



# 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

# SENZORICKÉ VLASTNOSTI ALKALICKY AKTIVOVANÝCH STRUSKOVÝCH KOMPOZITŮ PŘI NAMÁHÁNÍ V TLAKU

SELF-SENSING PROPERTIES OF ALKALI-ACTIVATED SLAG COMPOSITES UNDER  
COMPRESSIVE LOADING

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Maria Míková

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. PAVEL ROVNANÍK, Ph.D.

BRNO 2019



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Maria Míková
Název	Senzorické vlastnosti alkalicky aktivovaných struskových kompozitů při namáhání v tlaku
Vedoucí práce	doc. RNDr. Pavel Rovnaník, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2018
Datum odevzdání	11. 1. 2019

V Brně dne 31. 3. 2018

---

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

---

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

## **PODKLADY A LITERATURA**

1. Han B, Yu X, Ou J. Self-Sensing Concrete in Smart Structures. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2014.
2. Wang H, Gao X, Wang R. The influence of rheological parameters of cement paste on the dispersion of carbon nanofibers and self-sensing performance. Construction and Building Materials 2017, 134, 673-683.
3. Han B, Ding S, Yu X. Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review. Measurement 2015, 59, 110-128.
4. Shin SW, Oh TK. Application of electro-mechanical impedance sensing technique for online monitoring of strength development in concrete using smart PZT patches. Construction and Building Materials 2009, 23, 1185-1188.
5. D Alessandro A et al. Investigations on scalable fabrication procedures for self-sensing carbon nanotube cement-matrix composites for SHM applications. Cement and Concrete Composites 2016, 65, 200-213.

## **ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ**

Provedte literární rešerši týkající se elektrických vlastností cementových, případně dalších aluminosilikátových kompozitů využívaných ve stavebnictví. Zaměřte se především na senzorní vlastnosti při tlakovém namáhání kompozitů využívajících vodivých příměsí (grafit, kovová a uhlíková vlákna, CNT, saze) pro zvýšení elektrické vodivosti těchto materiálů. V experimentální části připravte kostky z kompozitů na bázi alkalicky aktivované strusky s vybranými typy vodivých příměsí. Zjistěte mechanické vlastnosti a elektrické parametry připravených kompozitů. Vzorky cyklicky zatěžujte v tlaku a sledujte elektrickou odezvu na vložené zatížení. Výsledky zpracujte do přehledných grafů a vyhodnotte. Rozsah práce 60 až 90 stran.

## **STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE**

VŠKP zpracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

---

doc. RNDr. Pavel Rovnaník, Ph.D.  
Vedoucí diplomové práce

## **ABSTRAKT:**

Výroba stavebních materiálů vyžaduje velké množství energie. Její spotřeba může být snížena užitím druhotných surovin. Tato diplomová práce se zabývá senzorickými vlastnostmi stavebních materiálů. Jsou prezentovány elektrické vlastnosti kompozitů a způsoby jejich měření.

V experimentální části byl zkoumán vliv vodivých příměsí na senzorické vlastnosti aluminosilikátových kompozitů. Byly vytvořeny krychle na bázi alkalicky aktivované strusky s obsahem grafitového prášku, sazí, uhlíkových vláken, ocelových vláken nebo uhlíkových nanotrubic. Sledoval se průběh změny elektrického odporu při cyklickém tlakovém namáhání.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** senzorické vlastnosti, alkalicky aktivovaná struska, grafitový prášek, saze, uhlíková vlákna, ocelová vlákna, uhlíkové nanotrubice

## **ABSTRACT:**

Production of construction materials requires a large amount of energy. That can be decreased by using of waste materials. This thesis deals with the self-sensing properties of composites. It presents electrical properties of building materials and their measurement.

In the experimental part, the influence of conductive fillers on the self-sensing properties of aluminosilicate composites was examined. Test cubes were made of alkali-activated slag with a content of graphite powder, carbon black, carbon fibers, steel fibers or carbon nanotubes. The fractional change in resistance during cyclic compressive loading was monitored.

**KEYWORDS:** self-sensing properties, alkali activated slag, graphite powder, carbon black, carbon fibers, steel fibers, carbon nanotubes



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Bc. Maria Míková *Senzorické vlastnosti alkalicky aktivovaných struskových kompozitů při namáhání v tlaku*. Brno, 2019. 73 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. RNDr. Pavel Rovnaník, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Senzorické vlastnosti alkalicky aktivovaných struskových kompozitů při namáhání v tlaku* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 10. 1. 2019

---

Bc. Maria Míková  
autor práce

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji panu doc. RNDr. Pavlu Rovnaníkovi, Ph.D. za vedení mé diplomové práce, odborný dohled, věcné připomínky, ochotu a trpělivost a panu doc. Mgr. Ivovi Kusákovi Ph.D. za cenné rady a vstřícnost při odborných konzultacích elektrických vlastností kompozitů. Rovněž mé poděkování patří rodině za podporu v průběhu celého studia na vysoké škole.

## Obsah

1	Úvod .....	10
2	Teoretická část .....	11
2.1	Elektrické vlastnosti kompozitů .....	11
2.1.1	Elektrody pro měření elektrických vlastností .....	11
2.1.2	Elektrický odpor .....	12
2.1.3	Elektrická vodivost .....	14
2.2	Senzorické vlastnosti při zatěžování .....	15
2.2.1	Tlakové namáhání .....	16
2.2.2	Tahové namáhání .....	17
2.2.3	Ohybové namáhání .....	17
2.2.4	Další faktory ovlivňující sensorické vlastnosti .....	17
2.3	Senzorické vlastnosti kompozitů při tlakovém namáhání .....	20
2.3.1	Cementové kompozity s nanotrubičkami .....	20
2.3.2	Porovnání vlastností cementového kompozitu s ocelovými drátky a uhlíkovými vlákny .....	22
2.3.3	Cementové kompozity se sazemí jako funkčním plnivem .....	25
2.3.4	Porovnání vlastností cementového kompozitu s grafitovým práškem a uhlíkovými vlákny .....	26
3	Experimentální část .....	31
3.1	Suroviny .....	31
3.1.1	Struska .....	31
3.1.2	Vodní sklo .....	32

3.1.3	Plnivo.....	32
3.1.4	Vodivé příměsi .....	32
3.1.5	Cement.....	33
3.1.6	Další suroviny .....	34
3.1.7	Voda.....	34
3.2	Příprava vzorků.....	34
3.3	Zkušební postupy a metodika zkoušení.....	37
3.3.1	Pevnost v tahu za ohybu.....	38
3.3.2	Pevnost v tlaku .....	38
3.3.3	Elektrický odpor trámců .....	39
3.3.4	Elektrický odpor při cyklickém zatěžování .....	39
3.4	Výsledky měření.....	40
3.4.1	Mechanické vlastnosti .....	40
3.4.2	Elektrický odpor.....	45
3.4.3	Změna elektrického odporu při cyklickém zatěžování.....	54
3.4.4	Zatěžování do porušení .....	62
4	Závěr .....	69
5	Literatura.....	71

# 1 Úvod

Cílem vývoje stavebních materiálů je dosáhnout lepších vlastností a zároveň snížit energetickou náročnost při jejich výrobě. Jedním z nových materiálů je tzv. chytrý beton, na jehož výzkumu se pracuje od 90. let 20. století. Tento materiál by měl sloužit k monitorování technického stavu budov, neboť vznik trhlin či jiných deformací v konstrukci se projevuje změnou elektrického odporu betonu. Využit se dá i v silniční dopravě pro monitorování rychlosti vozidel, zjišťování jejich hmotností nebo také sledování hustoty provozu. Další z vlastností chytrého betonu je jeho zahřívání při průchodu elektrickým proudem, čehož by se mohlo využít pro rozpouštění sněhu a ledu v zimních měsících na chodnících nebo letištních plochách. Tyto vlastnosti označujeme jako senzorické.

Jednou z nevýhod cementu je znečišťování životního prostředí při jeho výrobě oxidem uhličitým. Z toho důvodu je v současné době snaha o jeho nahrazování jinými látkami. Jednou z možností je použití průmyslových odpadních látek, například vysokopecní strusky nebo elektrárenského popílku. Tím by se i snížila spotřeba přírodních surovin, jako je vápenec. Jednou z alternativ úplné náhrady portlandského cementu je alkalicky aktivovaná struska.

Navzdory výše uvedeným důvodům prozatím nebylo provedeno mnoho výzkumů senzorických vlastností alkalicky aktivované strusky.

Tato práce se věnuje senzorickým vlastnostem aluminosilikátových kompozitů. Cílem je zlepšit senzorické vlastnosti alkalicky aktivované strusky zvýšením její elektrické vodivosti přimícháním vodivých příměsí, jejichž částice vytváří vodivou strukturu.

Řešenou problematikou tato práce navazuje na mou bakalářskou práci z roku 2016 na téma „Silikátové materiály se zvýšenou elektrickou vodivostí“.

## 2 Teoretická část

### 2.1 Elektrické vlastnosti kompozitů

Senzorické vlastnosti souvisí s elektrickými a mechanickými vlastnostmi chytrého betonu. Mechanické vlastnosti a metody jejich měření jsou běžně používány. Jedná se např. o pevnost, modul pružnosti, mezní přetvoření atd. Z elektrických vlastností se nejčastěji k určení sensorických vlastností používá elektrický odpor a měrný elektrický odpor. Někteří vědci používají jiné měřitelné veličiny jako například reaktanci, impedanci, kapacitu a relativní permitivitu [1].

#### 2.1.1 Elektrody pro měření elektrických vlastností

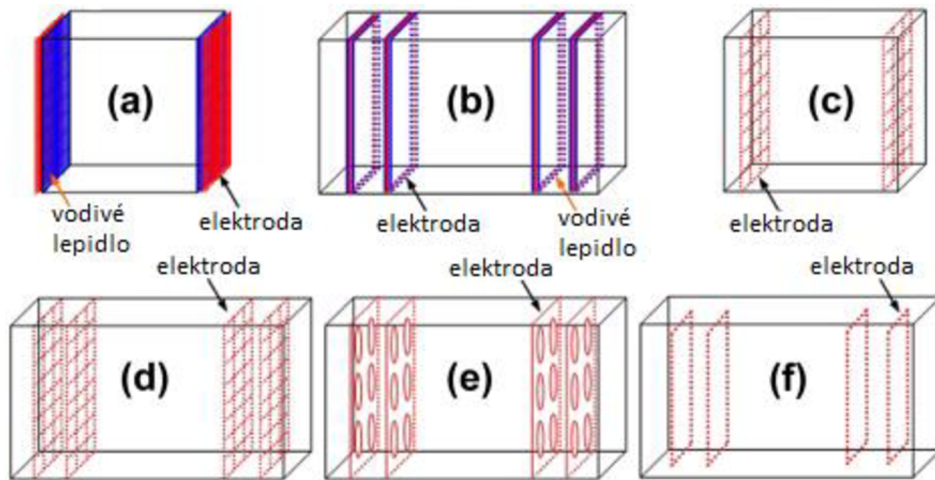
Elektrody slouží ke spojení měřeného materiálu a měřicího zařízení. Jejich výběr je velmi podstatný, neboť elektrody mají přímý vliv na přesnost měření snímacího signálu. Důležitá je volba materiálu elektrod, jejich fixace a uspořádání [2].

Materiály elektrod by měly mít především nízký elektrický odpor a stabilní elektrickou vodivost. V současné době se nejčastěji používá měď, nerez nebo olovo v různých formách, např. plechy, fólie, sítě, pásy, nátěry. Materiál a tvar elektrody ovlivňuje naměřenou rezistivitu [2, 3].

Elektrody chytrého betonu bývají obvykle ve dvou nebo čtyřelektrodovém uspořádání. Předchozí experimentální měření ukazují, že způsob upevnění elektrod a jejich rozmístění má přímý vliv na distribuci elektrického pole chytrého betonu, což ovlivňuje výsledky měření rezistivity [2].

V současné době existuje šest základních schémat upevnění a rozmístění elektrod (Obr. 2-1). Na schématech (a) a (b) jsou elektrody připevněny na povrchu betonu. Tento způsob se velmi užívá při laboratorním měření sensorických vlastností chytrého betonu, neboť nezhoršují jeho mechanické vlastnosti. Nevýhodou těchto metod je snadné odpadnutí elektrod, tudíž nejsou

vhodné pro praktické používání. K překonání tohoto problému byla navržena další schémata. Vložené pletivo (c) a (d), perforovaná deska (e) nebo smyčka (f) zajišťují integritu elektrody a chytrého betonu. Mimo to chytrý beton zajišťuje ochranu vložených elektrod [4].



Obr. 2-1 Schémata upevnění a rozmístění elektrod [1]

### 2.1.2 Elektrický odpor

Metody měření elektrického odporu chytrého betonu rozlišujeme dle počtu a uspořádání elektrod. Metoda tří elektrod se téměř nepoužívá kvůli jejich složitému rozmístění. Ačkoli má dvouelektrodová metoda jednodušší měřicí obvod, je metoda čtyř elektrod výhodnější, neboť eliminuje přechodový odpor mezi elektrodami a materiálem, což je důležité především při měření malých odporů [5].

Na základě předchozích výzkumů se pro měření elektrického odporu chytrého betonu doporučuje metoda čtyř elektrod. Někteří vědci ovšem tvrdí, že ačkoli při použití dvouelektrodové metody naměřená hodnota elektrického odporu může být vyšší než skutečný odpor kompozitu z důvodu navýšení o odpor přechodový, neovlivňuje to schopnost zaznamenávat změny elektrického odporu kompozitů při zatížení. Jelikož je dvouelektrodová metoda



jednodušší a příhodnější než metoda čtyř elektrod, je stále velmi široce používána [2, 5, 6].

Při měření elektrického odporu chytrého betonu dvouelektrodovou i čtyřelektrodovou metodou je nejjednodušší použití stejnosměrného proudu. Ovšem pokud se používá konstantní elektrické pole při měření elektrického odporu, pohyb a agregace iontů v matrici povedou k elektrické polarizaci chytrého betonu, jehož elektrická vodivost je ovlivněna iontovou vodivostí. Je velmi obtížné přesně změřit změny v elektrickém odporu chytrého betonu způsobené vnějším zatížením při měření stejnosměrným proudem. Jednou z možností, jak anulovat polarizační efekt při měření elektrického odporu stejnosměrným proudem, je zaznamenání změn odporu způsobené polarizací nezatíženého vzorku. Dále jde například použít potenciál stejnosměrného napětí před zatížením kompozitu, aby došlo k ustálení odporu po úplné polarizaci. Obě tyto metody ovšem nejsou vhodné pro použití v terénu. Rovněž lze použít střídavý proud. Přestože lze polarizaci pozorovat i při tomto způsobu, její působení je sníženo na přijatelný rozsah zvýšením frekvence použitého střídavého proudu [7, 8].

Rezistivitu neboli měrný elektrický odpor  $\rho$  lze dle Ohmova zákona vyjádřit:

$$\rho = R \cdot \frac{S}{L} \quad (1)$$

kde  $R$  - elektrický odpor ( $\Omega$ )

$S$  - obsah kolmého průřezu ( $m^2$ )

$L$  - vzdálenost mezi dvěma elektrodami (m)

Po diferencni úpravě získáme vztah:

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dR}{R} - (1 + 2\mu) \frac{dL}{L} \quad (2)$$

kde  $\mu$  - Poissonovo číslo

Deformace vlivem vnější síly jsou velmi malé, a tudíž lze změny ve vzdálenosti mezi elektrodami zanedbat. Po úpravě tedy získáme rovnici:

$$\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = \frac{R - R_0}{R_0}; \frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \frac{\Delta R}{R_0} \quad (3)$$

kde  $\rho_0$  - počáteční rezistivita materiálu, nevystavenému žádnému zatížení

$R_0$  - počáteční elektrický odpor materiálu, nevystavenému žádnému zatížení

$\Delta\rho$  - změna rezistivity

$\Delta R$  - je změna odporu

Z rovnice 3 je tedy patrné, že změna elektrického odporu materiálu při zatížení je stejná jako změna rezistivity [9].

### 2.1.3 Elektrická vodivost

Rozlišujeme několik druhů elektrické vodivosti - elektronovou, děrovou, iontovou a emisi elektronů (tunelový jev).

Elektronová vodivost je způsobena přímým kontaktem funkčních částic, čímž je vytvořena vodivá vazba. Elektrony se pohybují po vodivých cestách vytvořených z funkčních plniv [1].

Vodivost děrová je způsobena fiktivní částicí s kladným elementárním nábojem. Využívá se především k popisu vodivosti způsobené nedostatkem elektronů. Tento typ vodivosti je účinný pouze v případě užití uhlíkových plniv, jako jsou například uhlíková vlákna, uhlíkové nanotrubičky nebo saze [10].

V betonové matici se nacházejí póry a dutiny. Ve vodě vyplňující tyto dutiny se mohou rozpouštět ionty, což vede k iontové vodivosti v kapilárách. Tento typ vodivosti je závislý na množství vody v betonu, v suchých podmínkách se jedná téměř o izolační materiál. Iontová vodivost vede k elektrické polarizaci, která ovlivňuje stejnosměrný proud při měření elektrického odporu [11].

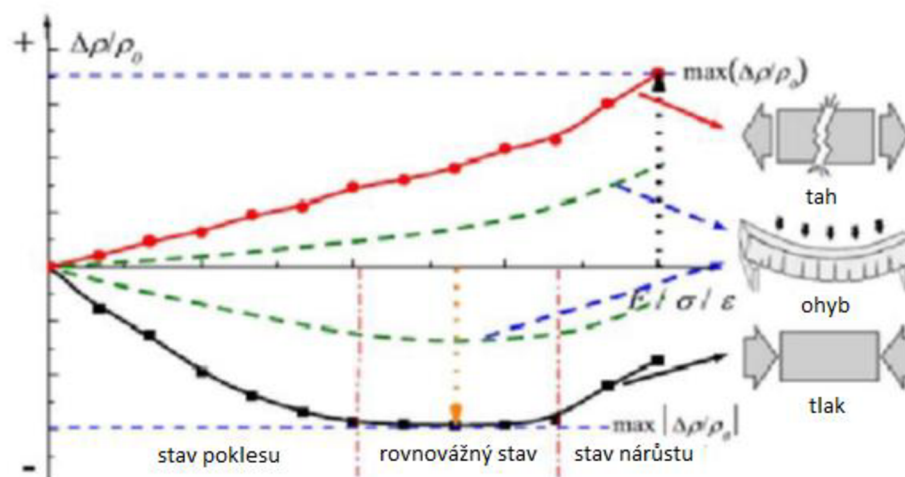
K emisi elektronů a tunelovému jevu dochází, pokud se funkční plniva nedotýkají, ovšem vzdálenost mezi nimi je dostatečně malá. Tunelový jev je vyvolán silným lokálním elektrickým polem. Běžná funkční plniva nedokáží vytvořit dostatečně silné elektrické pole pro vyvolání emise při nízkých napětích. Avšak některá plniva (např. niklový prášek nebo uhlíkové nanotrubicce) mohou vytvořit intenzivní elektrické pole na ostrých hrotech, čímž sníží tloušťku bariéry a umožní tak emisi [12].

Jelikož se typy vedení různě ovlivňují, je obtížné určit skutečnou elektrickou vodivost. Závislost elektrického odporu na čase při použití stejnosměrného proudu naznačuje, zda se jedná o vedení iontové nebo elektronové. Je-li dominantní iontové vedení, elektrický odpor roste s časem, což je způsobeno polarizačním účinkem. V případě elektronové vodivosti se elektrický odpor s časem nemění [13].

Závislost mezi proudem a napětím indikuje, zda se jedná o tunelový jev a emisi elektronů nebo elektronovou vodivost. Lineární křivka znamená, že se jedná o elektronovou vodivost. Nelineární křivka indikuje tunelový jev [13].

## **2.2 Senzorické vlastnosti při zatěžování**

Chytré betony vykazují jiné senzorické vlastnosti při různých druzích zatížení jako je tlakové, tahové a ohybové namáhání. Chování chytrého betonu při těchto typech namáhání je zobrazeno na obrázku 2-2.



Obr. 2-2 Senzorické vlastnosti chytrého betonu při různém zatížení [13]

### 2.2.1 Tlakové namáhání

Jak je vidět na obrázku 2-2, při stálém tlakovém zatěžování obvykle chytrý beton prochází stavem poklesu, rovnováhy a nárůstu změny elektrického odporu. Zatěžování způsobuje přibližování částic vodivého plniva, čímž dojde ke zvýšení elektrické vodivosti. Tvorba trhlin poté začne narušovat strukturu vzorku a vodivost se snižuje. Při dalším zatěžování se trhliny rozšiřují a dojde k výraznému narušení vodivé sítě [13].

Při cyklickém zatěžování dochází k tomu, že elektrická rezistivita chytrého betonu klesá s rostoucí silou a roste při odtížení vzorku. Při různých amplitudách zatěžovací síly nastává různá změna elektrické rezistivity. Hodnota rezistivity, které vzorek dosáhne při odtížení (tzv. základní rezistivita), je jiná, než byla počáteční, což je způsobeno postupnou redukcí množství trhlin v kompozitu při zatěžovacích cyklech [13].

Experimentálně bylo zjištěno, že pokud je amplituda zatěžovací síly pod 30 % maximální pevnosti, základní rezistivita i změna elektrické rezistivity jsou vratné, což je výsledkem reverzibilních elastických deformací chytrého betonu. Je-li amplituda zatěžovací síly v rozmezí 30 % a 75 % maximální pevnosti, je vratná pouze změna elektrické rezistivity. Hodnota základní rezistivity je již

nevratná. Tento jev se přisuzuje drobným deformacím v matici a z toho plynoucí rekonstrukce vodivé sítě. Pokud je amplituda zatěžovací síly nad 75 %, je nevratná základní rezistivita i změna elektrické rezistivity. To je způsobeno rozsáhlým poškozením matrice a porušením vodivé sítě [6, 12, 14, 15].

### **2.2.2 Tahové namáhání**

Při konstantním tahovém namáhání elektrická rezistivita roste, jelikož se od sebe částice vodivého plniva vzdalují a dochází k porušení vodivé sítě [13].

Během cyklického zatěžování dochází při zatěžování k nárůstu elektrické rezistivity a při snižování zatěžovací síly ke klesání. Podobně jako u cyklického namáhání tlakem se základní rezistivita a změna elektrické rezistivity mění dle amplitudy působící síly. Při nízkých amplitudách jsou oba jevy vratné. V případě větších amplitud jsou oba jevy nevratné [16, 17, 18].

### **2.2.3 Ohybové namáhání**

Jestli je trámec zatěžován ve středové části a podepřen na obou koncích, dochází v horní části příčného řezu k tlakovému namáhání a v dolní části k tahovému. Z toho důvodu jsou sensorické vlastnosti ohýbaného vzorku složeny ze sensorických vlastností při zatížení tlakem a tahem. U tohoto typu zatěžování velmi záleží na složení chytrého betonu a rozmístění elektrod [19-22].

Tyto výsledky ukazují, že existuje souvislost mezi elektrickou rezistivitou/odporem a zatěžováním, deformacemi, trhlinami vzorku. Z toho vyplývá, že lze odhalit poškození uvnitř struktury chytrých betonů pomocí měření elektrických vlastností [19-22].

### **2.2.4 Další faktory ovlivňující sensorické vlastnosti**

Koncentrace funkčního plniva velmi ovlivňuje sensorické vlastnosti, neboť vytváří vodivou síť, která ovlivňuje elektrický odpor/rezistivitu. Bylo provedeno poměrně dost výzkumů zabývajících se různými koncentracemi

rozličných vodivých plniv a jejich vlivu na senzorické vlastnosti při odlišných zatíženích [1, 13].

Geometrický tvar funkčního plniva rovněž velmi ovlivňuje rozdělení vodivé sítě. Zkoumán je především vliv tvaru, struktury, délky, velikosti a morfologie plniva na senzorické vlastnosti při různých druzích zatížení [1, 13, 19].

Bylo prokázáno, že senzorické vlastnosti betonu jsou ovlivněny rychlostí zatěžování. Tato závislost se projevuje na vzorcích s různými funkčními plnivou při tlakovém namáhání [1, 13].

Obsah vody v chytrém betonu je ovlivněn vlhkostí a teplotou okolního prostředí, způsobem vytvrzování, jeho strukturou apod. Všechny tyto faktory ovlivňují elektrickou vodivost a tím i senzorické vlastnosti [1, 13].

Změna teploty vede k objemovým změnám chytrého betonu, čímž dochází ke změnám vzdáleností mezi částicemi funkčních plniv. Změny teploty rovněž ovlivňují energii elektronů a množství vody v betonu. Tito činitelé mění elektrický odpor, čímž i senzorické vlastnosti [1, 13].

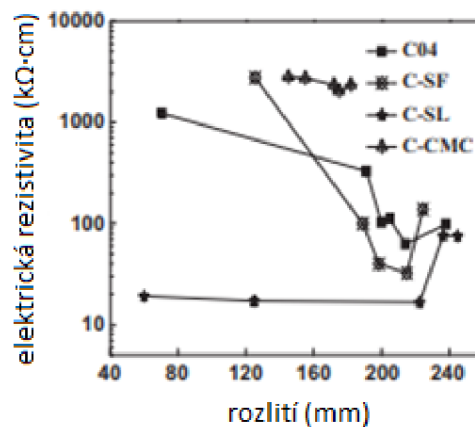
Zmrazovací a rozmrazovací cykly způsobují v chytrém betonu opakovanou deformaci a vznik trhlin ve struktuře. S vyšším množstvím cyklů se trhliny kumulují a rozšiřují, až dojde k nevratnému poškození struktury a tím i změně elektrického odporu [1, 13].

Při cyklické změně vlhkosti dochází ke zkrácení trvanlivosti chytrého betonu, čímž se ničí vodivá síť. Tím dochází ke zhoršení senzorických vlastností. Zatímco v suché matici převládá elektronová vodivost, ve vlhkém stavu převažuje vodivost iontová [11, 13].

Při krátkodobém působení korozního prostředí na chytrý beton, jako jsou například silné kyseliny nebo zásady, karbonatace, dojde ke snížení elektrického

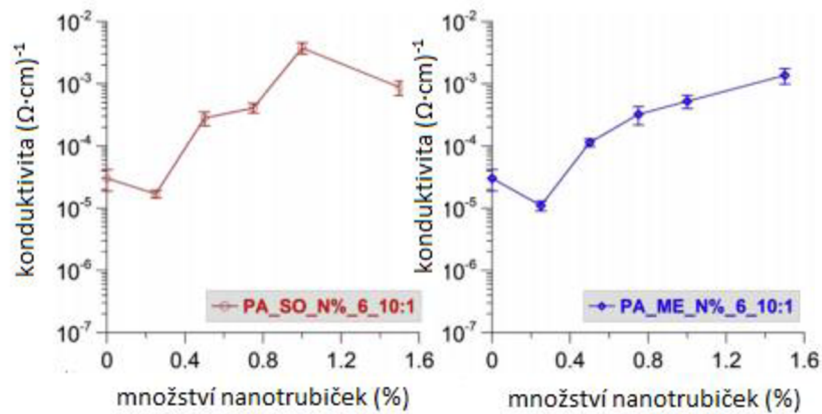
odporu díky iontové permeabilitě, což ovlivní sensorické vlastnosti. Při dlouhodobém vlivu korozivního prostředí již dochází k reakci agresivních iontů s vnitřní strukturou chytrého betonu, což způsobuje destrukci struktury betonu a degradaci sensorických vlastností [1, 11, 13].

Wan H., Gao X. a Wang R. [23] zkoumali vliv reologických vlastností cementové směsi na sensorické vlastnosti. Na Obr. 2-3 lze vidět, že s větším rozlitím nejdříve došlo k poklesu elektrické rezistivity a poté k jejímu nárůstu. Největší vodivosti bylo dosaženo díky nejlepšímu rozptýlení funkčního plniva ve směsi.



Obr. 2-3 Závislost elektrické rezistivity na rozlití [23]

D' Alessandro a kol. [24] zkoumali vliv způsobu rozptýlení uhlíkových nanotrubiček na elektrické vlastnosti cementové matrice. Směs ME byla míchána mechanicky, zatímco směs SO byla sonikována na ultrazvukovém homogenizátoru. Na Obr. 2-4 lze pozorovat, že sonikovaná směs má větší konduktivitu.

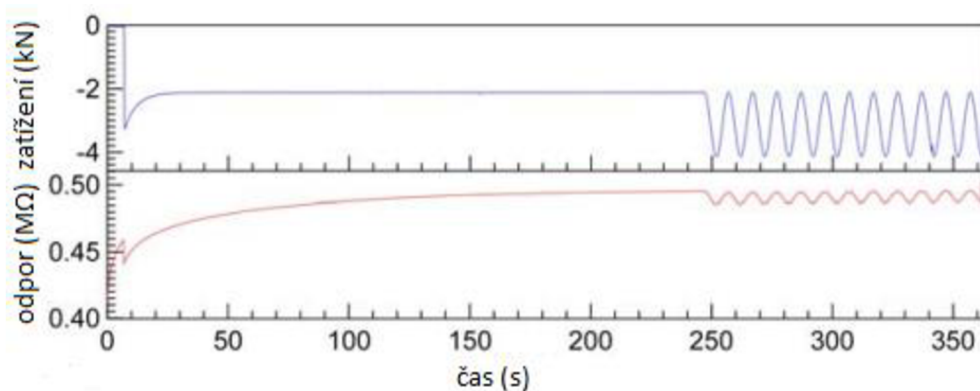


Obr. 2-4 porovnání závislosti konduktivity na množství nanotrubiček [24]

## 2.3 Senzorické vlastnosti kompozitů při tlakovém namáhání

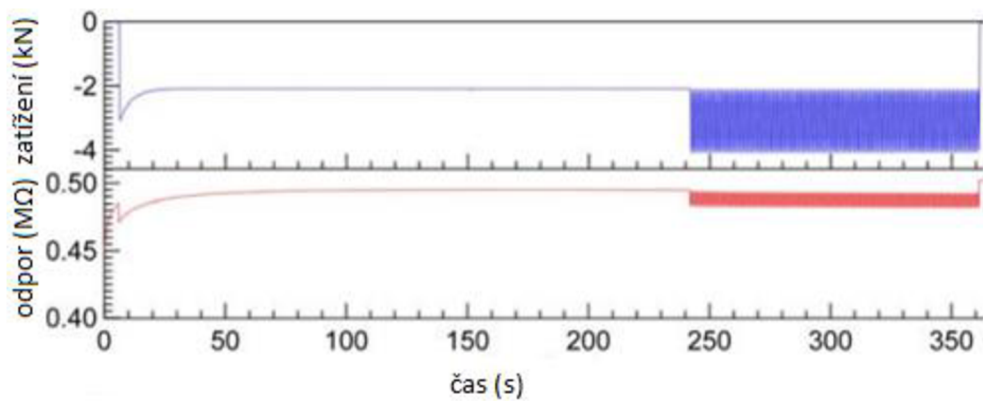
### 2.3.1 Cementové kompozity s nanotrubičkami

Výzkumu senzorických vlastností cementového kompozitu s příměsí uhlíkových nanotrubiček se věnoval Materazzi a kol. [25]. Jako elektrody použili měděný drát o průměru 1 mm, který byl vložen do vzorku – trámečku o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Tělesa byla dynamicky zatěžována při frekvenci zatěžování 0,1 – 5,0 Hz. Na obrázcích 2-5 až 2-8 je zobrazeno zatížení v závislosti na čase a jemu odpovídající elektrický odpor při různých frekvencích. Elektrický odpor se zvyšuje s narůstající silou, což je způsobeno pomalou polarizací cementového kompozitu s obsahem mnohostěnných nanotrubiček. U nižších frekvencí (0,1 a 1 Hz) lze pozorovat korelaci mezi působící silou a elektrickým odporem. Při vyšších frekvencích nelze i přes zvětšení měřítka rozeznat žádné průběhy.

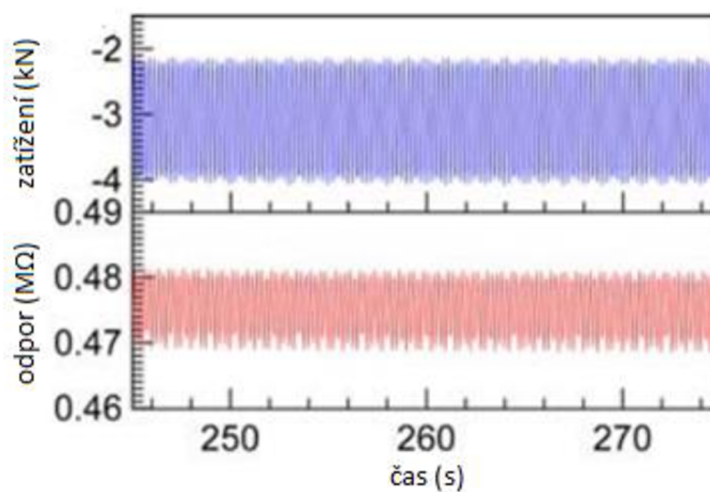


Obr. 2-5 Graf zobrazující zatížení a odpovídající odpor v závislosti na čase při 0,1 Hz [25]

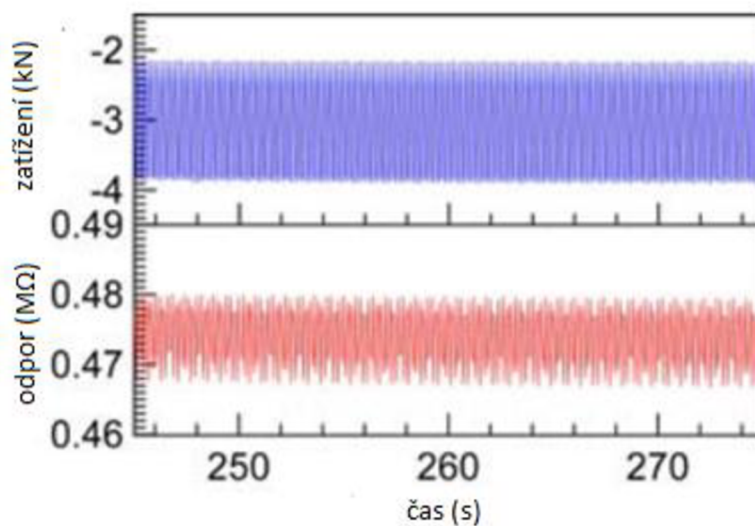




Obr. 2-6 Graf zobrazující zatížení a odpovídající odpor v závislosti na čase při 1,0 Hz [25]



Obr. 2-7 Graf zobrazující zatížení a odpovídající odpor v závislosti na čase při 4,0 Hz [25]



Obr. 2-8 Graf zobrazující zatížení a odpovídající odpor v závislosti na čase při 5,0 Hz [25]

### 2.3.2 Porovnání vlastností cementového kompozitu s ocelovými drátky a uhlíkovými vlákny

Wen S. a Chung D. D. L. [26] vytvořili studii zabývající se porovnáním cementového kompozitu s ocelovými drátky a uhlíkovými vlákny a jejich vlastnostmi jako piezorezistivními senzory.

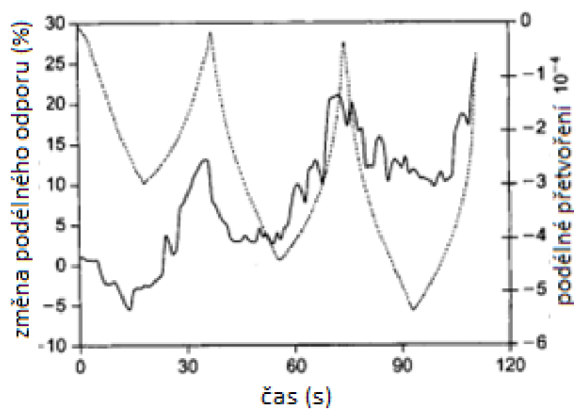
Pro výrobu vzorků byl použit CEM I, voda (vodní součinitel 0,35), mikrosilika (15 % z množství cementu), ocelové drátky (0,36 % a 0,72 %) o průměru 8  $\mu\text{m}$  a délce 6 mm, průměr uhlíkových vláken (0,5 %) byl 15  $\mu\text{m}$  a délka 5 mm. Pro tlakové namáhání vytvořili vzorky o rozměrech 51 x 51 x 51 mm. Elektrický odpor byl měřen čtyřelektrodově za použití stříbrné barvy a měděného drátu jako elektrod.

Na obrázcích 2-9 a 2-10, které zobrazují grafy vzorků s příměsí 0,72 % drátků, vidíme, že přetvoření je převážně vratné. U rezistivity dochází každým cyklem ke snížení reverzibility.

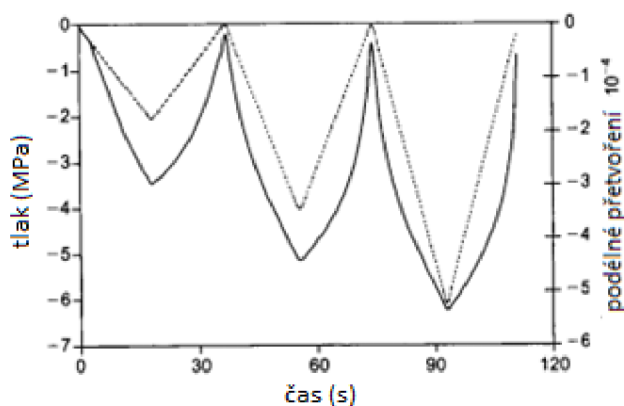
Grafy směsí s příměsí 0,36 % drátků jsou zobrazeny na obrázcích 2-11 a 2-12. U těchto vzorků rezistivita při zatěžování klesala. Změna rezistivity i přetvoření jsou více reverzibilní než u směsi obsahující 0,72 % drátků.

Na obrázcích 2-13 a 2-14 jsou znázorněny grafy vzorků s příměsí 0,5 % uhlíkových vláken. Přetvoření u této sady je naprosto vratné a lineárně souvisí s napětím. Rezistivita se s rostoucím zatížením snižovala. Taktéž zde se jedná o vratný proces s výjimkou nevratného zvýšení na konci prvního cyklu.

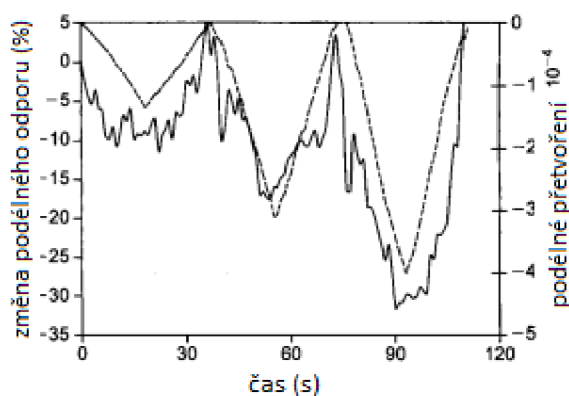
Tyto výsledky ukazují, že obě směsi s drátky jsou více vodivé než vzorky s uhlíkovými vlákny. Lepší piezorezistivní vlastnosti má ovšem sada s uhlíkovými vlákny, jelikož zkušební tělesa při odtížení prokázala větší reverzibilitu. U vzorků s drátky došlo zvoleným množstvím plniva k překročení perkolačního prahu a tím i zhoršení piezorezistivních vlastností.



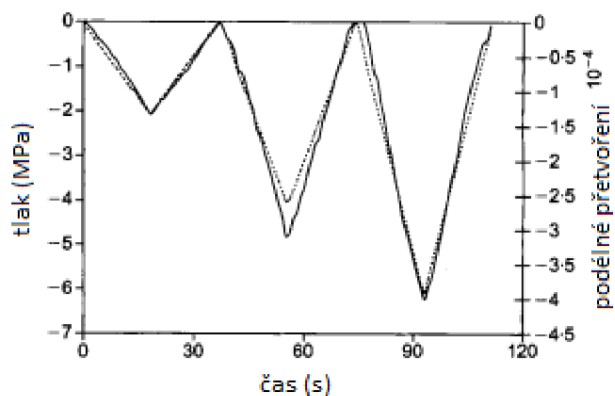
Obr. 2-9 Změna odporu (plná čára) a podélného přetvoření (přerušovaná čára) v závislosti na čase vzorku 0,72 % drátků [26]



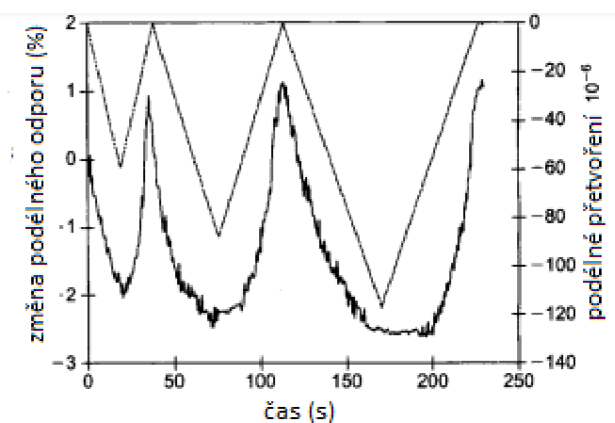
Obr. 2-10 Změna tlaku (přerušovaná čára) a podélného přetvoření (plná čára) v závislosti na čase vzorku 0,72 % drátků [26]



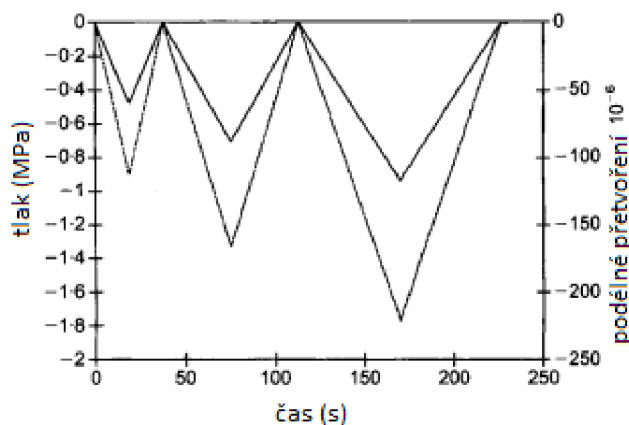
Obr. 2-11 Změna odporu (plná čára) a podélného přetvoření (přerušovaná čára) v závislosti na čase vzorku 0,36 % drátků [26]



Obr. 2-12 Změna tlaku (přerušovaná čára) a podélného přetvoření (plná čára) v závislosti na čase vzorku 0,36 % drátků [26]



Obr. 2-13 Změna odporu (plná čára) a podélného přetvoření (přerušovaná čára) v závislosti na čase vzorku 0,5 % uhlíkových vláken [26]



Obr. 2-14 Změna tlaku (přerušovaná čára) a podélného přetvoření (plná čára) v závislosti na čase vzorku 0,5 % uhlíkových vláken [26]

### 2.3.3 Cementové kompozity se sazí jako funkčním plnivem

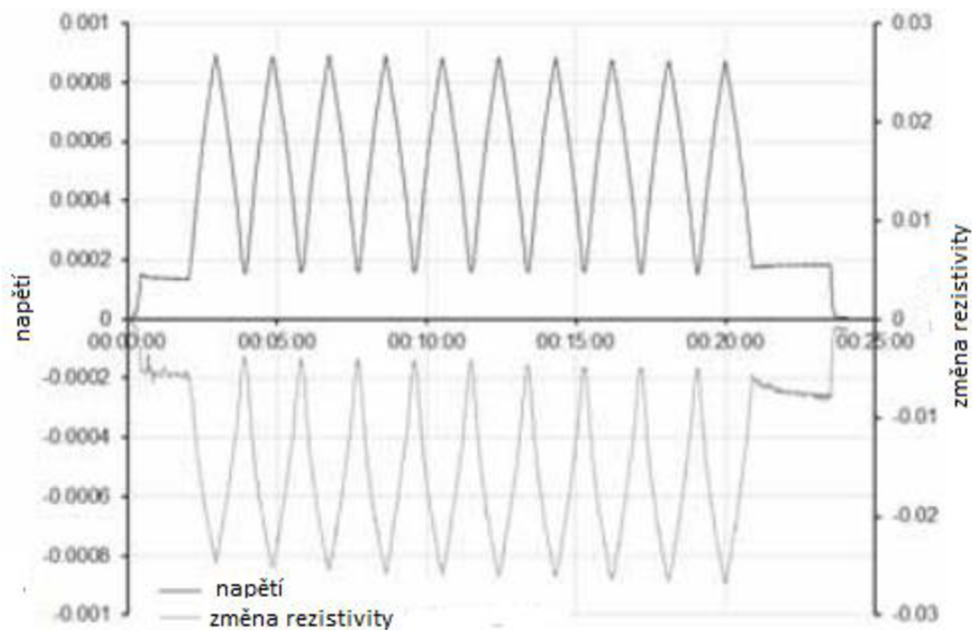
Výzkumu materiálů s přidáním sazí se věnoval Monteiro A. O., Cachim P. B. a Costa P. M. F. J. [27]. Vzorky byly tvořeny portlandským cementem, sazími o průměru částic 120 nm, superplastifikátorem na bázi polykarboxylátu, jemným pískem (<1 mm) a měděným plechem, který sloužil jako elektrody. Měření bylo provedeno čtyřelektrodově. Bylo vytvořeno pět vzorků - 0 % sazí, 1 %, 4 %, 7 % a 10 %. Vodní součinitel byl 0,5.

Při použití sazí je velmi důležité homogenní rozmístění částic pro dosažení tunelového jevu.

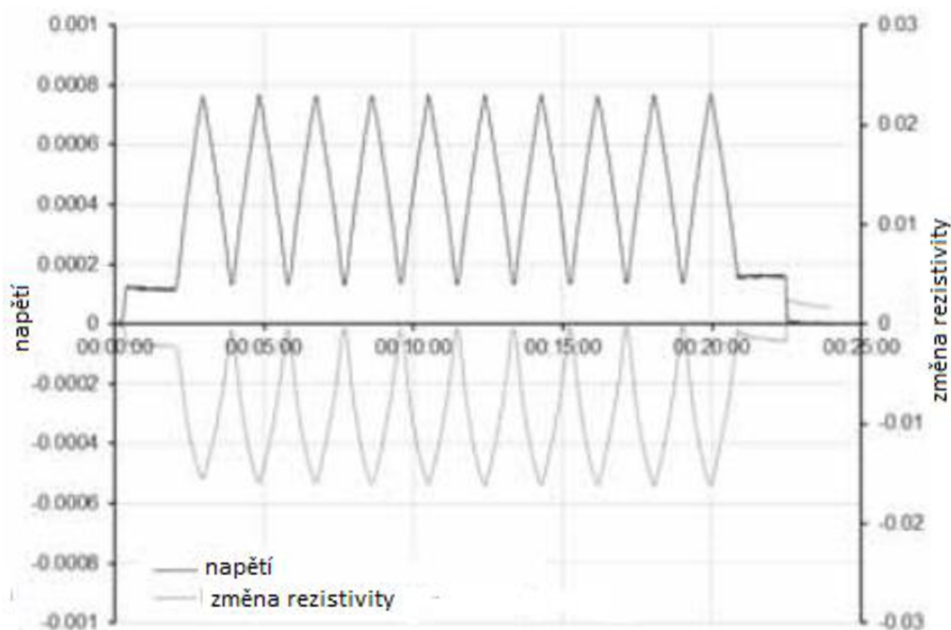
Měření mechanických vlastností potvrdilo předešlé výzkumy, že přidání sazí zlepšuje pevnost v tlaku, ovšem pouze do 4 %. U vyšších dávek se již mechanické vlastnosti zhoršují.

V dřívějších průzkumech bylo prokázáno, že piezorezistivní vlastnosti vykazují pouze vzorky s obsahem 7 % a 10 % a tudíž cyklické zatěžování bylo provedeno pouze na nich. Výsledky měření jsou zobrazeny na obrázku 2-15 (směs 7%) a 2-16 (10 %). Z grafů vyplývá, že změna rezistivity klesá při zvyšujícím se napětí, téměř lineárně.

Měření bylo potvrzeno předpoklad, že hodnota změny rezistivity se na konci cyklu nevrací do počáteční nulové hodnoty. To může být způsobeno nedostatečným časem pro stabilizaci elektrického odporu nebo změnou odporu elektrod v průběhu měření.



Obr. 2-15 Graf závislosti napětí a změny rezistivity na čase vzorku saze 7 % [27]



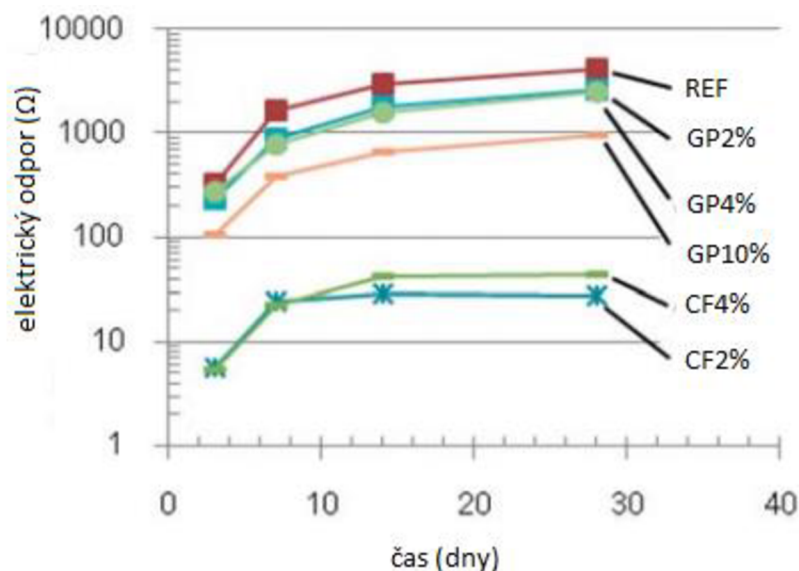
Obr. 2-16 Graf závislosti napětí a změny rezistivity na čase vzorku saze 10 % [27]

### 2.3.4 Porovnání vlastností cementového kompozitu s grafitovým práškem a uhlíkovými vlákny

Srovnání těchto materiálů provedli Loamrat K., Sappakittipakorn M., Sukontasukkul P. [28]. Vzorky byly tvořeny z portlandského cementu, který byl z 15 % nahrazen mikrosilikou, vodní součinitel byl 0,3, 0,4 a 0,5. Pro snížení rezistivity byla přidána 2 %, resp. 4 % sekaných uhlíkových vláken (CF) o délce

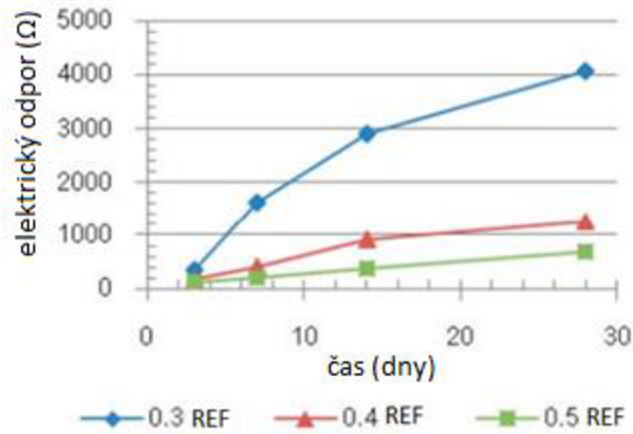
3 mm. Grafitového prášku (GP) byla přidána 2 %, 4 % a 10 %. Vzorky byly uloženy do forem 50 x 50 x 47 mm. Měření bylo provedeno čtyřelektrodově pomocí měděných plechů.

Nejdříve byl zkoumán vliv stáří vzorku na elektrický odpor. Výsledky jsou zobrazeny na obrázku 2-17. Z grafu vyplývá jednoznačné zvýšení elektrického odporu se zvyšujícím se stářím vzorku. To je způsobeno průběhem hydratace, přičemž dochází ke snížení množství pórů s obsahem vody. Z toho důvodu je nárůst odporu v počátku tak prudký a po 28 dnech již k nárůstu nedochází.

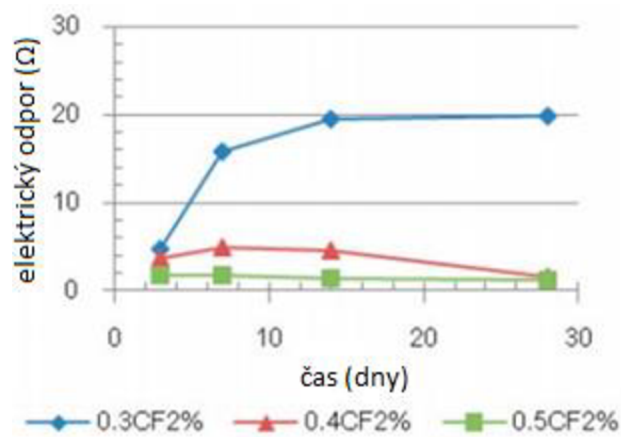


Obr. 2-17 Graf závislosti elektrického odporu na stáří vzorků [28]

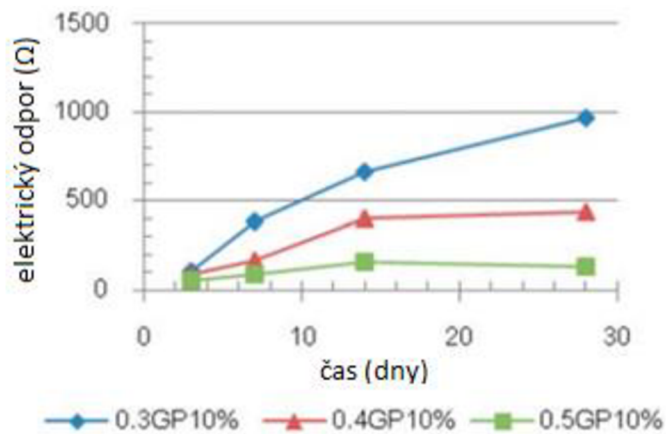
Vliv vodního součinitele na rezistivitu je znázorněn na obrázcích 2-18 až 2-20. Z grafů je patrné, že ve všech případech platí, že čím vyšší je vodní součinitel, tím nižší je odpor. Při vodním součiniteli 0,3 má hydratace na elektrický odpor největší vliv. U vodních součinitelů 0,4 a 0,5 hodnoty odporu rovněž ovlivňuje, ovšem ne tak výrazně. Je to způsobeno množstvím volné vody ve vzorku. Ta postupně ubývá vypařováním a průběhem hydratace, ale jedná se o poměrně pomalý děj.



Obr. 2-18 Závislost elektrického odporu na vodním součiniteli referenčních vzorků [28]



Obr. 2-19 Závislost elektrického odporu na vodním součiniteli vzorků s uhlíkovými vlákny [28]

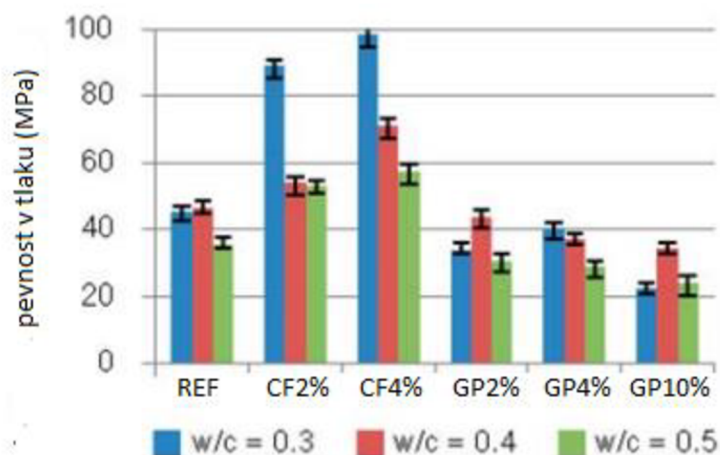


Obr. 2-20 Závislost elektrického odporu na vodním součiniteli vzorků s grafitovým práškem [28]

Na obrázku 2-21 je zobrazena pevnost v tlaku v závislosti na vodním součiniteli různých receptur. Z grafu je patrné, že vodní součinitel 0,5 výrazně

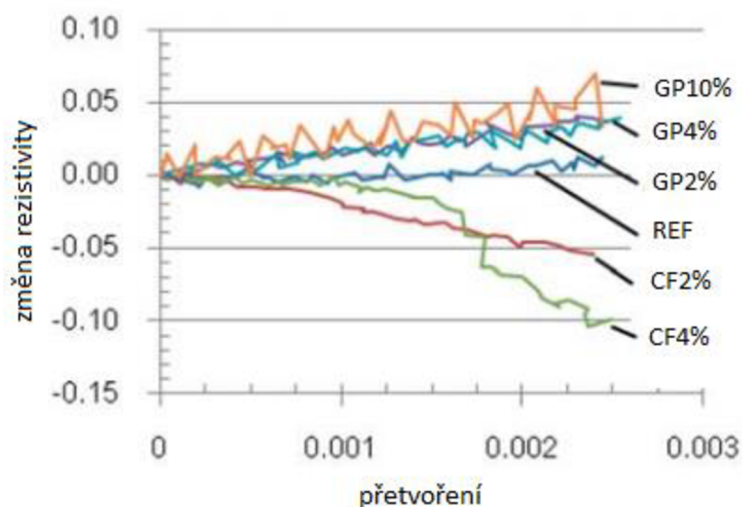


snižuje pevnost v tlaku vzorků. Je to způsobeno množstvím volné vody, kvůli které ve vzorcích vznikly kapilární póry. Vyšší množství grafitového prášku má rovněž negativní vliv na pevnost v tlaku. Důvodem poklesu může být slabší vazba mezi částicemi grafitu.

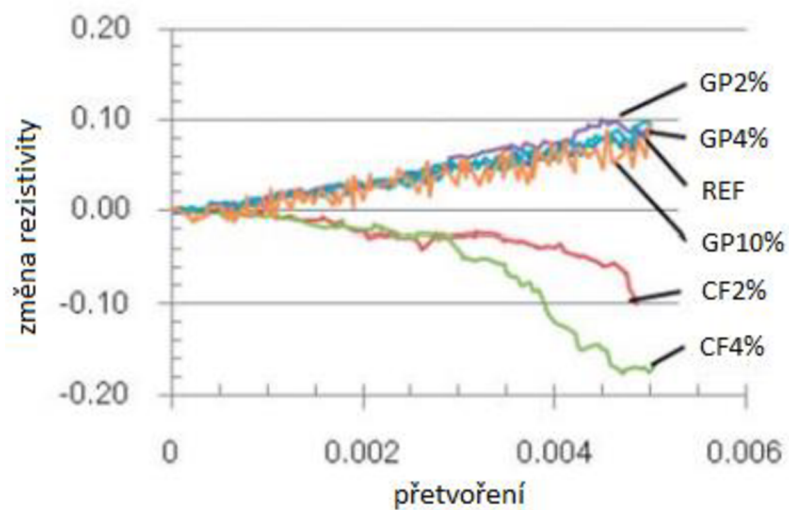


Obr. 2-21 Pevnost v tlaku různých receptur [28]

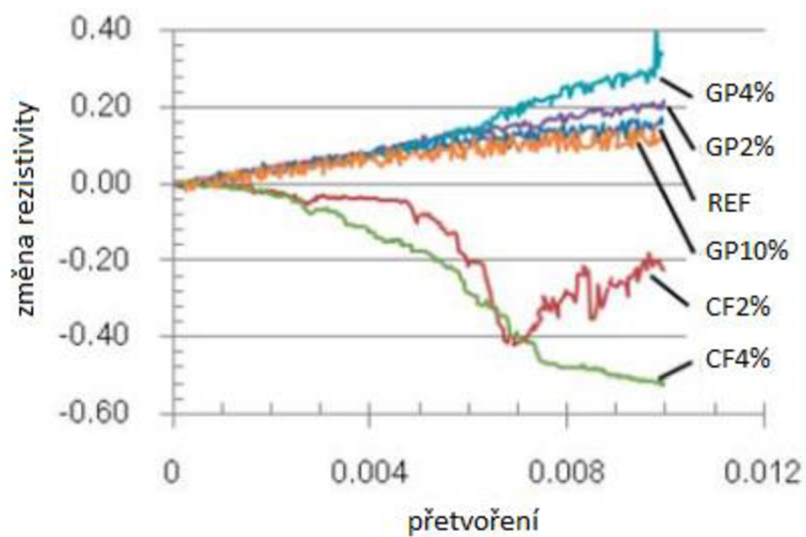
Vzorky s vodním součinitel 0,3 byly zkoumány na závislost změny rezistivity a přetvoření. Měřen byl elektrický odpor, dokud vzorek nedosáhl přetvoření 0,0025 (Obr. 2-22), 0,005 (Obr. 2-23) a 0,01 (Obr. 2-24). Z grafů vyplývá, že hodnota změny rezistivity u referenčních vzorků a vzorků s grafitovým práškem stoupá, zatímco u vzorků s uhlíkovými vlákny klesá, což svědčí o dobrých piezorezistivních vlastnostech. Jedná se o důsledek velmi dobré distribuce částic vodivého plniva, které se vzájemně dotýkají, čímž snižují odpor.



Obr. 2-22 Graf závislosti změny rezistivity na přetvoření (do 0,0025) [28]



Obr. 2-23 Graf závislosti změny rezistivity na přetvoření (do 0,005) [28]



Obr. 2-24 Graf závislosti změny rezistivity na přetvoření (do 0,01) [28]

### 3 Experimentální část

Experimentální část diplomové práce je zaměřena na zhodnocení elektrických, mechanických a senzorických vlastností alkalicky aktivované strusky s přídavkem různého množství vodivých příměsí, jako je grafitový prášek, ocelová a uhlíková vlákna, uhlíkové nanotrubičky a saze. V prvotní fázi výzkumu byly vyrobeny zkušební trámce o rozměrech 40 × 40 × 160 mm, na kterých se zkoumal vliv množství vodivé příměsi na mechanické a elektrické vlastnosti vzorků. Po vyhodnocení naměřených hodnot byly vybrány receptury, ze kterých byly připraveny krychle o rozměrech 100 × 100 × 100 mm obsahující elektrody z měděného pletiva. Na těchto vzorcích se zkoumaly elektrické vlastnosti při tlakovém zatěžování.

#### 3.1 Suroviny

V této kapitole jsou stručně popsány suroviny použité k přípravě vzorků.

##### 3.1.1 Struska

Jedná se o jemně mleté anorganické pojivo s latentně hydraulickými vlastnostmi, které se vyrábí mletím sušené vysokopecní granulované strusky, která splňuje požadavky dle ČSN EN 197-1.

Pro experiment byla použita vysokopecní granulovaná struska SMŠ 380 od výrobce Kotouč Štramberk, s.r.o. Měrný povrch této strusky je dán jejím označením, tedy 380 m<sup>2</sup>·kg<sup>-1</sup>. Chemické složení strusky je uvedeno v tabulce 3-1.

Tabulka 3-1 Chemické složení vysokopecní strusky

Složka	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	MnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
Obsah (%)	39,66	40,12	9,50	6,45	0,47	0,72	0,65	0,33	0,55

### **3.1.2 Vodní sklo**

Jako aktivátor strusky bylo použito vodní sklo. Jedná se o vodný roztok křemičitanu sodného či draselného. Pro experiment bylo použito sušené vodní sklo SUSIL MP 2,0 s molárním poměrem  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 2$ . Do betonu se dává v množství do 5 %, do alkalicky aktivovaných strusek více než 10 %. Na základě předchozích studií byl zvolen hmotnostní poměr strusky a vodního skla 5:1.

### **3.1.3 Plnivo**

Do směsi byl použit křemenný písek PG1, PG2 a PG3, který byl míchán v poměru 1:1:1. Maximální velikost zrna byla 2,5 mm. Jedná se o přírodní křemičitý písek skládající se ze zaoblených částic, jehož obsah křemenných zrn je nejméně 98 %.

### **3.1.4 Vodivé příměsi**

Pro zvýšení elektrické vodivosti směsi byl použit grafitový prášek (GP), ocelová (SF) a uhlíková vlákna (CF), uhlíkové nanotrubičky (CNT) a saze (CB).

#### **3.1.4.1 Grafitový prášek**

Pro přípravu trámčů  $40 \times 40 \times 160$  mm byl použit grafitový prášek COND 8 96 výrobce Graphite Týn, spol s.r.o. Střední velikost zrna je 7,0–9,0  $\mu\text{m}$  s obsahem minimálně 96 % uhlíku.

K výrobě krychlí pro zkoušky tlakového zatěžování se použil práškový grafit PMM 11 od firmy Koh-i-noor se střední velikostí zrn 11  $\mu\text{m}$  s obsahem uhlíku 99,5 % a obsahem popela max. 0,5 %.

#### **3.1.4.2 Ocelová vlákna**

Drátky byly od firmy KrampeHarex s označením DM 6/0,175. Jedná se o ocelové drátky pokryté mosazí. Délka drátků je 6 mm, průměr 0,175 mm. Dosahují pevnosti v tahu 2 800 MPa a modulu pružnosti 210 GPa.

### 3.1.4.3 Uhlíková vlákna

Užita byla uhlíková vlákna od firmy Tenax z polyakrylnitrilu. Délka vláken byla 3 mm a průměr 7  $\mu\text{m}$ . Jejich objemová hmotnost je 1,76  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Pevnost v tahu těchto vláken je 4 000 MPa a modul pružnosti v tahu 238 GPa.

### 3.1.4.4 Uhlíkové nanotrubičky

Zvoleny byly uhlíkové nanotrubičky GRAPHISTRENGTH CW2-45 od firmy Arkema. Jedná o mnohostěnné nanotrubičky, které jsou ve vysoké koncentraci (45 hmotnostních %) dispergovány v karboxymethylcelulóze. Z nanotrubiček byla předem připravena 1% vodná disperze. Ta byla připravena rozpuštěním pelet CNT v horké vodě a následnou homogenizací v mechanickém dispergátoru po dobu 2 hodin při rychlosti 14 000 ot./min

### 3.1.4.5 Saze

Použity byly saze VULCAN 7H od firmy Cabot Corporation. Používají se předně do gumárenského průmyslu, kde vynikají velmi dobrou dispergací a odolností proti opotřebení a otěru. Měrný povrch těchto sazí je 113  $\text{m}^2/\text{g}$  a pevnost v tahu 21,0 MPa.

### 3.1.5 Cement

Pro porovnání směsí alkalicky aktivované strusky byly vyrobeny vzorky s cementem. Použit byl portlandský cement CEM I 42,5 R Radotín. Jedná se o cement s průměrnou pevností v tlaku po 28 dnech 59 MPa a v tahu 9 MPa. Měrný povrch je 361  $\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ . Chemické složení je uvedeno v tabulce 3-2.

Tabulka 3-2 Chemické složení cementu

Složka	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Cl <sup>-</sup>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
Obsah (%)	64,9	19,8	4,2	2,6	1,8	3,0	0,062	3,01	0,16

### 3.1.6 Další suroviny

Do některých směsí byl přidán neiontový detergent Triton X-100 pro snazší dispergaci a u směsí vykazující pěnovost i Lukosan S pro vypuzení vmíseného vzduchu.

### 3.1.7 Voda

Pro přípravu všech směsí byla použita voda z vodovodního řádu.

## 3.2 Příprava vzorků

Všechny směsi byly připravovány v laboratorních podmínkách. K sušenému vodnímu sklu byla přidána suspenze vodivé příměsi s detergentem Tritonem X a částí vody. Tato směs byla minutu míchána v planetovém mixéru. Poté byla přidána struska a všechny frakce písku od nejjemnější po nejhrubší. Na závěr byl přidán Lukosan S a zbytek záměsové vody, jejíž množství bylo voleno dle zachování stejné konzistence. Vzorky s drátky byly připravovány odlišně, vsypaly se na závěr do již namíchané malty. Z každé směsi byla vytvořena sada tří trámců o rozměrech 40 × 40 × 160 mm. Po odformování byly vzorky uloženy do vody. Po 28 dnech od namíchání byly vytaženy a ponechány 7 dní na vzduchu pro ustálení vlhkosti. Následovalo sušení vzorků do konstantní hmotnosti a poté byly zkoušeny mechanické a elektrické vlastnosti. Po zhodnocení výsledků byly vybrány receptury, ze kterých byly vyrobeny krychle o rozměrech 100 × 100 × 100 mm. Do čerstvých malt byly zasunuty dvě elektrody z měděného pletiva o rozměrech 80 × 120 mm o tloušťce drátu 1 mm a velikostí ok 2,5 mm (Obr. 3-1). Receptury pro výrobu trámců jsou uvedeny v tabulce 3-3, pro výrobu krychlí v tabulce 3-4. Pro porovnání byly rovněž vyrobeny i vzorky z cementu, jejichž receptura je uvedena v tabulce 3-5.



Obr. 3-1 Výroba zkušebních těles s elektrodami

Tabulka 3-3 Receptury směsí pro výrobu jedné trojformy 40 × 40 × 160 mm

\*Pro přípravu vzorků s nižším obsahem CNT byla použita 1% disperze, pro vzorky od 0,5 % byla disperze 5%.

\*\*Pro přípravu vzorků s grafitovým práškem byl použit 0,5% roztok Tritonu X-100, pro přípravu ostatních směsí byl již roztok 2%.

	struska (g)	Susil (g)	písek (g)	COND 8 96 (g)	saze (g)	uhlíková vlákna (g)	drátky (g)	* CNT (g)	** Triton X-100 (ml)	1% Lukosan (ml)	voda (ml)
REF	450	90	1350	0	-	-	-	-	0	0	185
1 % GP	450	90	1350	4,5	-	-	-	-	30	5	150
2 % GP	450	90	1350	9	-	-	-	-	30	5	155
3 % GP	450	90	1350	13,5	-	-	-	-	30	5	160
4 % GP	450	90	1350	18	-	-	-	-	30	5	165
5 % GP	450	90	1350	22,5	-	-	-	-	60	10	135
6 % GP	450	90	1350	27	-	-	-	-	60	10	140
7 % GP	450	90	1350	31,5	-	-	-	-	90	15	110
8 % GP	450	90	1350	36	-	-	-	-	90	15	115
9 % GP	450	90	1350	40,5	-	-	-	-	120	20	85
10 % GP	450	90	1350	45	-	-	-	-	120	20	90
15 % GP	450	90	1350	67,5	-	-	-	-	180	30	75
20 % GP	450	90	1350	90	-	-	-	-	240	40	70
25 % GP	450	90	1350	112,5	-	-	-	-	300	40	70

30 % GP	450	90	1350	135	-	-	-	-	390	40	70
2 % CB	450	90	1350	-	9	-	-	-	9	-	200
4 % CB	450	90	1350	-	18	-	-	-	18	-	240
6 % CB	450	90	1350	-	27	-	-	-	27	-	275
8 % CB	450	90	1350	-	36	-	-	-	36	-	300
10 % CB	450	90	1350	-	45	-	-	-	45	-	325
0,5 % CF	450	90	1350	-	-	2,25	-	-	3	3	200
1 % CF	450	90	1350	-	-	4,5	-	-	5	5	220
2 % CF	450	90	1350	-	-	9	-	-	10	10	230
3 % CF	450	90	1350	-	-	13,5	-	-	-	-	300
4 % CF	450	90	1350	-	-	18	-	-	-	-	350
1 % CF-T	450	90	1350	-	-	4,5	-	-	5	5	210
1 % SF	450	90	1350	-	-	-	4,5	-	-	-	190
2 % SF	450	90	1350	-	-	-	9	-	-	-	190
3 % SF	450	90	1350	-	-	-	13,5	-	-	-	190
4 % SF	450	90	1350	-	-	-	18	-	-	-	190
5 % SF	450	90	1350	-	-	-	22,5	-	-	-	190
7 % SF	450	90	1350	-	-	-	31,5	-	-	-	190
9 % SF	450	90	1350	-	-	-	40,5	-	-	-	190
10 % SF	450	90	1350	-	-	-	45	-	-	-	190
15 % SF	450	90	1350	-	-	-	67,5	-	-	-	195
20 % SF	450	90	1350	-	-	-	90	-	-	-	195
0,1 % CNT	450	90	1350	-	-	-	-	45	-	-	140
0,2 % CNT	450	90	1350	-	-	-	-	90	-	-	100
0,3 % CNT	450	90	1350	-	-	-	-	135	-	-	60
0,5 % CNT	450	90	1350	-	-	-	-	45	-	-	140
1,0 % CNT	450	90	1350	-	-	-	-	90	-	-	100
1,5 % CNT	450	90	1350	-	-	-	-	135	-	-	60
2,0 % CNT	450	90	1350	-	-	-	-	180	-	-	20
2,5 % CNT	450	90	1350	-	-	-	-	225	-	-	10



Tabulka 3-4 Receptury směsí pro výrobu jedné formy 100 × 100 × 100 mm

	struska (g)	Susil (g)	písek (g)	grafit. prášek (g)	saze (g)	uhlíková vlákna (g)	drátky (g)	CNT (g)	2% Triton X-100 (ml)	1% Lukosan (ml)	voda (ml)
REF	600	120	1800	-	-	-	-	-	-	-	250
3 % GP	600	120	1800	18	-	-	-	-	10	7	250
10 % GP	600	120	1800	60	-	-	-	-	40	27	240
2 % CB	600	120	1800	-	12	-	-	-	12	-	275
4 % CB	600	120	1800	-	24	-	-	-	24	-	325
6 % CB	600	120	1800	-	36	-	-	-	36	-	370
0,5 % CF	600	120	1800	-	-	3	-	-	3	3	250
1 % CF	600	120	1800	-	-	6	-	-	6	6	270
2 % CF	600	120	1800	-	-	12	-	-	12	12	295
5 % SF	600	120	1800	-	-	-	30	-	-	-	250
10 % SF	600	120	1800	-	-	-	60	-	-	-	250
0,1 % CNT	600	120	1800	-	-	-	-	60	-	-	190
0,4 % CNT	600	120	1800	-	-	-	-	240	-	-	-

Tabulka 3-5 Receptura směsí s cementem pro výrobu jedné formy 100 × 100 × 100 mm

	cement (g)	písek (g)	voda (ml)
CEM	600	1800	275

### 3.3 Zkušební postupy a metodika zkoušení

Vyrobené trávce byly měřeny metodou impedanční spektroskopie pro určení elektrického odporu. Na vzorcích poté byly testovány mechanické vlastnosti a naměřené výsledky porovnány s referenční směsí. Krychle byly cyklicky tlakově zatěžovány, přičemž se měřila změna elektrického odporu. Následně se sledovala změna elektrického odporu při zatěžování až do porušení.

### 3.3.1 Pevnost v tahu za ohybu

Vzorky byly zkoušeny pomocí standardního tříbodového ohybu. Lisovací přípravek se sestával ze dvou válcových podpor o průměru 10 mm vzdálených od sebe ( $100 \pm 0,5$ ) mm. Na tyto podpory bylo umístěno zkušební těleso kolmo na směr hutnění. Další válec o průměru 10 mm se nacházel v horní části přípravku a fungoval jako válec tlačný. Umístěn byl při horním okraji tělesa umístěný uprostřed mezi spodními podporami. Pro výpočet pevnosti byl použit vztah:

$$R_f = \frac{3 \cdot f_f \cdot l}{2 \cdot a \cdot b^2}$$

kde  $R_f$  - pevnost v tahu za ohybu (MPa)

$f_f$  - zatížení při porušení tělesa (N)

$a, b$  - rozměry tělesa (mm)

$l$  - vzdálenost mezi podporami (mm)

### 3.3.2 Pevnost v tlaku

Zkouška pevnosti v tlaku se prováděla na stejném lisovacím zařízení jako zkouška v tahu ohybem při použití lisovacího přípravku pro zkoušku pevnosti v tlaku. Zlomky těles z ohybové zkoušky byly do přípravku vkládány kolmo na směr hutnění a zatěžovány do porušení. Příslušná pevnost v tlaku se vypočítala dle vzorce:

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

kde  $R_c$  - pevnost v tlaku (MPa)

$f_c$  - zatížení při porušení (N)

$A$  - zatěžovaná plocha (mm<sup>2</sup>)

### 3.3.3 Elektrický odpor trámů

Odpor vzorků byl stanovován metodou impedanční spektroskopie. Pro měření byl použit sinusový generátor signálu Agilent 33220A a dvoukanálový sinusový osciloskop Agilent 54645A. Vstupní napětí sinusového generátoru bylo 5,5 V. Hodnoty elektrické kapacity a odporu osciloskopu byly 13 pF a 1 M $\Omega$ . Tyto přístroje byly sestaveny dle navrženého schématu pro plně automatizované měření. Vzorky byly proměřovány ve frekvenčním spektru 40 Hz až 1 MHz.

### 3.3.4 Elektrický odpor při cyklickém zatěžování

Vzorky byly zatěžovány v hydraulickém lise FORM+TEST Prüfsysteme s rozsahem 0–3000 kN. Lis byl řízený programem Prometheus. Vzorky byly zatěžovány tlakem vodorovně s plochou elektrod (Obr. 3-2). Zatěžování a odtěžování vzorků probíhalo rychlostí 400 N·s<sup>-1</sup> v rozmezí zatěžovací síly 5-50 kN, což odpovídalo přibližně 10 % pevnosti v tlaku vzorků.



Obr. 3-2 Měření elektrického odporu při cyklickém zatěžování

Pro měření elektrického odporu ve střídavém poli byl použit sinusový generátor signálu Agilent 33220A a dva multimetry Agilent 34410A. Tyto přístroje byly sestaveny dle navrženého schématu pro plně automatizované měření. Napětí sinusového generátoru bylo 5 V, elektrický proud byl vypočítán z napětí měřeného na jednom z voltmetrů a z referenčního odporu, který byl 6796  $\Omega$ . Elektrický odpor byl dopočítán pomocí Ohmova zákona.

### **3.4 Výsledky měření**

#### **3.4.1 Mechanické vlastnosti**

Na obrázcích 3-3 až 3-12 jsou zobrazeny grafy pevností v tlaku a v tahu za ohybu směsí s vodivými plnivými v různých koncentracích. Z obrázku 3-3 je zřejmé, že přidání grafitového prášku do směsi zhoršuje pevnost v tlaku. Výrazný pokles lze sledovat u vzorků obsahujících do 4 % grafitu. Pevnost 4% směsi je o 30 % nižší než referenční (57,2 MPa). Při vyšších koncentracích se pevnosti příliš nemění a pohybují se v rozmezí 39,8 MPa a 43,8 MPa. U vzorků nad 15 % grafitu je rovněž patrné výrazné zhoršení tlakových pevností. Směs s 20 % grafitového prášku dosahuje pouhých 30 % pevnosti v tlaku referenčního vzorku. Pevnost v tahu za ohybu (Obr. 3-4) vzorků s koncentrací do 10 % se nijak výrazně nemění a pohybuje se v rozmezí 5,5 až 6,1 MPa, u vyšších množství grafitového prášku je již patrný razantní pokles.

Z obrázku 3-5 a 3-6 je patrné, že přidání sazí výrazně zhoršuje pevnost v tlaku i tahu za ohybu. Jelikož v předchozích výzkumech [27, 29] bylo na vzorcích, kde byl pojivem cement, dokázáno, že saze do koncentrace 4 % zlepšují mechanické vlastnosti, je pravděpodobné, že saze negativně ovlivňují průběh hydratace alkalicky aktivované strusky. Při vyšších koncentracích pak dochází k adsorpci sazí na povrch zrn cementu, což negativně ovlivňuje hydratační proces. Již nejnižší 2% množství sazí mělo za následek snížení

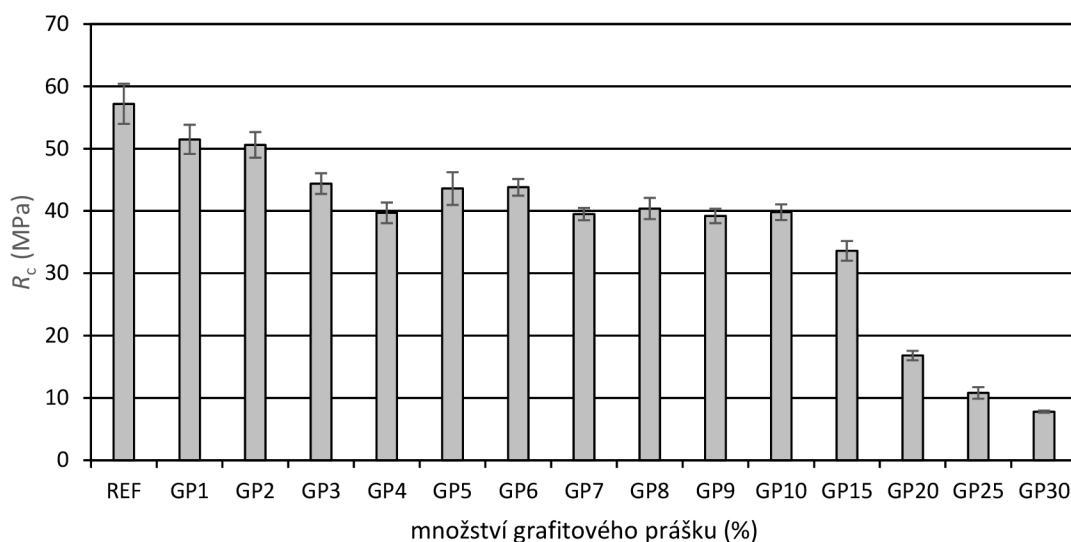
pevnosti v tlaku na 30,3 MPa, což je pouhých 53 % pevnosti reference, a pevnosti v tahu za ohybu na 2,1 MPa (37 % hodnoty reference).

Ke zhoršení pevností v tlaku (Obr. 3-7) při zvyšujícím se obsahu funkčního plniva došlo i u vzorků s uhlíkovými vlákny. Přidáním Tritonu X-100 (směs CF1T) došlo k lepšímu rozmíchání vláken, což se projevilo na lepší pevnosti v tlaku, která se zvýšila o 5,9 MPa oproti směsi bez Tritonu na hodnotu 41,4 MPa. Pevnost v tahu za ohybu (Obr. 3-8) se s vyšší koncentrací snižovala jen nepatrně a pohybovala se mezi hodnotami 3,8 MPa směsi s 3 % vláken a 4,5 MPa směsi s 0,5 % vláken. K výraznému poklesu došlo jen u směsi obsahující 4 % uhlíkových vláken (0,7 MPa).

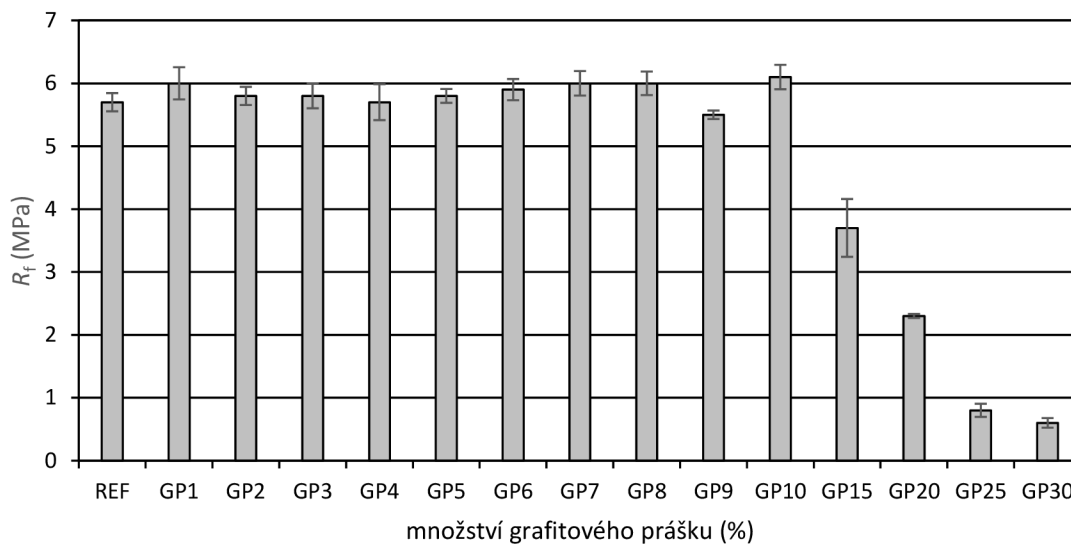
Se zvyšujícím se množstvím drátků ve směsích došlo k nápadnému zvýšení pevnosti v tlaku (Obr. 3-9) a mírnému zlepšení pevnosti v tahu za ohybu (Obr. 3-10). Vzorky s koncentrací vyšší než 9 % měly lepší pevnost v tlaku než směs referenční a dosáhly hodnot 62,4 MPa (vzorky s 9 % drátků) až 68,7 MPa (směs s 15 %). Pevnost v tahu za ohybu se s vyšší koncentrací zvyšovala jen nepatrně a pohybovala se v rozmezí 4,2 - 5,0 MPa. Nejnižší pevnosti měla směs s 2 % drátků a to 40,6 MPa v tlaku a 4,2 MPa v tahu za ohybu. Anomálie jsou způsobeny špatnou homogenizací ocelových vláken ve vzorcích, o čemž svědčí i výraznější směrodatné odchytky.

U vzorků obsahujících uhlíkové nanotrubičky došlo ke zvýšení pevnosti v tlaku (Obr. 3-11) oproti referenční směsi. Vzorky s koncentrací 0,1 % měly pevnost vyšší o 20,5 MPa, což je nárůst o 36 %. Při zvýšení koncentrace CNT došlo ke snížení pevnosti v tlaku, ovšem stále byla o 11 MPa vyšší než vzorků bez vodivého plniva. Stejná tendence se projevila i u pevnosti v tahu za ohybu (Obr. 3-12). Vzorky s CNT dosáhly vyšších hodnot než směs referenční, ovšem zvýšení koncentrace mělo za následek snížení pevnosti. Směs s 0,1 % měla pevnost v tahu za ohybu 7,0 MPa a vzorky s 0,4% koncentrací 6,7 MPa.

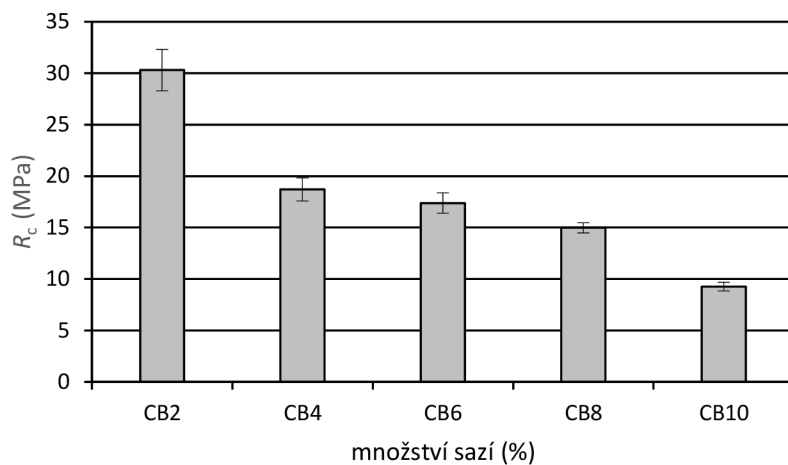
Na základě provedeného měření je zřejmé, že přidání vodivého plniva negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaných kompozitů. Výjimku tvoří přidavek drátků a nízkých koncentrací uhlíkových nanotrubiček. Velmi nízkých pevností dosáhly především směsi se sazemi.



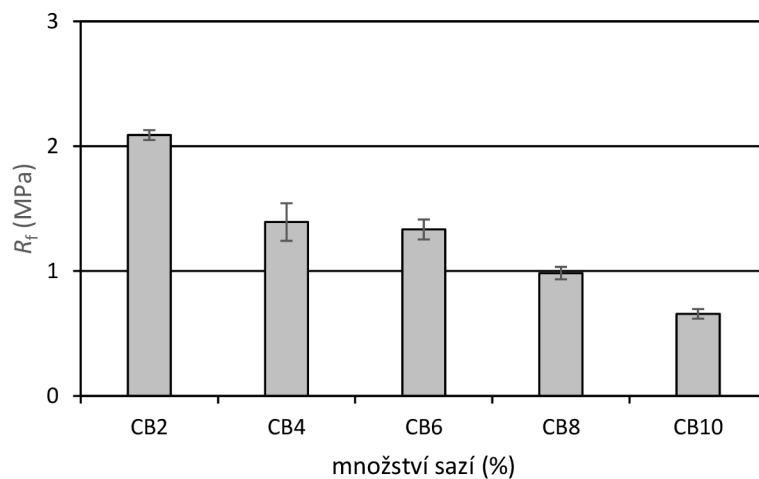
Obr. 3-3 Pevnosti v tlaku směsí s grafitovým práškem



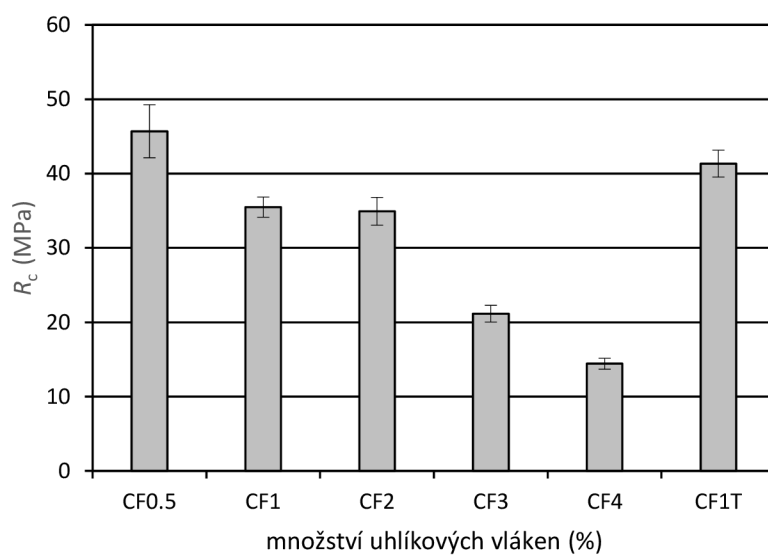
Obr. 3-4 Pevnosti v tahu za ohybu směsí s grafitovým práškem



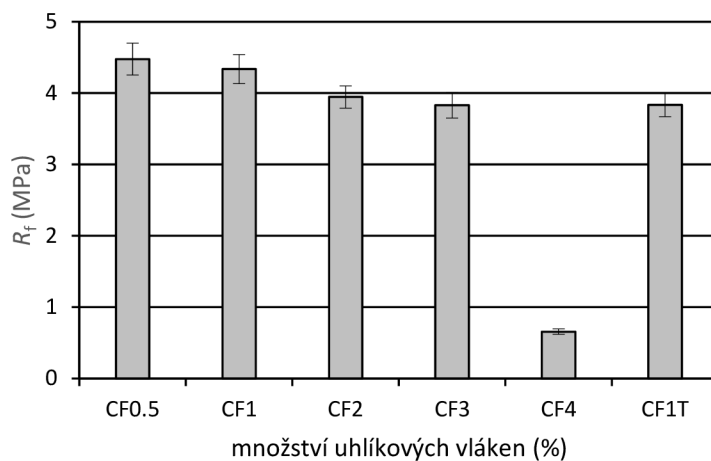
Obr. 3-5 Pevnosti v tlaku směsí se sazími



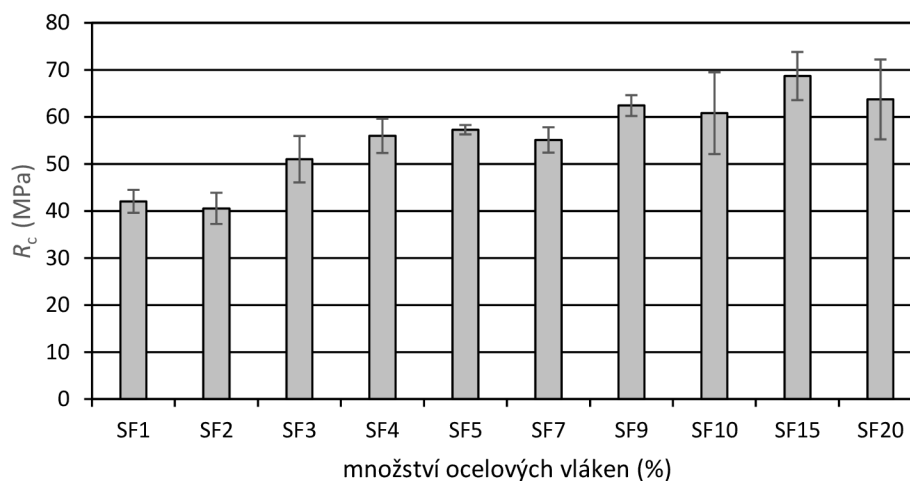
Obr. 3-6 Pevnosti v tahu za ohybu směsí se sazími



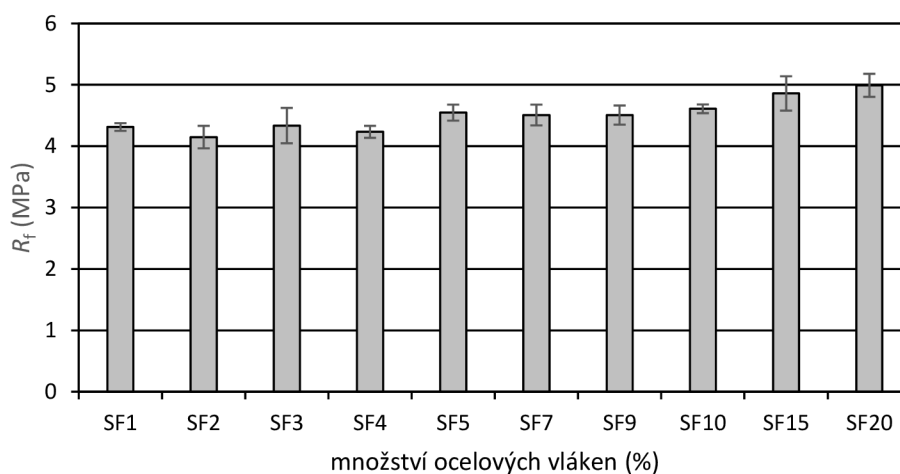
Obr. 3-7 Pevnosti v tlaku směsí s uhlíkovými vlákny



Obr. 3-8 Pevnosti v tahu za ohybu směsí s uhlíkovými vlákny

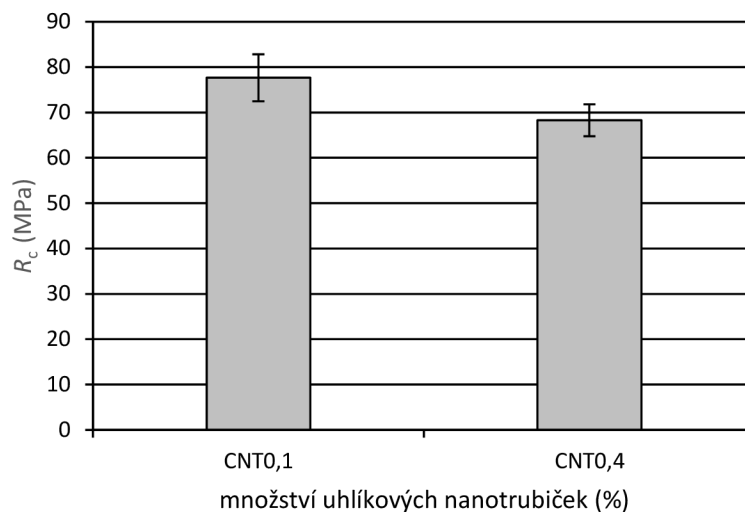


Obr. 3-9 Pevnosti v tlaku směsí s drátky

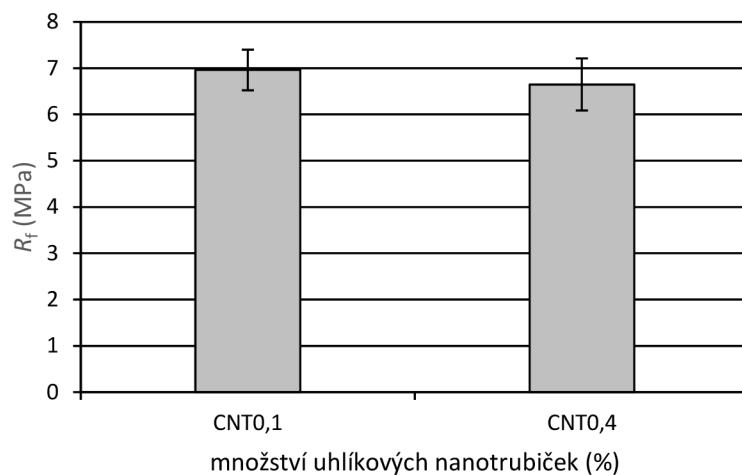


Obr. 3-10 Pevnosti v tahu za ohybu směsí s drátky





Obr. 3-11 Pevnosti v tlaku směsí s uhlíkovými nanotrubičkami



Obr. 3-12 Pevnosti v tahu za ohybu směsí s uhlíkovými nanotrubičkami

### 3.4.2 Elektrický odpor

Na obrázcích 3-13 až 3-17 je zobrazena závislost elektrického odporu na frekvenci pro směsi s různými množství funkčního plniva. Měření probíhalo metodou impedanční spektroskopie. Pro lepší přehlednost bylo v grafech použito logaritmické měřítko.

Elektrický odpor všech těles se s zvyšující frekvencí snižoval. U jednoho z referenčních vzorků došlo v rozmezí 400–1000 Hz k nárůstu odporu. U jiných

těles došlo při frekvenci 1000 Hz k prudkému poklesu odporu, ačkoli při nižších frekvencích byl pokles pouze pozvolný.

Na obrázku 3-15, který znázorňuje závislost elektrického odporu na frekvenci vzorků s uhlíkovými vlákny, můžeme vidět, že se přidání detergentu projevilo výrazným snížením elektrického odporu oproti vzorku se stejným množstvím vláken ovšem bez Tritonu. Z toho důvodu a rovněž příznivého vlivu na mechanické vlastnosti se začal při dalších mícháních Triton přidávat do všech směsí s uhlíkovými vlákny.

Elektrický odpor referenčních směsí byl vyšší než u vzorků s vodivými plnivý zejména při nižších frekvencích. Výjimku tvoří směsi s drátky, u kterých pouze směs s 15 % drátků měla nižší odpor než směs referenční.

Z důvodu změn průběhů odporů při frekvenci 1 kHz byla tato zvolena jako referenční. Závislost elektrického odporu na množství plniva při frekvenci 1 kHz je znázorněna na obrázcích 3-18 až 3-22.

Na grafu 3-18 má největší odpor směs bez obsahu vodivé příměsi a to  $2,48 \cdot 10^6 \Omega$ . Vzorek s 1 % grafitu měl odpor  $1,48 \cdot 10^6 \Omega$ , což je o 40 % méně oproti referenční směsi. Nejnižší elektrický odpor při této frekvenci měla směs 10%. Hodnota  $3,74 \cdot 10^5 \Omega$  dosahuje pouze 15 % odporu referenční směsi.

Graf závislosti elektrického odporu na množství sazí při 1 kHz je na obrázku 3-19. Se zvyšujícím se množstvím plniva odpor klesá. Největší rozdíl je mezi referenční směsí ( $1,27 \cdot 10^7 \Omega$ ) a směsí s 2 % sazí ( $3,94 \cdot 10^6 \Omega$ ), jedná se o téměř 70% snížení. Při vyšších koncentracích se elektrický odpor snižoval již pozvolněji. Směs s 6 % sazí měla odpor  $1,67 \cdot 10^6 \Omega$  a nejnižší hodnoty dosáhla směs s koncentrací 10 % a to  $1,50 \cdot 10^6 \Omega$ .

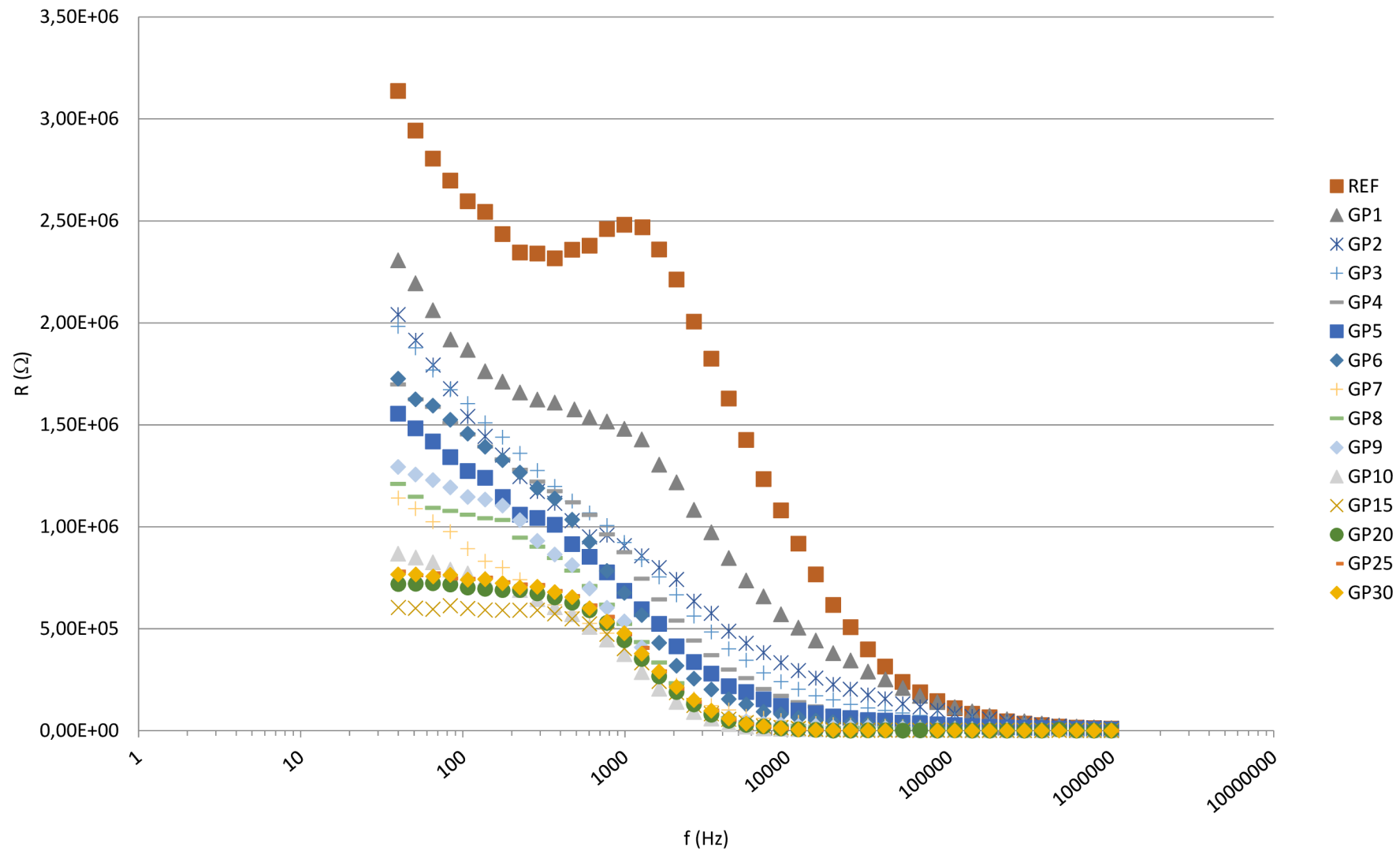
Na obrázku 3-20 je znázorněna závislost elektrického odporu na množství uhlíkových vláken. I v tomto případě bylo dosaženo výrazného snížení odporu (o 58 %) již přidáním nejnižší koncentrace, což bylo 0,5 %. Na grafu je rovněž

patrný vliv rozmíchání uhlíkových vláken v Tritonu. 1% směs s Tritonem dosáhla odporu jako směs s obsahem 3 %. Je tedy zřejmé, že Triton má příznivý vliv na rozmíchání uhlíkových vláken.

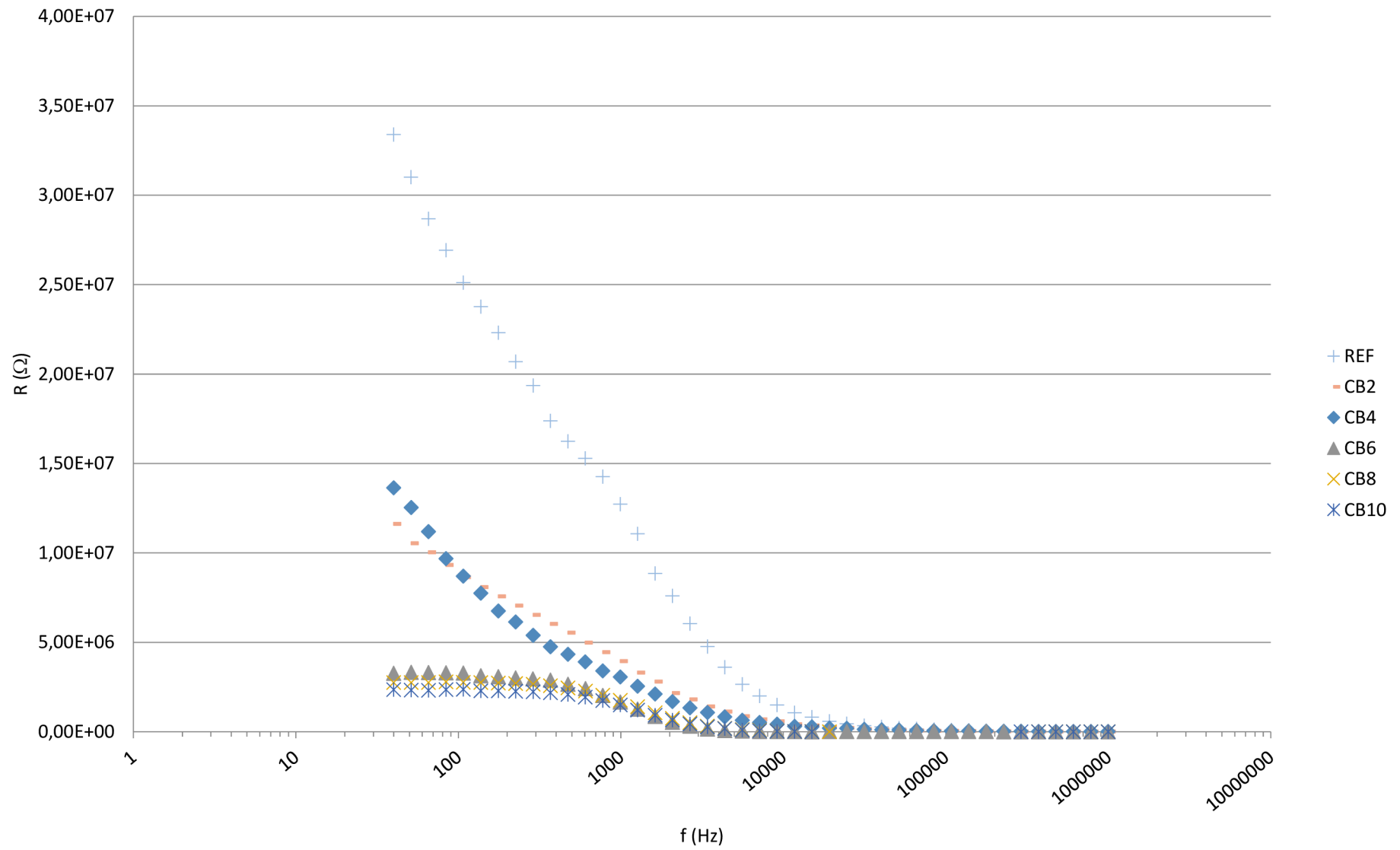
Změna elektrického odporu na množství drátků je na obrázku 3-21. Směsi do 10 % ocelových vláken mají vyšší odpor než směs referenční. Kolísání je způsobeno špatnou homogenizací vodivého plniva ve směsi. Vzorek s 4 % drátků měl stejný odpor ( $1,64 \cdot 10^7 \Omega$ ) jako směs s 1 %. Nejnižší odpor měla směs s koncentrací 15 % ( $1,04 \cdot 10^7 \Omega$ ), což je ovšem snížení oproti referenčnímu vzorku o 16 %.

Průběh závislosti odporu na množství CNT je na obrázku 3-22. Se zvyšujícím se množstvím plniva elektrický odpor klesá. Do obsahu 1 % pouze mírně (pokles o 29 %), poté již výrazně. Směs s 1 % měla odpor  $1,23 \cdot 10^7 \Omega$  a s 1,5 %  $6,19 \cdot 10^6 \Omega$ , což je rozdíl o 35 %. Nejnižšího odporu dosáhla směs s nejvyšší koncentrací 2,5 % ( $2,29 \cdot 10^6 \Omega$ ).

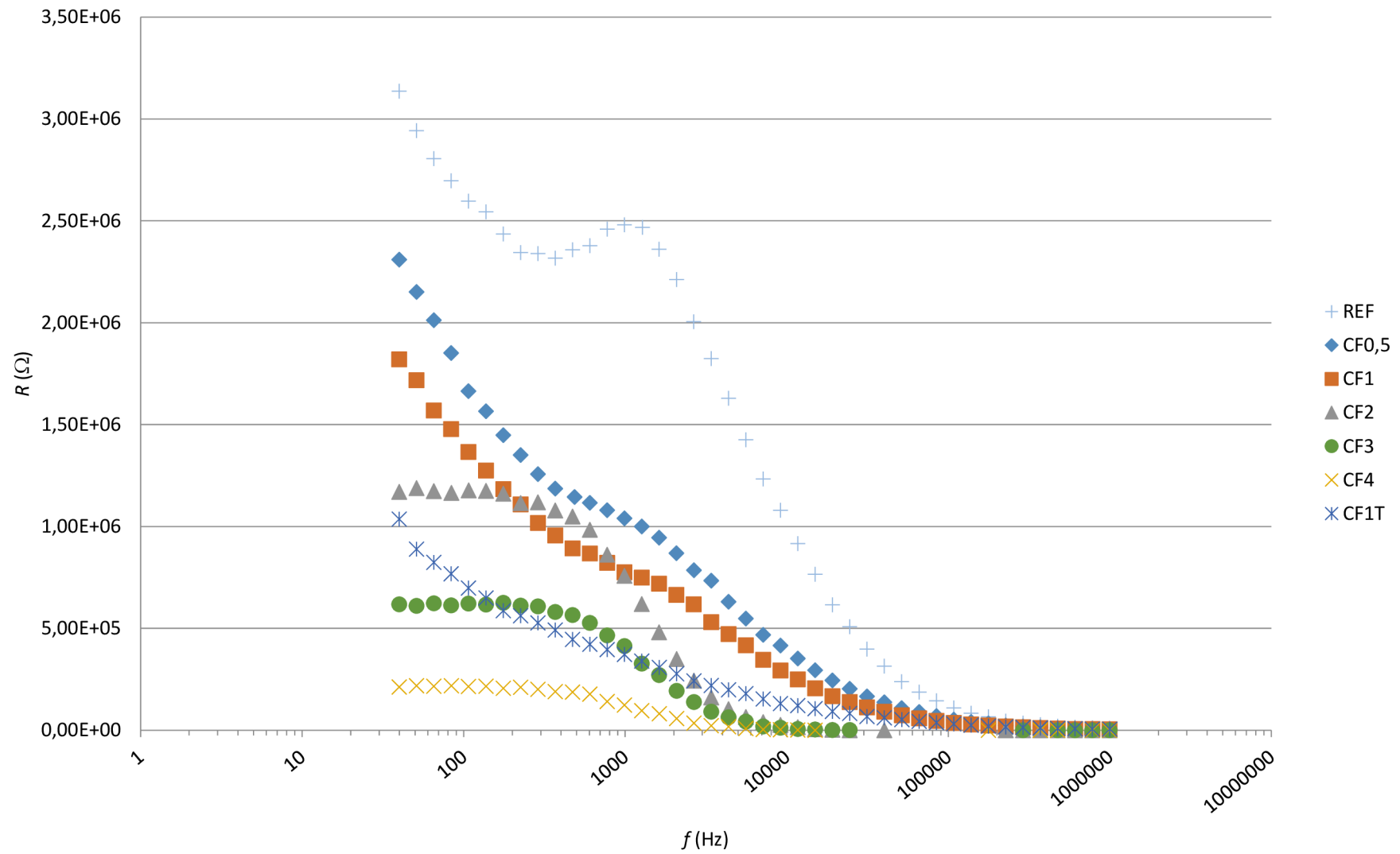
Je tedy zřejmé, že při zvolené frekvenci 1 kHz se elektrický odpor s vyšším množstvím vodivého plniva snižuje. Naměřené hodnoty jsou výrazně ovlivněny homogenizací funkčních plniv ve směsi, která je problematická zejména u vláknitých plniv. U uhlíkových vláken se příznivě projevilo přidání detergentu, ovšem i přesto byly na vzorku pozorovatelné shluky vláken. U ocelových vláken je problémem nejspíše hutnění malty na vibračním stolku, při kterém dojde k propadu drátků do spodní části vzorků.



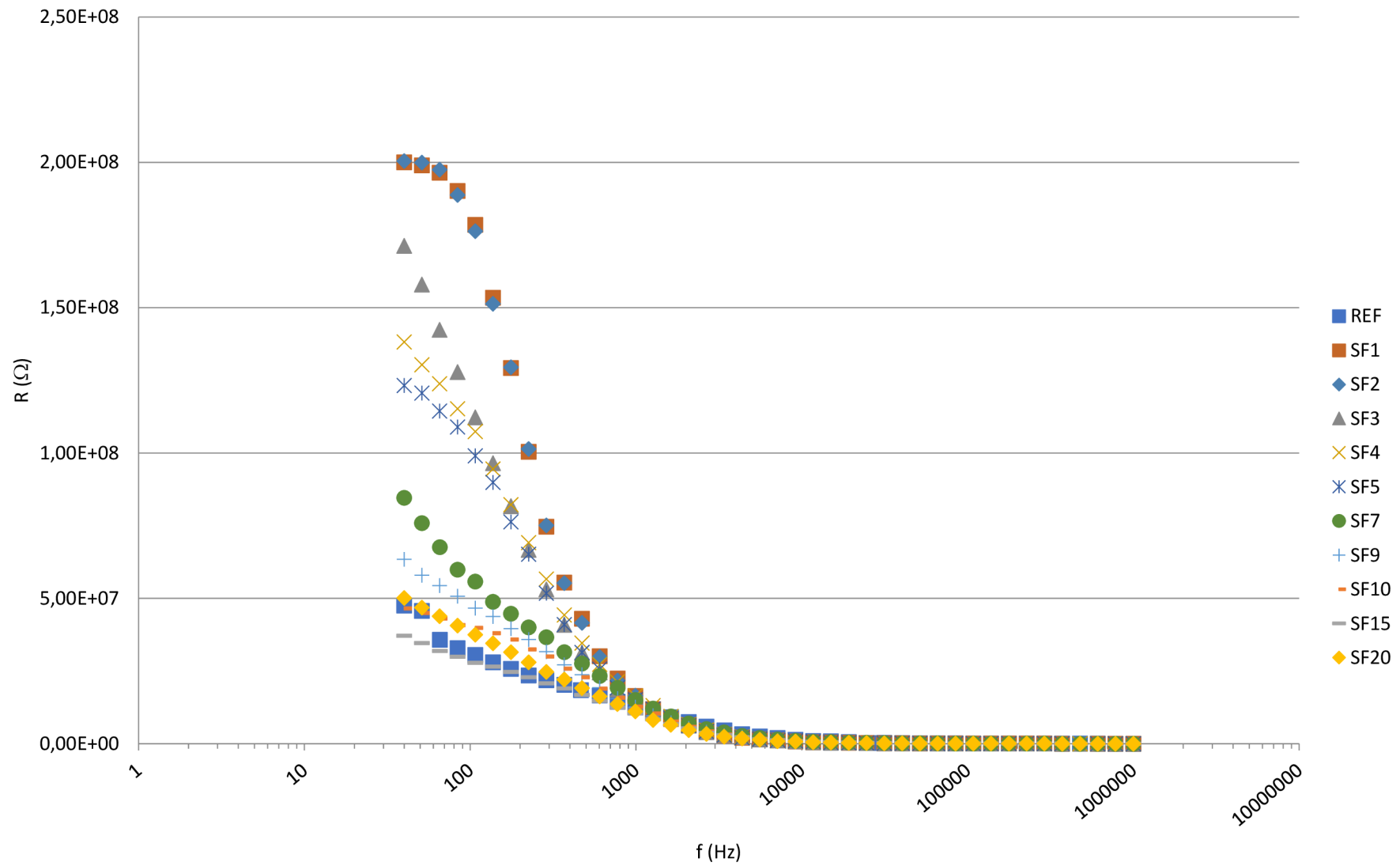
Obr. 3-13 Závislost odporu na frekvenci u směsí s grafitovým práškem



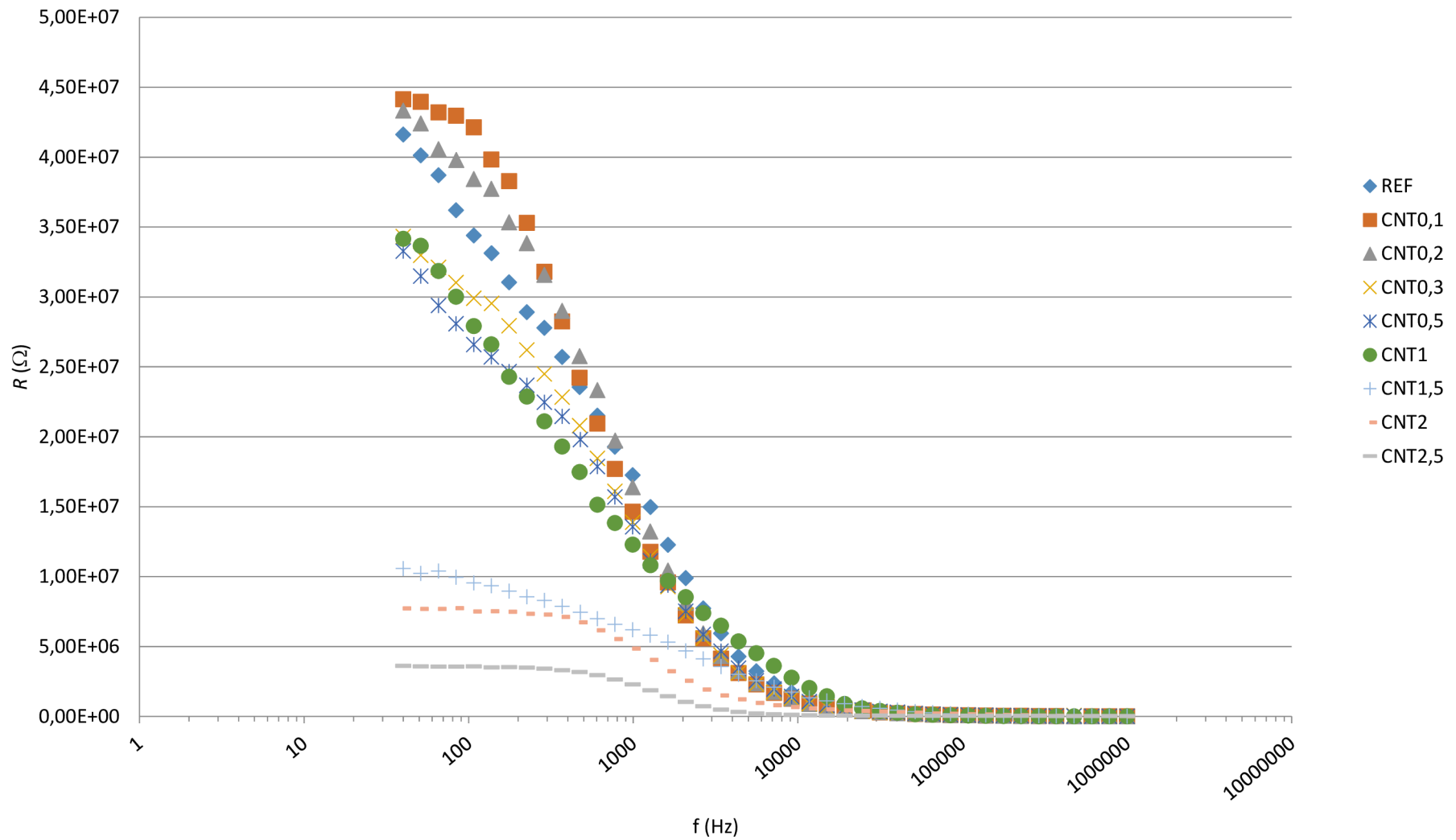
Obr. 3-14 Závislost odporu na frekvenci u směsí se sazemí



Obr. 3-15 Závislost odporu na frekvenci u směsí s uhlíkovými vlákny

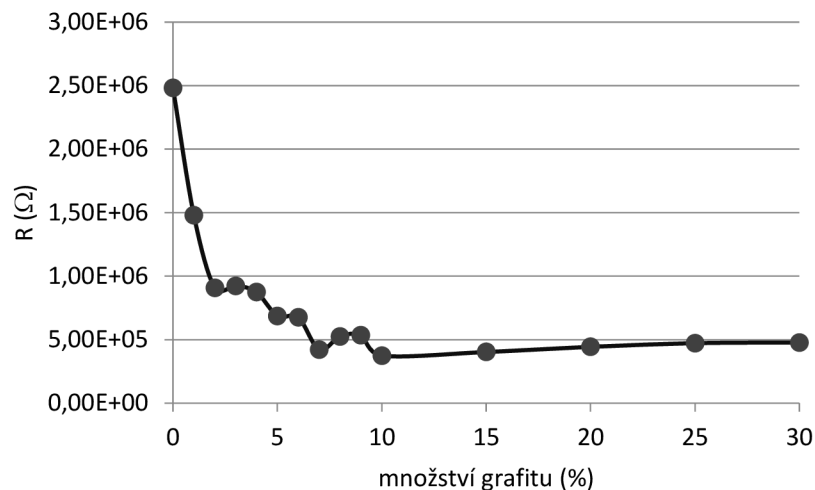


Obr. 3-16 Závislost odporu na frekvenci u směsí s ocelovými vlákny

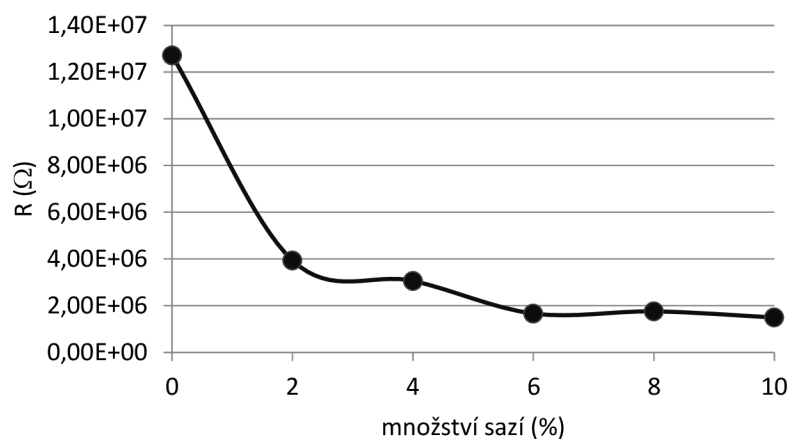


Obr. 3-17 Závislost odporu na frekvenci u směsí s uhlíkovými nanotrubičkami

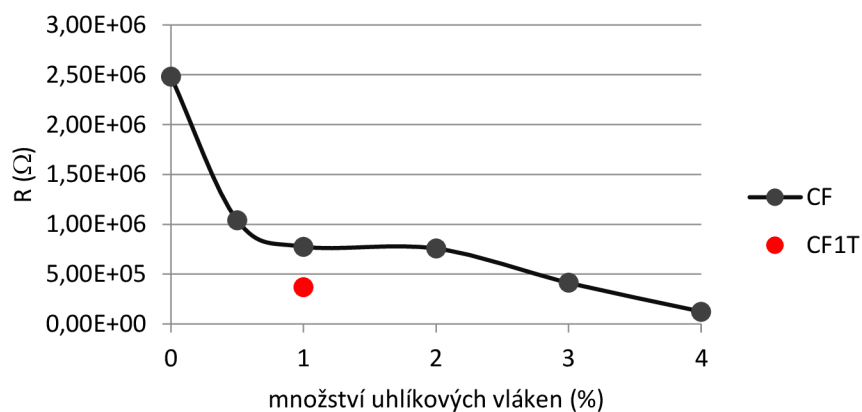




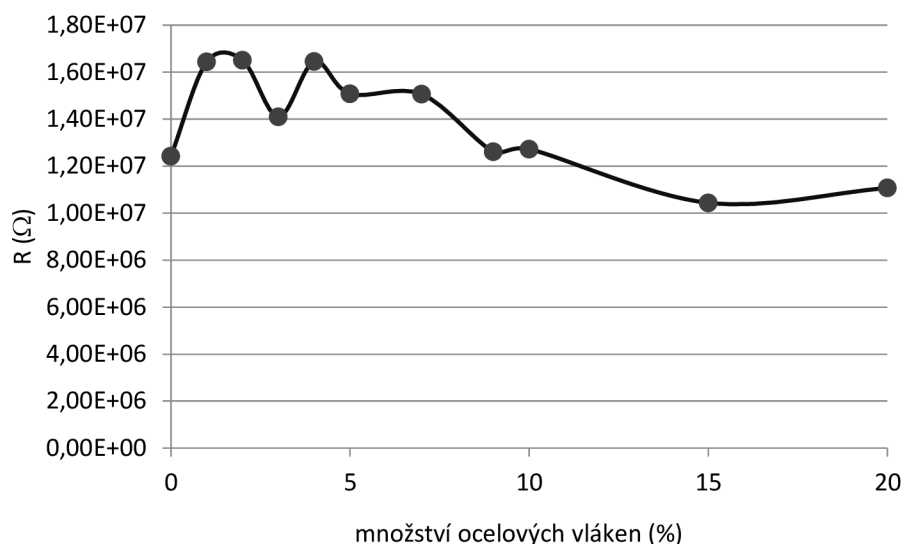
Obr. 3-18 Závislost elektrického odporu na množství grafitu při frekvenci 1 kHz



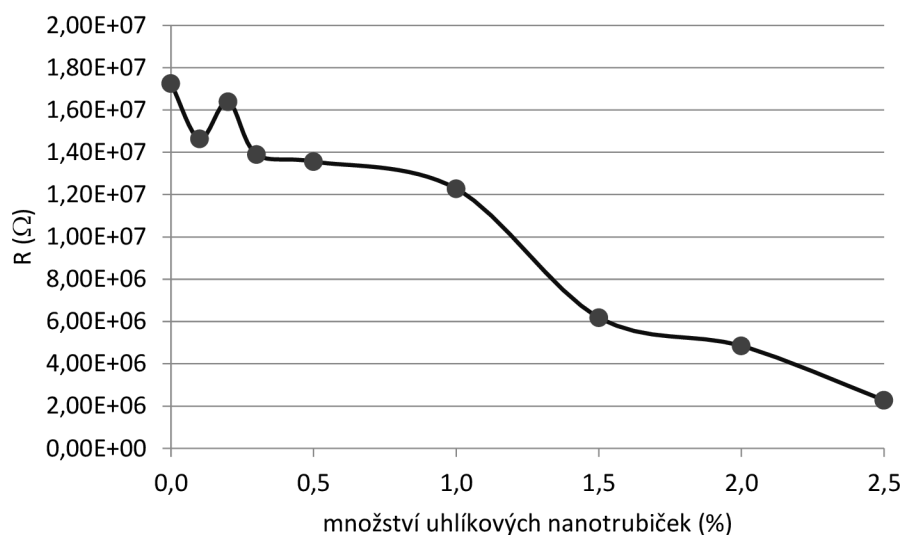
Obr. 3-19 Závislost elektrického odporu na množství sazí při frekvenci 1 kHz



Obr. 3-20 Závislost elektrického odporu na množství uhlíkových vláken při frekvenci 1 kHz



Obr. 3-21 Závislost elektrického odporu na množství ocelových vláken při frekvenci 1 kHz



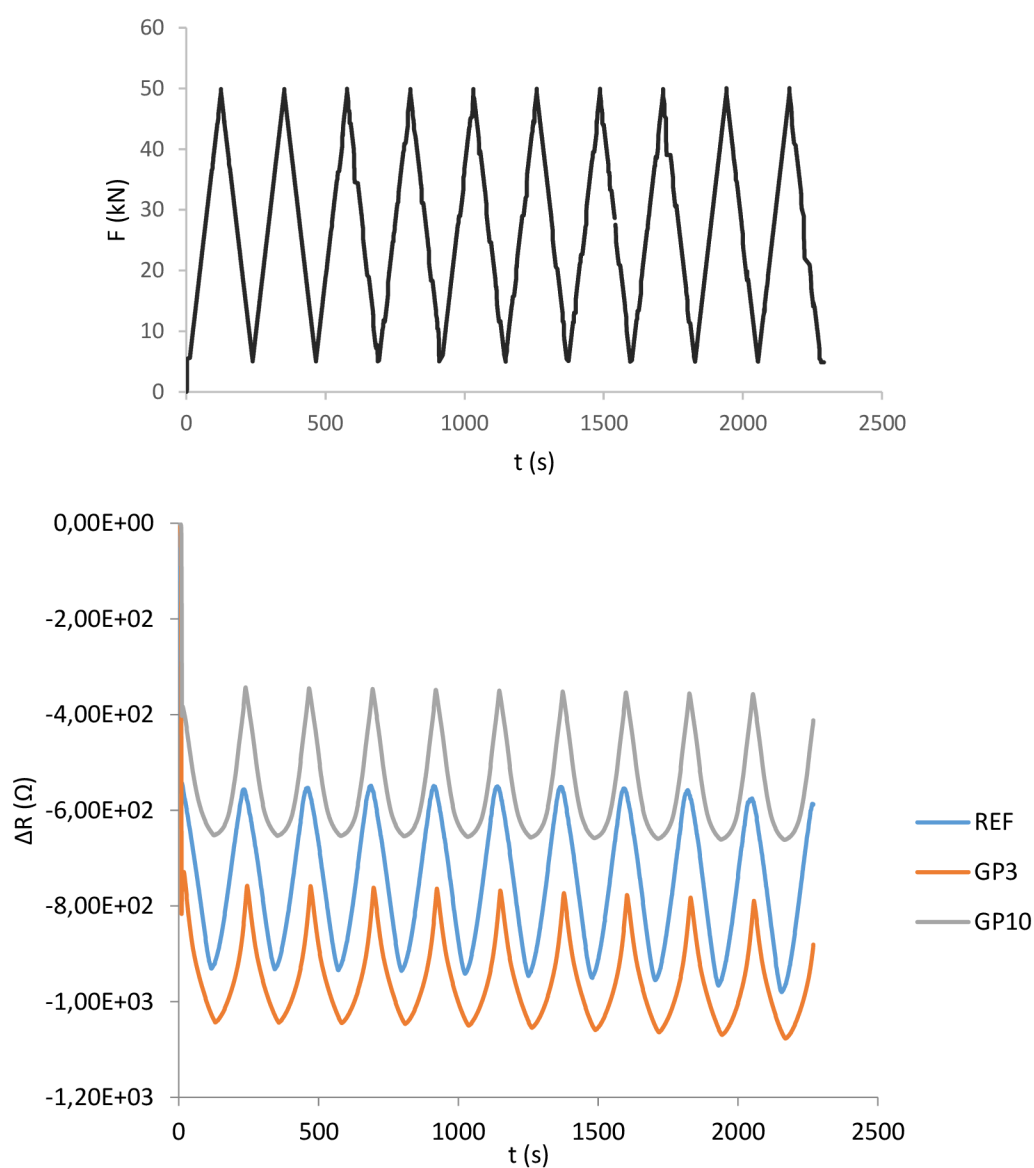
Obr. 3-22 Závislost elektrického odporu na množství uhlíkových nanotrubiček při frekvenci 1 kHz

### 3.4.3 Změna elektrického odporu při cyklickém zatěžování

Následující grafy znázorňují průběh změny elektrického odporu během cyklického zatěžování při frekvenci 1 kHz. Všechny vzorky na cyklické zatěžování reagovaly cyklickou změnou elektrického odporu. Se zvyšujícím se zatížením došlo ke snížení odporu a naopak. To je způsobeno přiblížením,

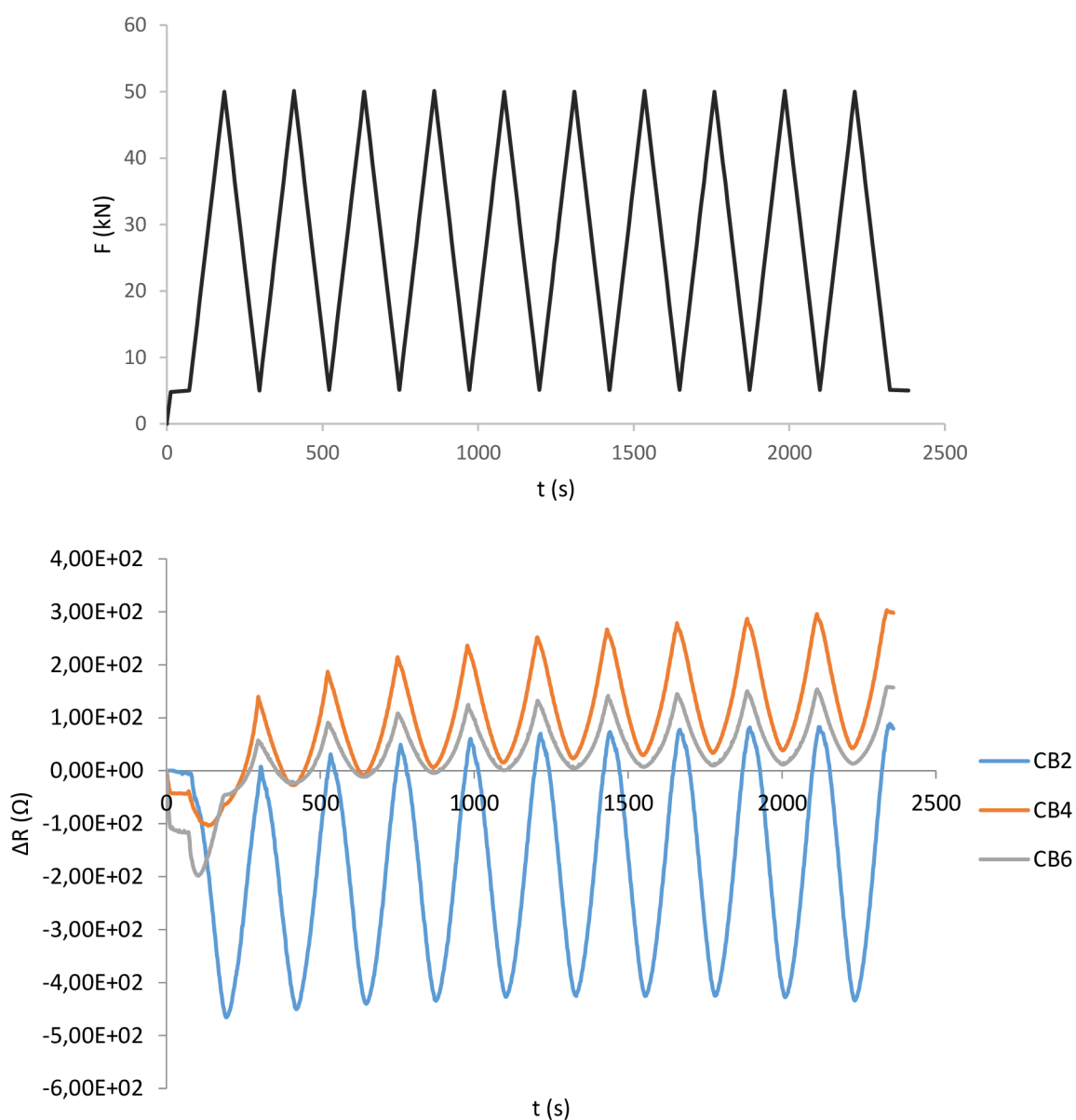
resp. oddalováním částic vodivého plniva, čímž je ovlivňována vodivá síť. Změna vnitřní struktury rovněž umožňuje vedení tunelovým jevem.

Z grafu 3-23 je patrné, že největší rozdíl změny elektrického odporu při zatěžování má referenční směs (416  $\Omega$ ). Směsi s obsahem grafitového prášku vykazují nejen nižší změnu odporu (256  $\Omega$  u směsi s 3 % grafitu a 295  $\Omega$  u vzorku s 10 % plniva), ale rovněž mají neostrá lokální minima při maximálním zatížení. Přidání grafitového prášku do alkalicky aktivované strusky tedy sníží její elektrický odpor, ovšem nevede ke zlepšení sensorických vlastností.



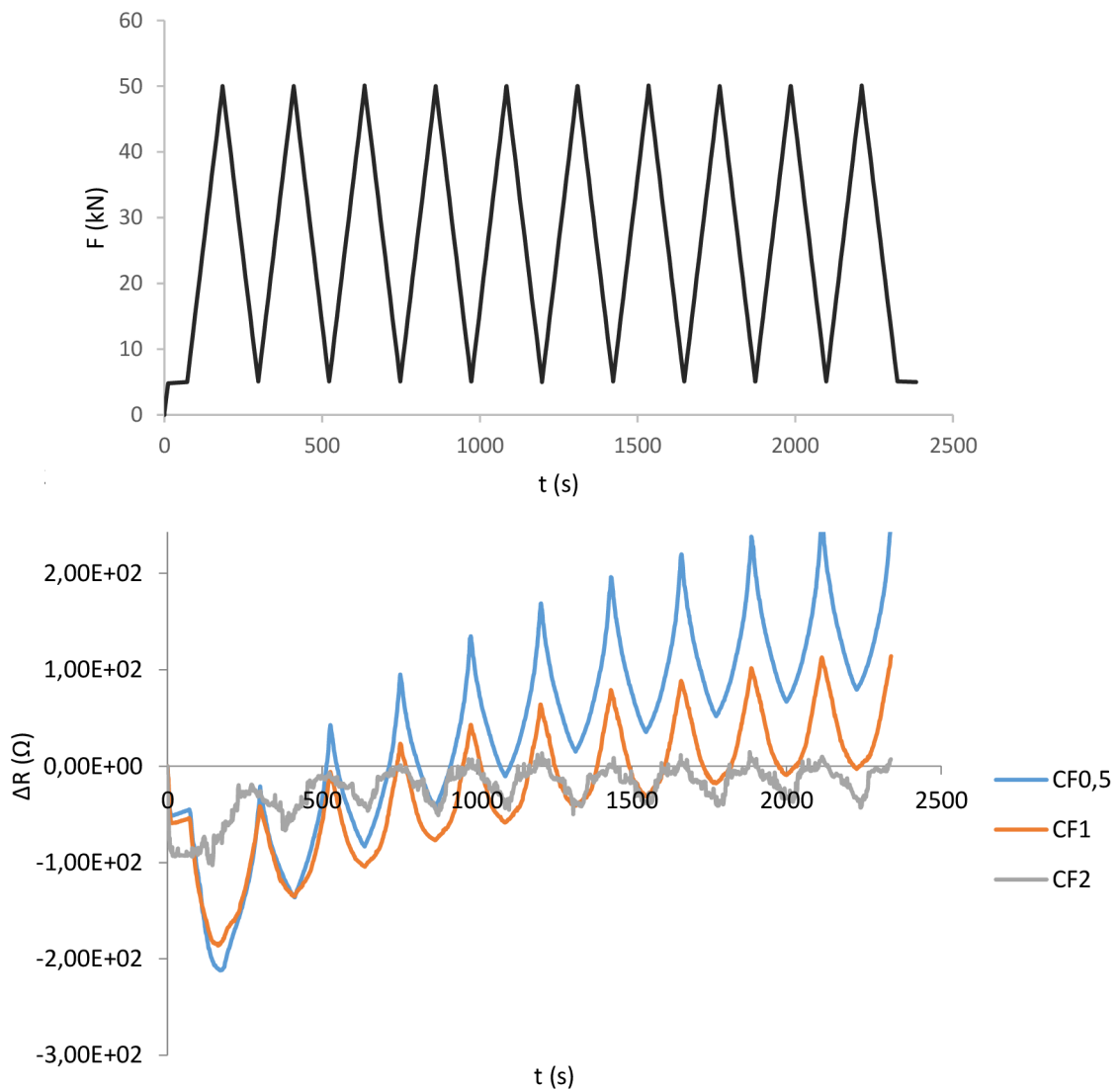
Obr. 3-23 Změna elektrického odporu při cyklickém zatěžování směsí s grafitovým práškem

Na obrázku 3-24 je patrný nárůst změny odporu v čase především u vzorků obsahujících 4 a 6 % sazí, což je nejspíše způsobeno poškozením vnitřní struktury a ovlivněním vodivé sítě nebo polarizací elektrod. Vzorek s 2 % sazí vykazuje výraznou změnu elektrického odporu při cyklickém zatížení až  $464 \Omega$ . S vyšším obsahem vodivého plniva dochází k nápadně nižším změnám odporu a podobně jako u vzorků s grafitovým práškem jsou pozorovatelná neostrá lokální minima.



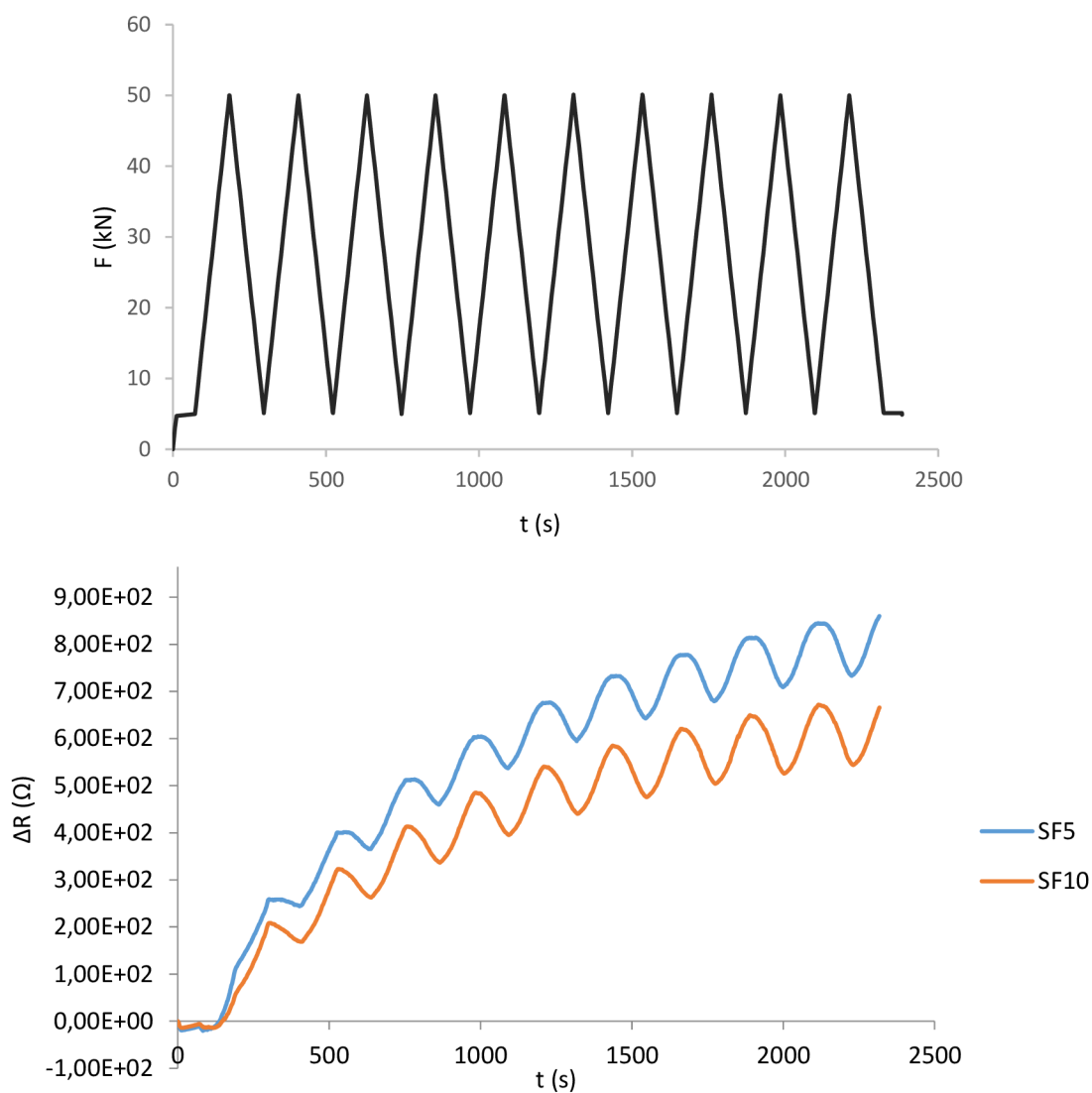
Obr. 3-24 Změna elektrického odporu při cyklickém zatěžování směsí se sazí

Při měření změn elektrického odporu vzorků s uhlíkovými vlákny (Obr. 3-25) během cyklického zatěžování při frekvenci 1 kHz je rovněž patrný nárůst odporu v čase. Největší změnu elektrického odporu vykázal vzorek s nejmenším množstvím uhlíkových vláken (až 176  $\Omega$  při změně o 45 kN). Křivka směsi s 2 % plniva není plynulá, vyskytují se různé odchylky a rovněž lokální minima i maxima jsou neostrá. S vyšším množstvím vodivého plniva dochází ke zhoršení sensorických vlastností.



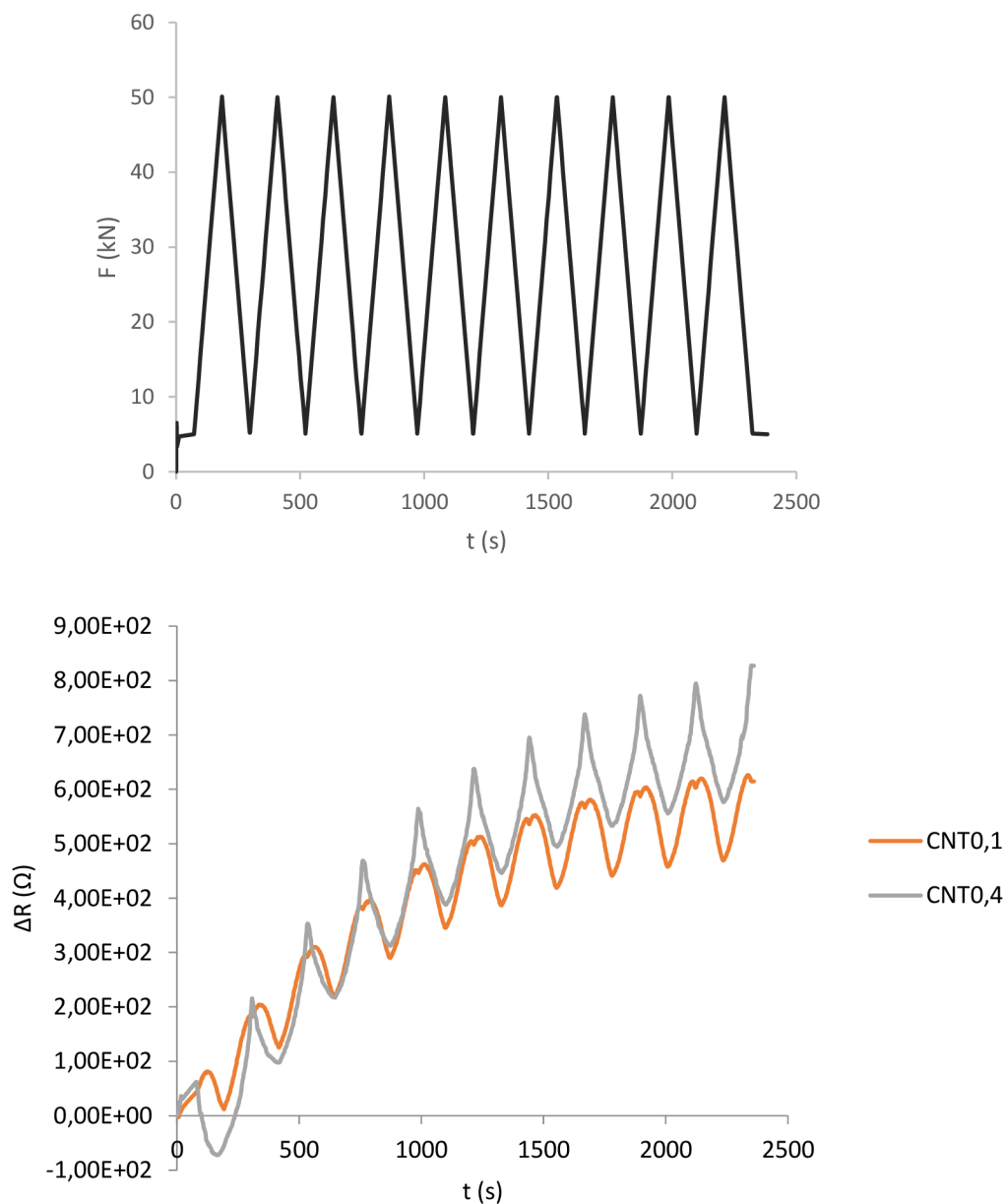
Obr. 3-25 Změna elektrického odporu při cyklickém zatěžování směsi s uhlíkovými vlákny

U vzorků s ocelovými vlákny (Obr. 3-26) dochází při měření ve frekvenci 1 kHz k výraznému růstu změny elektrického odporu v čase, způsobené polarizací elektrod nebo změnou vnitřní struktury. Změna odporu se při cyklickém zatěžování mění jen nepatrně, o 87  $\Omega$  u směsi s 5 % drátků, resp. o 95  $\Omega$  u vzorku s 10 % plniva. Lokální maxima i minima jsou neostrá.



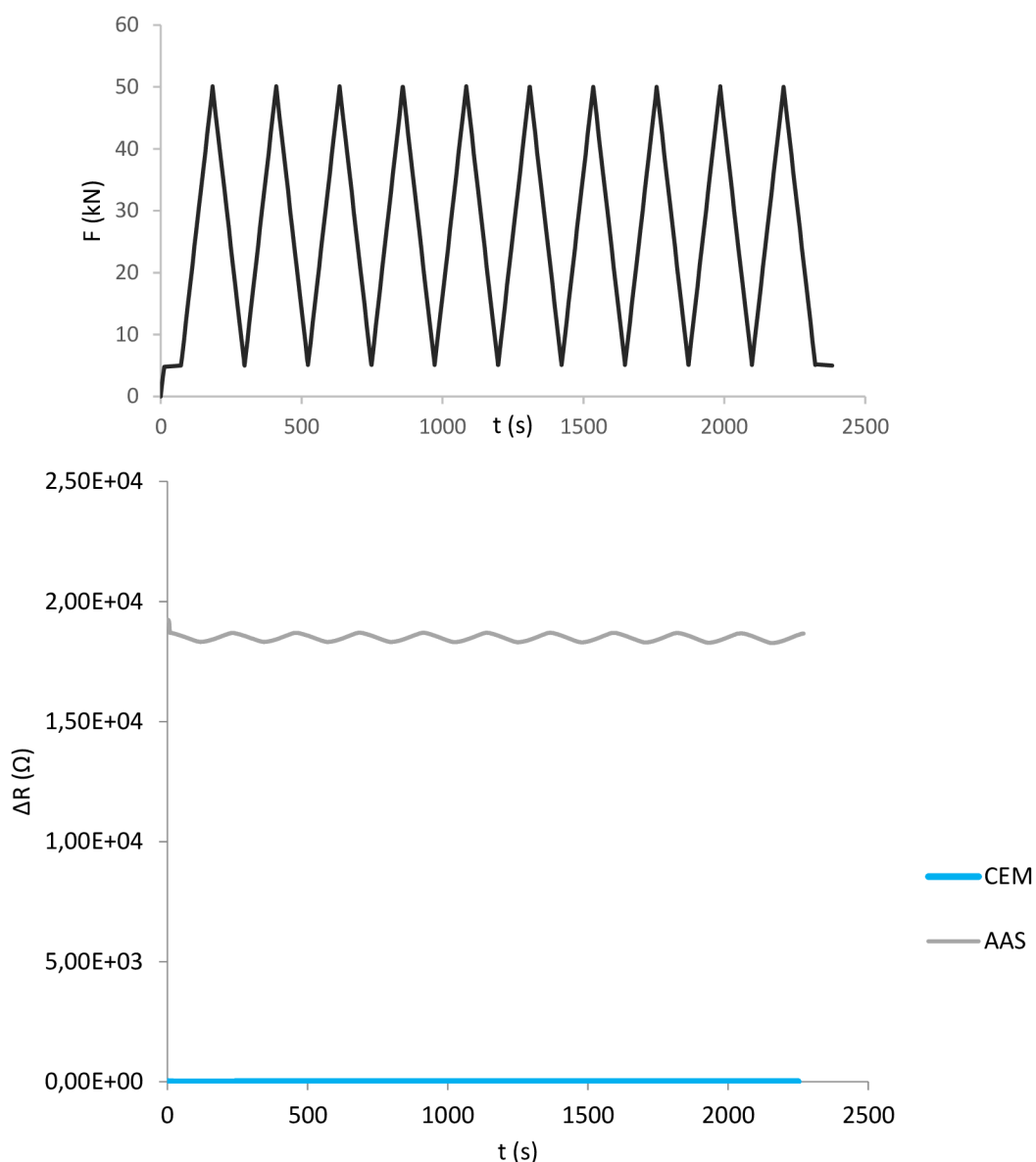
Obr. 3-26 Změna elektrického odporu při cyklickém zatěžování směsí s ocelovými drátky

U vzorků s uhlíkovými nanotrubičkami během měření taktěž docházelo k výraznému nárůstu změny elektrického odporu v čase. Vzorek obsahující 0,1 % CNT má poměrně neostrá lokální maxima a minima, změna elektrického odporu byla pouze 126  $\Omega$ . U vzorku s 0,4 % jsou maxima a minima výraznější, a i změna elektrického odporu je větší (190  $\Omega$ ).



Obr. 3-27 Změna elektrického odporu při cyklickém zatěžování směsí s uhlíkovými nanotrubičkami

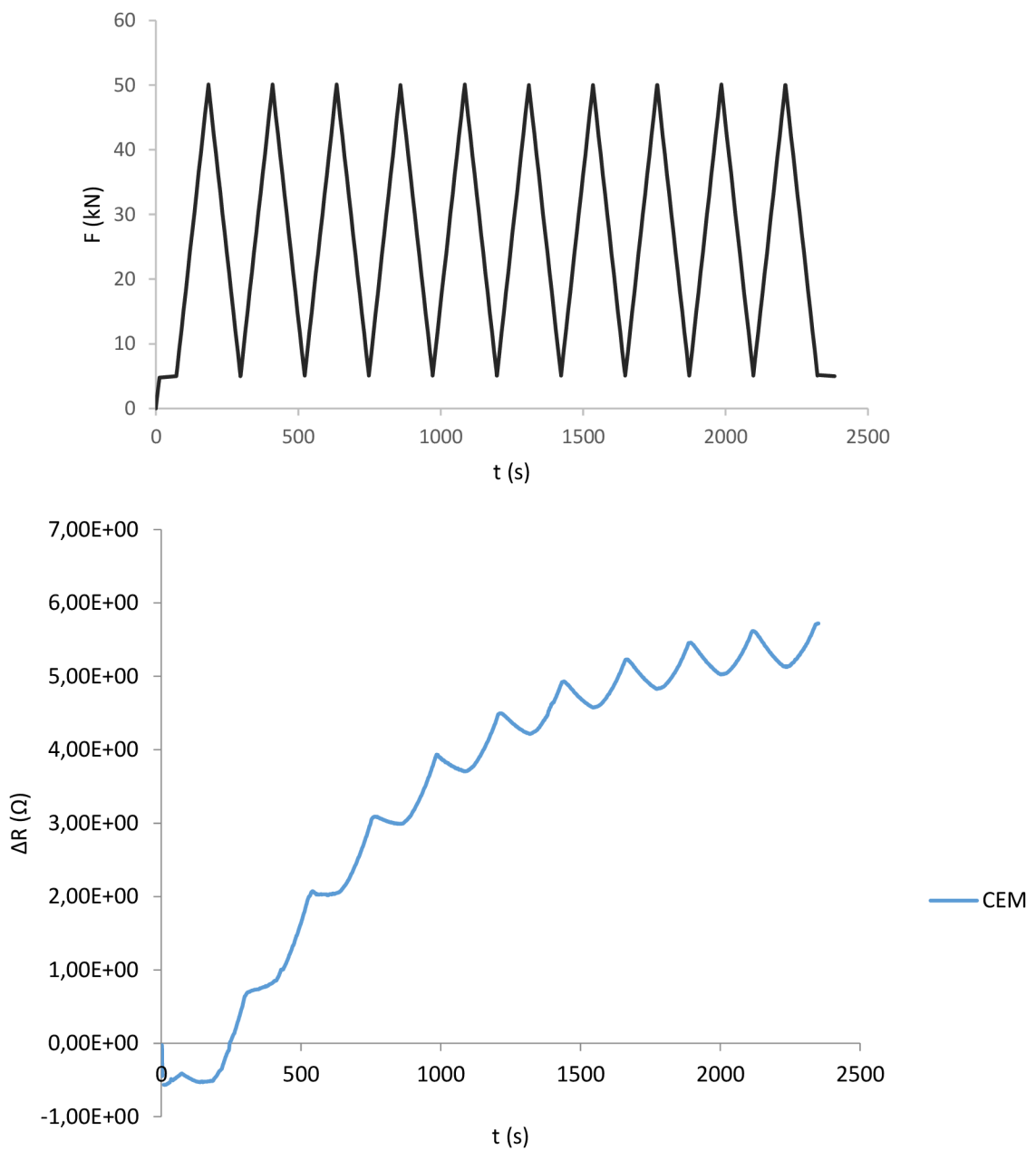
Pro porovnání byla vyrobeno zkušební těleso, kde byl jako pojivo použit cement. Graf zobrazující změnu elektrického odporu při cyklickém zatěžování referenčního vzorku alkalicky aktivované strusky a cementu je na obrázku 3-28. Elektrický odpor cementové směsi i jeho změna při tlakovém zatěžování je oproti vzorku z alkalicky aktivované strusky tak malá, že průběh křivky na tomto grafu není vůbec patrný a je tak zobrazen na samostatném grafu (Obr. 3-29).



Obr. 3-28 Porovnání změny elektrického odporu při cyklickém zatěžování cementové směsi a alkalicky aktivované strusky



I vzorek z cementu reagoval na cyklické zatěžování cyklickou změnou elektrického odporu, přičemž při zvýšení síly následoval pokles odporu a naopak. Reakce na zatížení ovšem není příliš výrazná. Největší dosažená změna elektrického odporu byla  $61 \Omega$  při změně o  $45 \text{ kN}$ . V počátcích měření lze pozorovat nárůst změny odporu v čase způsobený pravděpodobně změnou vnitřní struktury vlivem zatížení.



Obr. 3-29 Změna elektrického odporu při cyklickém zatěžování cementové směsi

### 3.4.4 Zatěžování do porušení

Po měření změny elektrického odporu při cyklickém zatěžování byly vzorky tlakově namáhány až do porušení. Měřena byla síla (červená křivka) a elektrický odpor (modrá křivka). Na grafech 3-30 až 3-43 jsou zobrazeny výsledky měření pro jednotlivá tělesa. Přehled sil potřebných k úplnému porušení tělesa je uveden v tabulce 3-6.

Tabulka 3-6 Zatěžovací síla potřebná k úplnému porušení těles

označení vzorku	síla potřebná k porušení (kN)
REF	633,6
GP3	597,9
GP10	447,1
CB2	400,3
CB4	300,5
CB6	216,6
CF0,5	547,2
CF1	476,3
CF2	295,0
SF5	630,6
SF10	721,8
CNT0,1	571,8
CNT0,4	649,5
CEM	722,2

Výsledky tohoto měření korespondují se závěry zkoušení mechanických vlastností na trácích. Vyšší pevnost oproti referenční směsi vykazaly pouze vzorky obsahující ocelové drátky a vzorek s cementem. Nejnižších pevností dosáhly vzorky se saze. U směsí obsahujících grafitový prášek, saze a uhlíková vlákna došlo se zvyšujícím se množstvím plniva ke zhoršení pevnosti v tlaku.

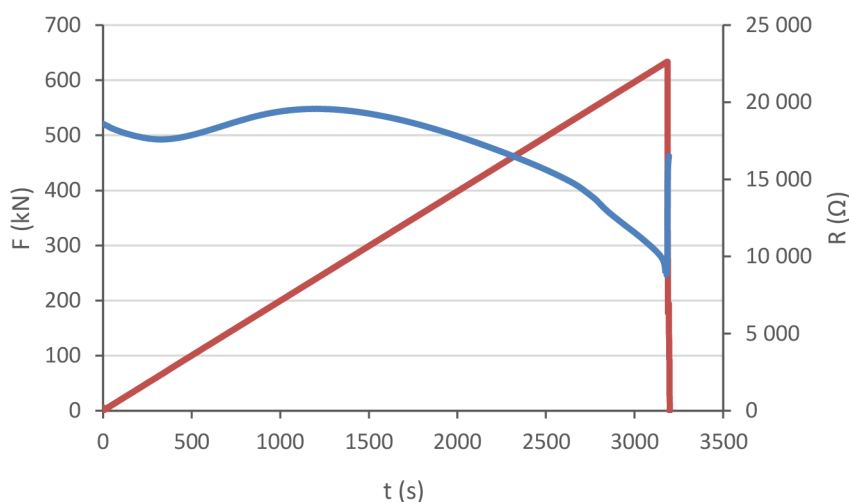
U směsí se saze, 5 % drátků a referenční (Obr. 30, 33 až 35, 39) lze pozorovat prudký pokles elektrického odporu cca 500 sekund před porušením vzorků, u směsí s CNT (Obr. 41, 42) dokonce 1 000 s. Tato vlastnost je prospěšná

při monitorování stavu budov, neboť dochází k nápadným změnám před výraznou destrukcí.

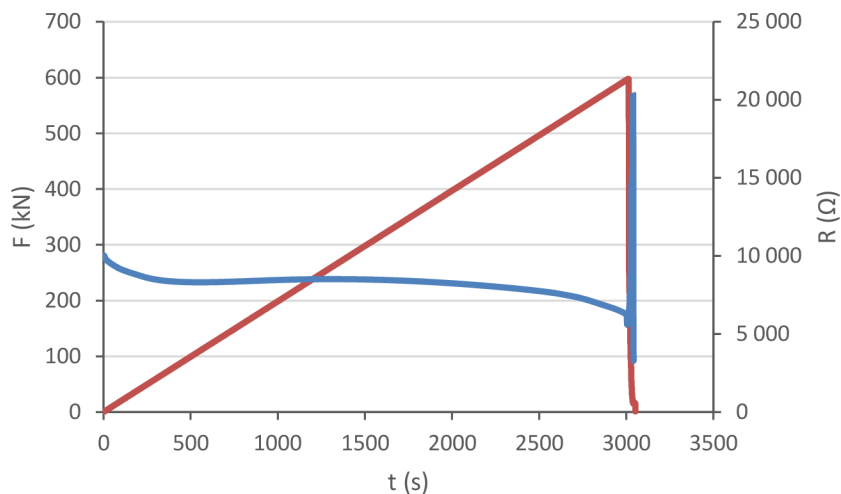
Na křivce referenčního vzorku (Obr. 30) můžeme pozorovat zpočátku snížení elektrického odporu, po dosažení lokálního minima (60 kN) následuje nárůst odporu až po hodnotu 240 kN a poté klesá až do bodu porušení. Podobný průběh křivky mají i vzorky se sazemi a uhlíkovými nanotrubičkami (Obr. 33-35, 41, 42). Nárůst elektrického odporu je pravděpodobně způsoben vznikem mikrotrhlin a částečným narušením vodivé sítě. Při dalším konstantním zatěžování dochází k přiblížení částic a obnovení vodivé sítě, což se projeví snížením elektrického odporu až do porušení.

U vzorků obsahující uhlíková vlákna (Obr. 36 až 38) došlo při zatěžování ke zvýšení elektrického odporu, nejspíše vlivem porušení struktury a narušením vodivé sítě.

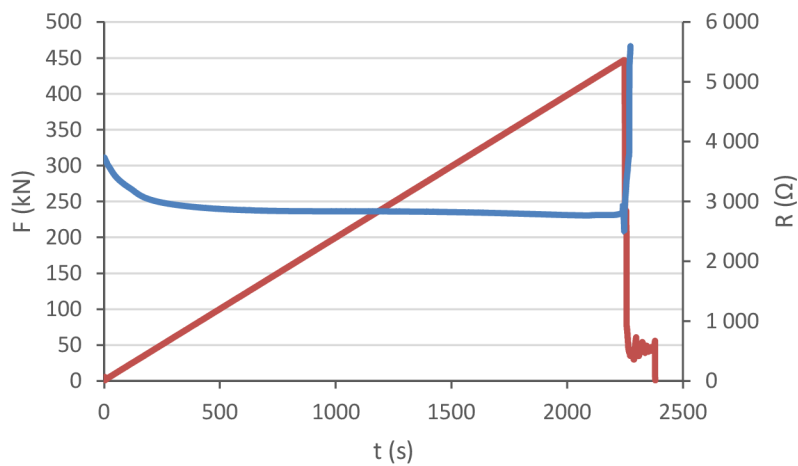
V čase porušení došlo u všech vzorků ke skokovému zvýšení elektrického odporu. To je způsobeno vznikem trhlin a rozrušením struktury, čímž dojde k destrukci vodivé sítě.



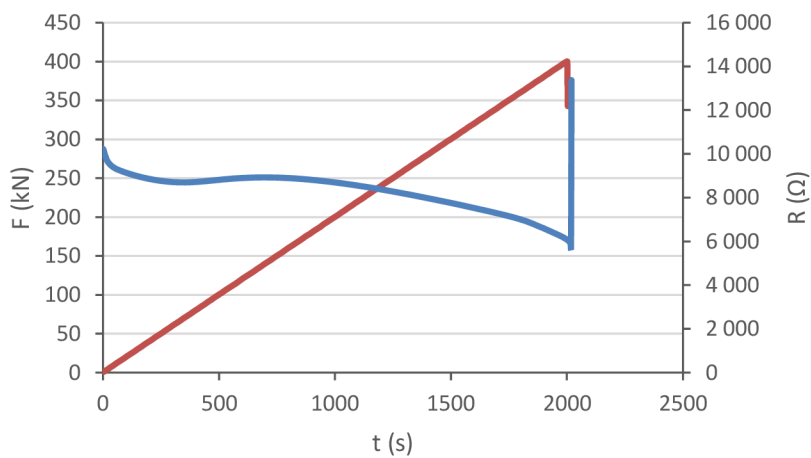
Obr. 3-30 Změna elektrického odporu při zatížení do porušení referenčního vzorku



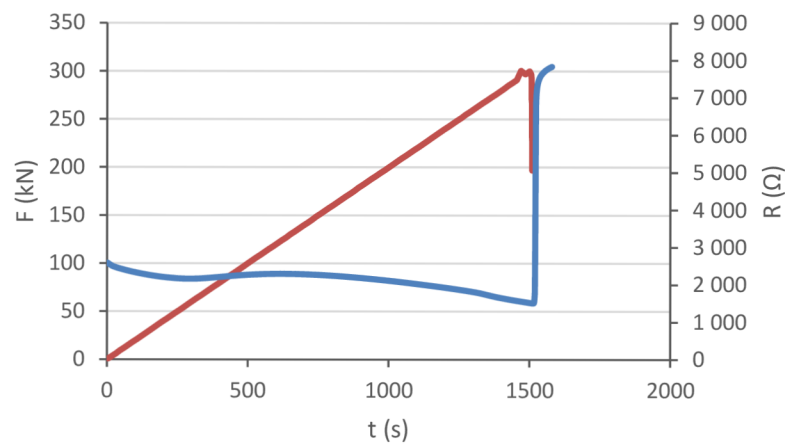
Obr. 3-31 Změna elektrického odporu při zatížení do porušení vzorku GP3



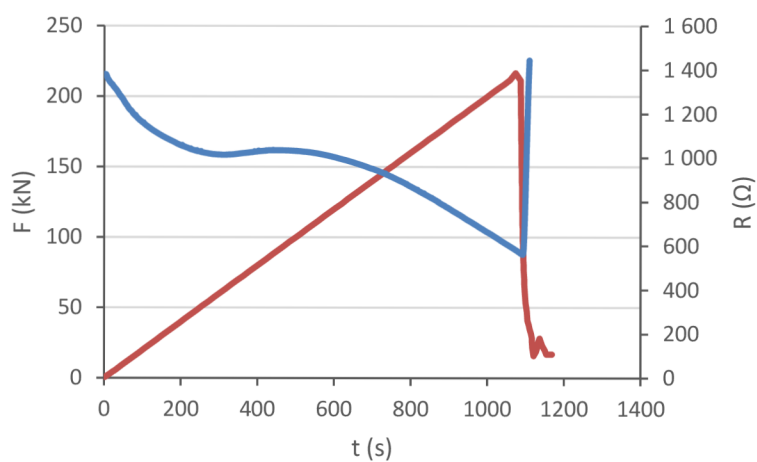
Obr. 3-32 Změna elektrického odporu při zatížení do porušení vzorku GP10



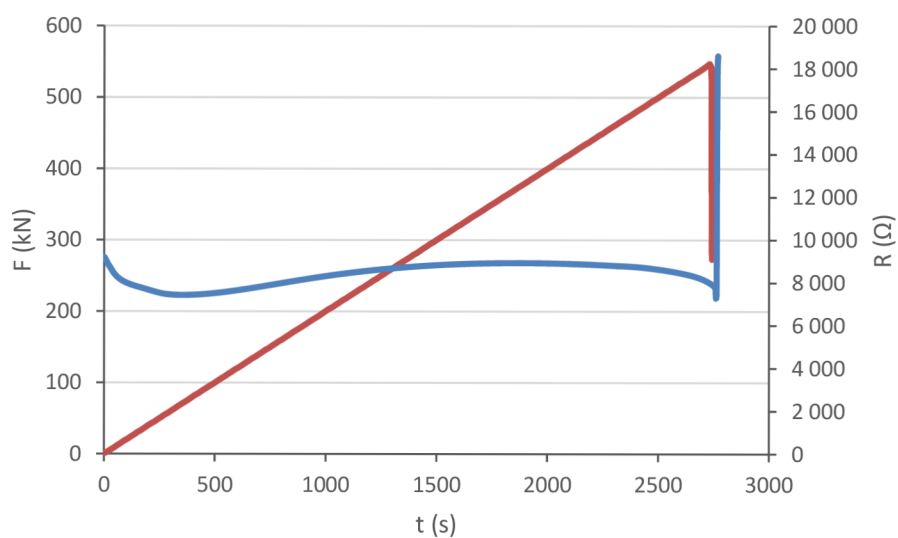
Obr. 3-33 Změna elektrického odporu při zatížení do porušení vzorku CB2



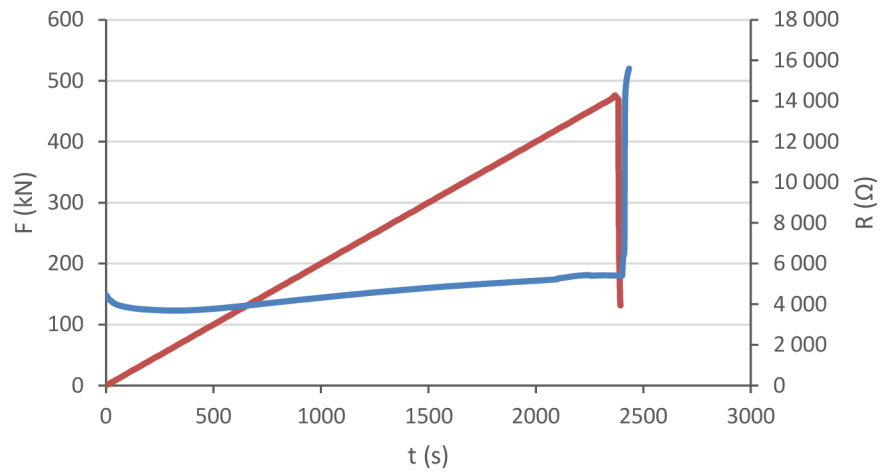
Obr. 3-34 Změna elektrického odporu při zatížení do porušení vzorku CB4



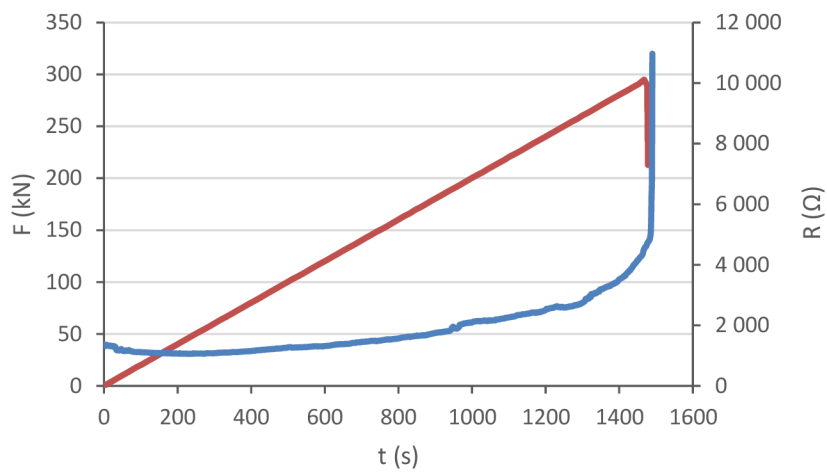
Obr. 3-35 Změna elektrického odporu při zatížení do porušení vzorku CB6



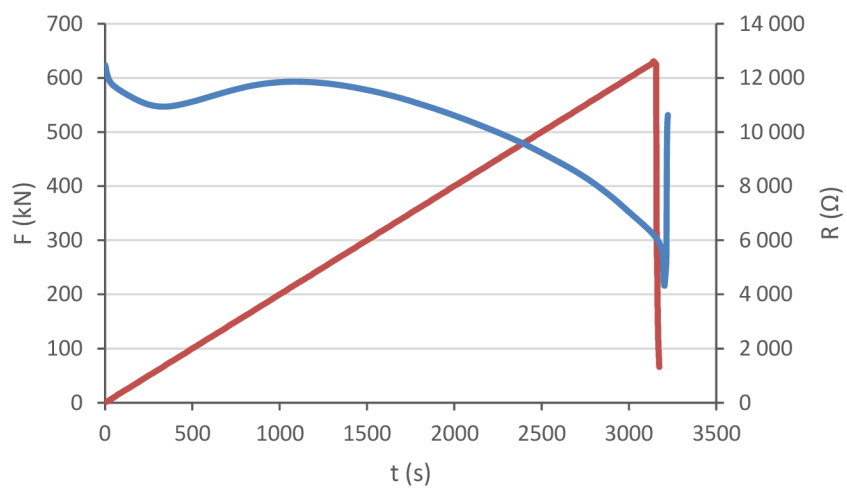
Obr. 3-36 Změna elektrického odporu při zatížení do porušení vzorku CF0,5



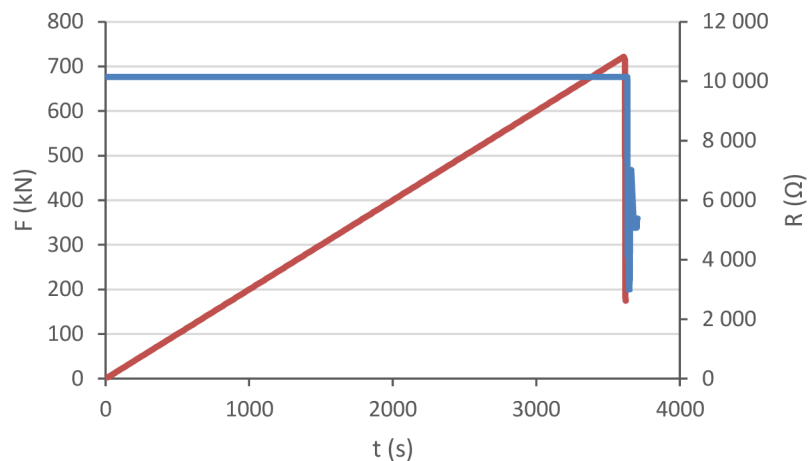
Obr. 3-37 Změna elektrického odporu při zatížení do porušení vzorku CF1



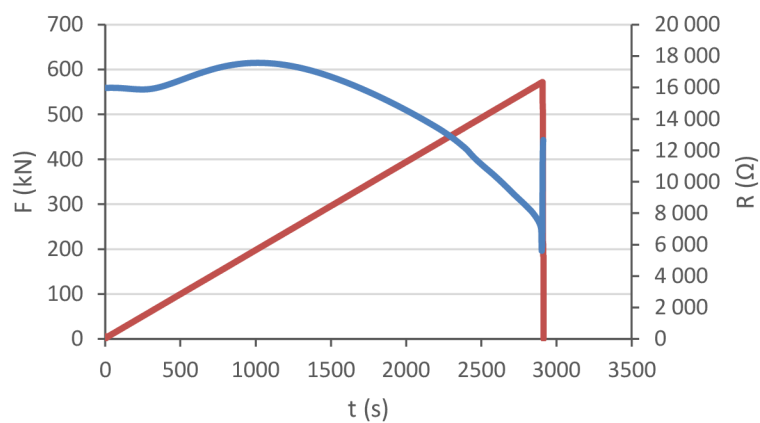
Obr. 3-38 Změna elektrického odporu při zatížení do porušení vzorku CF2



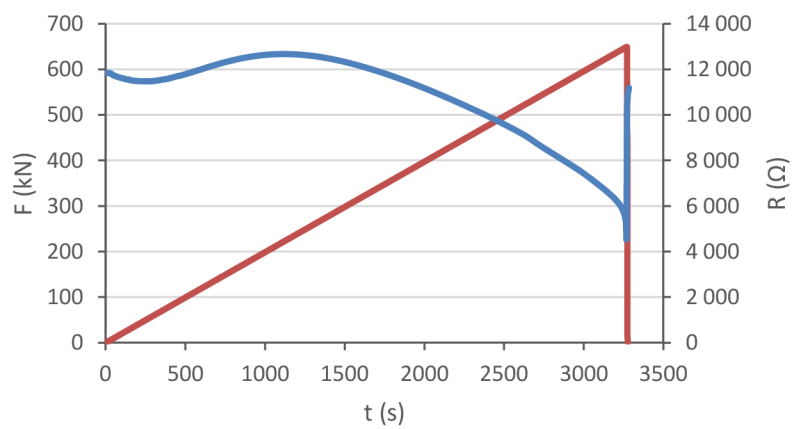
Obr. 3-39 Změna elektrického odporu při zatížení do porušení vzorku SF5



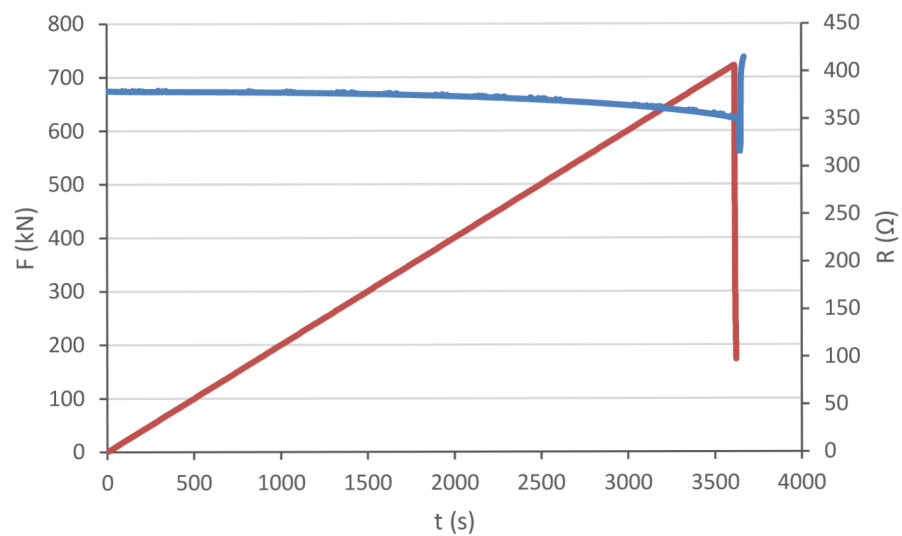
Obr. 3-40 Změna elektrického odporu při zatížení do porušení vzorku SF10



Obr. 3-41 Změna elektrického odporu při zatížení do porušení vzorku CNT0,1



Obr. 3-42 Změna elektrického odporu při zatížení do porušení vzorku CNT0,4



Obr. 3-43 Změna elektrického odporu při zatížení do porušení vzorku z cementu



## 4 Závěr

V teoretické části této práce byly popsány elektrické vlastnosti kompozitů a způsoby jejich měření. Byly představeny materiály používaných elektrod, možnosti jejich upevnění a uspořádání a vliv těchto faktorů na měření. Bylo zmíněno, jak různé druhy zatížení mění elektrické vlastnosti kompozitů a jaké faktory ovlivňují jejich senzorické vlastnosti. Rovněž byla provedena rešerše dosavadních výzkumů senzorických vlastností kompozitů při cyklickém zatěžování.

V experimentální části byly připraveny vzorky alkalicky aktivované strusky s různým množstvím vodivých plniv jako je grafitový prášek, saze, uhlíková vlákna, drátky a uhlíkové nanotrubičky, na kterých byly testovány mechanické a elektrické vlastnosti. Na základě těchto měření pak byly vybrány směsi, na kterých byl zkoumán vliv cyklického tlakového namáhání na průběh změny elektrického odporu.

Mechanické vlastnosti aluminosilikátových kompozitů se přidáním vodivých plniv ve většině případů zhoršily. Vzorky obsahující grafitový prášek, saze, uhlíková vlákna měly se zvyšujícím se množstvím plniva nižší pevnosti. Nejhorších mechanických vlastností dosáhly směsi se saze. Vzorky s ocelovými drátky měly při malých koncentracích nižší pevnosti než referenční směs, ovšem s vyšší koncentrací se jejich mechanické vlastnosti zlepšovaly.

Elektrický odpor vzorků se s vyšším množstvím vodivého plniva dle předpokladů snižoval. U směsí obsahujících grafitový prášek byl objeven perkolační práh při koncentraci 10 %. Při vyšším množství docházelo ke zvýšení elektrického odporu. Nejvýraznější vliv na elektrické vlastnosti měly již nejnižší zvolené koncentrace vodivých plniv. Například přidání 0,5 % uhlíkových vláken snížilo elektrický odpor o 58 % oproti referenci na  $1,04 \cdot 10^6 \Omega$ .

Všechny vzorky reagovaly na cyklické tlakové zatěžování cyklickou změnou elektrického odporu, přičemž při vyšším zatížení docházelo ke snížení elektrického odporu a naopak. U vzorků obsahujících saze, uhlíková vlákna, ocelová vlákna, uhlíkové nanotrubičky a cement došlo při cyklickém zatěžování k nárůstu změny elektrického odporu v čase. Tento jev může být způsobený polarizací elektrod, což by se dalo odstranit změnou použité frekvence, nebo vznikem nevratného poškození struktury, čímž došlo k narušení vodivé sítě.

Předpoklad, že přidání vodivých plniv zlepší senzorní vlastnosti alkalicky aktivované strusky, jako je tomu u cementových kompozitů dle předchozích výzkumů zmíněných v teoretické části, nebyl naplněn. Bylo zjištěno, že přidání vodivých plniv snižuje elektrický odpor aluminosilikátových kompozitů, ovšem ve většině případů zhoršuje jejich senzorní vlastnosti. Senzorní vlastnosti samotné alkalicky aktivované strusky jsou natolik dobré, že navýšení vodivých cest příměsí vede při určitém tlakovém zatížení k překonání perkolačního prahu.

Budoucí výzkum senzorních vlastností aluminosilikátových kompozitů by se měl zaměřit na jejich zlepšení jiným způsobem než přidáním vodivých plniv, jelikož alkalicky aktivovaná struska již obsahuje nanočástice železa, která zajišťují dostatečnou elektrickou vodivost. Zkoumat by se mohl vliv jiných faktorů na senzorní vlastnosti, například obsahu vody, rychlosti zatěžování či použití různých frekvencí při cyklickém zatěžování.

V případě zkoumání senzorních vlastností cementových kompozitů by bylo vhodné vyzkoušet použít kombinace různých vodivých plniv, popřípadě částečně cement nahradit vysokopecní struskou.

Rovněž by bylo užitečné věnovat se problematice dispergace uhlíkových vláken. K lepší homogenizaci uhlíkových vláken přispělo rozmíchání v roztoku Tritonu X-100, ovšem ve vzorcích stále byly pozorovatelné jejich shluky.

## 5 Literatura

- [1] HAN B., Yu X., Ou J., *Self-Sensing Concrete in Smart Structures*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2014.
- [2] HAN B.G., Guan X.C., Ou J.P., *Electrode design, measuring method and data acquisition system of carbon fiber cement paste piezoresistive sensors*. *Sensors and Actuators A: Physical* 2007;135(2):360–9.
- [3] WEN S.H., Chung D.D.L., *The role of electronic and ionic conduction in the electrical conductivity of carbon fiber reinforced cement*. *Carbon* 2006;44:2130–8.
- [4] ZHU S.R., Chung D.D.L., *Numerical assessment of the methods of measurement of the electrical resistance in carbon fiber reinforced cement*. *Smart Materials and Structures*, 2007;16:1164–70.
- [5] CHIARELLO M., Zinno R., *Electrical conductivity of self-monitoring CFRC*. *Cement and Concrete Composites* 2005;27:463–9.
- [6] AZHARI F., *Cement-based sensors for structural health monitoring* [dissertation for the master degree of applied science]. Canada: University of British Columbia; 2008.
- [7] REZA F., Batson G.B., Yamamuro J.A., Lee J.S.. *Resistance changes during compression of carbon fiber cement composites*. *J Material Civ Eng ASCE* 2003;15:476–83.
- [8] HOU T.C., Lynch JP. *Conductivity-based strain monitoring and damage characterization of fiber reinforced cementitious structural components*. *Proc SPIE* 2005;5765:419–29.
- [9] KOVACS G. *Micromachined transducers sourcebook*. Boston: McGraw-Hill; 1998.
- [10] WITTMANN F.H. *Materials for buildings and structures*. Wiley-VCH; 2000.
- [11] WEN S.H., Chung D.D.L., *The role of electronic and ionic conduction in the electrical conductivity of carbon fiber reinforced cement*. *Carbon* 2006;44:2130–8.
- [12] HAN B.G., Ou J.P., *Embedded piezoresistive cement-based stress/strain sensor*. *Sensors and Actuators a: Physical* 2007;138(2):294–8.
- [13] HAN B., Ding S., YU X. *Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review. Measurement*. Elsevier, 2015, 59, 110-128. DOI: 10.1016/j.measurement.2014.09.048. ISSN 0263-2241.
- [14] LI G.Y., Wang P.M., Zhao X. *Pressure-sensitive properties and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites*. *Cement and Concrete Composites*. Elsevier, 2007, 29(5), 377-382. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2006.12.011. ISSN 0958-9465.

- [15] HAN B.G., Yu Y., Han B.Z., Ou J.P. *Development of a wireless stress/strain measurement system integrated with pressure-sensitive nickel powder-filled cementbased sensors*. *Sensors and Actuators, A: Physical* 2008, 147(2), 536-543 DOI: 10.1016/j.sna.2008.06.021. ISSN 09244247.
- [16] FU X., Lu W., Chung D.D.L. *Improving the Strain-Sensing Ability of Carbon Fiber-Reinforced Cement by Ozone Treatment of the Fibers*. *Cement and Concrete Research*. Elsevier, 1998, 28(2), 183-187. DOI: 10.1016/S0008-8846(97)00265-2. ISSN 0008-8846.
- [17] SAAFI M. *Wireless and embedded carbon nanotube networks for damage detection in concrete structures*. *Nanotechnology*. 2009, 20(39), 395502. DOI: 10.1088/0957-4484/20/39/395502. ISSN 0957-4484.
- [18] HAN B.G., Han B.Z. a Ou J.P. *Experimental study on use of nickel powderfilled Portland cement-based composite for fabrication of piezoresistive sensors with high sensitivity*. *Sensors & Actuators: A. Physical*. Elsevier B.V, 2009, 149(1), 51-55. DOI: 10.1016/j.sna.2008.10.001. ISSN 0924-4247.
- [19] WANG X., Wang Y., Jin Z. *Electrical conductivity characterization and variation of carbon fiber reinforced cement composite*. *Journal of Materials Science*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002, 37(1), 223-227. DOI: 10.1023/A:1013107623281. ISSN 0022-2461.
- [20] CHEN B., Liu J. *Damage in carbon fiber-reinforced concrete, monitored by both electrical resistance measurement and acoustic emission analysis*. *Construction and Building Materials*. 2008, 22(11), 2196-2201.
- [21] WEN S., Chung D.D.L. *Self-sensing of flexural damage and strain in carbon fiber reinforced cement and effect of embedded steel reinforcing bars*. *Carbon*. Elsevier, 2006, 44(8), 1496-1502. DOI: 10.1016/j.carbon.2005.12.009. ISSN 0008-6223.
- [22] SHIN S.W., Oh T.K. *Application of electro-mechanical impedance sensing technique for online monitoring of strength development in concrete using smart PZT patches*. *Construction and Building Materials* 2009, 23, 1185-1188.
- [23] WANG H., Gao X., Wang R. *The influence of rheological parameters of cement paste on the dispersion of carbon nanofibers and self-sensing performance*. *Construction and Building Materials* 2017, 134, 673-683.
- [24] D ALESSANDRO A. et al. *Investigations on scalable fabrication procedures for self-sensing carbon nanotube cement-matrix composites for SHM applications*. *Cement and Concrete Composites* 2016, 65, 200-213.
- [25] MATERAZZI A.L., Ubertini F., D Alessandro A. *Carbon nanotube cement-based sensors for dynamic monitoring of concrete structures* (2013).

- [26] WEN S., Chung D. A. *Comparative Study of Steel- and Carbon-Fiber Cement as Piezoresistive Strain Sensors*. *Advances in Cement Research*. (2003). 15. 119-128. 10.1680/adcr.15.3.119.36621.
- [27] MONTEIRO A., Cachim P., Costa, P. *Carbon nanoparticles cement-based materials for service life monitoring* (2016).
- [28] LOAMRAT K., Sappakittipakorn M., Sukontasukkul P., Banthia N. *Effect of Carbon Fiber and Graphite Powder on Resistivity of Cement-based Sensor under Compression*. *KMUTNB International Journal of Applied Science and Technology*. (2014). 7. 29-35. 10.14416/j.ijast.2014.01.005.
- [29] HAN B. et al., *Electrostatic self-assembled carbon nanotube/nano carbon black composite fillers reinforced cement-based materials with multifunctionality*. *Composites Part A: Appl. Sci. and Manuf.*, 2015. 79: p. 103-115.