



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV CHEMIE

INSTITUTE OF CHEMISTRY

**VLIV VLHKOSTI NA ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI
SILIKÁTOVÝCH KOMPOZITŮ**

EFFECT OF MOISTURE ON THE ELECTRICAL PROPERTIES OF SILICATE COMPOSITES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Helena Karlíková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. PAVEL ROVNANÍK, Ph.D.

BRNO 2021



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav chemie

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Helena Karlíková
Název	Vliv vlhkosti na elektrické vlastnosti silikátových kompozitů
Vedoucí práce	doc. RNDr. Pavel Rovnaník, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2020
Datum odevzdání	28. 5. 2021

V Brně dne 30. 11. 2020

doc. Ing. Jitka Malá, Ph.D.
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. ROVNANÍK P, KUSÁK I, BAYER P, SCHMID P, FIALA L. Electrical and Self-Sensing Properties of Alkali-Activated Slag Composite with Graphite Filler. Materials 2019, Vol. 12, 1616.
3. ROVNANÍK P, KUSÁK I, BAYER P, SCHMID P, FIALA L. Comparison of electrical and self-sensing properties of Portland cement and alkali-activated slag mortars. Cement and Concrete Research 2019, Vol. 118, 84-91.
4. Cai J, Pan J, Li X, Tan J, Li J. Electrical resistivity of fly ash and metakaolin based geopolymers. Construction and Building Materials 2020, Vol. 234, 117868.
5. Saleem M, Shameem M, Hussain SE, Maslehuddin M. Effect of moisture, chloride and sulphate contamination on the electrical resistivity Portland cement concrete. Construction and Building Materials 1996, Vol. 10, 209-214.
6. Bai S, Jiang L, Jiang Y et al. Research on electrical conductivity of graphene/cement composites. Advances in Cement Research 2020, Vol. 32(2), 45-52.
7. Payakaniti P, Pinitsoontorn S, Thongbai P, Amornkitbamrung V, Chindaprasirt P. Electrical conductivity and compressive strength of carbon fiber reinforced fly ash geopolymeric composites. Construction and Building Materials 2017, Vol. 135, 164-176.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Provedte literární rešerši týkající elektrických vlastností čerstvých cementových past a pojiv na bázi alkalicky aktivovaných materiálů. Při zpracování tématu se věnujte především elektrickému odporu, vodivosti a dielektrickým vlastnostem. Část práce věnujte i vlhkostním parametrům a korelaci obsahu a transportu vlhkosti s pórovou strukturou silikátových stavebních materiálů. Na základě rešeršních poznatků vyhodnoťte rozdíly v chování jednotlivých druhů pojiv.

V experimentální části připravte vzorky malt na bázi cementu a alkalicky aktivované strusky s obsahem vodivého plniva z práškového grafitu v rozmezí 0-18 hm.%. Následně stanovte elektrické vlastnosti kompozitů v závislosti na vnitřní vlhkosti materiálů. Zaměřte se především na elektrickou rezistivitu v závislosti na frekvenci vstupního AC zdroje.

Pro vypracování bakalářské práce použijte zadanou literaturu, doplňte ji o vlastní a u každé převzaté informace uveďte odkaz na použitou literaturu. Výsledky zpracujte do přehledných grafů a tabulek. Rozsah práce je minimálně 40 stran.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ 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).

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

ABSTRAKT

Tato práce se věnuje studiu závislosti elektrických vlastností na vnitřní vlhkosti silikátových kompozitů. Teoretická část obsahuje informace o elektrických vlastnostech cementových past a alkalicky aktivovaných pojiv, a také poznatky o vlhkošních parametrech a přítomnosti vlhkosti v materiálové struktuře. V experimentální části byly vyrobeny vzorky malt s pojivovou složkou na bázi cementu a alkalicky aktivované strusky s obsahem grafitového prášku v rozmezí 0–18 hmotnostních %, u kterých byl použit jako plnivo křemenný písek. Po vytvrzení byly vzorky opatřeny měděnými elektrodami a nasyceny vodou. Elektrické vlastnosti malt byly sledovány metodou impedanční spektroskopie v průběhu postupného vysychání vzorků. Vliv mikrostruktury byl studován pomocí skenovací elektronové mikroskopie a vysokotlaké rtuťové porozimetrie. Z výsledků vyplývá, že k výraznému nárůstu elektrického odporu dochází až při obsahu relativní sorpční vlhkosti pod 20 % ve frekvenčním rozsahu 40–5000 Hz.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektrické vlastnosti, sorpční vlhkost, měrný elektrický odpor, cementový kompozit, alkalicky aktivovaná struska, grafitový prášek, mikrostruktura

ABSTRACT

This work deals with study on the dependence of electrical properties on the moisture content in silicate composites. The theoretical part contains information about the electrical properties of cement-based and alkali-activated binders, as well as knowledge on moisture parameters and the presence of moisture in the material structure. Samples of cement-based mortars and alkali-activated slag with a graphite powder in the range of 0–18 per cent by weight were produced and quartz sand was used as filler in the experimental part. The samples were provided with copper electrodes and saturated with water after hardening. The electrical properties of the mortars were monitored by means of impedance spectroscopy during the gradual drying of the samples. The effect of microstructure has been studied using scanning electron microscopy and mercury intrusion

porosimetry. The results indicate that a significant increase in electrical resistance occurs only when the relative sorption humidity content is below 20 per cent in the 40–5000 Hz frequency range.

KEYWORDS

Electrical properties, sorption humidity, specific electrical resistance, cement composite, alkali-activated slag, graphite powder, microstructure

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Helena Karlíková *Vliv vlhkosti na elektrické vlastnosti silikátových kompozitů*. Brno, 2021. 71 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie. Vedoucí práce doc. RNDr. Pavel Rovnaník, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Vliv vlhkosti na elektrické vlastnosti silikátových kompozitů* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 28. 5. 2021

Helena Karlíková

autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Vliv vlhkosti na elektrické vlastnosti silikátových kompozitů* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 28. 5. 2021

Helena Karlíková

autor práce

PODĚKOVÁNÍ

V první řadě bych chtěla poděkovat panu doc. RNDr. Pavlu Rovnaníkovi, Ph.D. za čas, který věnoval konzultacím ohledně mé bakalářské práce, trpělivost a odborné vedení. Dále bych ráda poděkovala panu doc. Mgr. Ivo Kusákovi Ph.D. za vysvětlení principu měření impedance a podklady pro vyhodnocení, a také panu Ing. Patriku Bayerovi Ph.D. za snímky ze skenovací elektronové mikroskopie. Na závěr bych ráda poděkovala mé rodině, která mě podporovala po celou dobu mého studia.

Obsah

1	ÚVOD.....	12
2	CÍL PRÁCE.....	14
3	TEORETICKÁ ČÁST.....	15
3.1	Kompozit	15
3.2	Alkalicky aktivované materiály.....	15
3.2.1	Princip alkalické aktivace.....	16
3.2.2	Mikrostruktura N-A-S-H gelů	17
3.2.3	Vlastnosti alkalicky aktivovaných materiálů.....	18
3.3	Vlhkost materiálů	18
3.3.1	Vlivy ovlivňující pohyb vlhkosti ve struktuře materiálu.....	19
3.3.2	Základní charakteristiky struktury pórovitých hmot	19
3.3.3	Transport vlhkosti.....	20
3.3.4	Pohlcování vlhkosti	20
3.4	Senzorický beton	21
3.4.1	Makroskopická struktura	22
3.4.2	Mikroskopická struktura.....	22
3.4.3	Dispergování.....	23
3.4.4	Typy snímaných signálů.....	24
3.4.5	Výroba elektrod	24
3.4.6	Metoda měření elektrického odporu.....	25
3.4.7	Elektrická vodivost.....	26
3.4.8	Vodivostní mechanismus bez zatížení.....	27
3.5	Elektrická vodivost silikátových kompozitů	28
3.5.1	Porovnání elektrické vodivosti betonu a geopolymérů	29

3.5.2	Vodivé příměsi v kompozitech.....	30
3.6	Vliv vlhkosti na elektrické vlastnosti	33
3.6.1	Kompozity s příměsemi.....	33
3.6.2	Beton a cementové malty	34
4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	36
4.1	Cíle a metodika práce	36
4.1.1	Etapa 1 – Použité materiály	37
4.1.2	Etapa 2 – Receptury.....	39
4.1.3	Etapa 3 – Zhotovení a příprava zkušebních těles pro měření.....	40
4.1.4	Etapa 4 – Prováděné měření a zkušební metody	41
4.2	Vyhodnocení a diskuse výsledků	44
4.2.1	Vliv vlhkosti na elektrickou vodivost.....	44
4.2.2	Porozimetrie.....	54
4.2.3	Mikrostruktura	58
5	ZÁVĚR	61
6	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	63
7	SEZNAM FYZIKÁLNÍCH VELIČIN A JEJICH JEDNOTEK	70
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	71

1 Úvod

Problematika udržitelného rozvoje zasahuje mnoho odvětví, a proto se v posledních letech výzkum stavebních hmot zaměřuje na vývoj materiálů s energetickou a materiálovou úsporou. Beton je jedním z nejpoužívanějších materiálů a nelze jednoduše nahradit, poněvadž má spoustu výhod, mezi které patří pevnost, trvanlivost, odolnost vůči agresivním látkám apod., ale v posledních letech je snaha omezit použití portlandského cementu hlavně kvůli snížení emisí oxidu uhličitého, který způsobuje skleníkový efekt a vysoké energetické náročnosti při výrobě slínkového cementu. Z tohoto důvodu se výzkum věnuje vývoji alternativních pojmů, mezi které patří také alkalicky aktivované materiály. Jedná se o hlinitokřemičitanové materiály s nižší uhlíkovou stopou, než se nachází u portlandského cementu a jsou označovány názvem geopolymery. Jejich použití přináší řadu výhod. Patří k nim mírně lepší elektrická vodivost v porovnání s prostým betonem, vysoké pevnosti, dobrá trvanlivost, ekologičnost a nízké náklady na výrobu, pokud jsou využívány druhotné suroviny, jako je popílek nebo struska.

Elektrická vodivost zásadně ovlivňuje různé progresivní vlastnosti či využití materiálů a vlhkost má na tento parametr významný dopad. Jedná se například o samovyhřívání, získávání energie, senzorické schopnosti nebo možnost roztání sněhu například na pozemních komunikacích v zimním období. Degradace stavebních materiálů je způsobena řadou faktorů a stav konstrukcí je nutné pravidelně kontrolovat, aby byla zajištěna jejich spolehlivost a bezpečnost. Vývoj nedestruktivních metod dospěl k výrobě elektrického senzoru pro monitorování konstrukce. Pokrok v různých možnostech využití elektricky vodivých materiálů s sebou přináší nejenom ekonomickou úsporu, jelikož se ušetří finanční prostředky například při využívání senzorů vlhkosti v oblasti nedestruktivního zkoušení, ale také možnost snížení zátěže na životní prostředí, protože v případě vývoje elektricky vodivého kompozitu, kvůli kterému bude nastávat tání sněhu na pozemních komunikacích, chodnicích, parkovištích apod., se omezí používání posypových solí. Aplikace těchto materiálů bude sloužit v různých podmínkách, a proto se musí zjistit, jak jejich elektrická vodivost reaguje na změnu vlhkosti.

Materiály, jako je prostý beton, vykazují nízké hodnoty elektrické vodivosti, takže se mohou označit za izolant, ale přidáním vodivých příměsí se jejich elektrický odpor začne snižovat, čímž získávají lepší elektrické vlastnosti a dají se využívat pro další účely. Koncentrace vodivé příměsí v kompozitu ovlivňuje výsledné elektrické vlastnosti materiálu. Před perkolačním prahem vykazuje kompozit s vodivou příměsí mírně nižší

elektrický odpor než referenční vzorek a za perkolačním prahem kompozit dosahuje elektrické vodivosti odpovídající přibližně elektrickým vlastnostem vodivé příměsi, avšak je důležité regulovat její koncentraci, protože při vysoké dávce dochází k výraznému zhoršení výsledných mechanických parametrů. Kompozity s vodivými příměsemi nacházejí široké uplatnění, a proto je důležité zjistit, jak reagují na vnikání vlhkosti do jejich struktury. Mezi nejčastěji používané vodivé příměsi patří uhlíková vlákna, ocelová vlákna, saze, grafitový prášek, niklový prášek apod.

2 Cíl práce

Tato práce se zabývá problematikou vlivu vlhkosti na elektrické vlastnosti silikátových kompozitů s obsahem vodivé příměsi. Cílem je výroba zkušebních těles na bázi cementu a alkalicky aktivované strusky a následné porovnání elektrických vlastností kompozitů v závislosti na změně vnitřní vlhkosti materiálů. Zkušební tělesa obsahují rozmezí 0 až 18 hmotnostních procent grafitového prášku, která jsou vztažena na hmotnost pojivové složky. Porovnání vlivu vlhkosti na elektrické vlastnosti vzorků se dále stanovuje pomocí elektronové mikroskopie a rtuťové porozimetrie. Výsledkem je vyhodnocení závislosti měrného elektrického odporu na frekvenci a relativní sorpční vlhkosti materiálů. Vysušování vzorků je prováděno postupně jejich ponecháním v exsikátorech, a nakonec jsou umístěny do vakuové sušárny. Měrný elektrický odpor je vypočten z průběžně měřených hodnot impedance na zkušebních tělesech.

3 Teoretická část

3.1 Kompozit

Označení kompozit vyjadřuje materiálový systém složený z nejméně dvou fází, z nichž alespoň jedna je pevná a disponuje makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi fázemi. Zároveň kompozit dosahuje lepších vlastností než jakákoli složka samostatně nebo obyčejnou sumací.

Atributy kompozitních materiálů závisí na mnoha aspektech. Jedná se o anizotropii jednotlivých fází a jejich mechanické vlastnosti, kde se pozornost věnuje hlavně pevnosti, modulům pružnosti, Poissonovu součiniteli, pracovnímu diagramu nebo meznímu přetvoření. Další parametr, který ovlivňuje výslednou charakteristiku, je objemové zastoupení fází, jejich geometrický tvar a uspořádání v systému včetně pórů. Interakce jednotlivých fází mezi sebou nebo s okolním prostředím a schopnost přenosu zatížení z matrice do vyztužujících částic, a naopak mají také velký dopad na vlastnosti kompozitu. Historie materiálů, do které patří např. technologie výroby, časové faktory apod., upravuje výsledné vlastnosti materiálů tvořících kompozit [1].

3.2 Alkalicky aktivované materiály

Alkalicky aktivované materiály se označují též názvem geopolymery. Považují se za anorganické polymerní materiály, které vznikají aktivací hlinitokřemičitých materiálů v zásaditém prostředí při normální teplotě a tlaku [2][3].

Pro přípravu alkalicky aktivovaných materiálů se využívá mnoho přírodních surovin, průmyslových vedlejších produktů a recyklovaných aluminosilikátů, mezi jejichž zástupce patří např. metakaolin, popílek, vysokopecní struska, skleněný odpad apod. [4].

Alkalicky aktivované cementy a betony přitahují pozornost po celém světě. Mezi hlavní výhody patří nízké náklady v případě využití druhotných surovin, jako je popílek nebo struska, vysoké pevnosti, dobrá trvanlivost v porovnání s portlandským cementem a využití druhotných odpadních surovin. Pro jejich rozvoj se používají např. popílky z elektráren a struska, čímž se zredukuje vývoz na skládky. V současnosti se alkalicky aktivované materiály aplikují pro různé účely ve stavebních projektech. Uplatnění nachází zejména jako konstrukční beton, bloky zdiva, betonové chodníky nebo trubky, autoklávovaný pórobeton a žáruvzdorný beton. Dále se používají při stabilizaci a solidifikaci nebezpečných radioaktivních odpadů nebo jako betonové příkopy.

Alkalicky aktivované materiály se potýkají s několika problémy. Jedním z nich je vysoká rychlost karbonatace alkalicky aktivovaného betonu, který se nachází v suchém prostředí. Zatímco ve vlhku karbonatace probíhá pomaleji a klesá tendence k tvorbě trhlin. Dále mohou být alkálie vyplavovány na povrch alkalicky aktivovaného betonu, kde reagují s oxidem uhličitým ve vzduchu, a proto dochází ke vzniku výkvětů. Pokud se alkalicky aktivované materiály podrobí sušení, dochází kvůli vysychání ke smrštění. Důležitou roli pro získání výsledných vlastností produktů hraje výběr vstupních složek, poněvadž potenciální expanze alkalické reakce se liší podle složení směsi. Do budoucna by bylo dobré rozšířit sortiment chemických příměsí, které se prodávají na trhu, protože většina z nich je určena pro výrobu portlandského cementu. Přitom s využitím geopolymérů je spojeno mnohem menší množství uvolněného oxidu uhličitého, což by přispělo ke zlepšení životního prostředí [1][5].

3.2.1 Princip alkalické aktivace

Pojem geopolymérace se používá pro reakci aluminosilikátového materiálu s alkalickým roztokem o vysoké koncentraci OH^- iontů v silně zásaditém prostředí o pH vyšším než 12. Na začátku dochází k rozpouštění aluminosilikátu. Jedná se v podstatě o alkalickou hydrolyzu sloučenin s kyslíkovými můstky mezi polyedry SiO_4^{4-} a AlO_4^{4-} . Amorfni aluminosilikáty se rozpouští poměrně rychle, čímž vzniká přesycený roztok obsahující $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$, $[\text{SiO}(\text{OH})_3]^-$ a $[\text{SiO}_2(\text{OH})_2]^{2-}$. Tyto složky mezi sebou kondenzují a dochází k tvorbě aluminosilikátového gelu, ze kterého vznikají nové aluminosilikátové sloučeniny, jejichž struktura se odvíjí podle poměru Si:Al. Musí být zajištěna přítomnost iontu alkalického kovu, který se podílí na vyrovnávání záporného náboje na atomu hliníku. Nově vzniklá fáze se popisuje buď jako amorfni nebo semikrystalická či polykrystalická hlavně u produktů tvořících se za vyšších teplot [6].

Podle povahy cementových složek se rozdělují do dvou modelů s vysokým a nízkým obsahem vápníku. První systém $(\text{Na}, \text{K})_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ je bohatý na vápník a křemík, které se nacházejí např. ve vysokopecní strusce ($\text{SiO}_2 + \text{CaO} > 70\%$), ta se aktivuje za relativně mírných alkalických podmínek. Hlavní produkt, který vzniká při reakci je C-A-S-H (hydrát hlinitokřemičitanu vápenatého) gel. Podobá se gelu vytvořenému během hydratace portlandského cementu, ale absorbuje do struktury hliník. Druhý model $(\text{Na}, \text{K})_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ zastupuje alkalicky aktivované materiály s větším množstvím hliníku a křemíku. Patří mezi ně např. metakaolin nebo popílek s nižším obsahem oxidu vápenatého. Pro nastartování reakce je zapotřebí vysoce alkalické

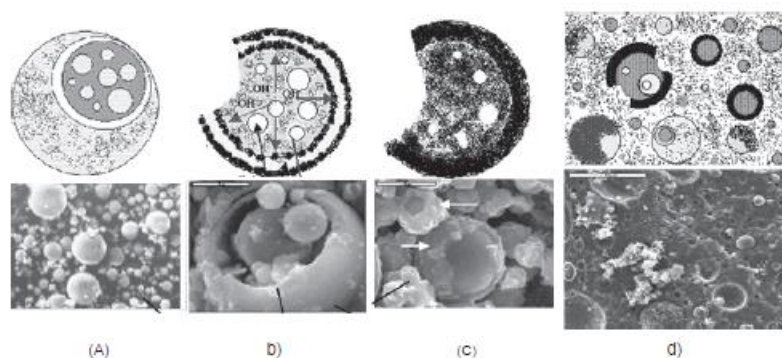
prostředí a teplotu v rozmezí 60 °C až 200 °C. Jako hlavní reakční produkt vzniká trojrozměrný anorganický alkalický polymer či N-A-S-H (alkalický hydrát hlinitokřemičitanu) gel [4].

Třetí model popisuje alkalickou aktivaci složenou z kombinací prvního a druhého systému. Používá se nový typ pojiva. Jedná se o hybridní alkalický cement vytvořený alkalickou aktivací materiálů s vyšším obsahem CaO, SiO₂ a Al₂O₃ než 20 %, např. spojením cementu a strusky, cementu a popílku atd. Hydratační produkty vznikající touto reakcí jsou velmi složité, protože dochází k propojení směsi cementových gelů, včetně C-A-S-H a N-A-S-H gelů [4].

Existuje minimální dávka aktivátoru, kterou je nutno aplikovat, aby došlo k zajištění příznivého průběhu hydratace a rozvoji vlastností. Avšak při nadměrném použití aktivátoru se mohou zhoršit výsledné vlastnosti. Jedná se například o pevnost, odolnost proti tepelným šokům apod. Účinky a optimální dávka závisí také na povaze výchozích surovin [7].

3.2.2 Mikrostruktura N-A-S-H gelů

Model popisující alkalickou aktivaci popílku byl navržen Fernández-Jiménezovou a kol. Proces začíná chemickým atakem na povrchu popílku, čímž dochází k tvorbě dutin. Popílek se rozpouští a dochází k vysrážení hydratačních produktů, které vznikají uvnitř i vně částic popílku. Vytvořené produkty zakrývají nezreagované částice a brání jim v kontaktu s alkalickým roztokem, a proto alkalická aktivace pokračuje už dále pomaleji. Částice popílku bráněné reakčními produkty se mohou dostat do styku s alkalickým roztokem pouze difúzními mechanismy. Na konci koexistují různé morfologie (částice nezreagovaného popílku, částice pod působením alkalického roztoku a reakční produkty) [4].



Obr. 3. 1: Mikrostruktura vytvořená alkalickou reakcí [4]

3.2.3 Vlastnosti alkalicky aktivovaných materiálů

Alkalicky aktivované materiály mají několik výhod v porovnání s produkty, které obsahují portlandský cement. Dosahují vyšší pevnosti v tlaku v rozmezí 360 až 520 dnů a odlišného poměru pevnosti v tlaku ku pevnosti v tahu. Lze dosáhnout minimálního smrštění, jestliže se pro výrobu alkalicky aktivovaných materiálů použije metakaolin nebo popílek. Na výsledné vlastnosti má vliv volba výchozích materiálů a jejich aktivátorů, poměr Na_2O ku SiO_2 nebo výsledný obsah Na_2O v aktivátoru, poměr $\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3 : \text{CaO}$ (MgO) v surovině, složení kameniva, hydrotermální podmínky a teplota během přípravy.

Geopolymery jsou tvořeny amorfni sklovitou strukturou a jejich reakční produkty se podobají zeolitům $M_n\{-(\text{Si-O})_Z-\text{Al-O}\}_N \cdot w\text{H}_2\text{O}$. A proto nevznikají obvyklé hydratační produkty, jako je portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nebo ettringit vyskytující se u portlandského cementu. Mikrostruktura alkalicky aktivovaných materiálů se jeví jako porézní a objevují se v ní nezreagované částice. Složení produktů lze zjistit kombinací různých metod. Nejvíce se používá infračervená spektrometrie, rentgenová difrakce nebo rastrovací elektronový mikroskop [4][8].

3.3 Vlhkost materiálů

Porézní struktura se vyskytuje u mnoha stavebních materiálů, a proto mohou přijímat vodu v kapalném nebo plynném skupenství do vnitřních dutin. Pokud dojde ke splnění určitých podmínek, voda může vyplňovat póry, přemísťovat se ve struktuře a odcházet zpět do okolí. Materiál je schopen pohlcovat vlhkost, dokud se nezaplní

všechny jeho póry. Obsah vlhkosti v materiálu je definován relativní sorpční vlhkostí [9][10].

3.3.1 Vlivy ovlivňující pohyb vlhkosti ve struktuře materiálu

Materiálová struktura umožňuje transport molekul vody, které mají velikost 0,28 nm. Jejich pohyb nejvíce ovlivňuje druh, tvar a velikost vnitřního prostoru. Tvar pórů může být kulový, válcovitý, kuželový nebo podobný trhlině. Druhy pórů se rozlišují na kanáلكovité oboustranně otevřené, jednostranně otevřené nebo vnitřní dutiny. Pórový systém se dělí podle vzniku materiálu na primární, který vznikl jako jeho součást a sekundární, jenž se vytvořil seskupováním samostatných částic [9].

3.3.2 Základní charakteristiky struktury pórovitých hmot

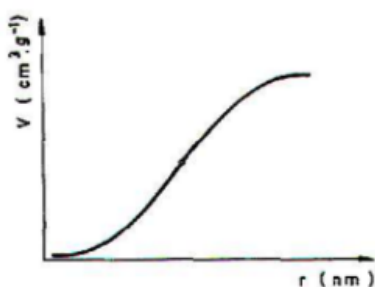
Do základní charakteristiky spadá pórovitost, rozdělení pórů a měrný povrch.

Pórovitost charakterizuje souvislost mezi objemem pórů a celkovým objemem materiálu:

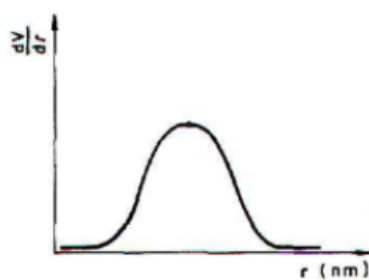
$$P = \frac{V_p}{V_o} = \frac{V_o - V}{V_o} \quad (3.1)$$

kde pórovitost P vyjadřuje objem pórů, V_o je celkový objem pórovitého materiálu a V označuje objem tuhé látky bez pórů.

Póry se dělí podle velikosti na základě modelu pórů nejčastěji kruhového nebo válcového tvaru po délce konstantního průřezu. Průměr nebo poloměr charakterizuje základní rozměr. Většina používaných materiálů je tvořena póry s různým poloměrem. Závislost objemu pórů na jejich poloměru nebo průměru vyjadřuje tvar integrální křivky, jejichž derivací vznikne názornější tzv. diferenciální křivka. Hmotu tvoří systém dutinek zaplněných kapalinami nebo plyny. Rozměry pórů zaujímají širokou škálu v různém vzájemném spojení, jestliže nejsou mezi sebou propojeny, jedná se o uzavřenou pórovitost. Opačný případ se označuje jako otevřená pórovitost [9].



Obr. 3. 2: Schéma průběhu součtové křivky rozdělení pórů [9]



Obr. 3. 3: Možný průběh derivace integrální křivky – rozdělení pórů [9]

Rozhraní mezi tuhou fází a plynnou nebo kapalnou fází, která vyplňuje póry, se nazývá měrný povrch [9].

3.3.3 Transport vlhkosti

Přechodná oblast vzniká na rozhraní obou fází v důsledku působení mezipovrchových sil, které jsou určeny povahou a složením příslušných fází. Její kvantitativní složení se neshoduje se složením vnitřku žádné z fází. Materiály disponují schopností přijímat vlhkost, a proto dochází k proměnlivému obsahu vlhkosti ve struktuře materiálu při rozdílném výskytu vodní páry ve vzduchu. Rozlišují se tři jevy. Jedná se o adsorpci, absorpci a chemisorpci [9][11].

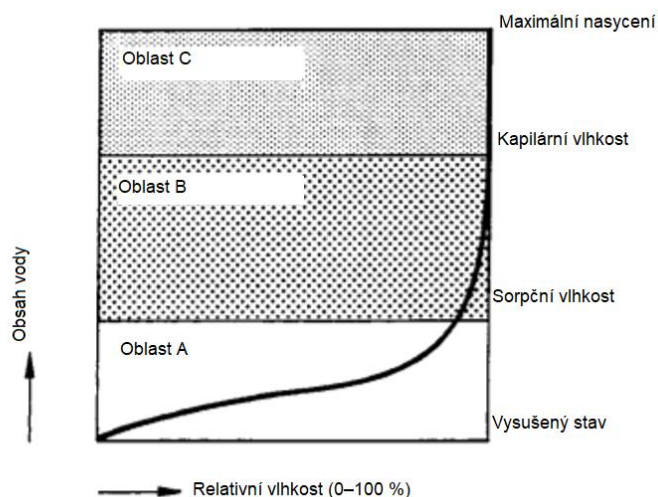
Molekulární van der Waalsové síly způsobují adsorpci. Dochází ke vzniku monomolekulární vrstvy na stěnách pórů, protože na sebe vzájemně působí molekuly tuhých látek a vodní páry. Počet vrstev se odvíjí hlavně podle relativní vlhkosti vzduchu, protože v závislosti na její hodnotě se mění objem materiálu. Když dochází k zaplňování pórů, voda se shromažďuje v jemných pórech a nízkých prostorech. Její hladina je zakřivená a vytváří se nad ní menší parciální tlak vodní páry. V úzkých pórech dochází ke zdvihu vody vlivem působení kapilárních sil a vodní pára difunduje z externího prostředí k zakřivenému povrchu hladiny vody a dochází ke kapilární kondenzaci [9][11].

Jev, kdy kapalná nebo plynná fáze prostupuje prostřednictvím difúze a dochází k vedení vlhkosti do tuhé fáze, se nazývá absorpce [9].

Během chemisorpce působí navíc chemické síly v porovnání s fyzikální adsorpcí. Dochází ke vzniku chemické vazby, která je mnohem pevnější [9][11].

3.3.4 Pohlcování vlhkosti

Pohlcování vlhkosti lze popsat na základě rozdělení do tří oblastí (viz Obr. 3. 4). Oblast A zahrnuje sorpční nebo hygroskopickou vlhkost v rozmezí od suchého stavu do 95% relativní vlhkosti. Jedná se o vodu ze sorpce vodní páry až do dosažení stavu rovnováhy. Oblast B následuje po ní a představuje kapilární vlhkost. Začíná v oblasti sorpční vlhkosti a končí u volného nasycení vodou. Poté následuje oblast C, která charakterizuje maximální nasycení. V praxi se tohoto stavu docílí difúzí v teplotním gradientu nebo v laboratoři vyvozováním sání pod tlakem. V této oblasti se zaplňují všechny póry, takže zde neexistují žádné stavy rovnováhy. Dosahuje se 100% relativní vlhkosti [10].



Obr. 3. 4: Schéma pohlcování vlhkosti na základě rozdělení do tří oblastí A, B, C [10]

3.4 Senzorický beton

Senzorický (chytrý) beton je kompozitní materiál. Obsahuje proměnlivé prvky o různých velikostech v rozmezí nanometrů až několik metrů. Skládá se z fáze konkrétní matrice, fáze funkčního plniva a fázového rozhraní mezi nimi. Disponuje složitou, heterogenní a dynamickou strukturou, se kterou souvisí jeho senzorické vlastnosti.

Chytrý beton vzniká přidáním funkčních plniv (ocelová vlákna, uhlíková vlákna, uhlíkové nanotrubičky, niklový prášek atd.) do konvenčního betonu, čímž se zvyšuje schopnost detekovat napětí, praskání, zatížení a jiné poškození za současného zachování nebo zlepšení mechanických vlastností.

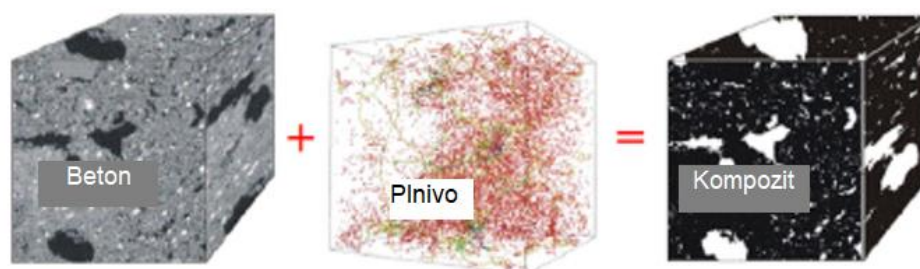
Technologie zpracování senzorického betonu se skládá z dispergování, formování a vytvrzování. Dispergování je nejdůležitější částí a velmi ovlivňuje rozložení plniva v matrici. Lití, vibrace, vytlačování, lisování a hydrotermální technologie lisování za tepla se používá pro zhutňování. Vytvrzování betonu se posuzuje podle stavu a stáří. Na základě těchto dvou hledisek se utváří vlastnosti pórů a hydratační produkty nebo se vyskytuje určitý podíl vody uvnitř kompozitu.

Funkční plniva se musí rovnoměrně rozptýlit v matrici betonu, aby se vytvořila rozsáhlá vodivá síť ve struktuře, která zajišťuje správnou schopnost detekce. Vodivá síť uvnitř materiálu se mění působením zatížení nebo vznikem deformací, což ovlivňuje elektrické parametry, mezi které patří např. elektrický odpor, kapacita nebo impedance.

Měřením elektrický parametrů lze tedy diagnostikovat trhliny, poškození za statických a dynamických podmínek, deformace apod [12].

3.4.1 Makroskopická struktura

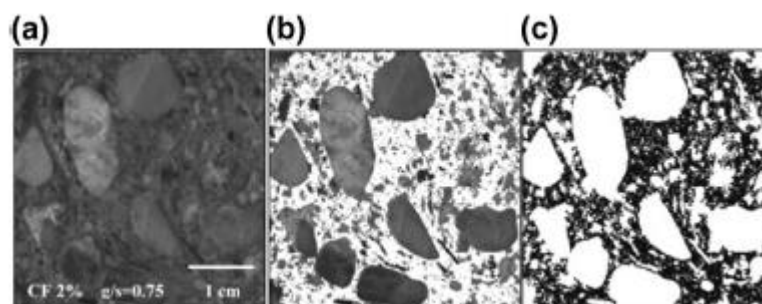
Senzorický beton se z hlediska makroskopické struktury vnímá jako dvoufázový materiál, který obsahuje funkční plnivo dispergované v matici betonu. Fáze funkčních plniv se mohou vyskytovat v jedné ze tří forem. Jedná se o vlákno, částici nebo kombinaci vláken a částice. Mnoho materiálů splňuje požadavky na vlastnosti funkčních plniv. Používá se např. o uhlíkové vlákno, uhlíkovou nanotrubičku, ocelové vlákno, niklový prášek, grafit či jejich kombinace [12].



Obr. 3. 5: Makroskopická struktura inteligentního betonu, který se skládá z betonu a plniva [12]

3.4.2 Mikroskopická struktura

Na mikroskopické úrovni se rozlišují tři úrovně distribuce v inteligentním betonu. Jedná se o distribuci funkčních plniv v pojivu, distribuci pojiva s funkčními plnivy mezi jemným kamenivem a distribuci jemného kameniva s pojivem a funkčními plnivy mezi hrubým kamenivem (viz Obr. 3. 6). Distribuci funkčních plniv v betonové matici ovlivňuje jejich koncentrace, geometrický tvar a metody zpracování [12].



Obr. 3. 6: Mikrostruktura betonu s uhlíkovými vlákny: a) obrázek bez digitálního zpracování, b) obrázek s digitálním zpracováním s cílem zvýraznění kameniva tmavými oblastmi, c) obrázek s digitálním zpracováním pro zvýraznění cementové pasty tmavými oblastmi [12].

3.4.3 Dispergování

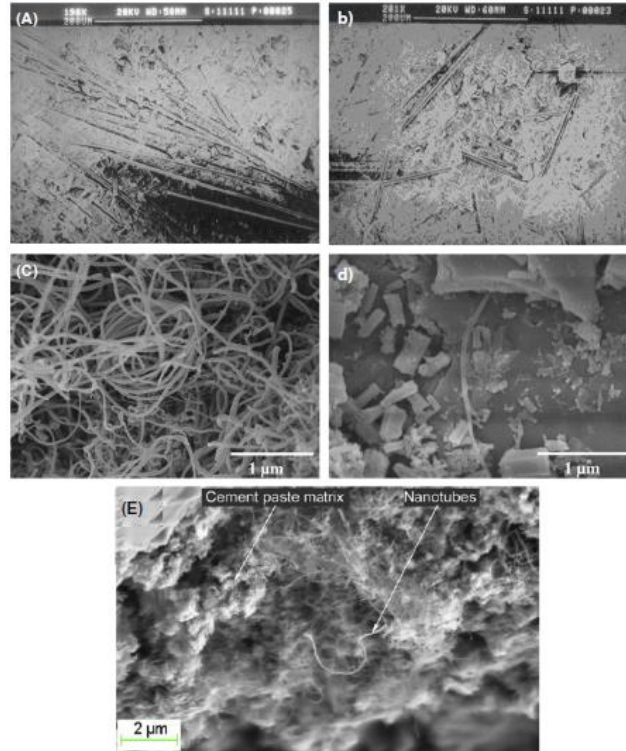
Pojem dispergování označuje míchání u betonů se samočinnou detekcí. Beton nabývá snímací schopnosti, pokud dojde k rovnoměrnému rozptýlení funkčního plniva v betonové matici, a zároveň je-li kamenivo rovnoměrně dispergováno v cementové pastě. Pokud jsou tyto požadavky splněny, vznikne efektivní elektrická síť. Účinnost dispergování závisí na procesu, metodě, zařízení a energii dodané během míchání.

Jednotlivé druhy funkčních plniv se přidávají do čerstvého betonu v různém pořadí. Mohou se tedy dodat jako první, poslední nebo současně s ostatními složkami (viz Tab. 3. 1). Grafitový prášek se vmíchává do čerstvého betonu na konci nebo současně s ostatními surovinami [12].

Tab. 3. 1: Vhodný proces dispergování pro různá funkční plniva [12]

Pořadí přidání funkčního plniva	Vhodná funkční plniva
První	Uhlíkové vlákno, uhlíková nanotrubička, uhlíkové nanovlákno, saze
Současně s ostatními složkami	Uhlíkové vlákno, ocelové vlákno, ocelová struska, magnetický popel, grafitový prášek
Poslední	Saze, ocelové vlákno, niklový prášek, grafitový prášek, polyvinylalkoholové vlákno

Disperze funkčních plniv se ověřuje pozorováním mikrostruktury, k čemuž se nejčastěji používá skenovací elektronový mikroskop (SEM) nebo optický mikroskop. Dále může analýza mikrostruktury proběhnout pomocí měření elektrického odporu, který závisí na vodivé síti v kompozitu. Pokud jsou funkční plniva rovnoměrně dispergována, vytvářejí vodivou síť s vyšší elektrickou vodivostí a menším elektrickým odporem, a proto se získají lepší snímací vlastnosti. Kromě těchto dvou metod existuje metoda čerstvé směsi a metoda pozorování vodného roztoku funkčních plniv. Princip metody čerstvé směsi spočívá v odebrání kousků směsi o stejné hmotnosti z různých míst čerstvého betonu. Poté se plnivo omyje, osuší, zváží a z výsledků se vypočte směrodatná odchylka hmotnosti plniva k účinnosti míchání. Metoda pozorování vodného roztoku souvisí s typem vybraného materiálu, jako je druh, koncentrace apod. Nízká koncentrace, velikost částic, geometrie tvaru, hydrofilní povrch funkčního plniva a vysoký poměr vody ku cementu přispívají k vyšší účinnosti dispergace [12].



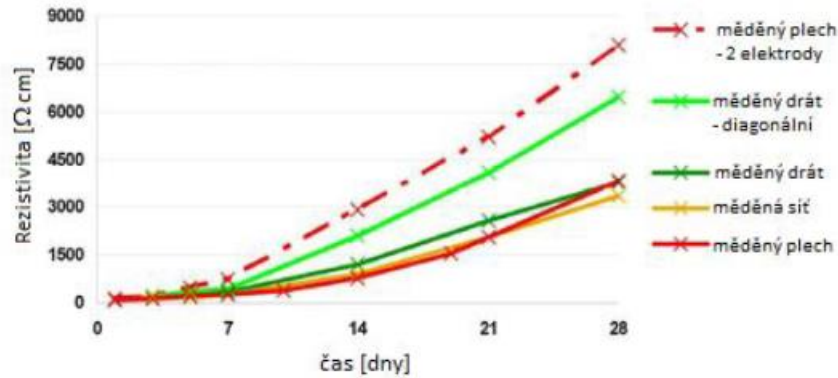
Obr. 3. 7: Srovnání disperze funkčních plniv ze skenovací elektronové mikroskopie (SEM), (A) špatná disperze uhlíkového vlákna, (B) dobrá disperze uhlíkového vlákna, (C) špatná disperze uhlíkových nanotrubiček, (D) dobrá disperze uhlíkových nanotrubiček, (E) SEM obrazy betonu s uhlíkovou nanotrubicí [12]

3.4.4 Typy snímaných signálů

Různé typy snímaných signálů slouží pro vyhodnocení vlastností chytrého betonu. Jedná se o pět typů elektrických parametrů, mezi které se řadí elektrický odpor, impedance, elektrická reaktance, elektrická kapacita nebo relativní dielektrická konstanta. Pokud se ke snímání signálu používá elektrický odpor, funguje to tak, že dojde-li k odlišnému rozložení vodivé sítě v kompozitech, elektrický odpor se změní [12].

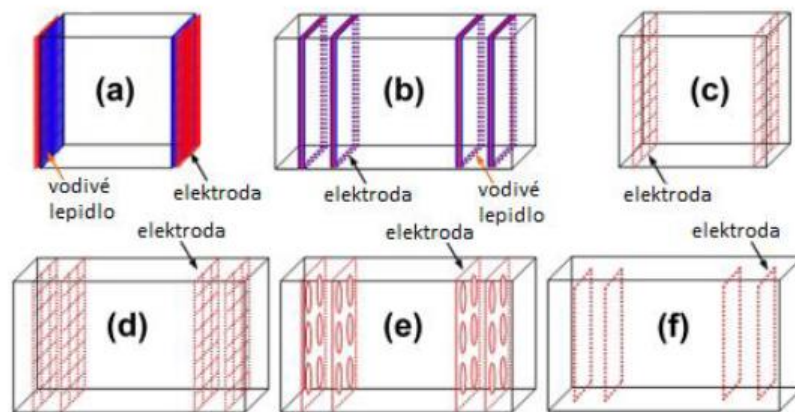
3.4.5 Výroba elektrod

Různé typy elektrod ovlivňují přesnost měření snímaného signálu. Při navrhování se musí zohlednit výběr materiálů, upevnění a rozmístění elektrod. Materiál by měl disponovat nízkým elektrickým odporem a stabilními elektrickými vlastnostmi. Tyto podmínky splňují kovové plechy (např. z mědi nebo nerezové oceli), kovové fólie, (měděné, nerezové nebo hliníkové), kovové sítě, měděné smyčky, kovové tyče, měděné pásy, měděné dráty, grafitová látka či vodivý nátěr (měděný, grafitový, se sazemi apod.).



Obr. 3. 8: Závislost měrného elektrického odporu betonu s uhlíkovým vláknem na čase z hlediska použití různých druhů měděných elektrod [12][13]

Elektrody se nejčastěji připevňují přichycením, kotvením, pokovením nebo sepnutím. Měření elektrických vlastností lze provádět systémem, který se skládá z dvou, tří nebo čtyř elektrod.



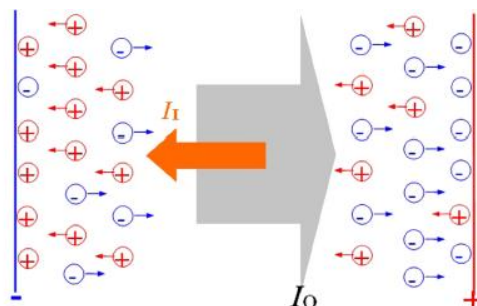
Obr. 3. 9: Varianty fixace a rozložení elektrod [12][13]

Metoda se třemi elektrodami se moc nepoužívá kvůli složitému nastavení elektrod. U metody se dvěma elektrodami jsou sloučené elektrody proudové i napěťové. V případě metody čtyř elektrod se umísťují dvě vnitřní napěťové elektrody a dvě vnější proudové elektrody. Závěrem lze říct, že i když je dvuelektrodový systém jednodušší na provedení, tak se preferuje systém se čtyřmi elektrodami, protože dochází k redukci přechodového odporu mezi elektrodami a betonem [12].

3.4.6 Metoda měření elektrického odporu

Měření elektrického odporu se nejjednodušeji provádí metodou stejnosměrného proudu (DC) s pevným napětím, které se aplikuje na zkušební vzorek. Během měření je využíváno konstantní elektrické pole, ale kvůli pohybu a agregaci iontů dochází k elektrické polarizaci v matici betonu (viz obr. 3. 10). Tento negativní jev lze eliminovat

bud' zaznamenáním změny odporu, která je způsobená polarizací nebo připojením stejnosměrného napětí s předstihem před zatížením kompozitu. Avšak nejvíce účinná metoda měření je použití působení signálů střídavého proudu se stejnou velikostí kladných a záporných špiček (AC). Mezi výhody patří vyšší stabilita a citlivost signálu [12].



Obr. 3. 10: Schéma působení elektrické polarizace v matrici [12]

3.4.7 Elektrická vodivost

Elektronová děrová a iontová vodivost patří mezi základní rozdělení elektrické vodivosti a v obou případech dochází k transportu. U elektronové vodivosti jsou náboje přenášeny volnými elektrony, zatímco v případě iontové vodivosti dochází k přenosu ionizovaných atomů nebo molekul. Elektrony a díry se nacházejí ve funkčních plnivech a ionty v cementové matrici. Elektronová děrová vodivost se dělí na kontaktní vedení, tunelové vedení a iontové vedení.

Přímý kontakt sousedních funkčních plniv vytváří vodivé spojení, které se označuje jako kontaktní vedení. Elektrony se přemísťují po vodivých cestách vytvořených z funkčních plniv.

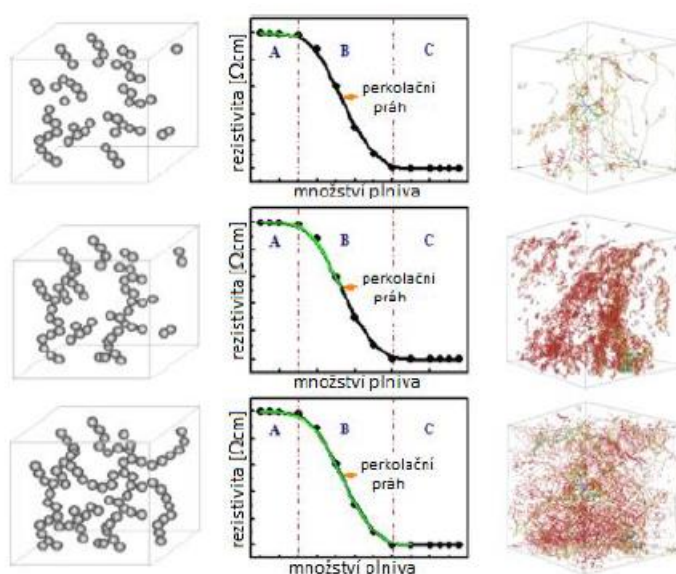
Tunelové vedení a emise elektronů patří mezi kvantové jevy. Elektrony skočí přes energetické bariéry mezi funkčními plnivými v betonové matrici. U obou případů nastává přenos elektronů mezi plnivými, které se navzájem nedotýkají, ale nachází se ve vzájemné blízkosti. Emise elektronů při nízkých napětích vyžaduje dostatečně silné elektrické pole, a proto se moc nevyužívá. Mezi výjimky se řadí, pokud některá funkční plniva mohou vytvořit intenzivní elektrické pole na ostrých hrotech, čímž se zredukuje tloušťka bariéry a dojde k emisi.

Hydratovaná cementová pasta obsahuje mezery, hydratovaný gel křemičitanu vápenatého a jiné pevné fáze. Ionty (hlavně Ca^{2+} a OH^-) se mohou rozpustit ve vodě zaplňující mezery, čímž dochází k iontové vodivosti. Zvyšuje se s přibývajícím množstvím volné vody v cementovém tmelu. Iontová vodivost vede k elektrické polarizaci, která

ovlivňuje stejnosměrný proud během měření elektrického odporu. Typ a koncentrace plniva působí na elektrickou polarizaci [12].

3.4.8 Vodivostní mechanismus bez zatížení

Vodivý beton vzniká přidáním funkčních plniv do matrice betonu. Vodivé vlastnosti souvisí s koncentrací funkčních plniv. Perkolační jev popisuje vodivostní charakteristická křivka. Perkolační práh je kritický jev. Dělí se do tří částí. Zóna A s vysokým odporem se nazývá izolační. Část křivky B s prudce se snižujícím odporem představuje perkolační zónu a zóna C disponuje nízkým odporem, takže se označuje jako vodivá [12][14].



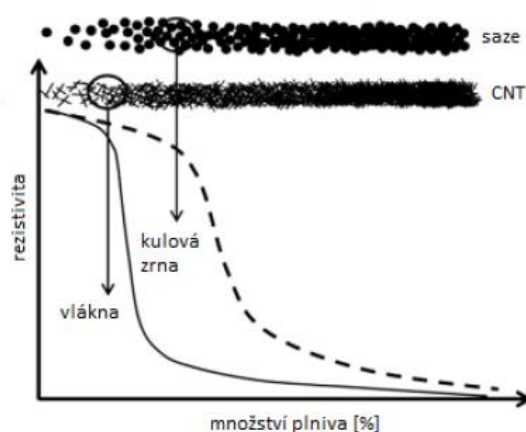
Obr. 3. 11: Změna elektrického odporu v závislosti na koncentraci plniva (horní řada ukazuje zónu A, střední řada zónu B a poslední řada zónu C) [12][13]

V zóně A je koncentrace funkčního plniva mnohem nižší než hodnota perkolačního prahu. Funkční plniva mezi sebou mají velké vzdálenosti, takže se omezí jejich shromažďování. Kompozit vykazuje vysoký odpor jako betonová matrice, protože se elektrony nedokážou pohybovat mezi funkčními plnivy.

V perkolační zóně B se vzdálenost začne zmenšovat se zvyšující se koncentrací funkčního plniva, čímž se začne tvořit vodivá cesta. Zvyšuje se vodivost kompozitu, protože stoupá pravděpodobnost elektronového přechodu. Před nastáním perkolačního prahu probíhá kontaktní vedení, tunelování, emise elektronů a iontové vedení, ale po jeho dosažení převládá iontová vodivost.

Ve vodivé zóně oblasti C se nachází více funkčního plniva, než se potřebuje pro vznik perkolačního prahu. Funkční plniva jsou mezi sebou v přímém kontaktu a zcela převládá kontaktní vedení.

Existuje závislost mezi elektrickým odporem a koncentrací funkčního plniva. Vlákenná funkční plniva, která disponují vysokým poměrem stran, modifikují více elektrickou vodivost i při nižších koncentracích v porovnání s částicovými plnivými kubického tvaru [12].



Obr. 3. 12: Závislost elektrického odporu na množství plniva u sazí s kulovými zrny a CNT s částicemi ve tvaru vláken [12][13]

3.5 Elektrická vodivost silikátových kompozitů

Na trhu se zvyšuje poptávka po senzorech vlhkosti, které by monitorovaly stav materiálu. Jedná se zejména o průmyslová odvětví, mořské nebo říční oblasti, oblast jaderné energetiky, dopravy atd. Existuje několik metod, jimiž lze zaznamenávat aktuální situaci. Patří mezi ně např. senzory z optických vláken, konkrétní měření elektrické impedance, dielektrická permitivita, kapacitní snímače apod. Geopolymery se jeví také jako optimální senzory, jelikož vykazují chemickou stabilitu, elektrickou vodivost v rozsahu 10^{-6} až $10^{-3} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ podle složení receptury, přilnavost k betonovému podkladu a obdobné mechanické a tepelné vlastnosti jako portlandský cement. Molekulární strukturu geopolymery tvoří 3D síť, které jsou složené z Si–O–Al a Si–O–Si vazeb. Pokud jsou ionty alkalických kovů vnášeny do materiálu roztokem aktivátoru, dochází ke vzniku elektrické vodivosti geopolymery. Část iontů se aktivně naváže na záporně nabitou aluminosilikátovou matici a zbývající ionty vykonávají pohyb, což je částečně způsobeno díky neuspořádané struktuře [15][16].

Na základě výzkumu lze shrnout, že s rostoucím obsahem vlhkosti a chloridů dochází k exponenciálnímu poklesu elektrického odporu, což je způsobeno iontovou a vlhkostní vodivostí v matrici. Avšak pokud se porovnávají dva vzorky o stejném obsahu vlhkosti, ale u jednoho se vyskytuje vyšší koncentrace síranů, tak se u něho naměří i nižší hodnota elektrického odporu. Vlhkost způsobuje korozi výztuže a degradaci struktury v železobetonu. Depasivace oceli nastává poklesem pH roztoku pórů v důsledku karbonatace nebo přítomností chloridových iontů na rozhraní betonu a oceli. Degradace výztuže v železobetonu je velmi drahá položka v globálním rozpočtu, která činí kolem 350 miliard ročně, a proto se kladou vysoké požadavky na nedestruktivní zkoušení [15][16][17].

3.5.1 Porovnání elektrické vodivosti betonu a geopolymérů

V průběhu let proběhla rozsáhlá řada studií zaměřená na mechanické chování geopolymérů, avšak tématu elektrické vodivosti se nevěnovalo tolik pozornosti. Na základě výzkumu Hanjitsuvana a kol. [18] se zjistilo, že se zvyšující se koncentrací hydroxidu sodného NaOH roste elektrická vodivost geopolymerní popílkové pasty s vysokým obsahem vápníku, v důsledku silnějšího průběhu geopolymery. Paykaniti a kol. [19] objevili, že elektrická vodivost popílkového geopolyméru se mění v závislosti na obsahu uhlíkových vláken [16].

Alkalicky aktivované materiály vedou více elektrický proud než beton, protože obsahují alkalický aktivátor s několika vodivými ionty K^+ , OH^- , Na^+ . Jejich kompaktnější a hutná struktura vytváří více elektrických obvodů, takže se snižuje elektrický odpor a zároveň dochází ke snadnějšímu transportu iontů. Teplota vytvrzování ovlivňuje pevnost, distribuci pórů a mikrostrukturu. Při zvýšení teploty dojde k rychlému nárůstu elektrického odporu, což je spojeno s urychlením procesu geopolymeryzace a v matrici vznikne stabilní elektricky vodivá cesta [16][20].

Ve srovnání s alkalicky aktivovanými materiály se beton chová více jako elektrický izolant. Jeho elektrický odpor se pohybuje v rozmezí $10^3 \Omega \cdot m$ u nasyceného betonu vodou a $10^9 \Omega \cdot m$ pro suchý beton. To znamená, že se zvyšujícím se obsahem vody elektrický odpor klesá. Velikost měrného odporu souvisí s mikrostrukturou cementové matrice, strukturou a distribucí velikosti pórů a pórovitostí. Zároveň se jedná o funkci koncentrace iontů a jejich pohyblivosti v roztoku pórů. Cementové kompozity obsahují volné ionty ve svém roztoku, které způsobují elektrickou polarizaci při aplikaci konstantního elektrického pole. Měřený odpor způsobený polarizací nelineárně narůstá,

a proto nelze použít pro měření nejjednodušší zkušební metodu stejnosměrného proudu. Tento účinek může být eliminován několika způsoby. Mezi ně patří měření změny odporu vlivem působení polarizace nezatíženého vzorku, aplikování stejnosměrného pole určitý čas před samosnímacími testy pro vyrovnání odporu, dvoufázové měření stejnosměrného proudu nebo použití střídavého proudu. Poslední zmiňovaná metoda se objevuje nejčastěji. I když má nevýhodu, že se při jejím použití objevuje polarizace. Ta se však může odstranit zvyšováním frekvence [20].

Výsledky pro porovnání elektrických vlastností portlandského cementu a alkalicky aktivované strusky vychází tak, že odpor portlandského cementu je přibližně devětkrát větší než odpor alkalicky aktivované struskové malty při nižších frekvencích. I když se vzorky vysuší při teplotě 105 °C, než se začnou měřit elektrické vlastnosti, může se v nich vyskytovat voda. Po zvýšení frekvence na 500 Hz se hodnoty elektrického odporu shodují. Alkalicky aktivovaná strusková malta obsahuje zvýšenou koncentraci vodivého elektrolytu v roztoku pórů a částice železa, jelikož se jedná o vysokopecní strusku. Vysoce alkalické prostředí matrice zajišťuje pasivaci, takže nedochází ke korozi a částice se chovají jako vodivá příměs, ale neúčastní se alkalické aktivace. Navíc alkalicky aktivovaná strusková malta obsahuje rozpustné ionty Na^+ , zatímco v pórovém roztoku cementové pasty se vyskytuje převážně špatně rozpustný $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Přestože je mezní iontová vodivost Ca^{2+} iontů vyšší než Na^+ , jejich nižší rozpustnost a nižší obsah vody redukuje vodivost cementové pasty [20].

3.5.2 Vodivé příměsi v kompozitech

Chytrý beton s vodivými příměsemi se v současnosti používá pro mnoho účelů. Často je využívám pro odmrazování a tání sněhu na silnicích a jak již bylo zmíněno, vodivostní složka dokáže detekovat poškození betonu [21].

V současnosti se nejčastěji používají dva druhy elektricky vodivých příměsí. Jedná se o kov a uhlík. Mezi kovové příměsi patří např. ocelové vlákno nebo ocelová struska, u nichž klesá elektrická vodivost se zvyšující se dobou vytvrzování, protože dochází k tvorbě pasivního filmu na povrchu kovové příměsi v roztoku pórů. Uhlíkové příměsi zahrnují např. grafitový prášek, saze, uhlíková vlákna či uhlíkové nanotrubičky. S malým množstvím se obtížně dosahuje lepších elektrických vlastností. Avšak se zvětšujícím se obsahem se redukuje pevnostní charakteristiky a zpracovatelnost [22].

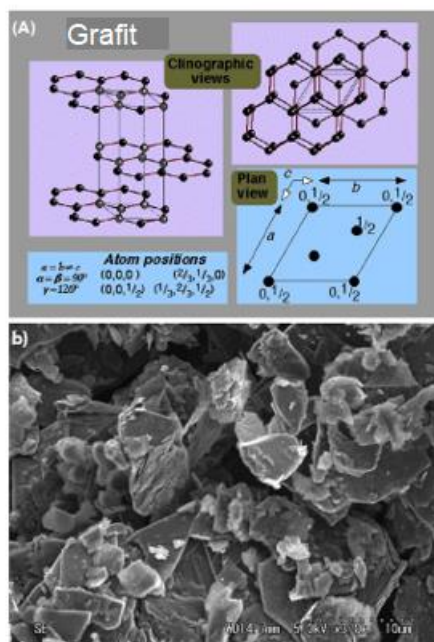
Pokud se jako vodivá příměs v kompozitech používají uhlíková vlákna, elektrická vodivost závisí na jejich koncentraci a perkolačním prahu. Pod prahovou hodnotou se mění elektrický odpor v závislosti na teplotě a čase vytvrzování, ale nad ní rezistivita monotónně klesá podle množství uhlíkových vláken. Přítomnost uhlíkových vláken o určitém obsahu zlepšuje mechanické i elektrické vlastnosti. Geopolymer vykazuje křehkost, a proto se přidávají nejčastěji krátká vlákna, poněvadž se jedná o jednoduchou výrobu s dobrou manipulací a nízkými náklady. Mechanismus vedení je kombinací iontové a elektrické vodivosti [19]. Bylo zjištěno, že velké poměry uhlíkových vláken nebo nanotrubic mohou usnadnit tvorbu vodivé sítě i při nižším zastoupení v matrici [22]. To znamená, že kvůli delším vláknům mírně klesá odpor a zvyšuje se pevnost kompozitu. Podmínkou pro jejich použití je dobrá zpracovatelnost a soudržnost. Toho lze dosáhnout, pokud se použije vyšší poměr hrubé ku jemné frakci kameniva, avšak dojde ke zvýšení elektrického odporu. Elektrickou vodivost lze zvýšit malými dávkami činidla, pokud nastává rozmezí prahové hodnoty perkolace nebo rovnoměrným rozptýlením uhlíkových vláken v kompozitu [23]. Z ekonomického hlediska a výsledků mechanických a elektrických vlastností je nejlepší pro výrobu chytrého betonu uvažovat, že se prahová hodnota vyskytuje pro dávkování 1,5 % uhlíkových vláken ku hmotnosti cementu [24].

Grafen se používá v materiálech na bázi cementu pro zlepšení elektrických vlastností. Navíc přispívá dobrými tepelnými a mechanickými vlastnostmi. Na základě experimentu se zjistilo, že když koncentrace grafenu dosáhne hodnoty perkolačního prahu, dojde ke zvýšení elektrické vodivosti o několik řádů, protože nastává tvorba vodivé sítě v celém objemu kompozitu. Pro vodivost systému je důležité správné rozptýlení vodivé příměsi. Doba vytvrzování zásadně ovlivňuje elektrickou vodivost pouze pod perkolačním prahem. S vyšším obsahem grafenu v cementovém kompozitu se snižuje elektrický odpor. Při porovnání suchého a vlhkého vzorku se zjistilo, že pod hodnotou perkolace je hodnota elektrické vodivosti nižší v suchém stavu než ve vlhkém. Avšak po překročení perkolačního prahu vykazuje vysušený kompozit vyšší elektrickou vodivost než vlhký [22]. Cementový kompozit bez obsahu grafenu, který se ale jinak vyrobí ze stejné receptury, má v suchém stavu vyšší elektrický odpor [25].

Obsah grafitu v alkalicky aktivované struskové maltě přináší benefit pouze do 10 %, protože dochází ke zlepšení elektrických vlastností. Ale poté při vyšším množství dochází k silnému zhoršení mechanických vlastností. To je způsobeno tím, že průměr pórů v matrici struskové malty se pohybuje v rozmezí 1 až 10 μm . Přidáním

grafitového prášku o 10 hmotnostních % se objevuje malé zvýšení gelových pórů s průměrem 20 nm, ale dochází k vytvoření většího počtu pórů o průměru větším než 7 μm . Množství nově vytvořených větších pórů pravděpodobně souvisí s částečnou delaminací grafitových destiček. To má za následek zvýšení celkové pórovitosti a snížení objemové hmotnosti a pevnosti [26]. Při pozorování mikrostruktury cementového kompozitu s obsahem částic grafitu lze vidět, že je důležité správné dávkování. Grafit totiž vykazuje aglomerační účinek kolem hydratačních produktů v betonu, což má následně špatný vliv na mechanické vlastnosti betonu. Navíc při malém množství nedojde k úplnému vytvoření vodivé cesty [27][28].

Grafit je polymorfní uhlík. Disponuje vrstvenou a rovinnou strukturou. V každé vrstvě se nachází atomy uhlíku uspořádané do voštinové mřížky s oddělením 0,142 nm a vzdáleností mezi rovinami 0,335 nm. Kovalentní vazby atomů nemají pevné spojení mezi sebou do jednoho celku, takže je grafit měkký materiál. Rozlišují se podle výskytu a původu tři formy: vločkovitá, krystalická a amorfní (viz obr. 3. 13). Grafit se vyznačuje dobrou tepelnou a elektrickou vodivostí. Má vysokou žáruvzdornost a stabilní chemické vlastnosti [12].

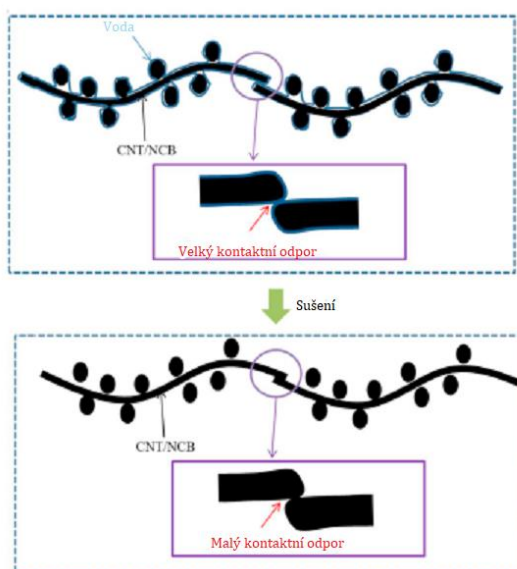


Obr. 3.13: Grafitový prášek, a) Struktura grafitu, b) Mikrostruktura grafitového prášku [12]

3.6 Vliv vlhkosti na elektrické vlastnosti

3.6.1 Kompozity s příměsemi

Kompozitní plniva se přidávají do betonu za účelem zlepšení piezorezistivních vlastností, avšak ty významně ovlivňuje obsah vody. Je totiž nutné najít optimální dávku vody, aby došlo k přímému kontaktu částic příměši mezi sebou. S redukcí obsahu vody se snižuje kontaktní odpor mezi plnivy a zvyšuje se smrštění, čímž dochází k horší citlivosti piezorezistivních vlastností. Stejnoseměrný elektrický odpor kompozitního plniva klesá se snížením obsahem vody, ale stejnoseměrný elektrický odpor obyčejného materiálu na bázi cementu se zvyšuje se snížením množstvím vody. To dokazuje, že snížení obsahu vody přispěje ke snížení kontaktního odporu mezi částicemi plniva (viz obr. 3. 14) [29][30][31] .



Obr. 3. 14: Elektrický kontaktní odpor mění se v závislosti na vlhkosti [30]

Několik studií se zabývá závislosti elektrické vodivosti na vlhkosti. V jedné z nich je zaznamenáno měření elektrického odporu u malt různých receptur (např. obyčejný portlandský cement – OPC, OPC s 5 hmotnostními % křemičitých úletů, 40 nebo 70 hmotnostními % strusky apod.) a odlišných poměrů vody k pojivu v rozmezí 0,38 až 0,53. Vzorky se podrobily prostředí s relativní vlhkostí od 100 % do 33 %, přičemž se distribuce vlhkosti měnila v každé struktuře podle okolních podmínek. Tato studie vychází z toho, že iontová difúze a elektrolytické vedení mají společné, že dochází k náhodnému pohybu nabitých částic, a proto se mohou porovnávat. Pohyb způsobují různé mechanismy a je udržován gradienty koncentrací a rozdíly elektrického potenciálu. Z výsledků lze vyvodit závěr, že při 100% nasycení materiálu je velká elektrická vodivost. Malty s vyšším

poměrem vodního součinitele mají vyšší vodivost při vysoké relativní sorpční vlhkosti. Hlavní transportní cesty pro vodu v kapilárních pórech se vyprazdňují, když relativní sorpční vlhkost klesá na určitou hodnotu. Po jejím překročení dochází k prohození a vyšší vodivost začínají vykazovat malty s nízkým vodním součinitelem. To se pravděpodobně děje, protože obsahují více gelu a propojených gelových pórů. U vzorků s obsahem strusky dochází k rychlejšímu poklesu vodivosti v porovnání s ostatními pojivy [32].

Cementové kompozity s obsahem ocelové strusky přispívají k lepšímu monitorování elektrických vlastností, pokud obsahují větší množství oxidů železa. Vlhkost na elektrické vlastnosti působí tak, že u vysušeného betonu dochází k rapidnímu nárůstu elektrického odporu [33].

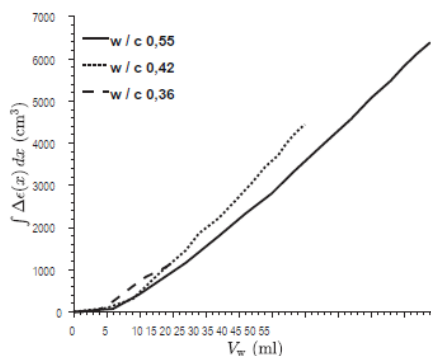
Podle výběru vodivé příměsi je nutné upravit vodní součinitel. Některé vodivé příměsi zvyšují absorpci vody, jedná se např. o ocelové hobliny. Avšak při použití grafitového prášku v kompozitech, lze snížit obsah vody a tím zlepšit trvanlivost [34].

3.6.2 Beton a cementové malty

Na základě výzkumu je potvrzeno, že rezistivita betonu přímo souvisí se sorpční vlhkostí a také ji ovlivňuje teplota. Elektrický odpor betonu nabývá různých hodnot hlavně v závislosti na vlhkosti, pórovitosti, distribuci velikosti pórů, koncentraci a pohybu iontů v roztoku pórů. Vodivou fází betonu představuje roztok pórů a při dosažení stavu nasycení se zvyšuje rezistivita. Avšak u nesaturovaného betonu nebo malty neznamena zvýšená pórovitost, že dojde automaticky ke zvýšení odporu při stejné relativní sorpční vlhkosti. Hygroskopická rovnováha zahrnuje pouze póry do určité velikosti při příslušné relativní sorpční vlhkosti, a proto je distribuce pórů důležitější než jejich celkový objem [35][36].

Pokud se relativní sorpční vlhkost v pórech betonu pohybuje pod hodnotou 40–45 %, vlhkost je absorbována a silně vázána na C-S-H gely a povrch kapilárních pórů. Po překonání této hranice nastává kondenzace v malých kapilárních pórech. Experimentálně je ověřeno, že téměř nulová vodivost se nachází při relativní sorpční vlhkosti nižší než 42 %, protože není přítomna volná voda [35].

Rozdílná hodnota vodního součinitele ovlivňuje schopnost pohlcování vody. Ze závislosti objemu absorbované vody, lze vyvodit, že vzorek cementové malty s nejvyšším vodním součinitelem pohlcuje nejvíce vody. Po pár dnech rychlost absorpce významně klesá u všech vzorků [37].



Obr. 3. 15: Závislost integrované změny permitivity jako funkce na absorpci vody pro směsi s různým vodním součinitelem 0,55; 0,42 a 0,36 [37]

Při porovnání závislostí elektrického odporu na obsahu vlhkosti hydrofobizované a nehydrofobizované malty se ukazuje, že vzorky cementové malty s hydrofobní impregnací vykazují snížený stupeň nasycení, jelikož voda nemohla proniknout do menších pórů. Hypotéza podle Carmelieta a kol. [38] říká, že by se část subsystému pórů střední velikosti mohla ucpat kvůli hydrofobní úpravě. Porovnání obou odporových charakteristik vzorků znázorňuje, že nižších hodnot elektrického odporu dosahují vzorky s hydrofobní impregnací [39].

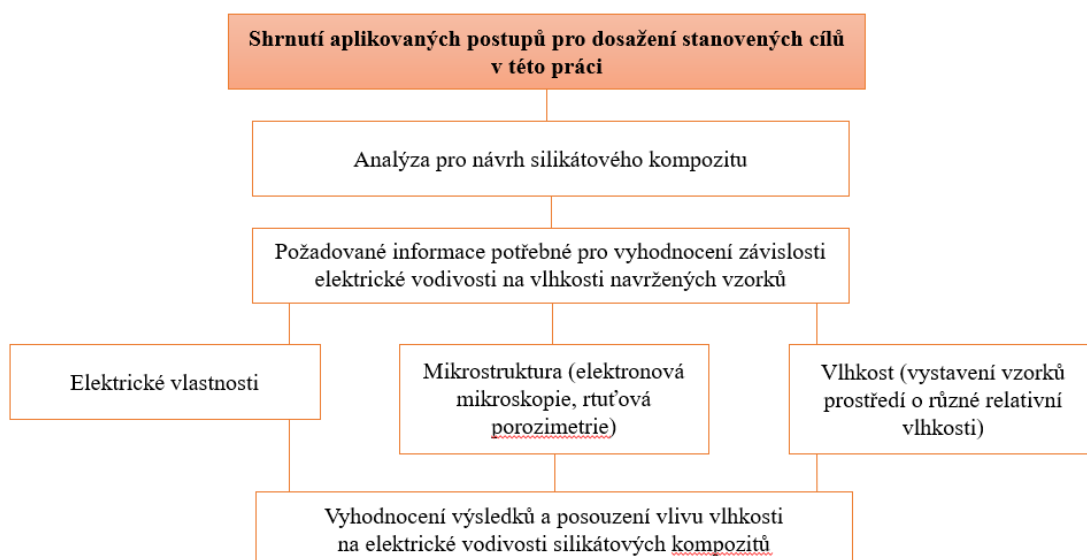
Pokud je kladen důraz na lepší samosnímací schopnosti betonu, používají se ty, které obsahují nižší obsah slínku. Elektrická impedance zůstává určitou dobu konstantní a po dosažení určitého objemu vody, který lze detekovat, začne klesat spolu s absorpcí vody [40].

Jestliže na beton působí mechanické namáhání, může nastat vlivem tlaku přemístění roztoku v pórech do mikrotrhliny. To se projeví jako pokles elektrického odporu, avšak při poškození betonu dochází k jeho nárůstu [41].

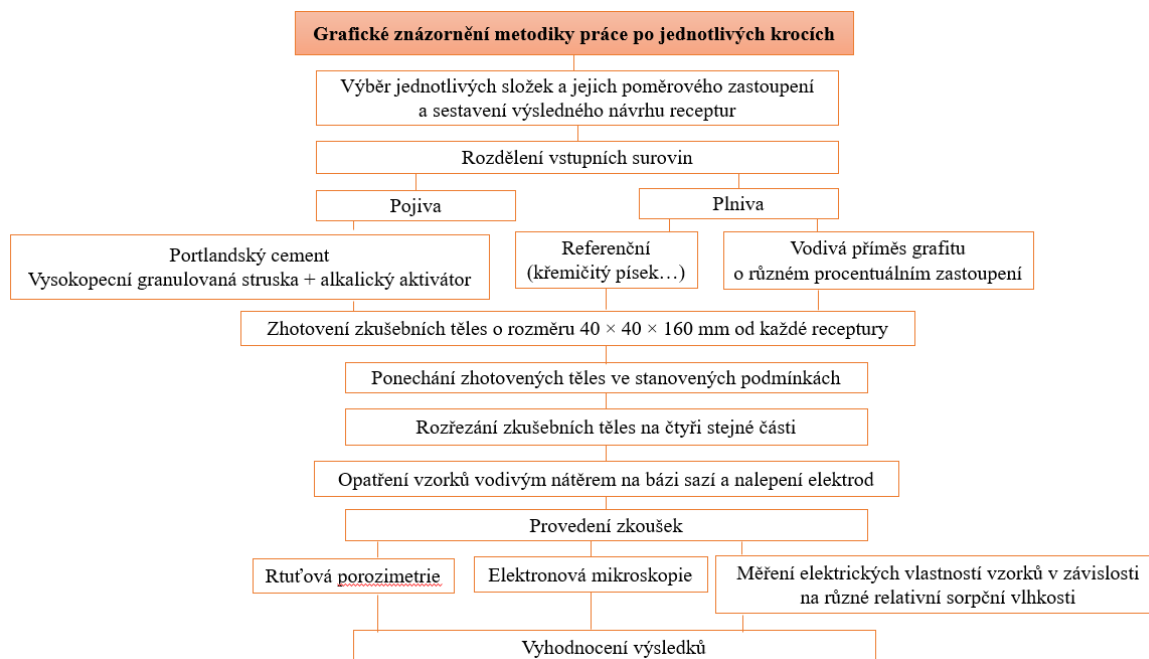
4 Experimentální část

4.1 Cíle a metodika práce

Experimentální část spočívá v porovnání vlivu vlhkosti na elektrické vlastnosti vzorků s alkalicky aktivovanou struskou a cementem. Zkušební tělesa na bázi cementu (CEM) a alkalicky aktivované strusky (AAS) obsahují procentuální zastoupení grafitu v rozmezí 0 % až 18 %. Závislost elektrické vodivosti na vlhkosti je vyhodnocována vystavením vzorků prostředí o relativní vlhkosti v rozmezí 0 % až 100 %, což je prováděno uložením v exsikátoru, a nakonec vysušením ve vakuové sušárně při teplotě 80 °C. V průběhu vysoušení se vzorky váží, čímž se zjišťuje relativní sorpční vlhkost. Po každém určení relativní sorpční vlhkosti materiálu se měří impedance ve frekvenčním rozsahu 40 Hz až 1 MHz, ze které se následně počítá měrný elektrický odpor. Stanovení se provádí při konstantní pokojové teplotě a tlaku. Pro správné posouzení výsledků se provádí analýza mikrostruktury pomocí skenovací elektronové mikroskopie a rtuťové porozimetrie.



Obr. 4. 1: Shrnutí aplikovaných postupů



Obr. 4. 2: Metodika práce v jednotlivých krocích

4.1.1 Etapa 1 – Použité materiály

První sada trámečků obsahuje vysokopecní granulovanou strusku o chemickém složení, které je uvedeno v tabulce 4. 1.

Tab. 4. 1: Chemické složení vysokopecní granulované strusky

Chemické složení	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	SO ₃
Zastoupení (%)	8,543	36,720	0,096	39,796	9,934	0,332	0,026	0,242	1,011

Pro výrobu trámečků s obsahem cementu, je použit CEM I 42,5 R ze závodu Mokrá, který náleží společnosti Českomoravský cement, a.s. Cement obsahuje 95 % až 100 % portlandského slínku a pod 5 % doplňující složky. Chemické složení je převzato z technického listu (viz Tab. 4. 2 a 4. 3). Cement CEM I 42,5 R vykazuje rychlý nárůst pevností, vysoké počáteční pevnosti, rychlý vývin hydratačního tepla a vyšší celkové hydratační teplo.

Tab. 4. 2: Chemické složení cementu CEM I 42,5 R

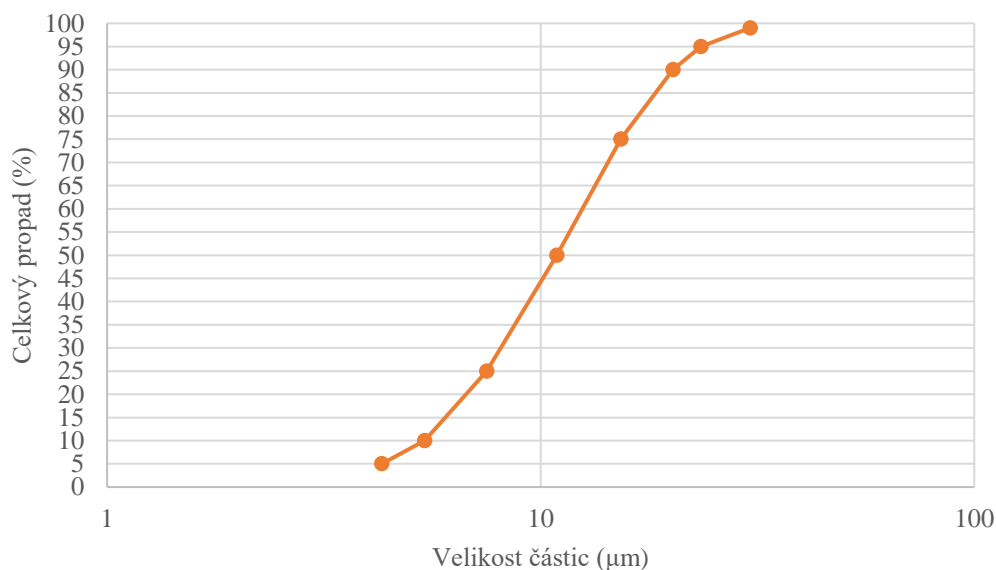
Chemické složení	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Cl ⁻	K ₂ O	Na ₂ O
Zastoupení (%)	63,7	19,7	4,7	3,3	1,4	3,09	0,059	0,73	0,16

Tab. 4. 3: Chemické složení cementu CEM I 42,5 R

Chemické složení	Na ₂ O ekvivalent (%)	Nerozpustný zbytek (%)	Ztráta žháním (%)
Zastoupení	0,64	0,67	3,37

Křemenný písek o třech frakcích PG1 až PG3 se používá jako plnivo. Maximální velikost zrna činí 2,5 mm.

Grafitový prášek, který je vyráběn v Týnu nad Vltavou, se přidává pro zvýšení elektrické vodivosti. Smíchává se s 2% Tritonem X-100, jelikož funguje jako dispergační činidlo.



Obr. 4.3: Vyhodnocení laserové granulometrie pro grafitový prášek

Lukosan S se dováží z Lučebních závodů a. s. Kolín. Je to odpěňovací přísada, která pomáhá eliminovat tvorbu velkých pórů, protože dokáže zachycovat vzduch během míchání. Používá se 1% roztok čistícího prostředku na bázi siloxanu. Hustota Lukosanu S nabývá hodnot v rozmezí $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ až $1050 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Susil je sušené vodní sklo, který v minulosti vyráběly Lučební závody a. s. Kolín. Jeho silikátový modul se rovná dvěma. Vyskytuje se v práškové formě a kvůli horší rozpustnosti se nepoužívá v kombinaci s jinými příměsemi kromě strusky.

Výsledky stanovení velikosti částic pomocí laserové granulometrie jsou uvedeny pro grafitový prášek, vysokopecní granulovanou strusku a cement CEM I 42,5 R v Tab. 4. 4.

Tab. 4. 4: Vyhodnocení velikosti částic pomocí laserové granulometrie

	d₁₀	d₅₀	d₉₀
Vysokopecní granulovaná struska (μm)	3,2	13,8	41,0
Cement CEM I 42,5 R (μm)	7,1	42,5	112,9
Grafitový prášek (μm)	5,4	10,9	20,2

4.1.2 Etapa 2 – Receptury

Praktická část zahrnuje vytvoření třech trámečků o rozměru 40 × 40 × 160 mm od každé receptury. Vzorky obsahují jako pojivovou složku cement nebo strusku. Proměnlivou složkou je grafit, který se vyskytuje poměrově k pojivové složce v obsahu 0 % až 18 %. Křemenný písek slouží jako plnivo. Záměsová voda je přidávána tak, aby se konzistence u jednotlivých směsí nelišila.

Tab. 4. 5: Složení struskových vzorků s proměnlivým obsahem grafitu na jednu trojformu o rozměrech 40 × 40 × 160 mm

	Množství grafitu vztažené na hmotnost pojivové složky pro AAS (%)			
	0 (Ref)	6 (G6)	12 (G12)	18 (G18)
Vysokopecní granulovaná struska (g)	450	450	450	450
Susil MP 2,0 (g)	90	90	90	90
Písek PG1–PG3 (g)	1350 (3 × 450)	1350 (3 × 450)	1350 (3 × 450)	1350 (3 × 450)
Grafit (g)	-	27,0	54,0	95,0
2% Triton X-100 (g)	-	14	28	42
1% Lukosan S (g)	-	10	20	30
Voda (g)	190	186	195	235

Tab. 4. 6: Složení receptur cementových trámeček s měnícím se množstvím grafitu na jednu trojformu o rozměrech 40 × 40 × 160 mm

	Množství grafitu vztažené na hmotnost pojivové složky pro CEM (%)			
	0 (Ref)	6 (G6)	12 (G12)	18 (G18)
Cement CEM I 42,5 (g)	450	450	450	450
Písek PG1–PG3 (g)	1350 (3 × 450)	1350 (3 × 450)	1350 (3 × 450)	1350 (3 × 450)
Grafit (g)	-	27,0	54,0	95,0
2% Triton X-100 (g)	-	14	28	42
1% Lukosan S (g)	-	10	20	30
Voda (g)	190	180	195	230

4.1.3 Etapa 3 – Zhotovení a příprava zkušebních těles pro měření

Od každé receptury jsou vyrobeny tři trámečky o rozměru 40 × 40 × 160 mm podle uvedeného složení, viz Tab. 4.5 a Tab. 4.6.

Vzorky s obsahem strusky se po navážení složek začínají připravovat tak, že se rozdrťí velké hrudky Susilu a rozpustí se v části vody. Přidá se struska a směs se zhomogenizuje v míchačce. Grafit s 2% Tritonem X-100 se smíchají zvlášť v kádince, do které se opět přidá potřebný díl vody, aby došlo k propojení složek. Obsah kádinky se přemístí do míchačky a obě připravené směsi se promíchají. Nakonec se přidávají postupně tři frakce křemičitého písku od nejjemnější po nejhrubší a odpěňovací přísada Lukosan S. Naplní se předem vymazané trojformy a proběhne hutnění na vibračním stolku. Po uplynutí 24 hodin se vzorky odformují a uloží do vodní lázně o teplotě 20 °C po dobu 28 dnů.

Cementové trámečky se po navážení surovin zhotovují tak, že se nejprve v míchačce smíchá cement s částí vody. Grafit a 2% Triton X-100 se ručně promíchá s určitým hmotnostním podílem vody v kádince, a poté se převede do míchačky. Proběhne homogenizace všech složek. Jako poslední se přisypou tři frakce křemičitého písku od nejjemnější po nejhrubší a nalije se odpěňovací přísada Lukosan S. Do vymazané trojformy se nadávkuje připravená směs a vzorky se zhutní na vibračním stolku. Ponechají se 24 hodin při laboratorní teplotě a po odformování se uloží do vodní lázně o teplotě 20 °C po dobu 28 dnů.

Všechny připravené trámečky se rozřezají na čtyři stejné části. Strany, kterými byl veden řez a ty s nimi rovnoběžné, se vyplní pomocí štetce vodivým nátěrem na bázi

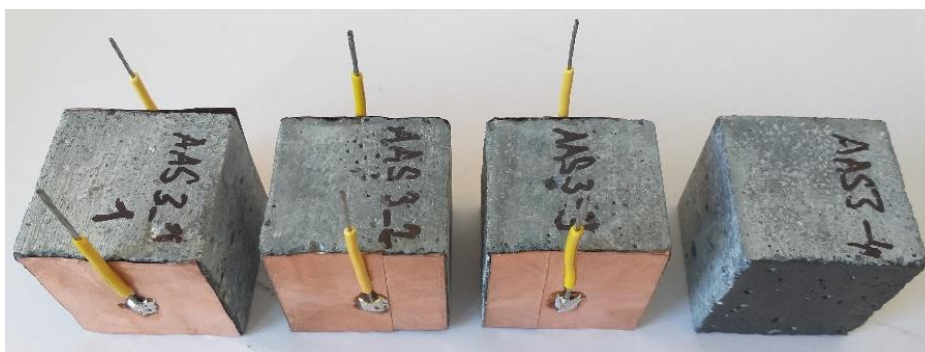
uhlíku. Po uschnutí vodivého nátěru se na celou plochu stran nalepí měděná páska, která tvoří elektrody.



Obr. 4. 4: Nařezaný trámeček na čtyři části o rozměru $40 \times 40 \times 160$ mm



Obr. 4. 5: Natírání dvou protilehlých stran vodivou uhlíkovou pastou



Obr. 4. 6: Nalepení elektrod

4.1.4 Etapa 4 – Prováděné měření a zkušební metody

Vzorky se ponechají před měřením ve vodní lázni po dobu 24 hodin, aby došlo k jejich 100% nasycení. Následně jsou přemístěny do exsikátoru, kde jsou uloženy nad vodou pro udržení 100% stavu nasycenosti. Pomocí výměny náplně v exsikátoru se snižuje relativní vlhkost vzduchu a vzorky se po časových úsecích váží, čímž se sleduje změna relativní sorpční vlhkosti materiálu. Po ponechání nad vodou se dále používá nasycený roztok chloridu sodného, který navozuje 77% relativní vlhkost vzduchu. Poté jsou vzorky ponechány nad 30% roztokem hydroxidu sodného, což odpovídá relativní vlhkosti vzduchu kolem 40 % a na závěr se pro postupné vysoušení vzorků aplikuje hydroxid sodný v pevném skupenství, protože je hygroskopický, takže pohlcuje vzdušnou vlhkost a má schopnost ji v sobě zadržet. Nakonec se vzorky umístí do vakuové sušárny, kde jsou vysušeny při teplotě $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při každém zjišťování relativní sorpční vlhkosti materiálu se měří impedance ve frekvenčním rozsahu 40 Hz až 1 MHz a z výsledného

souboru dat jsou vytvořeny závislosti měrného elektrického odporu na relativní sorpční vlhkosti materiálu.



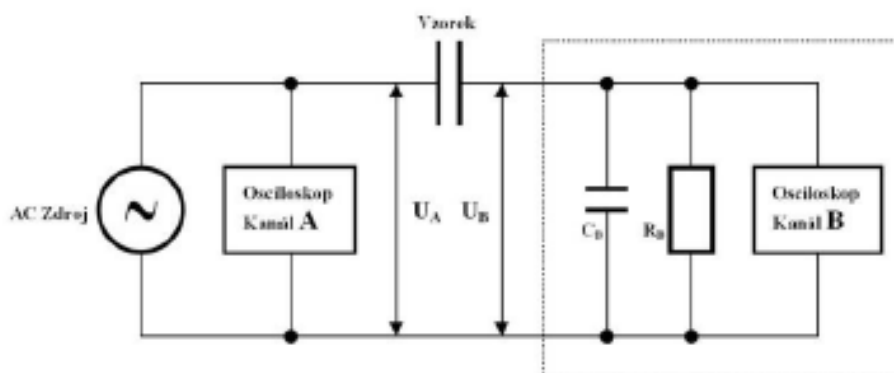
Obr. 4. 7: Uložení vzorků v exsikátoru

Analýza elektrických vlastností na připravených vzorcích je uskutečňována prostřednictvím impedanční spektroskopie v rozsahu od 40 Hz do 1 MHz. Impedance je fyzikální veličina, která vyjadřuje zdánlivý elektrický odpor, jenž závisí na frekvenci a je označována písmenem Z . Kvůli tomu že určuje závislost dvou veličin, je definována komplexním číslem a lze znázornit jako vektor v komplexní rovině. Komplexní číslo se skládá z reálné a imaginární složky. Reálnou složku impedance představuje elektrický odpor a imaginární složkou je reaktance. Zapisuje se pomocí vztahu, viz 4. 1, kde Z je impedance, R představuje elektrický odpor a X_C je označena kapacitní reaktance [26][42].

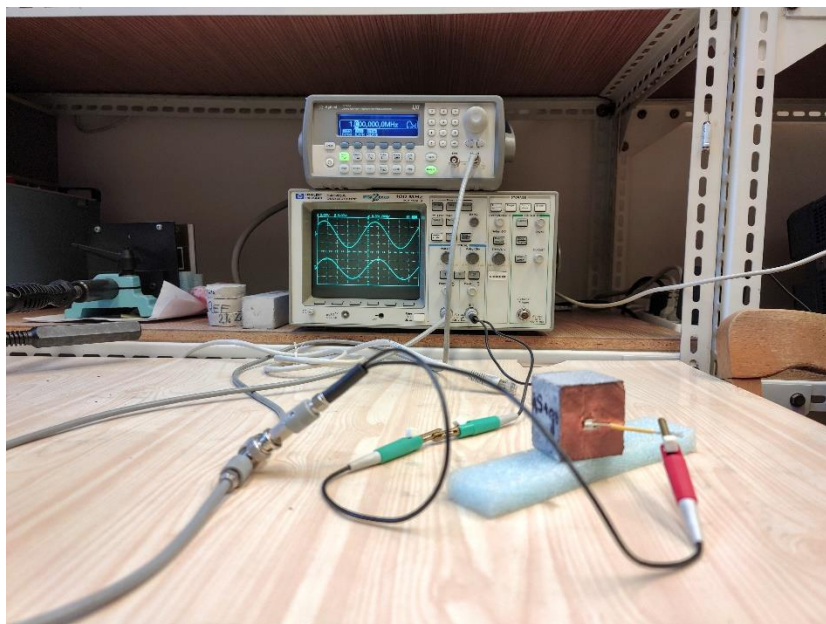
$$Z = R + iX_C \quad (4. 1)$$

Sinusový signál vyvozuje generátor Agilent 33220A se vstupním napětím 5,5 V. Měření je dále prováděno pomocí dvoukanalového osciloskopu Agilent 54645A s nastavením vstupních hodnot elektrické kapacity a odporu osciloskopu na 13 pF či 1 MW. Elektrody jsou od sebe vzdáleny přibližně 40 mm, což se odvíjí podle nařezání trámečků. Měrný elektrický odpor ρ se vypočte na základě naměřených hodnot impedance, plochy stran S , kde jsou nalepeny elektrody a vzdálenosti elektrod od sebe l , jelikož měrný elektrický odpor závisí na velikosti vzorku, viz vztah 4. 2 [26][42].

$$\rho = R \cdot \frac{S}{l} \quad (4. 2)$$



Obr. 4. 8: Schéma detailního zapojení přístrojů: zleva zdroj střídavého napětí, U označuje napětí před vzorkem a za vzorkem, zkušební vzorek, dvoukanálový osciloskop (čárkovaná čára ohraničuje vstupní parametry kanálu B osciloskopu) [42]



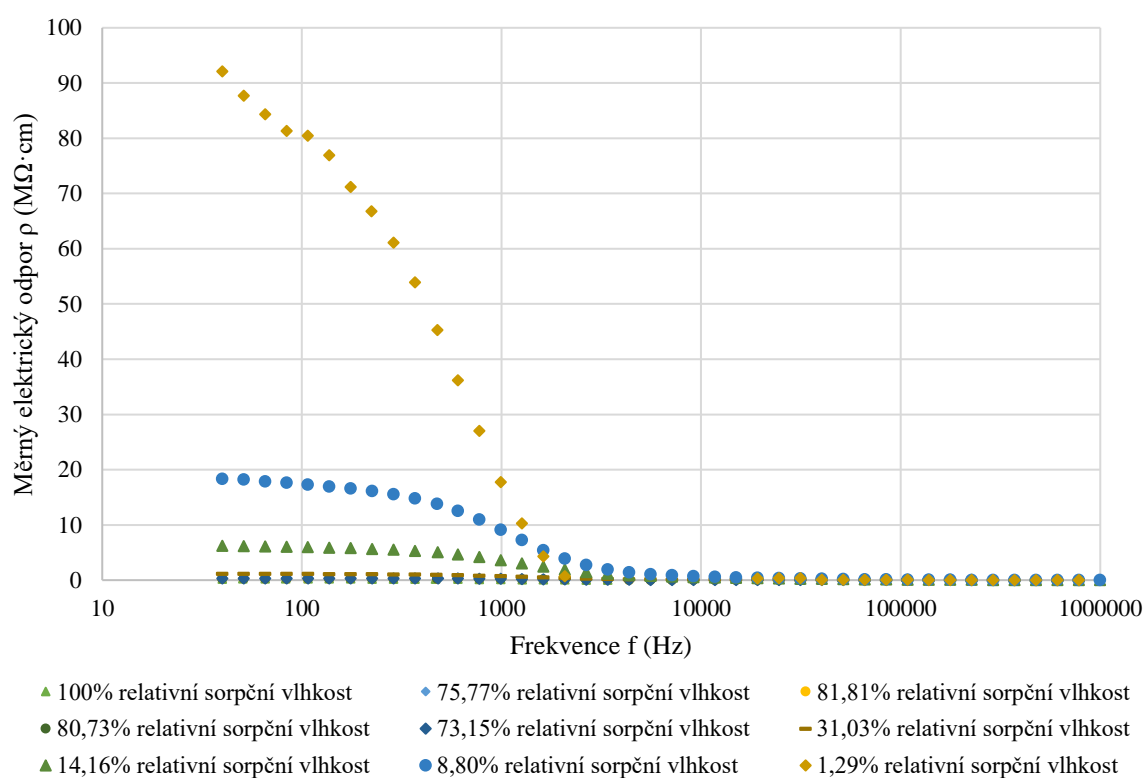
Obr. 4. 9: Schéma zapojení přístrojů pro měření impedance

Snímky mikrostruktury jsou získány pomocí skenovacího elektronového mikroskopu TESCANMIRA 3 XMU, přičemž vzorky byly předem opatřeny vodivou vrstvou zlata. Distribuce pórů je vyhodnocena použitím metody rtuťové porozimetrie (MIP) tak, že vzorek se ponoří do rtuti, což je nesmáčivá kapalina a zastoupení pórů se určuje na základě pronikání rtuti do struktury materiálu za zvýšeného tlaku. K tomu je využíván porosimetr Micromeritics Poresizer 9310, který dokáže určit průměr pórů o velikosti 6 nm [26].

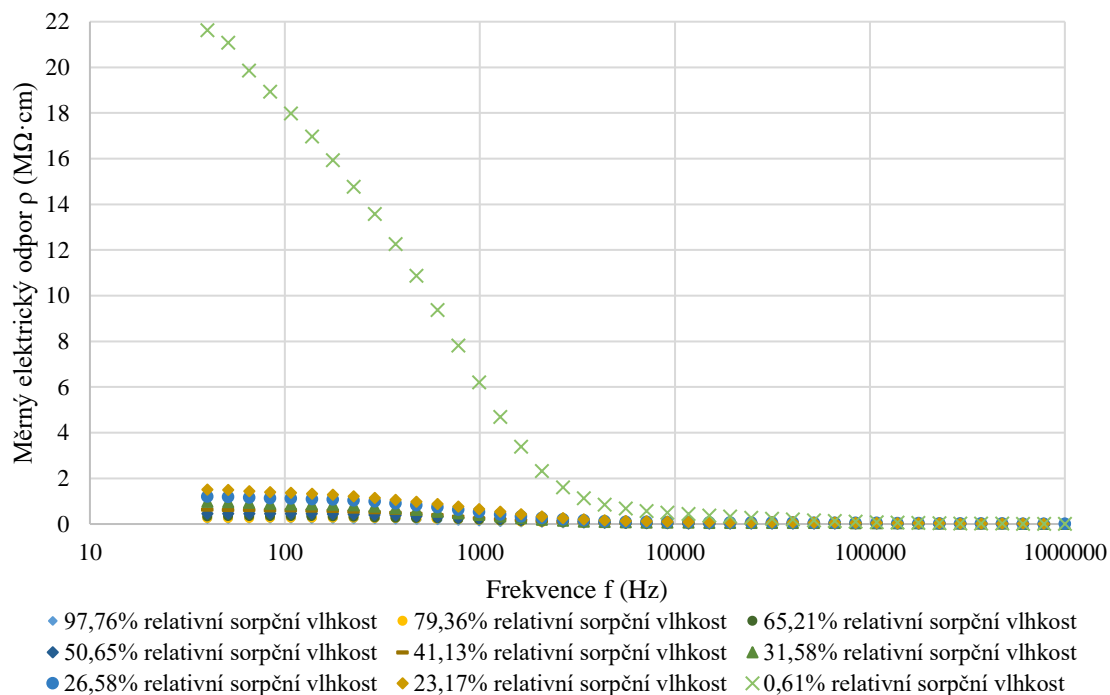
4.2 Vyhodnocení a diskuse výsledků

4.2.1 Vliv vlhkosti na elektrickou vodivost

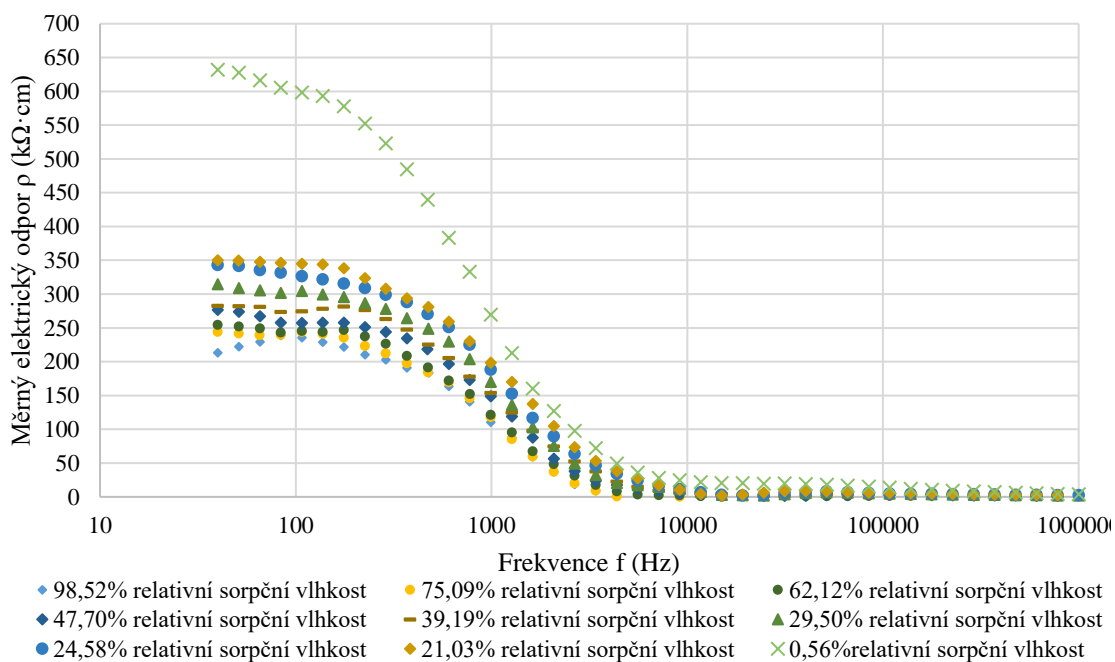
Závislosti měrného elektrického odporu na relativní sorpční vlhkosti a frekvenci pro studované kompozity jsou porovnány na Obr. 4. 10 až Obr. 4. 17. Impedance je měřena při různých frekvencích, a poté je z ní vypočten měrný elektrický odpor, který klesá se zvyšující se sorpční vlhkostí materiálu, což znamená, že vysušený vzorek klade největší měrný elektrický odpor. Z výsledků lze zjistit, že hodnota měrného elektrického odporu závisí na zvolené frekvenci, protože pokud se sníží hodnota frekvence, dojde ke zvýšení měrného elektrického odporu a naopak.



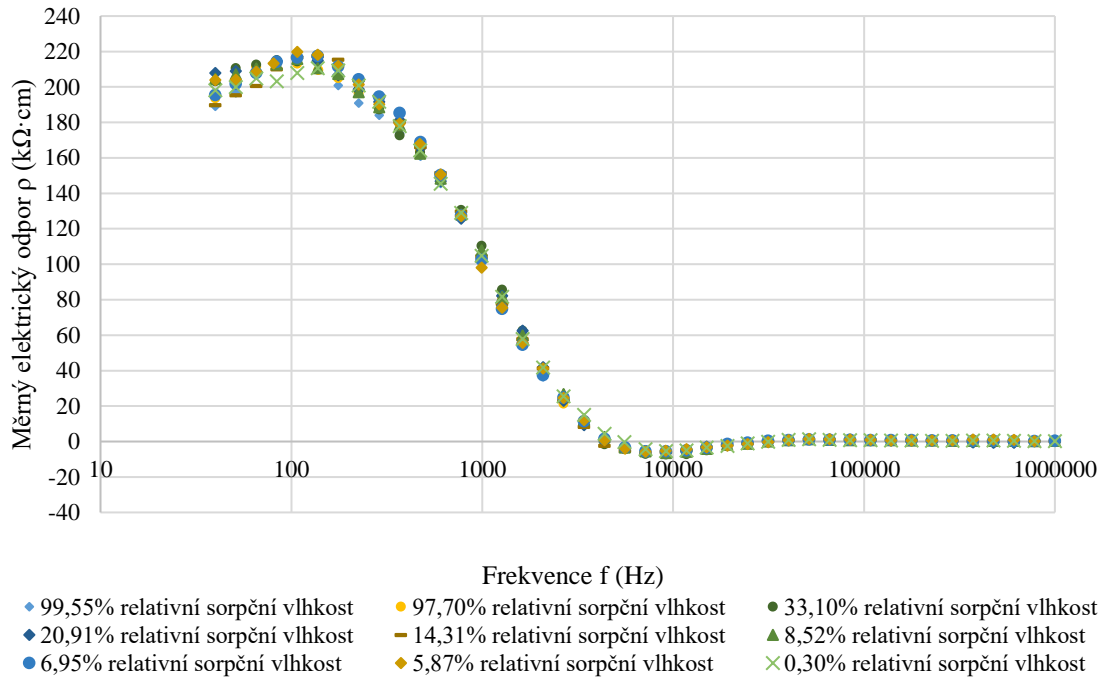
Obr. 4. 10: Závislost měrného elektrického odporu na frekvenci pro různou relativní sorpční vlhkost materiálu v rozmezí 0 % až 100 % pro referenci AAS



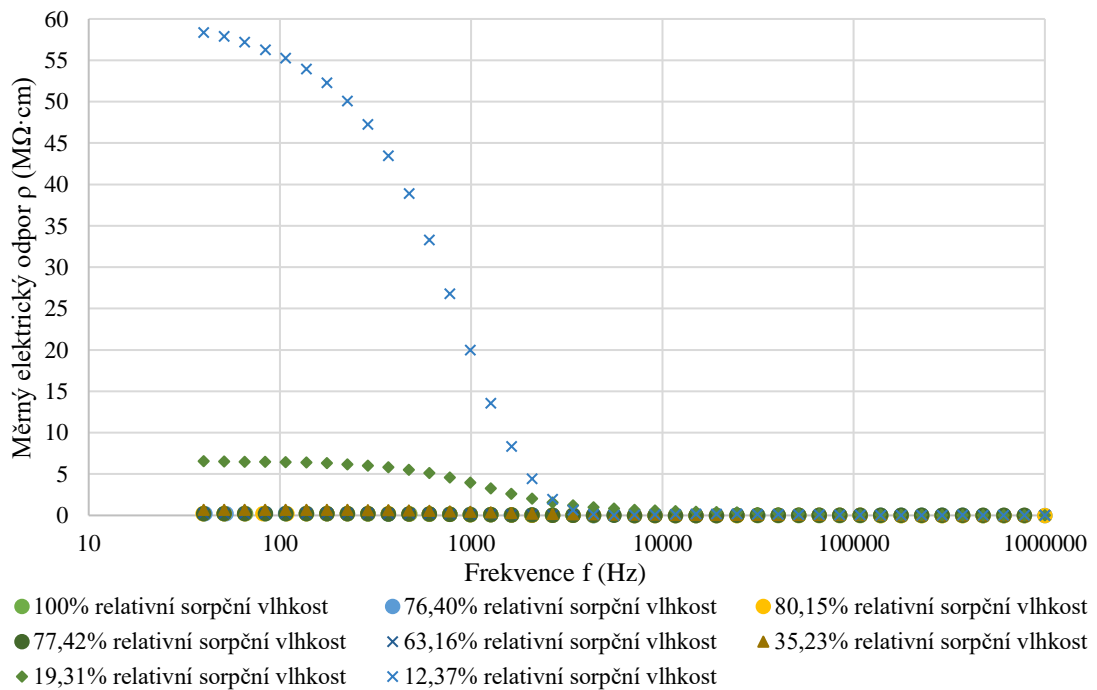
Obr. 4. 11: Závislost měrného elektrického odporu na frekvenci pro různou relativní sorpční vlhkost materiálu v rozmezí 0 % až 100 % pro AAS G6



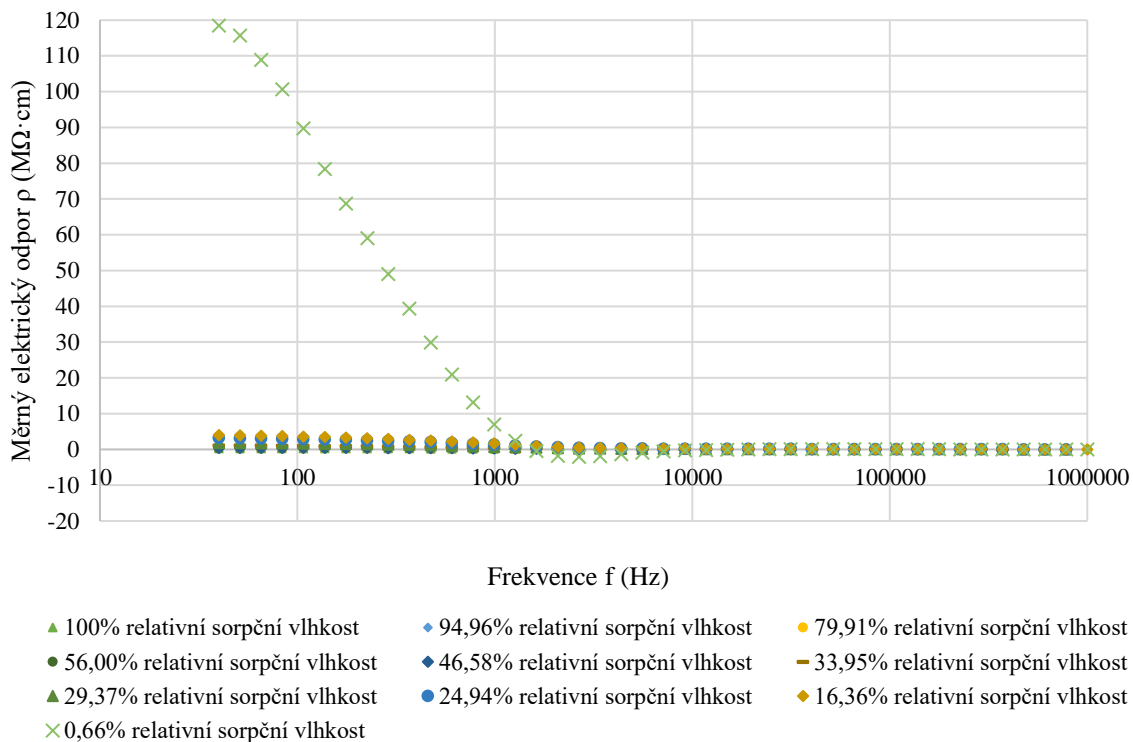
Obr. 4. 12: Závislost měrného elektrického odporu na frekvenci pro různou relativní sorpční vlhkost materiálu v rozmezí 0 % až 100 % pro AAS G12



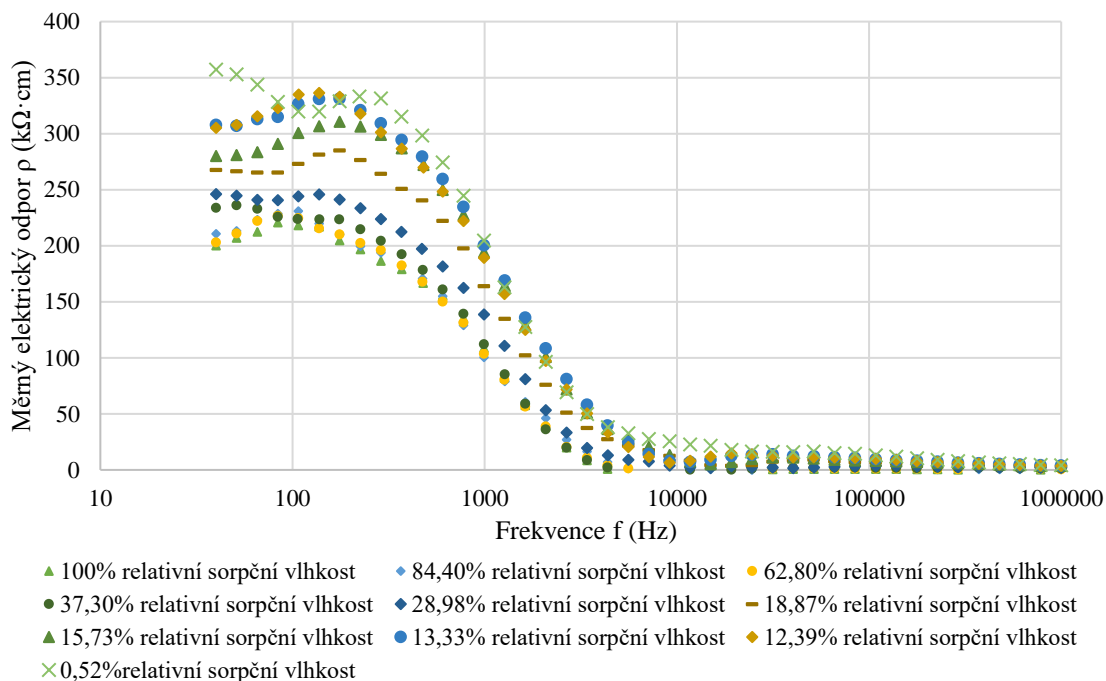
Obr. 4. 13: Závislost měrného elektrického odporu na frekvenci pro různou relativní sorpční vlhkost materiálu v rozmezí 0 % až 100 % pro AAS G18



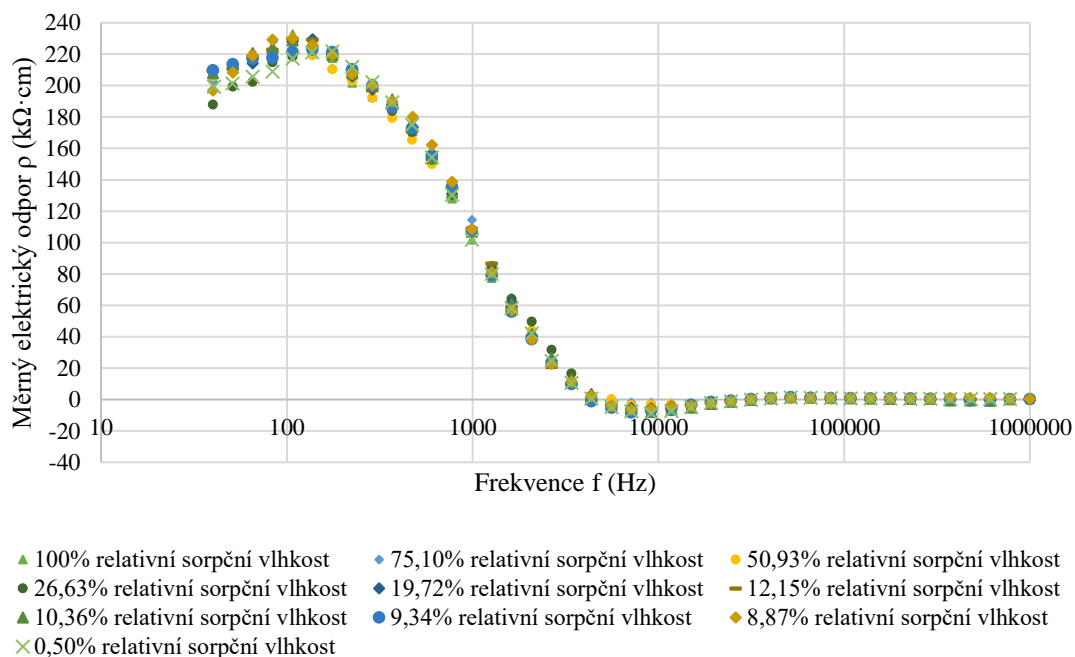
Obr. 4. 14: Závislost měrného elektrického odporu na frekvenci pro různou relativní sorpční vlhkost materiálu v rozmezí 0 % až 100 % pro referenci CEM



Obr. 4. 15: Závislost měrného elektrického odporu na frekvenci pro různou relativní sorpční vlhkost materiálu v rozmezí 0 % až 100 % pro CEM G6



Obr. 4. 16: Závislost měrného elektrického odporu na frekvenci pro různou relativní sorpční vlhkost materiálu v rozmezí 0 % až 100 % pro CEM G12



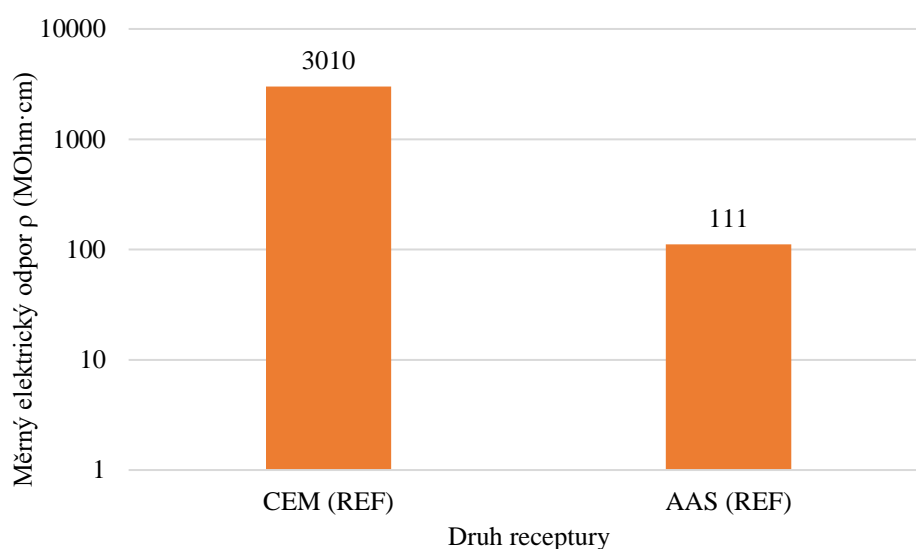
Obr. 4. 17: Závislost měrného elektrického odporu na frekvenci pro různou relativní sorpční vlhkost materiálu v rozmezí 0 % až 100 % pro CEM G18

Na základě naměřených dat jsou porovnány vzorky AAS (Obr. 4. 10 až Obr. 4. 13) pro nejnižší relativní sorpční vlhkosti, co byly naměřeny, a vybranou frekvenci 40 Hz a ukazuje se, že nejvyšší hodnota měrného elektrického odporu je naměřena pro referenci AAS 92,11 MΩ·cm při relativní sorpční vlhkosti 1,29 % (Obr. 4. 10). Poté následuje měrný elektrický odpor 21,63 MΩ·cm pro AAS G6 při relativní sorpční vlhkosti 0,61 % (Obr. 4. 11) a 631,76 kΩ·cm pro AAS G12 při relativní sorpční vlhkosti 0,56 % (Obr. 4. 12). Nejnižší hodnota měrného elektrického odporu je 198,09 kΩ·cm pro AAS G18 při relativní sorpční vlhkosti 0,30 % (Obr. 4. 13). Srovnání vzorků CEM na Obr. 4. 14 až Obr. 4. 17 pro frekvenci 40 Hz a nejnižší naměřenou relativní sorpční vlhkost vychází, že měrný elektrický odpor pro referenci CEM je 58,36 MΩ·cm při relativní sorpční vlhkosti 12,37 % (Obr. 4. 14), protože naměřené hodnoty měrného elektrického odporu pod touto relativní sorpční vlhkostí byly mimo rozsah přístroje. Měrný elektrický odpor pro CEM G6 odpovídá hodnotě 118,45 MΩ·cm při relativní sorpční vlhkosti 0,62 % (Obr. 4. 15) a 357 kΩ·cm pro CEM G12 při relativní sorpční vlhkosti 0,52 % (Obr. 4. 16). Nejnižší měrný elektrický odpor 199,19 kΩ·cm vychází u CEM G18 při relativní sorpční vlhkosti 0,50 % (Obr. 4. 17).

Hodnoty měrného elektrického odporu u kompozitů AAS G18 (Obr. 4. 13) a CEM G18 (Obr. 4. 17) jsou po překročení perkolačního prahu přibližně stejné při dané frekvenci a neliší se při změně relativní sorpční vlhkosti. Ostatní vzorky vykazují výrazný nárůst

měrného elektrického odporu při nižších hodnotách relativní sorpční vlhkosti než 20 %, viz Obr. 4.10 až Obr. 4.12 a Obr. 4.14 až Obr. 4. 16.

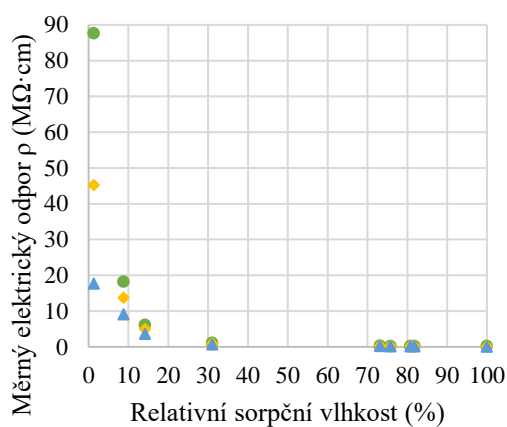
Na Obr. 4. 18 lze vidět porovnání referenčních vysušených vzorků AAS a CEM. Cementový kompozit se chová jako výraznější izolant v porovnání s alkalicky aktivovanou struskou, protože geopolymery obsahují vodivé ionty, které jsou do matrice vneseny použitím alkalického aktivátoru. V souladu s literárními údaji a výsledků porozimetrie je potvrzeno, že mají kompaktnější a hutnější strukturu, ve které se může vytvářet více elektrických obvodů, čímž se snižuje elektrický odpor a ionty se mohou snadněji pohybovat [20]. Měrný elektrický odpor referenčních cementových trámečků nešel naměřit pod relativní sorpční vlhkost materiálu 12 %, protože hodnoty byly mimo rozsah měření přístroje, ale pomocí extrapolace je stanoveno, že měrný elektrický odpor je 27krát vyšší než u referenčních zkušebních těles alkalicky aktivované strusky (viz Obr. 4.18).



Obr. 4. 18: Porovnání měrných elektrických odporů referencí ve vysušeném stavu

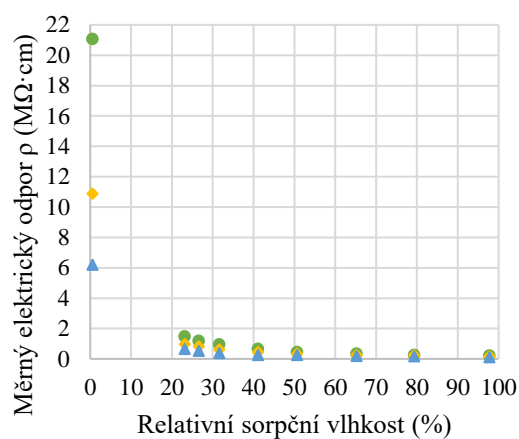
Pro lepší představu závislosti měrného elektrického odporu na relativní sorpční vlhkosti jsou na Obr. 4. 19 až Obr. 4. 26 sestaveny grafy pro všechny studované směsi, kde jsou vybrána vždy naměřená data pro tři frekvence. Koncentrace vodivé příměsi, kterou zastupuje grafitový prášek, ovlivňuje změnu měrného elektrického odporu. Podle vyhodnocení závislosti měrného elektrického odporu na frekvenci a relativní sorpční vlhkosti lze určit, že kompozity s obsahem 6 hmotnostních % grafitového prášku se nacházejí před perkolačním prahem, protože měrný elektrický odpor mírně poklesl, což naznačuje tomu, že jsou od sebe částice vodivé příměsi vzdáleny (Obr. 4. 20 a Obr. 4. 24). Vzorky s 12 hmotnostními % grafitového prášku jsou v oblasti perkolačního prahu,

protože naměřené hodnoty svědčí o tom, že dochází k výraznému poklesu měrného elektrického odporu ve srovnání s referencemi a začíná se vytvářet vodivá cesta (Obr. 4. 21 a Obr. 4. 25). U vzorku AAS G12 (Obr. 4. 21) nedošlo k tak výraznému poklesu měrného elektrického odporu jako u vzorku CEM G12 (Obr. 4. 25), takže může být perkolační práh mírně posunut a nacházet se u AAS mezi 12–13 hmotnostními % grafitového prášku. Zkušební tělesa s 18 hmotnostními % grafitového prášku se vyskytují za perkolačním prahem, jelikož měrný elektrický odpor AAS G18 (Obr. 4. 22) a CEM G18 (Obr. 4. 26) nabývá přibližně stejných hodnot. To nastává tehdy, když se částice vodivé příměsi nacházejí blízko u sebe nebo se dotýkají, takže se kontaktní vedení stává dominantním a uplatňuje se zde tedy hlavně elektrická vodivost grafitového prášku. Tyto poznatky jsou v souladu s literární rešerší [12][14].



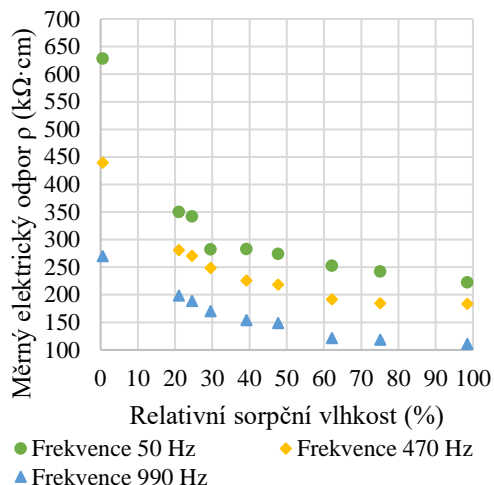
● Frekvence 50 Hz ◆ Frekvence 500 Hz
▲ Frekvence 990 Hz

Obr. 4. 19: Porovnání měření závislosti měrného elektrického odporu na relativní sorpční vlhkosti materiálu za použití vybraných frekvencí o velikosti 50 Hz, 500 Hz a 990 Hz pro referenci AAS

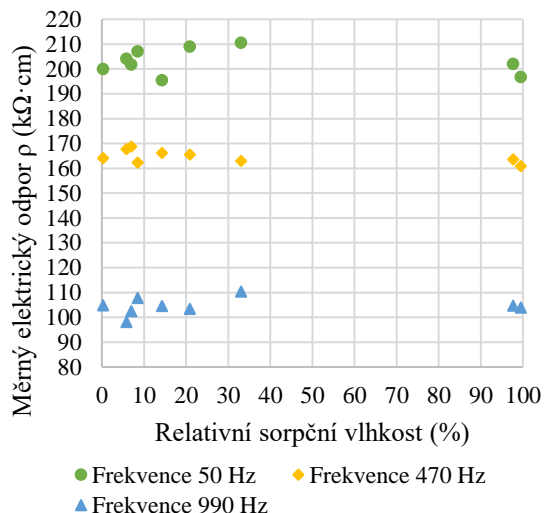


● Frekvence 50 Hz ◆ Frekvence 475 Hz
▲ Frekvence 990 Hz

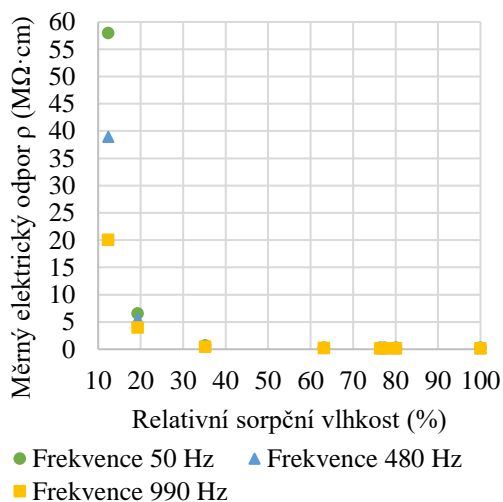
Obr. 4. 20: Porovnání měření závislosti měrného elektrického odporu na relativní sorpční vlhkosti materiálu za použití vybraných frekvencí o velikosti 50 Hz, 475 Hz a 990 Hz pro AAS G6



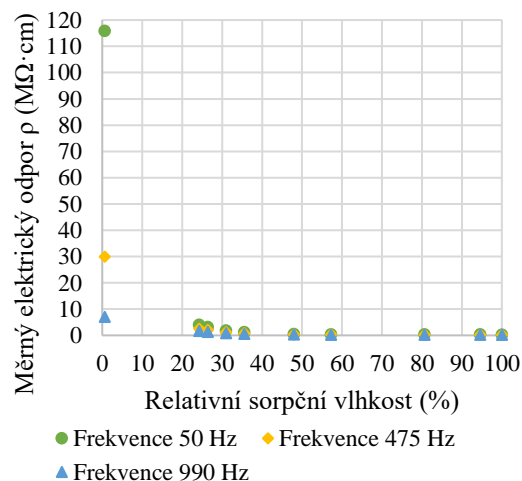
Obr. 4.21: Porovnání měření závislosti měrného elektrického odporu na relativní sorpční vlhkosti materiálu za použití vybraných frekvencí o velikosti 50 Hz, 470 Hz a 990 Hz pro AAS G12



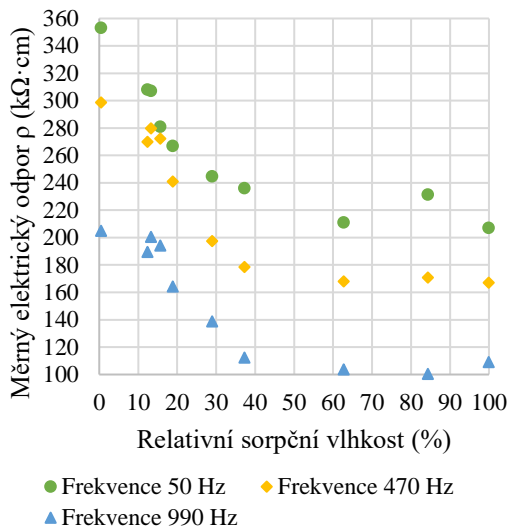
Obr. 4.22: Porovnání měření závislosti měrného elektrického odporu na relativní sorpční vlhkosti materiálu za použití vybraných frekvencí o velikosti 50 Hz, 470 Hz a 990 Hz pro AAS G18



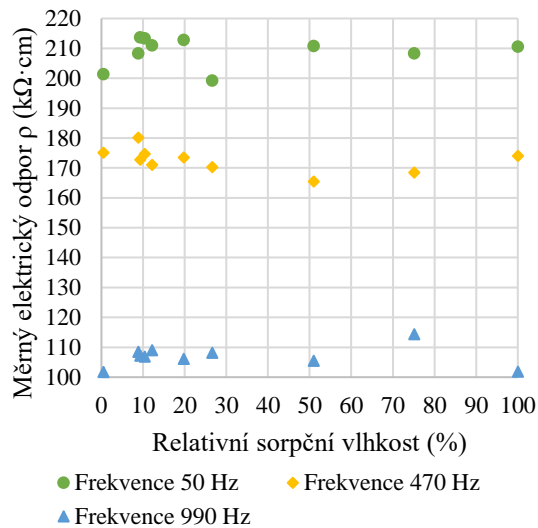
Obr. 4.23: Porovnání měření závislosti měrného elektrického odporu na relativní sorpční vlhkosti materiálu za použití vybraných frekvencí o velikosti 50 Hz, 480 Hz a 990 Hz pro referenci CEM



Obr. 4.24: Porovnání měření závislosti měrného elektrického odporu na relativní sorpční vlhkosti materiálu za použití vybraných frekvencí o velikosti 50 Hz, 475 Hz a 990 Hz pro CEM G6

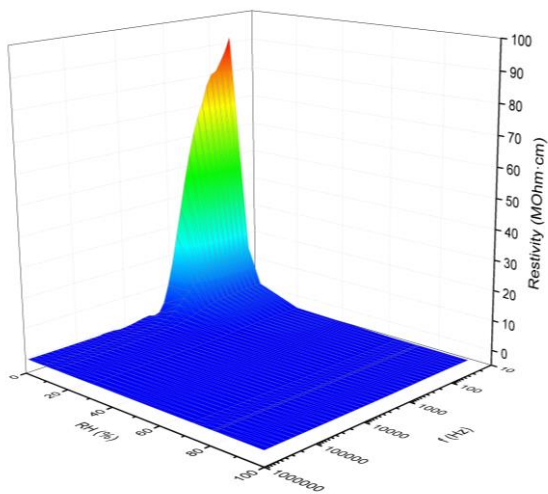


Obr. 4. 25: Porovnání měření závislosti měrného elektrického odporu na relativní sorpční vlhkosti materiálu za použití vybraných frekvencí o velikosti 50 Hz, 470 Hz a 990 Hz pro CEM G12

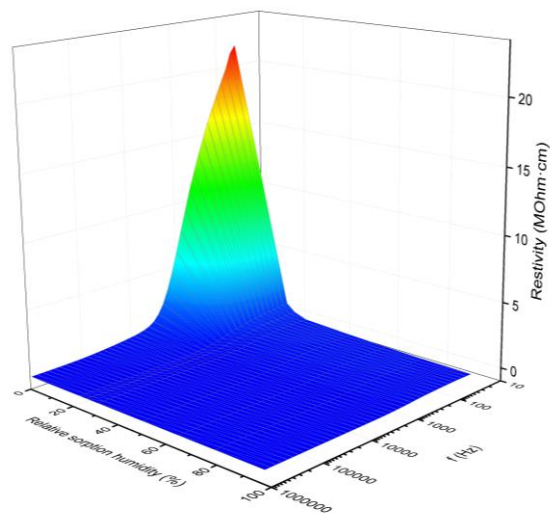


Obr. 4. 26: Porovnání měření závislosti měrného elektrického odporu na relativní sorpční vlhkosti materiálu za použití vybraných frekvencí o velikosti 50 Hz, 470 Hz a 990 Hz pro CEM G18

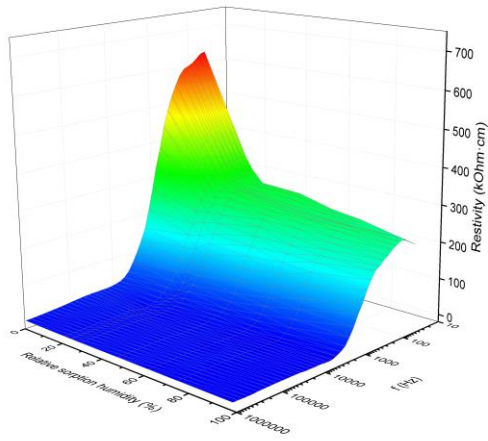
Na základě naměřených dat byly vytvořeny 3D modely, které názorně ukazují závislosti měrného elektrického odporu na frekvenci a relativní sorpční vlhkosti pro jednotlivé vzorky, viz Obr. 4. 27 až Obr. 4. 34.



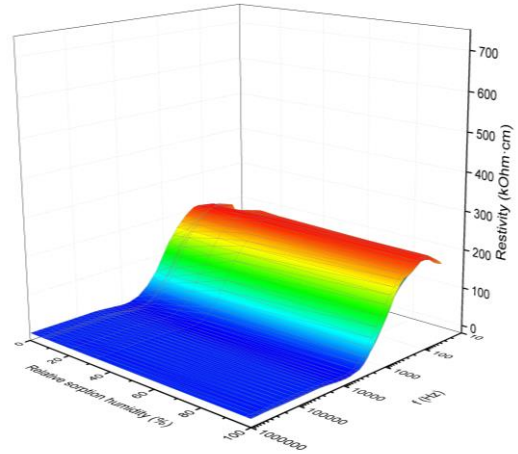
Obr. 4. 27: 3D graf AAS pro referenci znázorňující závislost měrného elektrického odporu na frekvenci a relativní sorpční vlhkosti materiálu



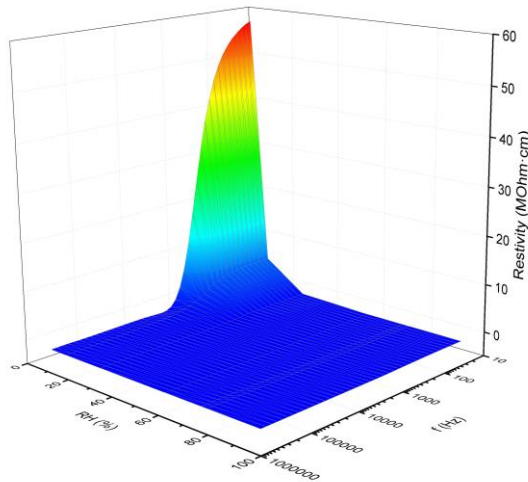
Obr. 4. 28: 3D graf AAS G6 znázorňující závislost měrného elektrického odporu na frekvenci a relativní sorpční vlhkosti materiálu



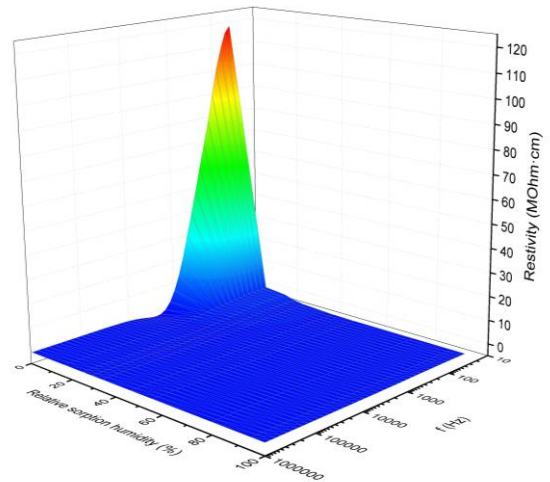
Obr. 4. 29: 3D graf AAS G12 znázorňující závislost měrného elektrického odporu na frekvenci a relativní sorpční vlhkosti materiálu



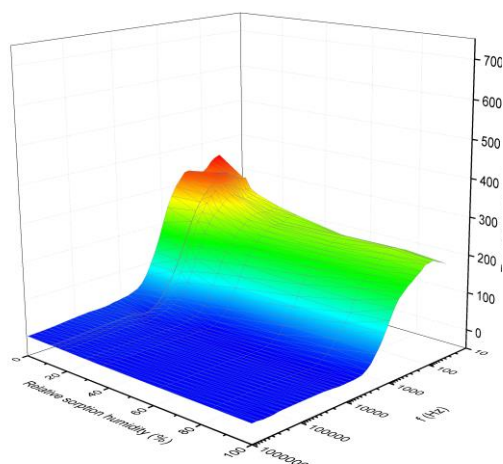
Obr. 4. 30: 3D graf G18 znázorňující závislost měrného elektrického odporu na frekvenci a relativní sorpční vlhkosti materiálu



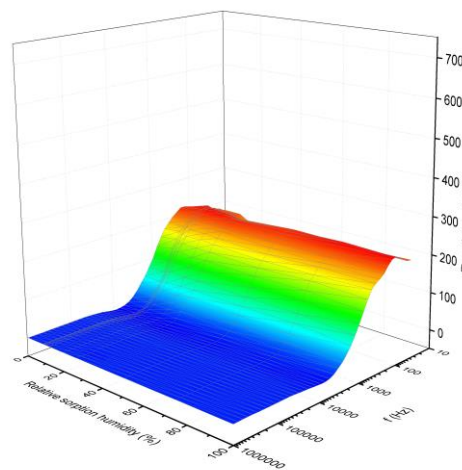
Obr. 4. 31: 3D graf CEM pro referenci znázorňující závislost měrného elektrického odporu na frekvenci a relativní sorpční vlhkosti materiálu



Obr. 4. 32: 3D graf CEM G6 znázorňující závislost měrného elektrického odporu na frekvenci a relativní sorpční vlhkosti materiálu



Obr. 4. 33: 3D graf CEM G12 znázorňující závislost měrného elektrického odporu na frekvenci a relativní sorpční vlhkosti materiálu

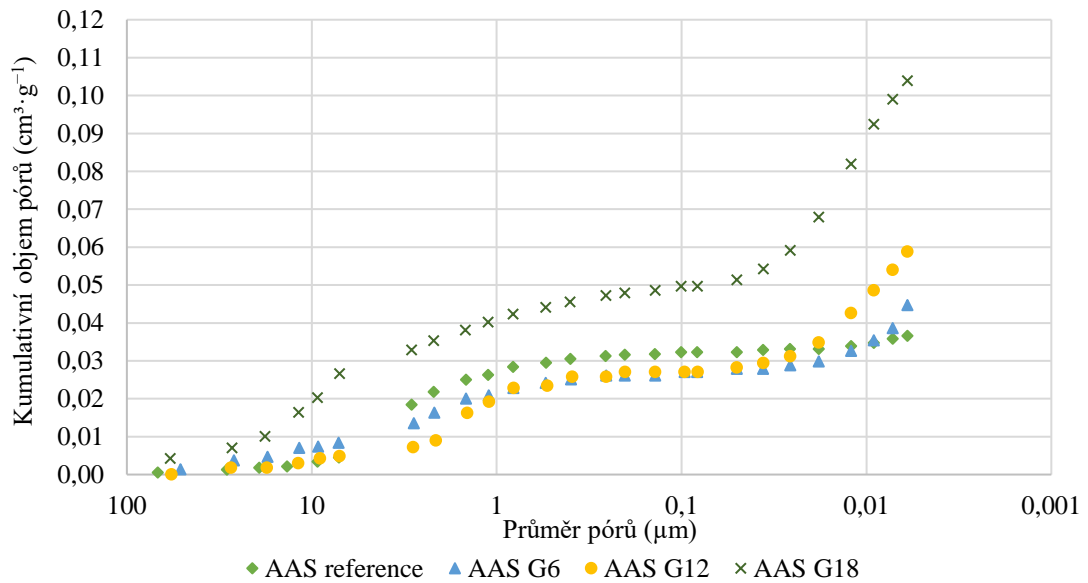


Obr. 4. 34: 3D graf CEM G18 znázorňující závislost měrného elektrického odporu na frekvenci a relativní sorpční vlhkosti materiálu

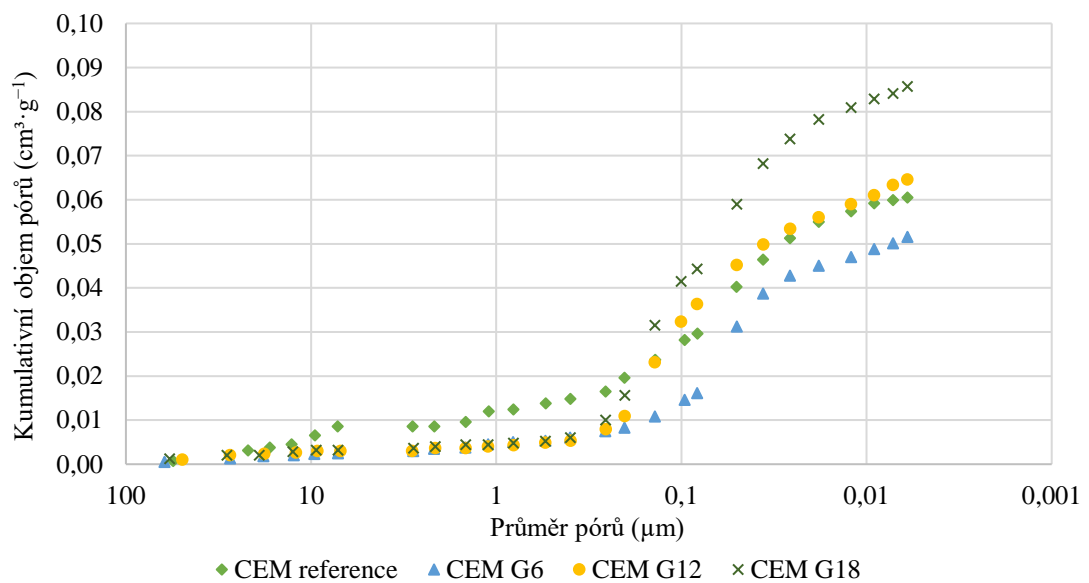
4.2.2 Porozimetrie

Rtuťová porozimetrie byla provedena na všech vzorcích. Na základě naměřených dat jsou sestrojeny grafy ukazující závislost kumulativního objemu pórů nebo diferenčního objemu pórů na průměru pórů. Kumulativní objem pórů znázorňuje zastoupení objemu pórů o určité velikosti, zatímco diferenční objem pórů udává počet pórů o daném průměru.

Závislosti kumulativního objemu pórů na průměru pórů pro studované kompozity AAS a CEM jsou porovnány na Obr. 4. 35 a Obr. 4. 36. Na Obr. 4. 35 lze pozorovat, že při zvyšování koncentrace grafitového prášku v matrici AAS docházelo k tvorbě většího objemu pórů pod $0,01 \mu\text{m}$, díky kterým se zvyšuje elektrická vodivost. Grafitový prášek má tendenci vytvářet shluky, takže čím více se ho přidávalo, tím více záměsové vody se spotřebovalo, aby došlo ke správné homogenizaci, což se pak negativně projevuje zvýšenou pórovitostí, protože voda vlivem odpařování odcházela ze struktury materiálu, čímž se vytvořilo více kapilár a pórů. Z tohoto důvodu mají kompozity AAS G18 a CEM G18 nejvyšší objem pórů (viz Obr. 4. 35 a Obr. 4. 36).

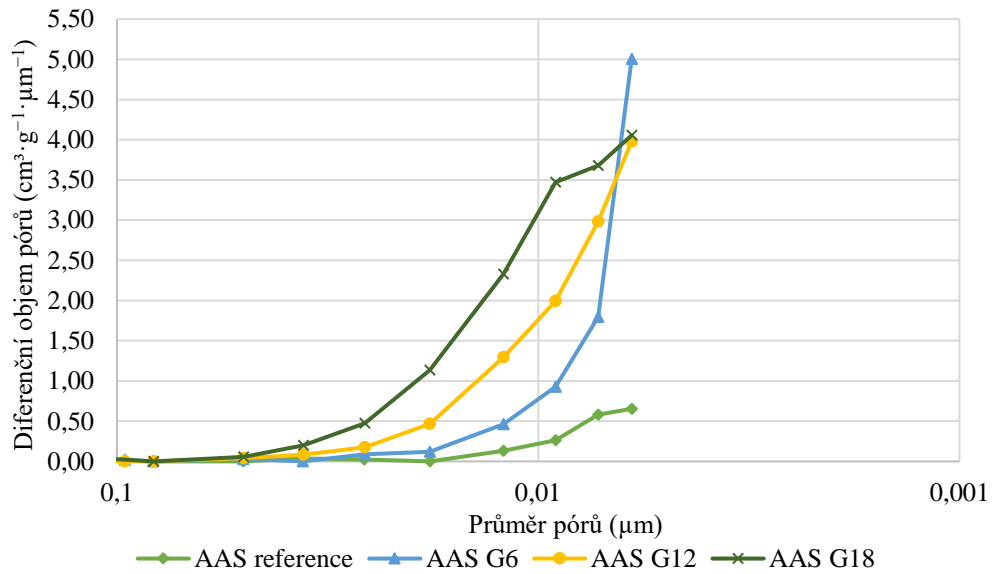


Obr. 4. 35: Porovnání zastoupení průměrů pórů pro AAS (reference – bez obsahu grafitu, G6 – 6 % grafitu, G12 – 12 % grafitu, G18 – 18 % grafitu)

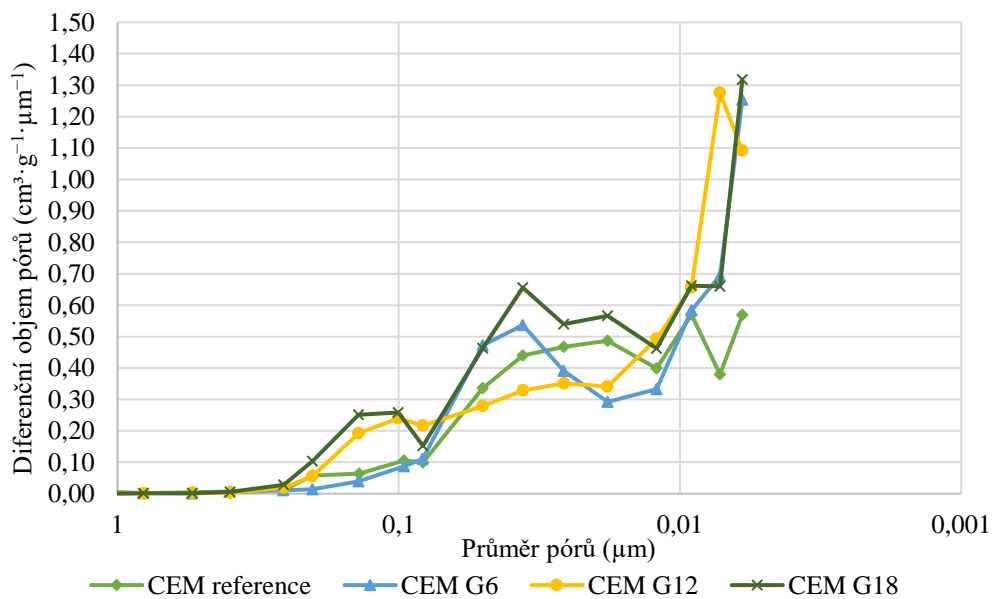


Obr. 4. 36: Porovnání zastoupení průměrů pórů pro CEM (reference – bez obsahu grafitu, G6 – 6 % grafitu, G12 – 12 % grafitu, G18 – 18 % grafitu)

Závislost diferenčního objemu pórů na průměru pórů potvrzuje, že vzorky AAS (Obr. 4. 37) obsahují více pórů v intervalu 0,001–0,1 μm než zkušební tělesa CEM (Obr. 4. 38).



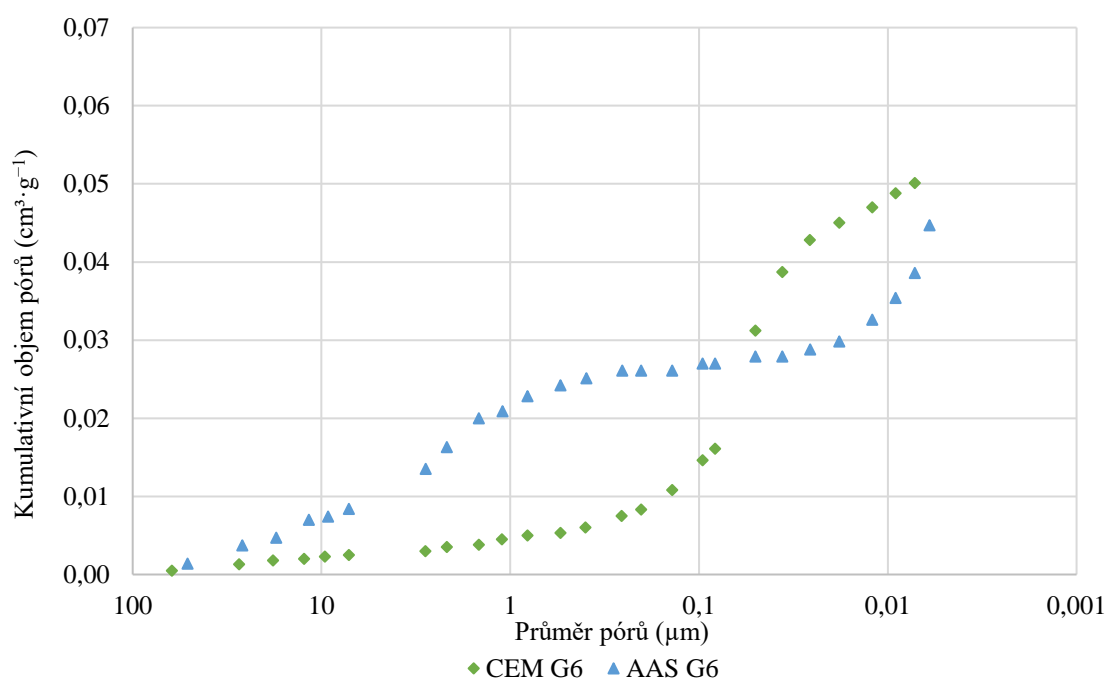
Obr. 4. 37: Porovnání zastoupení průměrů pórů pro AAS (reference – bez obsahu grafitu, G6 – 6 % grafitu, G12 – 12 % grafitu, G18 – 18 % grafitu)



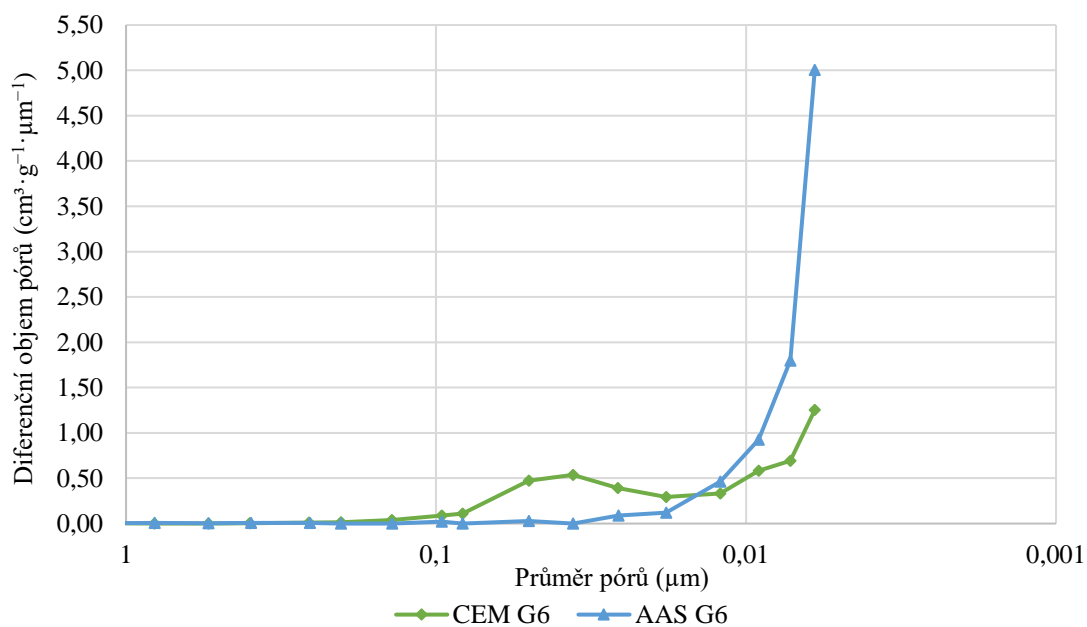
Obr. 4. 38: Porovnání zastoupení průměrů pórů pro CEM (reference – bez obsahu grafitu, G6 – 6 % grafitu, G12 – 12 % grafitu, G18 – 18 % grafitu)

Kelvinova rovnice teoreticky popisuje tlak par v pórech a závisí na účinných povrchového napětí, kontaktním úhlu, velikosti pórů a tlaku par v roztoku pórů. Udává skutečnost, že v úzkých kapilárách nastává kondenzace při nižším tlaku, než je tlak nasycené vodní páry, a proto se zaplňují rychleji vodou [43][44]. Na základě porovnání AAS G6 a CEM G6 (Obr. 4. 39 a Obr. 4. 40) lze pozorovat uplatnění tohoto jevu. Závislost diferenčního objemu pórů na průměru pórů ukazuje, že u vzorku AAS G6 počet pórů

pod 0,01 μm neustále narůstá a bude v nich dříve docházet ke kondenzaci, což způsobuje lepší elektrickou vodivost než u vzorku CEM G6.



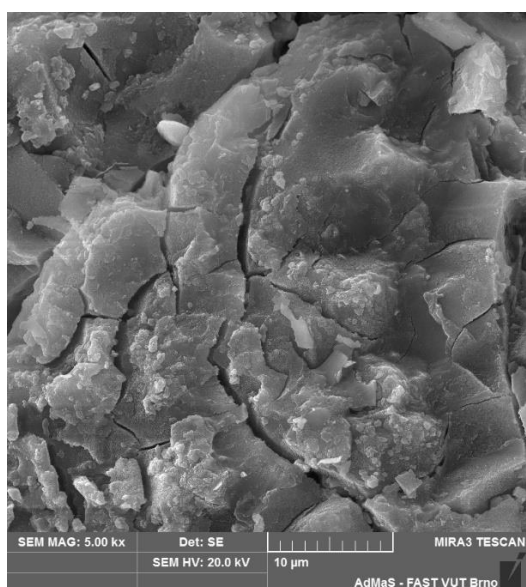
Obr. 4. 39: Porovnání zastoupení průměrů pórů pro AAS G6 a CEM G6



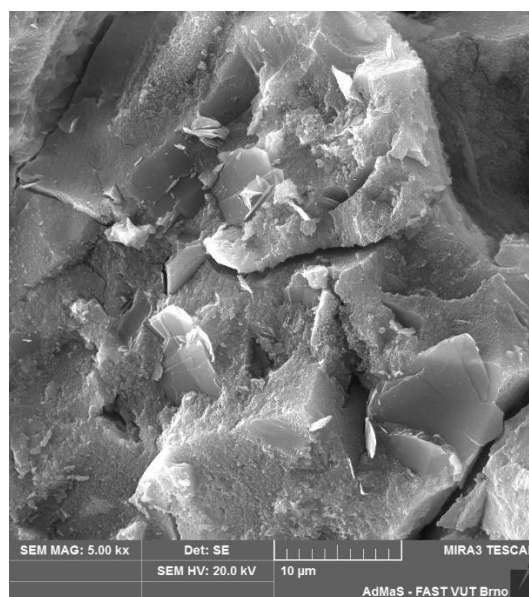
Obr. 4. 40: Porovnání zastoupení průměrů pórů pro AAS G6 a CEM G6

4.2.3 Mikrostruktura

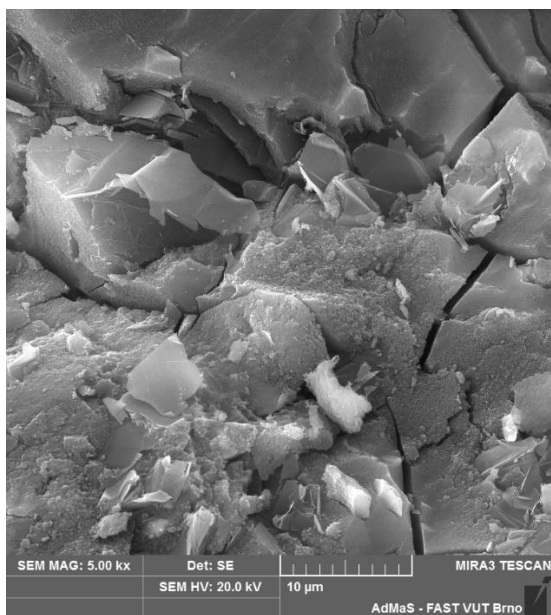
Mikrostruktura je analyzována pomocí skenovací elektronové mikroskopie. Porovnání SEM snímků všech materiálů je na Obr. 4. 41 až 4. 48. Na SEM snímcích AAS (Obr. 4. 41 až Obr. 4. 44) se vyskytuje vedle nezreagovaných zrn strusky především amorfní forma C-A-S-H gelu. Na SEM snímcích vzorků CEM (Obr. 4. 45 až Obr. 4. 48) lze pozorovat obvyklou strukturu C-S-H gelu, který je u vzorků G12 a G18 doprovázen krystaly vláknitého C-S-H gelu druhého typu, jehož přítomnost je způsobena vysokým vodním součinitelem těchto dvou směsí. Grafit představuje proměnlivou složku a dá se jednoduše rozpoznat, protože vytváří tenké desky s lamelární strukturou [26]. Na mikrostrukturu vzorků s obsahem 6 % grafitového prášku převládá struktura cementové pasty (Obr. 4. 46) nebo alkalicky aktivované strusky (Obr. 4. 42). Oblast perkolačního prahu se nachází při 12% obsahu grafitového prášku ve vzorcích a na SEM snímcích lze vidět, že se částice grafitu vyskytují blízko u sebe, viz Obr. 4. 43 a Obr. 4. 47. Snímky SEM pro kompozity s 18 hmotnostními % grafitového prášku ukazují stav za perkolačním prahem, kdy se částice grafitového prášku nacházejí v těsné blízkosti nebo vytváří shluky (Obr. 4. 44 a Obr. 4. 48).



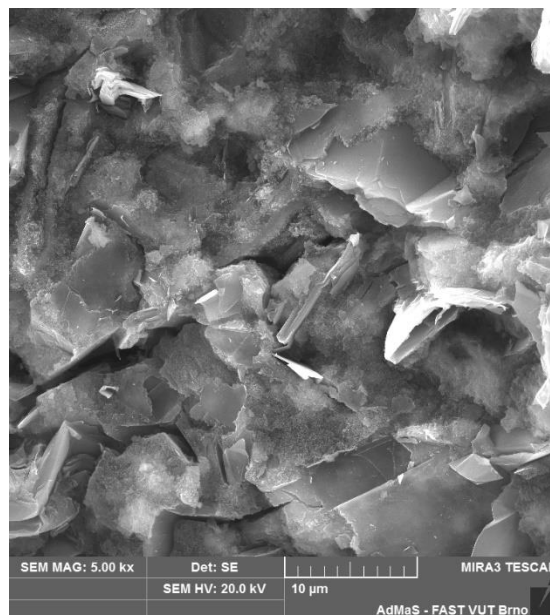
Obr. 4. 41: SEM snímek referenční receptury AAS



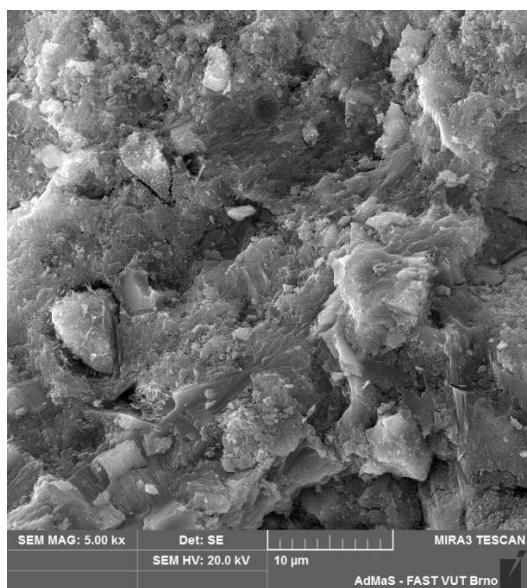
Obr. 4. 42: SEM snímek AAS G6



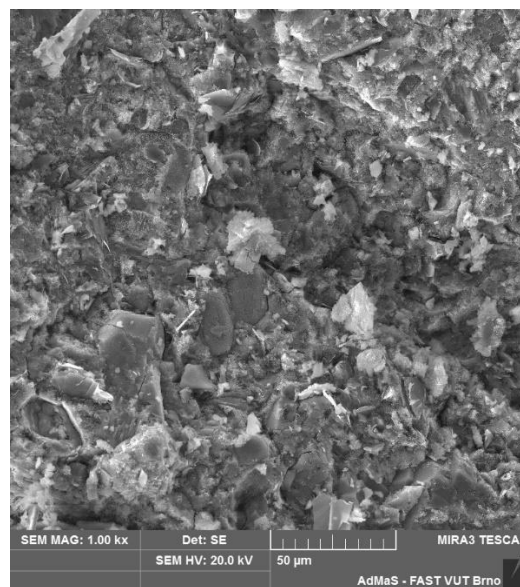
Obr. 4. 43: SEM snímek AAS G12



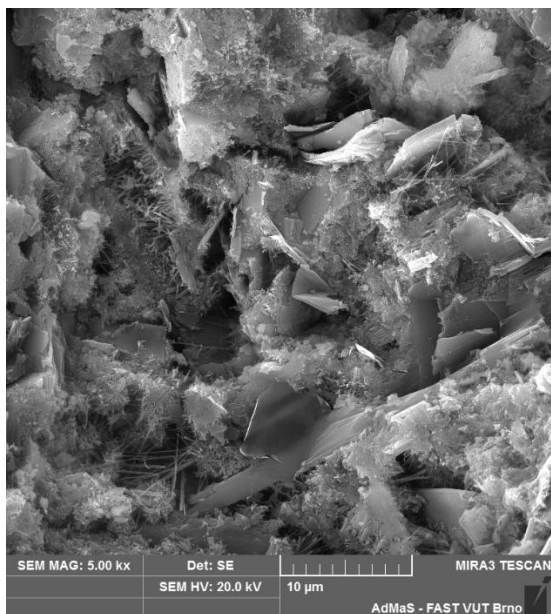
Obr. 4. 44: SEM snímek AAS G18



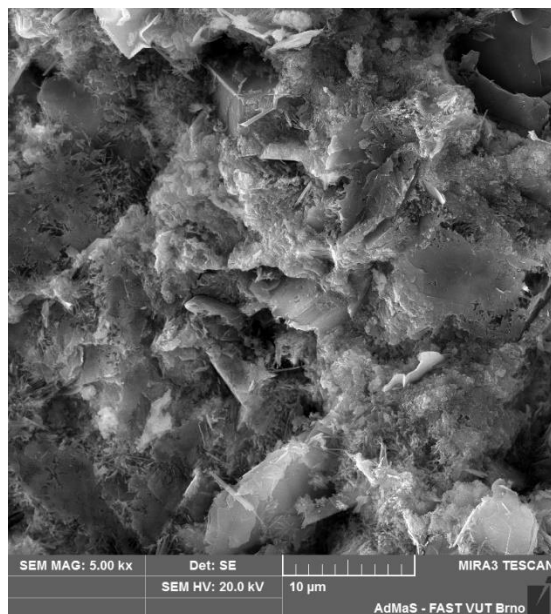
Obr. 4. 45: SEM snímek referenční receptury CEM



Obr. 4. 46: SEM snímek CEM G6



Obr. 4. 47: SEM snímek CEM G12



Obr. 4. 48: SEM snímek CEM G18

5 Závěr

První část bakalářské práce je věnována literární rešerši, která je zaměřena na dříve publikované výzkumy zabývající se alkalicky aktivovanými materiály, vlhkostí, senzorickými betony, elektrickými vlastnostmi, používáním vodivých příměsí v kompozitech a vlivem vlhkosti na elektrické vlastnosti materiálů. V posledních letech se objevila řada studií, které zaměřovaly pozornost na mechanické chování betonu nebo geopolymerů, ale jejich elektrické vlastnosti se příliš nezkoumaly, přitom elektrická vodivost materiálů se využívá pro různé progresivní aplikace a vlhkost na ni má významný vliv. Jedná se například o senzory vlhkosti monitorující aktuální stav materiálu, které by nacházely uplatnění zejména v průmyslových odvětvích, mořských nebo říčních oblastech, jaderné energetice, dopravě apod. Beton se chová jako větší elektrický izolant v porovnání s alkalicky aktivovanými materiály, ale elektrická vodivost se dá zvýšit přidáním vodivých příměsí, takto vyrobený beton se označuje jako chytrý beton a používá se například pro odmrazování a tání sněhu na pozemních komunikacích. Optimální dávka vodivé příměsi musí být dobře zvolena kvůli tomu, že při její vysoké koncentraci v matici dojde k významnému zhoršení mechanických vlastností kompozitu.

Druhá část se zabývá experimentální částí, která je rozdělena na cíle a metodiku práce a vyhodnocení a diskusi výsledků. Na základě získaných poznatků z literární rešerše byly navrženy receptury pro silikátové kompozity a byly vyrobeny vzorky alkalicky aktivované strusky AAS a cementové pasty CEM o procentuálním zastoupení vodivé příměsi v rozmezí 0 až 18 hmotnostních %. Vzorky byly z nasyceného stavu postupně vysušovány až do konstantní hmotnosti a v průběhu vysoušení byly měřeny elektrické vlastnosti ve frekvenčním rozsahu 40 Hz až 1 MHz. Z úbytku hmotnosti byla stanovena relativní sorpční vlhkost a z naměřených dat se vypočítal měrný elektrický odpor a posoudila se jeho závislost na relativní sorpční vlhkosti a frekvenci. Vyhodnocení je doplněno analýzou mikrostruktury pomocí skenovacího elektronového mikroskopu a rtuťové porozimetrie.

Na základě naměřených hodnot je zjištěno, že hodnota měrného elektrického odporu klesá se zvyšující se relativní sorpční vlhkostí materiálu. Výsledky ukazují, že výrazný nárůst měrného elektrického odporu se objevuje, pokud relativní sorpční vlhkost klesne pod 20 %, avšak kompozity AAS G18 a CEM G18 se vyznačují tím, že po překročení perkolačního prahu mají hodnoty měrného elektrického odporu při dané frekvenci přibližně stejné a neliší se při změně relativní sorpční vlhkosti. Z vyhodnocení

lze dále zjistit, že hodnota měrného elektrického odporu se zvyšuje se snižující se frekvencí.

Jak již bylo zmíněno, referenční cementový kompozit klade vyšší elektrický odpor v porovnání s referenčním vzorkem alkalicky aktivované strusky, protože roztok alkalického aktivátoru vnáší do matrice geopolymery vodivé ionty, které se pohybují ve struktuře a vytváří tím vyšší elektrickou vodivost, než je u portlandského cementu. Měrný elektrický odpor reference CEM vychází 27krát vyšší než reference AAS ve vysušeném stavu při frekvenci 40 Hz.

Výstup dat z rtuťové porozimetrie potvrzuje, že porozita matrice ovlivňuje elektrickou vodivost, protože z porovnání závislosti diferenčního objemu pórů na průměru pórů pro vzorky G6 je patrné, že počet pórů pod 0,01 μm u vzorku AAS G6 neustále narůstá a bude v nich dříve docházet ke kondenzaci, protože platí Kelvinova rovnice, která říká, že ve velmi úzkých kapilárách nastává kondenzace před dosažením nasyceného tlaku vodní páry. Z tohoto důvodu mají vzorky AAS mírně lepší elektrickou vodivost než CEM, navíc se zvyšující se koncentrací grafitového prášku u AAS dochází ke vzniku více pórů pod 0,01 μm , které zvyšují elektrickou vodivost. Celkově vyšší zastoupení pórů se vyskytuje u zkušebních těles AAS G18 a CEM G18 v porovnání s ostatními kompozity, protože bylo použito více záměsové vody, aby došlo k homogenizaci grafitového prášku ve směsi. Během tuhnutí a tvrdnutí betonu docházelo k vypařování vody ze struktury a při jejím odchodu se vytvářelo více kapilár a pórů, než se nachází u ostatních vzorků.

Koncentrace vodivé příměsi v matrici ovlivňuje změnu měrného elektrického odporu. V experimentální části je jako vodivá příměs použit grafitový prášek, který vytváří tenké desky v mikrostruktuře a má tendenci se shlukovat. Kompozity s obsahem 6 hmotnostních % grafitového prášku jsou před perkolačním prahem, protože měrný elektrický odpor mírně poklesl, takže jsou od sebe částice grafitového prášku vzdáleny. Vzorky s 12 hmotnostními % grafitového prášku se vyskytují v oblasti perkolačního prahu, protože dochází k výraznému poklesu měrného elektrického odporu ve srovnání s referencemi, což znamená, že se začíná vytvářet vodivá cesta. Kompozity s 18 hmotnostními % grafitového prášku jsou za perkolačním prahem. Naměřené hodnoty měrného elektrického odporu vypovídají o tom, že výsledná elektrická vodivost závisí hlavně na elektrické vodivosti grafitového prášku. Částice grafitového prášku nacházejí blízko u sebe nebo se shlukují, takže se kontaktní vedení stává dominantním.

6 Seznam použité literatury

- [1] BODNÁROVÁ, L. Kompozitní materiály. Brno: VUT Brno, FAST, 2007.
- [2] PTÁČEK, P. Kinetika heterogenních procesů se zaměřením na technologii silikátů a keramických surovin. Brno: Vutium, 2007.
- [3] BOHÁČOVÁ, J., S. STANĚK a M. VAVRO. Possible Applications of Alkali-Activated Systems in Construction Možnosti Aplikace Alkalicky Aktivovaných Systémů Ve Stavebnictví. Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series [online]. 2012, 12(2), 8-17 [cit. 2020-11-17]. ISSN 1804-4824.
Dostupné z: doi:10.2478/v10160-012-0012-8.
- [4] GARCIA-LODEIRO, I., A. PALOMO a A. FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ. An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders. Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes [online]. Elsevier, 2015, 2015, s. 19-47 [cit. 2021-02-12]. ISBN 9781782422761.
Dostupné z: doi:10.1533/9781782422884.1.19
- [5] SHI, C., P. V. KRIVENKO a D. M. ROY. Alkali-activated cements and concretes. London: Taylor & Francis, 2006. ISBN 0-415-70004-3.
- [6] ŘEZNÍK, B. a P. ROVNANÍKOVÁ. Alkalická aktivace mletého keramického střepu [online]. 2014 [cit. 2021-02-03].
Dostupné z: http://www.civilengineeringjournal.cz/archive/issues/2014/so_9-10/so_05_14_reznik.pdf
- [7] SHI, D., J. YE a W. ZHANG. Effects of activator content on properties, mineralogy, hydration and microstructure of alkali-activated materials synthesized from calcium silicate slag and ground granulated blast furnace slag. Journal of Building Engineering [online]. 2020, 32 [cit. 2021-02-12]. ISSN 23527102.
Dostupné z: doi:10.1016/j.job.2020.101791
- [8] ŠKVÁRA, F. Alkalicky aktivované materiály - geopolymery. Praha, 2007. ISBN 978-80-7080-004-1. Dostupné z: <http://www.vscht.cz>. VŠCHT v Praze, Ústav skla a keramiky.

- [9] ŠŤASTNÍK, S. Fyzika stavebních látek: Fyzikální vlastnosti stavebních materiálů a konstrukcí. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006 [cit. 2021-02-06].
- [10] KÜNZEL, H. M. Simultaneous heat and moisture transport in building components: one- and two-dimensional calculation using simple parameters. Stuttgart: IRB Verlag, 1995. ISBN 3816741037.
- [11] DROCHYTKA, R. a P. MATULOVÁ. Lehké stavební látky. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006 [cit. 2021-02-06].
- [12] HAN, B., X. YU a J. OU. Self-sensing concrete in smart structures. Amsterdam: Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier, [2014]. ISBN 978-0-12-800517-0.
- [13] MÍKOVÁ, M. Silikátové materiály se zvýšenou elektrickou vodivostí. Brno, 2016. 50 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie. Vedoucí práce doc. RNDr. Pavel Rovnaník, Ph.D.
- [14] KŘESÁLEK, V. Elektrická vodivost dvousložkových kompozitních materiálů v oblasti prahu perkolace: Electrical conductivity of two-component composites at the percolation threshold. Brno: VUTIUM, 2004. ISBN 80-214-2617-9.
- [15] BIONDI, L., M. PERRY, J. MCALORUM, CH. VLACHAKIS a A. HAMILTON. Geopolymer-based moisture sensors for reinforced concrete health monitoring. Sensors and Actuators B: Chemical [online]. 2020, 309 [cit. 2021-02-12]. ISSN 09254005.
Dostupné z: doi:10.1016/j.snb.2020.127775
- [16] CAI, J., J. PAN, X. LI, J. TAN a J. LI. Electrical resistivity of fly ash and metakaolin based geopolymers. Construction and Building Materials [online]. 2020, 234 [cit. 2021-02-12]. ISSN 09500618.
Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117868
- [17] SALEEM, M., M. SHAMEEM, S.E. HUSSAIN a M. MASLEHUDDIN. Effect of moisture, chloride and sulphate contamination on the electrical resistivity of Portland cement concrete. Construction and Building Materials [online]. 1996, 10(3), 209-214 [cit. 2021-02-12]. ISSN 09500618.
Dostupné z: doi:10.1016/0950-0618(95)00078-X

- [18] HANJITSUWAN, S., S. HUNPRATUB, P. THONGBAI, S. MAENSIRI, V. SATA a P. CHINDAPRASIRT. Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2014, 45, 9-14 [cit. 2021-5-18]. ISSN 09589465.
Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2013.09.012
- [19] PAYAKANITI, P., S. PINITSOONTORN, P. THONGBAI, V. AMORNKITBAMRUNG a P. CHINDAPRASIRT. Electrical conductivity and compressive strength of carbon fiber reinforced fly ash geopolymeric composites. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, 135, 164-176 [cit. 2021-02-12]. ISSN 09500618.
Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.12.198
- [20] ROVNANÍK, P., I. KUSÁK, P. BAYER, P. SCHMID a L. FIALA. Comparison of electrical and self-sensing properties of Portland cement and alkali-activated slag mortars. *Cement and Concrete Research* [online]. 2019, 118, 84-91 [cit. 2021-02-12]. ISSN 00088846.
Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2019.02.009
- [21] CHEN, M., P. GAO, F. GENG, L. ZHANG a H. LIU. Mechanical and smart properties of carbon fiber and graphite conductive concrete for internal damage monitoring of structure. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, **142**, 320-327 [cit. 2021-03-15]. ISSN 09500618.
Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.03.048
- [22] BAI, S., L. JIANG, Y. JIANG, M. JIN, S. JIANG a D. TAO. Research on electrical conductivity of graphene/cement composites. *Advances in Cement Research* [online]. 2020, 32(2), 45-52 [cit. 2021-02-12]. ISSN 0951-7197.
Dostupné z: doi:10.1680/jadcr.16.00170
- [23] SASSANI, A., H. CEYLAN, S. KIM, K. GOPALAKRISHNAN, A. ARABZADEH a P. C. TAYLOR. Influence of mix design variables on engineering properties of carbon fiber-modified electrically conductive concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, 152, 168-181 [cit. 2021-02-12]. ISSN 09500618.
Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.06.172

- [24] CHOLKER, A. K. a M. A. TANTRAY. Electrical resistance-based health monitoring of structural smart concrete. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2020 [cit. 2021-03-15]. ISSN 22147853.
Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.10.991
- [25] FULHAM-LEBRASSEUR, R., L. SORELLI a D. CONCIATORI. Development of electrically conductive concrete and mortars with hybrid conductive inclusions. *Construction and Building Materials* [online]. 2020, **237** [cit. 2021-03-15]. ISSN 09500618.
Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117470
- [26] ROVNANÍK, P., I. KUSÁK, P. BAYER, P. SCHMID a L. FIALA. Electrical and Self-Sensing Properties of Alkali-Activated Slag Composite with Graphite Filler. *Materials* [online]. 2019, 12(10) [cit. 2021-02-12]. ISSN 1996-1944.
Dostupné z: doi:10.3390/ma12101616
- [27] DONG, W., Y. HUANG, B. LEHANE, F. ASLANI a G. MA. Mechanical and electrical properties of concrete incorporating an iron-particle contained nano-graphite by-product. *Construction and Building Materials* [online]. 2021, **270** [cit. 2021-03-15]. ISSN 09500618.
Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121377
- [28] SUN, J., S. LIN, G. ZHANG, Y. SUN, J. ZHANG, C. CHEN, A. M. MORSY a X. WANG. The effect of graphite and slag on electrical and mechanical properties of electrically conductive cementitious composites. *Construction and Building Materials* [online]. 2021, **281** [cit. 2021-03-15]. ISSN 09500618.
Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122606
- [29] ALLAM, H., F. DUPLAN, J. CLERC, S. AMZIANE a Y. BURTSCHHELL. About electrical resistivity variation during drying and improvement of the sensing behavior of carbon fiber-reinforced smart concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2020, **264** [cit. 2021-03-15]. ISSN 09500618.
Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120699
- [30] ZHANG, L., S. DING, B. HAN, X. YU a Y. NI. Effect of water content on the piezoresistive property of smart cement-based materials with carbon nanotube/nanocarbon black composite filler. *Composites Part A: Applied*

- Science and Manufacturing [online]. 2019, 119, 8-20 [cit. 2021-02-19]. ISSN 1359835X.
Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesa.2019.01.010
- [31] DEMIRCILIOĞLU, E., E. TEOMETE, E. SCHLANGEN a F. J. BAEZA. Temperature and moisture effects on electrical resistance and strain sensitivity of smart concrete. Construction and Building Materials [online]. 2019, **224**, 420-427 [cit. 2021-03-15]. ISSN 09500618.
Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.091
- [32] OLSSON, N., V. BAROGHEL-BOUNY, L. NILSSON a M. THIERY. Non-saturated ion diffusion in concrete – A new approach to evaluate conductivity measurements. Cement and Concrete Composites [online]. 2013, 40, 40-47 [cit. 2021-02-18]. ISSN 09589465.
Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2013.04.001
- [33] HONG, S., T. YUAN, J. CHOI a Y. YOON. Effects of Steelmaking Slag and Moisture on Electrical Properties of Concrete. Materials [online]. 2020, 13(12) [cit. 2021-02-18]. ISSN 1996-1944.
Dostupné z: doi:10.3390/ma13122675
- [34] EL-DIEB, A. S., M. A. EL-GHAREEB, M. A.H. ABDEL-RAHMAN a E. S. A. NASR. Multifunctional electrically conductive concrete using different fillers. Journal of Building Engineering [online]. 2018, **15**, 61-69 [cit. 2021-03-15]. ISSN 23527102.
Dostupné z: doi:10.1016/j.jobe.2017.10.012
- [35] VILLAGRÁN ZACCARDI, Y. A., J. FULLEA GARCÍA, P. HUÉLAMO a Á. A. DI MAIO. Influence of temperature and humidity on Portland cement mortar resistivity monitored with inner sensors. Materials and Corrosion [online]. 2009, 60(4), 294-299 [cit. 2021-02-18]. ISSN 09475117.
Dostupné z: doi:10.1002/maco.200805075
- [36] SMYL, D. J. Relating unsaturated electrical and hydraulic conductivity of cement-based materials. Australian Journal of Civil Engineering [online]. 2018, 16(2), 129-142 [cit. 2021-02-19]. ISSN 1448-8353.
Dostupné z: doi:10.1080/14488353.2018.1473832
- [37] VOSS, A., P. HOSSEINI, M. POUR-GHAZ, M. VAUHKONEN a A. SEPPÄNEN. Three-dimensional electrical capacitance tomography –

- A tool for characterizing moisture transport properties of cement-based materials. *Materials & Design* [online]. 2019, 181 [cit. 2021-02-19]. ISSN 02641275.
Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2019.107967
- [38] CARMELIET, J., G. HOUVENAGHEL, J. VAN SCHIJNDEL a S. ROELS. Moisture phenomena in hydrophobic porous building material Part 1: Measurements and physical interpretations / Wechselwirkung hydrophobierter poröser Werkstoffe des Bauwesens mit Feuchtigkeit, Teil 1. *Restoration of Buildings and Monuments* [online]. 2002, 8(2-3), 165-184 [cit. 2021-5-18]. ISSN 1864-7022.
Dostupné z: doi:10.1515/rbm-2002-5660
- [39] OTTEN, K. A., C. BRISCHKE a C. MEYER. Material moisture content of wood and cement mortars – Electrical resistance-based measurements in the high ohmic range. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, 153, 640-646 [cit. 2021-02-20]. ISSN 09500618.
Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.07.090
- [40] COSOLI, G., A. MOBILI, N. GIULIETTI, et al. Performance of concretes manufactured with newly developed low-clinker cements exposed to water and chlorides: Characterization by means of electrical impedance measurements. *Construction and Building Materials* [online]. 2021, 271 [cit. 2021-02-20]. ISSN 09500618.
Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121546
- [41] ZENG, X., H. LIU, H. ZHU, et al. Study on damage of concrete under uniaxial compression based on electrical resistivity method. *Construction and Building Materials* [online]. 2020, **254** [cit. 2021-03-15]. ISSN 09500618.
Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119270
- [42] KUSÁK, I. Využití střídavého elektrického pole pro posouzení fyzikálních vlastností vybraných stavebních materiálů: Application of an AC electric field to assessing physical properties of selected building materials: zkrácená verze habilitační práce v oboru fyzikální a stavebně materiálové inženýrství. Brno: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2018. ISBN 978-80-214-5681-5.

- [43] ZHANG, P., Z. CHEN, K. G. BROWN, J. C.L. MEEUSSEN, CH. GRUBER, A. C. GARRABRANTS a D. S. KOSSON. Drying model of a high salt content cementitious waste form: Effect of capillary forces and salt solution. Cement and Concrete Research [online]. 2021, 146 [cit. 2021-5-26]. ISSN 00088846.
Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2021.106459
- [44] Odvlhčování staveb. 2., přeprac. vyd. Praha: Grada, 2008. Stavitel. ISBN 978-80-247-2693-9.

7 Seznam fyzikálních veličin a jejich jednotek

P – pórovitost (–)

V_o – celkový objem pórovitého materiálu (m^3)

V – objem tuhé látky bez pórů (m^3)

Z – impedance (Ω)

R – elektrický odpor (Ω)

X – reaktance (Ω)

ρ – měrný elektrický odpor ($\Omega \cdot \text{m}$)

S – obsah stran (m^2)

l – vzdálenost elektrod od sebe (m)

U – napětí (V)

f – frekvence (Hz)

8 Seznam použitých zkratek

SEM – skenovací elektronová mikroskopie

DC – stejnosměrný elektrický proud

AC – střídavý elektrický proud

OPC – obyčejný portlandský cement

AAS – alkalicky aktivovaná struska

CEM – zkušební tělesa na bázi cementu

REF – referenční vzorek (bez obsahu grafitu)

G6 – vzorek s 6% obsahem grafitu (vztaženo na pojivovou složku)

G12 – vzorek s 12% obsahem grafitu (vztaženo na pojivovou složku)

G18 – vzorek s 18% obsahem grafitu (vztaženo na pojivovou složku)