73
Graf č. 5 Křivka zrnitosti referenční směsi.....	76
Graf č. 6 Vliv množství funkčních plniv na pevnost v tahu za ohybu po 7mi dnech .....	77
Graf č. 7 Vliv množství funkčního plniva na pevnost v tlaku.....	78
Graf č. 8 Impedance cementových past s hrubým typem plniva, referenční směsi bez plniva, a s vápencem jakožto plniva v závislosti na čase .....	80
Graf č. 9 Impedance cementových past s jemným typem plniva v závislosti na čase (hodnoty jsou uvedeny v příloze).....	81
Graf č. 10 Vlhkost vzorků cementových past v průběhu měření impedance v závislosti na čase (hodnoty jsou uvedeny v příloze).....	82
Graf č. 11 Impedance kompozitů s hrubým typem plniva, referenční směsi bez plniva, a s vápencem jakožto plniva v závislosti na čase .....	84
Graf č. 12 Impedance kompozitů s jemným typem plniva v závislosti na čase (hodnoty jsou uvedeny v příloze) .....	85
Graf č. 13 Vlhkost vzorků kompozitů v průběhu měření impedance v závislosti na čase (hodnoty jsou uvedeny v příloze).....	86
Graf č. 14 Srovnání impedance kompozitů na bázi hrubých primárních plniv ..	87
Graf č. 15 Srovnání impedance kompozitů na bázi jemných primárních plniv .	87
Graf č. 16 Vliv náhrady cementu popílkem na impedanci nasyceného kompozitu po 7mi dnech.....	91
Graf č. 17 Vliv náhrady cementu popílkem na impedanci vysušeného kompozitu po 7 dmi dnech.....	91
Graf č. 18 Vliv náhrady cementu popílkem na impedanci nasyceného kompozitu po 28mi dnech.....	92
Graf č. 19 Vliv náhrady cementu popílkem na impedanci vysušeného kompozitu po 28mi dnech.....	93
Graf č. 20 Vliv náhrady cementu popílkem na pevnost v tahu za ohybu nasyceného kompozitu po 7mi dnech .....	94

Graf č. 21 Vliv náhrady cementu popílkem na pevnost v tahu za ohybu nasyceného kompozitu po 28mi dnech .....	94
Graf č. 22 Vliv náhrady cementu popílkem na pevnost v tahu za ohybu vysušeného kompozitu po 7mi dnech .....	95
Graf č. 23 Vliv náhrady cementu popílkem na pevnost v tlaku nasyceného kompozitu po 7mi dnech .....	96
Graf č. 24 Vliv náhrady cementu popílkem na pevnost v tlaku nasyceného kompozitu po 28mi dnech .....	96
Graf č. 25 Vliv náhrady cementu popílkem na pevnost v tlaku vysušeného kompozitu po 28mi dnech .....	97
Graf č. 26 Vliv náhrady kameniva PR 1.6-4 za ocelové piliny na impedanci nasyceného kompozitu po 7mi dnech .....	100
Graf č. 27 Vliv náhrady kameniva PR 1.6-4 za ocelové piliny na impedanci vysušeného kompozitu po 7mi dnech .....	100
Graf č. 28 Vliv náhrady kameniva PR 1.6-4 za ocelové piliny na impedanci nasyceného kompozitu po 28mi dnech .....	101
Graf č. 29 Vliv náhrady kameniva PR 1.6-4 za ocelové piliny na impedanci suchého kompozitu po 28mi dnech.....	101
Graf č. 30 Vliv náhrady kameniva na pevnost v tahu za ohybu nasyceného kompozitu po 7mi dnech .....	102
Graf č. 31 Vliv náhrady kameniva na pevnost v tahu za ohybu nasyceného kompozitu po 28mi dnech .....	103
Graf č. 32 Vliv náhrady kameniva na pevnost v tahu za ohybu vysušeného kompozitu po 28mi dnech .....	103
Graf č. 33 Vliv náhrady kameniva na pevnost v tlaku nasyceného kompozitu po 7mi dnech.....	104
Graf č. 34 Vliv náhrady kameniva na pevnost v tlaku nasyceného kompozitu po 28mi dnech.....	105
Graf č. 35 Vliv náhrady kameniva na pevnost v tlaku vysušeného kompozitu po 28mi dnech.....	105
Graf č. 36 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na impedanci nasyceného kompozitu po 7mi dnech .....	108
Graf č. 37 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na impedanci vysušeného kompozitu po 7mi dnech .....	108

Graf č. 38 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na impedanci nasyceného kompozitu po 28mi dnech .....	109
Graf č. 39 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na impedanci vysušeného kompozitu po 28mi dnech .....	109
Graf č. 40 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na pevnost v tahu za ohybu nasyceného kompozitu po 7mi dnech .....	111
Graf č. 41 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na pevnost v tahu za ohybu nasyceného kompozitu po 28mi dnech. ....	112
Graf č. 42 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na pevnost v tahu za ohybu vysušeného kompozitu po 28mi dnech. ....	112
Graf č. 43 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na pevnost v tlaku nasyceného kompozitu po 7mi dnech .....	114
Graf č. 44 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na pevnost v tlaku nasyceného kompozitu po 28mi dnech .....	114
Graf č. 45 Vliv náhrady primárních funkčních plniv na pevnost v tlaku vysušeného kompozitu po 28mi dnech .....	115
Graf č. 46 Srovnání impedance kompozitu na bázi primárních surovin s kompozitem s na bázi druhotných surovin pro jemný typ plniv .....	118
Graf č. 47 Srovnání impedance kompozitů na bázi primárních surovin s kompozity s obsahem na bázi surovin pro hrubý typ plniv .....	119
Graf č. 48 Srovnání pevnosti v tahu za ohybu kompozitu na bázi primárních surovin s kompozitem na bázi druhotných surovin pro jemný typ plniv .....	120
Graf č. 49 Srovnání pevnosti v tahu za ohybu kompozitů na bázi primárních surovin s kompozity na bázi druhotných surovin pro hrubý typ plniv .....	120
Graf č. 50 Srovnání pevnosti tlaku kompozitu na bázi primárních surovin s kompozitem na bázi druhotných surovin pro jemný typ plniv .....	121
Graf č. 51 Srovnání pevnosti v tlaku kompozitů na bázi primárních surovin s kompozity na bázi druhotných surovin pro hrubý typ plniv .....	122