



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

NÁVRH CEMENTOVÉ KOMPOZITNÍ SMĚSI ZLEPŠUJÍCÍ UZEMNĚNÍ

PROPOSITION OF GROUNDING ENHANCING CEMENT COMPOSITE MIXTURE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Sochor

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA

BRNO 2018



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 technologie stavebních hmot a dílců |

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

| | |
|------------------------|--|
| Student | David Sochor |
| Název | Návrh cementové kompozitní směsi zlepšující uzemnění |
| Vedoucí práce | prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA |
| Datum zadání | 30. 11. 2017 |
| Datum odevzdání | 25. 5. 2018 |

V Brně dne 30. 11. 2017

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

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

PANTOJA J. J.; ROMAN F.; AMORTEGUI F.; RIVERA C. Lightning grounding system of a tall-mast for human safety, In Electric Power Systems Research, Volume 153, 2017, Pages 119-127, ISSN 0378-7796

NAHMAN J.; SALAMON D. Mutual interference of neighboring grounding systems and approximate formulation, In Electric Power Systems Research, Volume 151, 2017, Pages 166-173, ISSN 0378-7796

ZHANG J.; XU L.; ZHAO Q. Investigation of carbon fillers modified electrically conductive concrete as grounding electrodes for transmission towers: Computational model and case study,

In Construction and Building Materials, Volume 145, 2017, Pages 347-353, ISSN 0950-0618

ANDROVITSANEAS V. P.; GONOS I. F.; STATHOPULOS I. A. Experimental study on transient impedance of grounding rods encased in ground enhancing compounds, In Electric Power Systems Research, Volume 139, 2016, Pages 109-115, ISSN 0378-7796

ČSN EN 62561-7 – Součástí systému ochrany před bleskem (LPSC) – Část 7: Požadavky na směsi zlepšující uzemnění

ČSN EN 62305-1 – Ochrana před bleskem – Část 1: Obecné principy

ČSN EN 62305-2 – Ochrana před bleskem – Část 2: Řízení rizika

ČSN EN 62305-3 – Ochrana před bleskem – Část 3: Hmotné škody na stavbách a ohrožení života

Výzkumné zprávy a protokoly ústavu THD, příspěvky ze sborníků konferencí, odborné články, časopisy, normy.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V rámci řešení bakalářské práce bude na základě rešerše odborné literatury navržena receptura kompozitu, který bude možné aplikovat za účelem zlepšení uzemnění, a tím zvýšení ochrany stavebních konstrukcí před úderem blesku a vznikem přepětí. Navrhovaná kompozitní směs bude ve své receptuře rovněž zahrnovat podíl druhotných surovin, čímž dojde ke snížení dopadu výroby na životní prostředí.

1. Porovnejte v praxi používané metody ochrany budov před zásahem blesku a vznikem přepětí
2. Zhodnoťte současný stav poznání v oblasti vodivých stavebních materiálů používaných pro ochranu stavebních konstrukcí
3. Formulujte požadavky na mechanicko-fyzikální parametry, které budou nově vyvinuté kompozitní materiály muset splňovat.
4. Navrhněte vhodná pojiva pro výrobu vodivých kompozitních směsí.
5. Zhodnoťte široké spektrum vodivých plniv, a to zejména s důrazem na využití druhotných surovin, pro nové hmoty a navrhněte vhodné typy
6. Navrhněte recepturu cementové kompozitní směsi zlepšující uzemnění a tu experimentálně ověřte.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá návrhem vodivé cementové kompozitní směsi zlepšující uzemnění pro ochranu stavebních konstrukcí v oblastech s nízkou vodivostí. Teoretická část je z větší části zaměřena na shrnutí poznatků současné ochrany budov před bleskem a vznikem přepětí. Zahrnuje poznatky v oblasti vodivých stavebních materiálů a klade si za cíl předložit návrh cementové kompozitní směsi zlepšující uzemnění. Volbou vhodných surovin pro dosažení elektrické vodivosti. Byl vyvinout bezúdržbový materiál nevyžadující přítomnost vlhkosti při udržování vodivosti. V neposlední řadě zkoumá možnosti využití průmyslových odpadů jako druhotných surovin. Závěr se věnuje laboratornímu testování nově vyvinutých hmot, shrnutí a diskuzi zjištěných výsledků. U vyvíjených vzorku se podařilo výrazně snížit rezistivitu. Prokázal se pozitivní vliv příměsí železitých odprašků a uhlíkových částic.

KLÍČOVÁ SLOVA

ochrana před bleskem, přepětí, druhotné suroviny, vodivost, uhlík, železo

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the design of a conductive cement composite grounding mixture for protection of building structures in areas with low conductivity. The theoretical part is mainly focused on summarizing the knowledge of the current protection of buildings against lightning and overvoltage. The study includes knowledge in the field of conductive building materials and aims to present the design of a cement composite mixture to improve grounding. Choosing the right raw materials to achieve electrical conductivity. A maintenance-free material has been developed, no humidity needed material while maintaining conductivity. The work it examines the possibilities of using industrial wastes as secondary raw materials. The conclusion focuses on laboratory testing of newly developed materials, summary and discussion of the results. With the developed samples, the resistivity was greatly reduced. The positive effect of ferric dust and carbon particles has been demonstrated.

KEYWORDS

lightning protection system, overvoltage, secondary raw materials, conductivity, carbon, iron

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

David Sochor *Návrh cementové kompozitní směsi zlepšující uzemnění*. Brno, 2018. 75 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 23.5.2018

David Sochor
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou vyjádřil své poděkování vedoucímu mé bakalářské práce prof. Ing. Rostislavu Drochytkovi, CSc., MBA za věnovaný čas, cenné připomínky a rady, které mi pomohly k vyhotovení této práce. Dále mé poděkování patří Ing. Jindřichu Melicharovi a Ing. Vítovi Černému, Ph.D. za odborné konzultace a pomoc při zpracování tohoto tématu a v neposlední řadě doc. Ing. Pavlu Šteffanovi, Ph.D. z fakulty elektrotechniky za rady v oblasti elektrotechniky.

Předložená práce byla zpracována v rámci řešení projektu FV30239 „Pokročilé hmoty zlepšující uzemnění v systému ochrany před bleskem a přepětím“

OBSAH

| | |
|--|----|
| ÚVOD | 11 |
| TEORETICKÁ ČÁST | 12 |
| 1 ATMOSFÉRICKÝ VÝBOJ..... | 12 |
| 1.1 Obecné vlastnosti..... | 12 |
| 1.2 Druhy atmosférických výbojů..... | 12 |
| 1.2.1 Blesk směrem dolů..... | 12 |
| 1.2.2 Blesk směrem nahoru..... | 13 |
| 2 OCHRANA PŘED BLESKEM | 14 |
| 2.1 Historie ochrany před bleskem | 14 |
| 2.2 Rizika vzniklá úderem blesku | 15 |
| 2.2.1 Obecné principy ochrany | 15 |
| 2.2.2 Příčiny poškození | 16 |
| 2.2.3 Typy škod..... | 16 |
| 2.2.4 Typy ztrát | 17 |
| 2.2.5 Typy rizik „R“ | 17 |
| 2.3 Systém ochrany před bleskem (LPS) | 18 |
| 2.4 Zatřídění objektů v LPS..... | 18 |
| 2.5 Vnější systém ochrany | 18 |
| 2.5.1 Jímací soustava | 19 |
| 2.5.2 Metoda valící se koule..... | 19 |
| 2.5.3 Metoda ochranného úhlu..... | 20 |
| 2.5.4 Metoda mřížové sítě..... | 21 |
| 2.6 Svody..... | 22 |
| 2.6.1 Uzemňovací soustava | 23 |
| 2.7 Vnitřní systém ochrany..... | 25 |
| 2.7.1 Ekvipotenciální pospojování proti blesku | 25 |
| 2.7.2 Oddělení bezpečnou vzdáleností..... | 26 |
| 2.7.3 Ochrana proti přepětí..... | 26 |
| 3 Konstrukční řešení fyzikálního vedení materiálem | 28 |
| 3.1 Vytápění a temperování venkovních ploch | 28 |
| 3.2 Elektricky vodivý beton..... | 29 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.3 | Elektricky vodivé keramické podlahy | 30 |
| | PRAKTICKÁ ČÁST | 32 |
| 4 | CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE | 32 |
| 5 | METODIKA PRÁCE | 33 |
| 6 | ETAPA I: Specifikace požadavků na vlastnosti směsí zlepšující uzemnění | 36 |
| 6.1 | Vyluhovací zkouška (EN 12457-2) | 36 |
| 6.2 | Stanovení síry (ISO 4689–3) | 38 |
| 6.3 | Stanovení rezistivity (ČSN EN 62561-7) | 38 |
| 6.3.1 | Zkušební postup | 39 |
| 6.4 | Korozní zkoušky (ČSN EN 62561-7) | 40 |
| 6.5 | Produkty zlepšují uzemnění pro ochranu stavebních konstrukcí dostupné na zahraničním trhu | 42 |
| 7 | ETAPA 2: Výběr vstupních surovin pro přípravu vodivého kompozitu | 44 |
| 7.1 | Požadavky, které ovlivňují funkci vodivého kompozitu | 44 |
| 7.2 | Pojiva | 45 |
| 7.2.1 | Cementová pojiva | 45 |
| 7.2.2 | Polymerní pojiva | 46 |
| 7.3 | Plniva | 47 |
| 7.3.1 | Písek | 47 |
| 7.3.2 | Expandovaný grafit | 48 |
| 7.3.3 | Uhlíkové částice CR2 | 48 |
| 7.3.4 | Niklový prášek | 49 |
| 7.3.5 | Uhlíkové nanotrubičky | 49 |
| 7.3.6 | Ocelová vlákna | 50 |
| 7.3.7 | Skleněná vlákna | 50 |
| 7.4 | Druhotné suroviny | 51 |
| 7.4.1 | Železité odprašky | 51 |
| 7.4.2 | Popílek | 51 |
| 7.4.3 | Mikrosilika | 53 |
| 7.4.4 | Odpadní drcené sklo | 53 |
| 7.5 | Shrnutí etapy II | 54 |
| 8 | ETAPA III: VOLBA MATERIÁLOVÉHO SLOŽENÍ KOMPOZITNÍ SMĚSI ZLEPŠUJÍCÍ UZEMNĚNÍ | 55 |

| | | |
|-------|---|----|
| 8.1 | Vhodnost použitých surovin..... | 55 |
| 8.2 | Návrh receptur vodivého kompozitu | 55 |
| 8.3 | Shrnutí etapy III..... | 58 |
| 9 | ETAPA IV: EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ NOVĚ VYVINUTÝCH HMOT..... | 59 |
| 9.1 | Výroba zkušebních těles dle navržených receptur..... | 59 |
| 9.2 | Popis prováděných zkoušek kompozitu..... | 61 |
| 9.2.1 | Objemová hmotnost ztvrdlého zkušebního vzorku..... | 61 |
| 9.2.2 | Stanovení impedance a výpočet rezistivity | 63 |
| 9.2.3 | Pevnost v tahu za ohybu | 65 |
| 9.2.4 | Pevnost v tlaku..... | 66 |
| 9.3 | Shrnutí etapy IV | 67 |
| | ZÁVĚR | 69 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ..... | 71 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ | 74 |
| | SEZNAM GRAFŮ | 75 |
| | SEZNAM TABULEK | 75 |

ÚVOD

Ve stavebnictví obecně dochází k upřednostnění kompozitních materiálů. Tento nárůst si můžeme vysvětlit novými poznatky v oblasti mechanicko-fyzikálních vlastností kompozitů, životností a využívání druhotných surovin. Při vývoji nových stavebních materiálů se společnosti snaží snižovat finanční náklady, snižování nákladů nesmí být na úkor kvality.

S dopadem na problémy skladování odpadů, je v dnešní době kladen důraz na snižování objemu skládkování a tím zvýšit míru recyklace k roku 2020 na 50 % a připravit ČR na zákaz skládkování od roku 2024.

Ochrana budov před bleskem je tématem velice důležitým, jelikož se zabývá bezpečností lidí, movitých i nemovitých věcí. S využitím problémů s uzemněním v oblastech s nízkou vodivostí jako je skalnatá půda, vrcholky hor a písečná půda se nabízí možnost vyvinout nový materiál, který pomůže problém řešit.

TEORETICKÁ ČÁST

1 ATMOSFÉRICKÝ VÝBOJ

1.1 Obecné vlastnosti

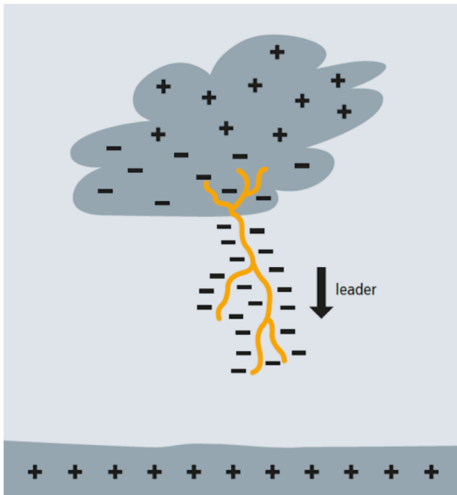
Blesk je jedním z nejstarších pozorovaných přírodních jevů na Zemi, silný elektrostatický výboj, který je doprovázen světlem, vznikající při bouřkách. V dnešní době se zatím nevynalezlo zařízení, které by umožnilo zabránit výboji. Obecně jsou zavedeny základní pojmy výbojů: úder blesku do země – výboj mezi mrakem a zemí, sestupný blesk – z mraku k zemi, vzestupný blesk – elektrický výboj ze země do mraku. Blesk vyvíjí vysoký výbojový proud o hodnotě až několik stovek kA. Při vzniku takto vysokého proudu se výrazně zahřívá okolní vzduch, poté se ochladí a vznikne smrštění. Díky expanzi se vytvoří hrom a akustická vlna, která se může pohybovat rychleji než rychlost zvuku a může být slyšet ve vzdálenosti více než 20 km od zdroje. Doba mezi blesky a po zaznění zvuku (často nazývána doba záblesku) může být použita k posuzování vzdálenosti hromobití. Zvuk cestuje 300 metrů za sekundu, takže blesk, který je slyšen o 30 sekund později, je zhruba 9 km vzdálen. Při takto vysokém výboji dochází k hmotným škodám stavby, jeho vybavení a ohrožení lidského života. (1) (2)

1.2 Druhy atmosférických výbojů

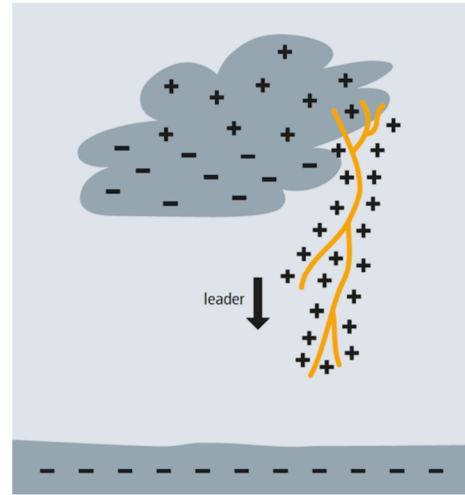
V běžném bouřkovém mraku dochází k teplotním změnám, tím se vytváří kapičky vody a ledové částice. Jejich pohybem a působení gravitace vzniká elektrostatický náboj v oblaku. Kladně nabitě částice se hromadí. V horní části jsou zpravidla „lehčí“ než záporně nabitě částice v dolní části hromového mraku. Toto oddělení náboje produkuje obrovský elektrický potenciál v hodnotě miliónů voltů a nakonec dochází k elektrickému vybití mezi dvěma protilehlými nabitými plochami, které vytvářejí blesk a hrom. Rozlišujeme dva typy blesků na zemi. Blesk směrem dolů (mrak → země) a blesk směrem nahoru (země → mrak). (3)

1.2.1 Blesk směrem dolů

V případě blesku směrem dolů, bude bleskový výboj z oblaku k zemi. Jedná se o nejnebezpečnější druh blesku a škody jim způsobené jsou oproti ostatním fatální. Takové výboje se obvykle vyskytují v rovinném terénu a v blízkosti nízkých budov. Nejběžnější typ blesku je záporný blesk směřující dolů, kde se záporně nabitě části v mraku vytlačují z bouřky do země (Obrázek č. 1). Před samotným výbojem blesku dochází k vyslání předvýboje. Ten vyhledá vhodný výboj od země, který s hlavním výbojem vytvoří elektrický oblouk. Rychlost předvýboje je až 300 km/h. Ve chvíli kdy se výboj přiblíží k zemi (100–10 m) vznikne silné elektrické pole, které překoná elektrickou pevnost vzduchu a dojde k udeření blesku. Po přetržení blesku (snížení náboje mezi oblakem a zemí) dojde k pozitivnímu výboji v již vytvořeném bleskovém kanálu (Obrázek č. 2). Těchto slabších výbojů může být několik, tzn. že celkový výboj blesku může trvat několik vteřin. Poměr polarit je 90 % negativního blesku a 10 % pozitivního blesku. Tento poměr závisí na geografické poloze. (3)



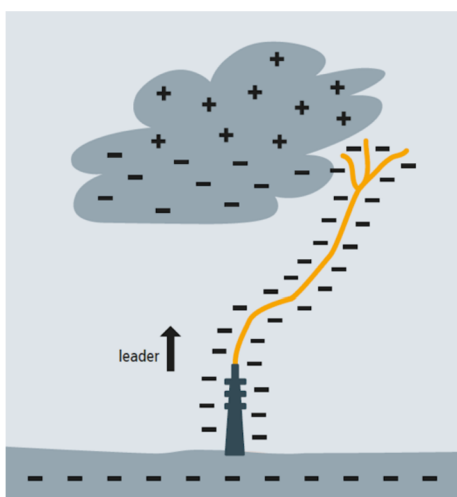
Obrázek č. 1: Sestupný negativní výboj (mrak-země)



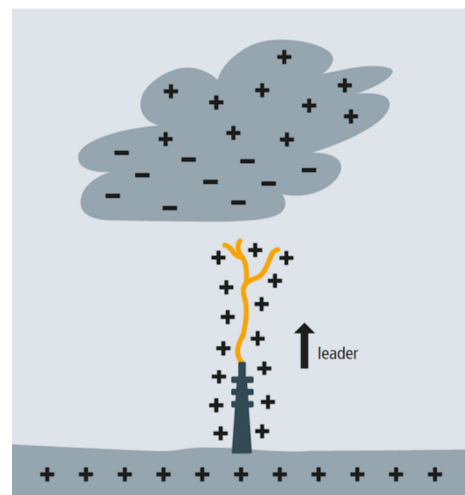
Obrázek č. 2: Sestupný pozitivní výboj (mrak-země)

1.2.2 Blesk směrem nahoru

U velmi vysokých exponovaných objektů (např. u větrných turbín, stožárů, telekomunikačních věží) nebo na vrcholcích hor, může dojít k blesku směrem vzhůru (záblesky do oblak). Rozpoznáme pomocí vzestupných větví bleskového výboje. V případě vzestupných záblesků není v oblaku dosaženo vysoké intenzity elektrického pole, které je zapotřebí k vytvoření blesku směrem k zemi, ale spíše elektrického pole na exponovaném objektu a související vysoká pevnost elektrického pole. Z tohoto místa se výboj šíří směrem k mraku. Blesky vzhůru se vyskytují jak s negativní polaritou (Obrázek č. 3), tak s kladnou polaritou (Obrázek č. 4). Vzhledem k tomu, že s bleskem směrem vzhůru se výboj šíří z exponovaného předmětu na povrchu země do oblaku, vysoké objekty mohou být během bouřky několikrát zasaženy jedním bleskem. (3)



Obrázek č. 4: Vzestupný negativní výboj (země-mrak)



Obrázek č. 3: Vzestupný pozitivní výboj (země-mrak)

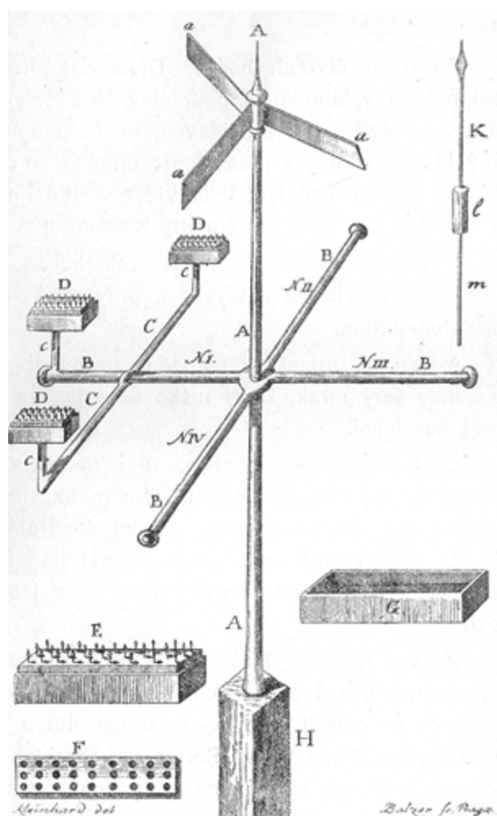
2 OCHRANA PŘED BLESKEM

2.1 Historie ochrany před bleskem

Zcela na začátku dějin ochrany před bleskem stál Prokop Diviš a Benjamin Franklin. Prokop Diviš začínal s myšlenkou sestavit zařízení, které by zbavovalo z bouřek blesky. Vynalezl bleskosvod „povětrnostní mašina“ jak stroj nazval (Obrázek č. 5). Konstrukce bleskosvodu byl vodorovný kříž ze železných tyčí. Ramena kříže byla překřížena dalšími kratšími tyčemi, čímž vytvořil prostor pro osazení dvanácti kovových krabic, které vyplnil kovovými pilinami pro větší vodivost. Tímto zhotovil velkou vodivou plochu o výšce 13 metrů upevněnou třemi železnými tyčemi hluboko do země. Cílem Divišova bleskosvodu bylo elektřinu vyjmout z mraků, aby blesk vůbec nevznikl, avšak svým zařízením blesky přitahoval k zemi. Historické prameny uvádějí, že v roce vztyčení bleskosvod prokazatelně zabránil vzniku tří bouří.

Americký vědec Benjamin Franklin se zabýval pokusy o atmosférické elektřině, v roce 1752 zkouškami prokázal podstatu blesku a je považován za vynálezce bleskosvodu, avšak jeho bleskosvod byl tehdy bez uzemnění, což bylo velmi nebezpečné.

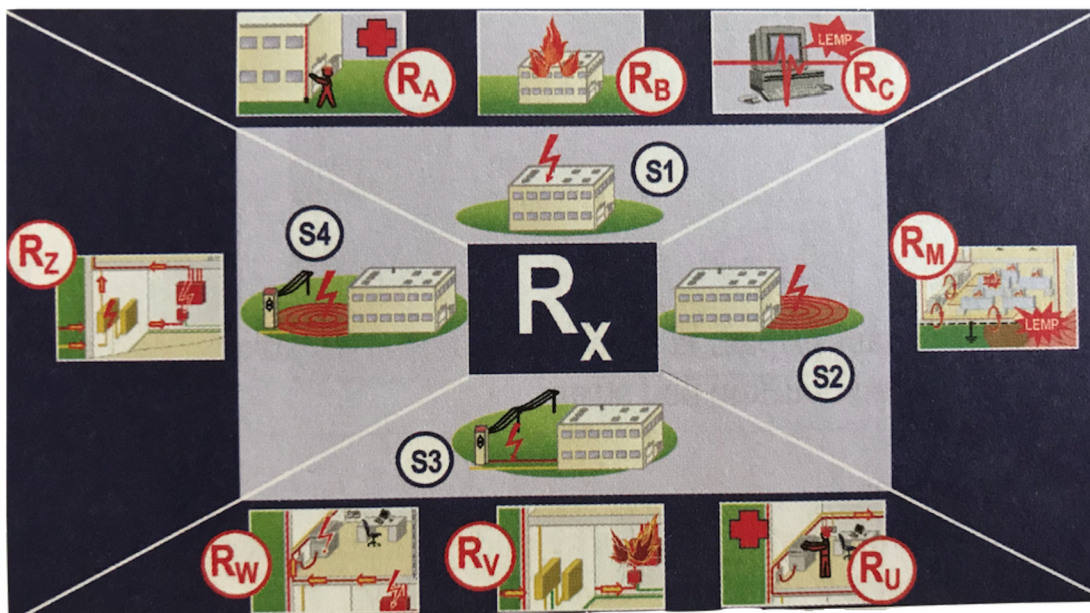
(4)



Obrázek č. 5: Divišův bleskosvod (5)

2.2 Rizika vzniklá úderem blesku

- Riziko R_A – úrazu nebo zranění pro člověka nebo zvířata po přímém úderu blesku do budovy
- Riziko R_B – požáru nebo mechanického poškození budovy po přímém úderu blesku do budovy
- Riziko R_C – pro elektronická zařízení ve stavbách po přímém úderu blesku do budovy
- Riziko R_M – pro elektronická zařízení ve stavbách vzniklé po úderu blesku v blízkosti budovy
- Riziko R_U – úrazu nebo zranění pro člověka nebo zvířata po přímém úderu blesku do inženýrské sítě
- Riziko R_V - požáru nebo mechanického poškození budovy následkem úderu blesku do metalické sítě
- Riziko R_Z – pro elektronická zařízení ve stavbách vzniklé po úderu blesku v blízkosti metalických sítí (6)



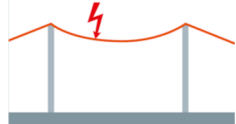



Obrázek č. 6: Přehled součástí rizik dle příčin poškození (6)

2.2.1 Obecné principy ochrany

Dosud nejsou známa žádná zařízení, která by zabránila výboji blesku. Musí se tedy akceptovat opatření k minimalizaci újmy na zdraví, hmotným a dalším škodám. Ideální ochrana stavby a inženýrských sítí bude v případě, pokud objekt bude vodivý, uzemněný, celkově stíněný, dostatečně silný a v neposlední řadě pospojován na vstupu inženýrských sítí do stavby. (7) Pro přehledné zobrazení slouží Tabulka 1.

Tabulka 1: Škody a ztráty na stavbách podle různých míst úderu blesku (8)

| Místo úderu | | Příčina poškození | Typ poškození | Typ ztráty |
|------------------------------------|---|-------------------|----------------|---|
| Stavba |  | S1 | D1 D2 D3 | L1, L4 ^a L1, L2, L3, L4 L1 ^b , L2, L4 |
| V blízkosti stavby |  | S2 | D3 | L1 ^b , L2, L4 |
| Sít' připojené ke stavbě |  | S3 | D1 D2 D3 | L1, L4 ^a L1, L2, L3, L4 L1 ^b , L2, L4 |
| V blízkosti inženýrské sítě |  | S4 | D3 | L1 ^b , L2, L4 |

^a Pouze pro nemovitosti, kde mohou být ztráty na zvířatech.
^b Pouze pro stavby s nebezpečím výbuchu a pro nemocnice nebo jiné stavby, kde porucha vnitřních systémů bezprostředně ohrožuje lidské životy.

2.2.2 Příčiny poškození

Příčinou poškození je bleskový proud, závisí na poloze úderu, může se jednat o zasažení přímo do uvažovaného objektu nebo v jeho blízkosti. Úder zasažený přímo do objektu nese větší energii než blízký úder blesku. (9)

Ze zmíněných přímých a blízkých úderů vychází i (10) tato norma rozlišuje čtyři možné příčiny poškození:

- S1 – údery blesku do stavby
- S2 – údery blesku v blízkosti stavby
- S3 – údery blesku do inženýrských sítí
- S4 – údery blesku v blízkosti inženýrských sítí

2.2.3 Typy škod

Výboj blesku vede k mnoha druhům škod, jejich povaha závisí na vlastnostech uvažovaného objektu. Druh použité nosné konstrukce, účel a způsob využití. Související škody se přitom mohou omezit na určitou část objektu nebo může dojít k poškození v celém jeho prostoru. (9)

Rozlišujeme tři základní typy škod, vznikajících následkem úderu blesku:

- D1 – Úraz živých bytostí působením nebezpečných dotykovým a krokovým napětím následkem elektrického šoku
- D2 – Hmotné škody (požár, výbuch, mechanická destrukce, uvolnění chemikálií) způsobenou účinky bleskového proudu včetně jiskření
- D3 – Porucha elektrických a elektronických systémů (způsobenými přepětím)

2.2.4 Typy ztrát

Každý typ škody, může vyvolat různé následné ztráty. Typy ztrát jsou elektrické šoky pro živé bytosti následkem dotykových a krokových napětí, hmotné škody (požár, exploze, mechanické a chemické reakce) způsobené bleskovým proudem včetně jisker a selhání elektrických a elektronických systémů účinkem elektrických impulsů (rázů). (9)

Následující typy ztrát, které se mohou objevit jako důsledek škody:

- L1 – Ztráty na lidských životech, zahrnující poranění nebo smrt osob
- L2 – Ztráty na službách veřejných
- L3 – Ztráty na kulturním dědictví
- L4 – Ztráty ekonomické hodnoty (stavby a jejího obsahu a ztráta činnosti)

2.2.5 Typy rizik „R“

Riziko R je hodnota průměrných možných ročních ztrát. Pro vyhodnocení, zda je nebo není potřebná ochrana objektu před bleskem, se musí provést ohodnocení rizika v souladu s postupy obsaženými v ČSN EN 62305-2.

- R1 – Riziko ztrát na lidských životech nebo trvalé zranění
- R2 – Riziko ztrát na službách veřejnosti
- R3 – Riziko ztrát na kulturním dědictví
- R4 – Riziko ztrát ekonomických hodnot

Ochrana před bleskem je potřebná pokud riziko R (R_1 až R_3) je vyšší než přípustná hladina R_T ($R > R_T$). Při ochraně objektu je nutno snížit riziko R na přípustné riziko R_T ($R \leq R_T$) (8)

Tabulka 2: Typické hodnoty pro přípustné riziko R_T (10)

| Typy ztrát | Hodnota přípustného rizika |
|---|----------------------------|
| Ztráty na lidských životech nebo trvalé úrazy | 10^{-5} |
| Ztráta veřejné služby | 10^{-3} |
| Ztráta kulturního dědictví | 10^{-3} |

2.3 Systém ochrany před bleskem (LPS)

Ochrana objektů a elektrických zařízení před možnými účinky blesku a přepětí. Systémy ochrany rozdělujeme na dvě části. Vnější systém ochrany před bleskem se stává z jímací soustavy, soustavy svodů a uzemňovací soustavy. Vnitřní systém ochrany před bleskem je tvořen ekvipotenciální pospojováním proti blesku, nebo elektrickou izolací vnějšího systému ochrany. (7)

2.4 Zatřídění objektů v LPS

Dle velikosti atmosférického výboje rozdělujeme systém ochrany před bleskem (LPS) do čtyř tříd viz. Tabulka 3 (11)

Tabulka 3: Doporučené třídy LPS (11)

| Třída LPS | Druh objektu |
|-----------|--|
| I | budovy s vysoce náročnou výrobou, energetické zdroje, budovy s prostředím s nebezpečím výbuchu, provozovny s chemickou výrobou, nemocnice, jaderné elektrárny (+ předpisy KTA), automobilky, plynárny, vodárny, elektrárny, banky, stanice mobilních operátorů |
| II | supermarkety, muzea, rodinné domy s nadstandardní výbavou, školy, katedrály |
| III | rodinné domy, administrativní budovy, obytné budovy, zemědělské stavby |
| IV | budovy stojící v ochranném prostoru jiných objektů (bez vlastního hromosvodu), obyčejné sklady apod., stavby a haly bez výskytu osob a vnitřního vybavení |

2.5 Vnější systém ochrany

Úkolem vnější ochrany před bleskem je zachytit všechny údery blesku směřující do stavebních objektů pomocí jímací soustavy, bezpečné svedení blesku do uzemňovací soustavy systémem svodů až k rozptýlení bleskového proudu do země uzemňovací soustavou. To vše se má odehrát bez poškození chráněného objektu vlivem tepelných, mechanických nebo elektrických účinků atmosférického výboje. (12)

2.5.1 Jímací soustava

Jímací soustava musí v každém případě zachytit blesk. Musí být tedy dostatečně masivní a musí být umístěna tak, aby blesk neuhodil do částí, které mají být chráněny. Je-li jímací soustava správně navržena sníží se riziko vniknutí bleskového proudu do stavby. (11) Jímací soustavu mohou tvořit:

- Tyče nebo soustava tyčí
- Podélné vedení nebo zavěšená lana
- Mřížová síť

Součásti jímací soustavy instalované na objektu musí být umístěny na rozích, exponovaných místech a na hranách. Každý jímač vytváří pod sebou ochranný prostor. Ten lze určit pomocí tří metod:

- Metodou valící se koule
- Metodou ochranného úhlu
- Metodou mřížové sítě

Všechny tyto metody lze kombinovat při návrhu jednoho objektu.

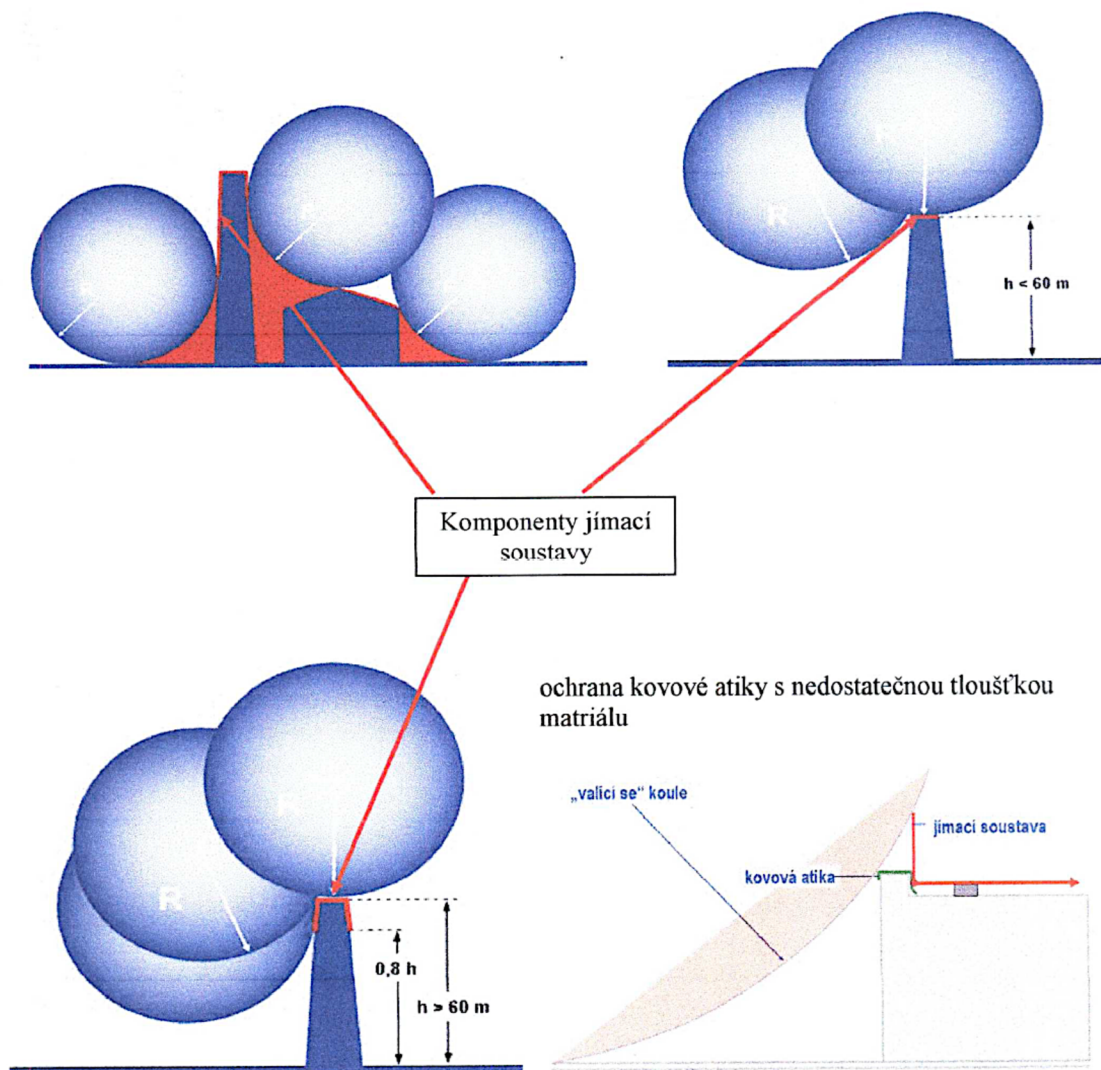
2.5.2 Metoda valící se koule

Jedná se o výchozí metodu, od které jsou odvozené metody další. Princip spočívá v tom, že koule o poloměru stanoveném pro jednotlivé třídy ochrany (viz. Tabulka č. 3 v kapitole 2.4) se valí kolem, přes celou stavbu až do doby, dokud se nedotkne země. V místech kde se koule dotkne jakékoliv části objektu, musí být umístěn zvolený komponent jímací soustavy. Tato metoda je vhodná především pro složité stavby a objekty v husté zástavbě, je také přesnější než metoda ochranného úhlu nebo metoda mřížové sítě. (7)

Na obrázku č. 7 je zřetelné převalování koule přes objekt. Ve všech dotkových bodech valící se koule, je nutno doplnit tato místa jímači.

Tabulka 4: Parametry bleskové koule (11)

| Třída LPS | Poloměr valící se koule r [m] |
|-----------|---------------------------------|
| I | 20 |
| II | 30 |
| III | 45 |
| IV | 60 |

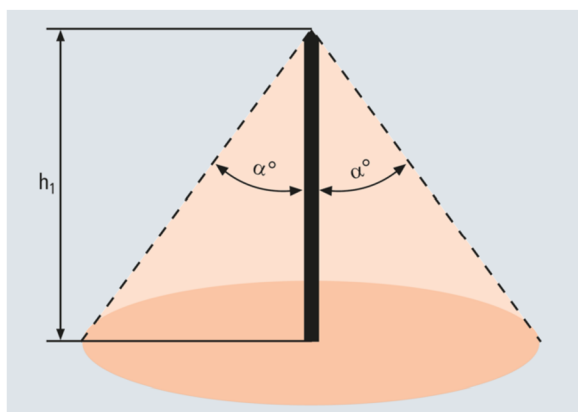


Obrázek č. 7: Metoda valící se koule (7)

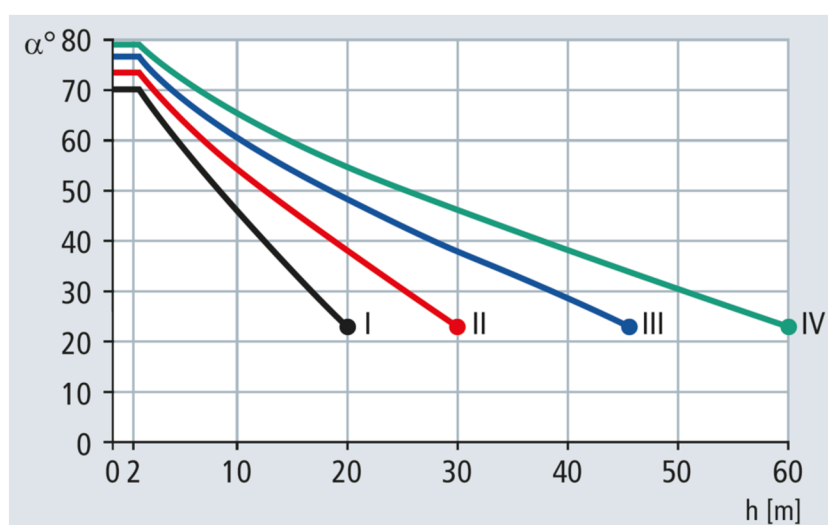
2.5.3 Metoda ochranného úhlu

Tato metoda je považována za zjednodušenou, používá se zpravidla u jednoduchých staveb s tyčovými jímáči, hřebenovou nebo kombinovanou hřebenovou jímací soustavou. Tato metoda kopíruje metodu valící se koule, pouze s tím rozdílem, že k vymezení ochranného prostoru se používají běžné stupně, potažmo metry. (9)

Ochranný prostor v okolí jímací tyče bude vytvořen pravoúhlým kuželem s vrcholem v ose jímací tyče, polovičním vrcholovým úhlem α , který je závislý na výšce jímací soustavy a třídě ochrany LPS.



Obrázek č. 8: Ochranný prostor vymezený ochranným úhlem (3)



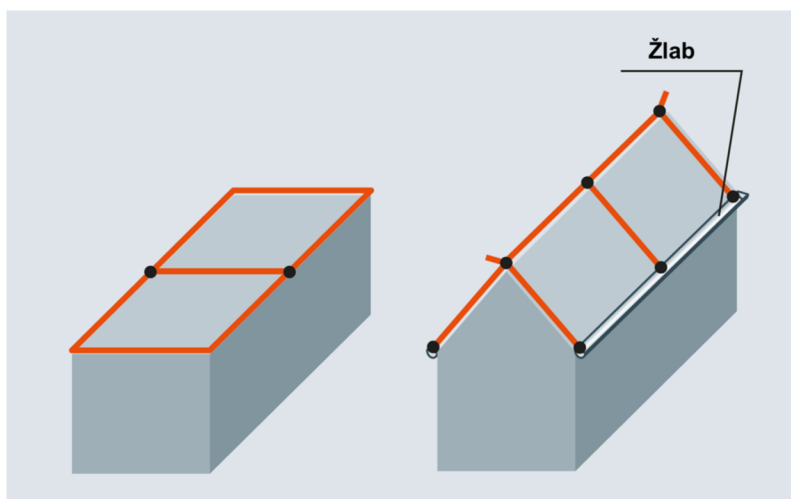
Graf č. 1: Velikost ochranných úhlů (3)

2.5.4 Metoda mřížové sítě

Tato metoda se používá převážně pro rovinné plochy. Její využití se používá k ochraně stavebních objektů s plochými a sedlovými střechami. Vytvořenou sítí, popř. mříže vodivých jímacích vedení, propojených v místech vzájemného křížení. Velikost ok navrhované mřížové jímací soustavy se odvíjí od zatřídění chráněného objektu do tříd ochrany před bleskem (LPS) dle Tabulky 3. Tuto souvislost uvádí Tabulka 5. (9)

Tabulka 5: Parametry mřížové jímací soustavy (13)

| Třída LPS | Velikost ok [m] |
|-----------|-----------------|
| I | 5 x 5 |
| II | 10 x 10 |
| III | 15 x 15 |
| IV | 20 x 20 |



Obrázek č. 9: Systém mřížové soustavy u ploché a sedlové střechy (3)

2.6 Svody

Svody zabezpečují svedení energie z jímacího zařízení do uzemňovací soustavy. Z hlediska provedení mohou být svody skryty v drážce obvodového zdiva, nebo na povrchu fasády. Při skrytém uložení může dojít k poškození fasády a kovového vodiče vlivem chemického působení stavebního materiálu. (9)

Bez ohledu na umístění svodů, je nutno svody umístit tak, aby se snížila pravděpodobnost škod způsobených bleskem. Dodržením těchto obecných pravidel:

- Vytvoření několika paralelních vodivých cest
- Zajištění co nejkratší proudové cesty od jímacího zařízení k zemničům
- Propojení s vodivými částmi stavebního objektu všude tam, kde je třeba

Obecně mají být svody rozmístěny v blízkosti rohů chráněného objektu a rovnoměrně podél obvodových stěn. Navrhuje se dostatečný počet nikdy ne jeden. (viz. tabulka 6.) (9)

Tabulka 6: Typické hodnoty vzdáleností mezi svody (13)

| Třída LPS | Obvyklé vzdálenosti [m] |
|-----------|-------------------------|
| I | 10 |
| II | 10 |
| III | 15 |
| IV | 20 |

**Dle ČSN EN 62305-3 ed.2 čl. E.5.3.1: Odchylky od vzdáleností mezi svody jsou přípustné v toleranci $\pm 20\%$*

- Při použití izolované (oddálené) jímací soustavy:
 - Pokud je jímací soustava tvořena jímací tyčí na oddáleně stojícím stožáru (stožárech), které nejsou z kovu nebo ze vzájemně spojeného armování je zapotřebí instalovat jeden svod pro jednotlivý stožár.
 - Pokud je jímací soustava sestavena z závěsných lan (jednoho lana), je zapotřebí instalovat jeden svod pro každou nosnou konstrukci.
 - Pokud je jímací soustava tvořena mřížovou jímací soustavou, je nutný minimálně jeden svod pro každou hranu konstrukce k uchycení lana nebo drátu. (7)

- Při použití neoddálené jímací soustavy:
 - Pro každý neizolovaný systém se musí instalovat minimálně dva svody. Umístění se volí s ohledem na architektonické a praktické požadavky chráněné stavby, pravidelně po obvodu se stejnými rozestupy. Vzdálenosti mezi svody určuje tabulka 6. (7)

Svody musí být rozmístěny, pro vytvoření přímého, nepřerušovaného spojení na jímací soustavu. Zajištění co nejkratšího spojení se zemí, musí vést svisle dolů a nevytvářet zbytečné oblouky a smyčky. Vždy musí být zajištěna minimální přípustná vzdálenost od materiálu k podkladu, především na jeho hořlavost. Svody se neumísťují do míst nebo okolí se zvýšeným nebezpečím koroze. (7)

2.6.1 Uzemňovací soustava

Uzemňovací soustava by měla zajistit bezproblémový přechod bleskového proudu do země, aniž by došlo k nebezpečným přepětím. Důležitým kritériem jsou jeho tvary a rozměry. Kromě těchto kritérií je především důležitá hodnota zemního odporu, která by měl být menší než 10Ω . (7)

$$R_E \leq 10 \Omega$$

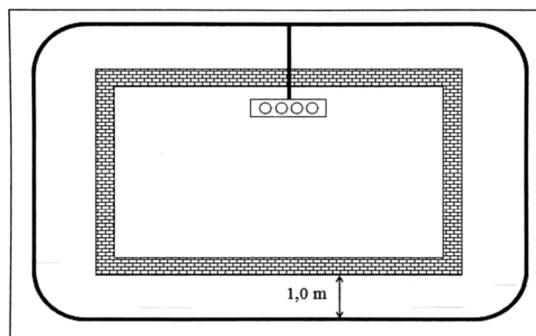
Z hlediska ochrany před bleskem je nutno upřednostnit jedině integrované uzemnění objektu, která je vhodná pro všechny účely (např. ochrana před bleskem, silnoproudé, telekomunikační systémy a další zařízení) (7)

Tabulka 7: Provedení zemničů (7)

| Uspořádání zemničů | |
|--|--|
| <p>Uspořádání typu A</p> <p>Skládá se ze svislého nebo vodorovného zemniče, instalovaného vně stavby a spojeného se všemi svody. Při tomto uspořádání nesmí být počet zemničů nižší než 2. Zemnič musí být uložen v zemi s horním koncem min. 0,5m pod povrchem</p> | <p>Uspořádání typu B</p> <p>Sestává buď z obvodového zemniče vně chráněného objektu, nebo ze základového zemniče. Může být proveden i jako mřížový. Minimální hloubka uložení je 0,5 m pod povrchem a je-li vně objektu tak ve vzdálenosti 1 m od vnějších zdí objektu.</p> |

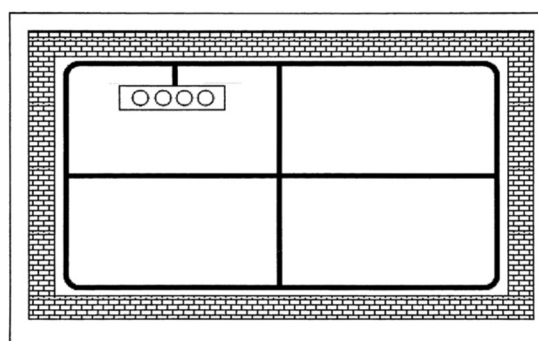
Uspořádání typu B tvoří obvodový nebo základový zemnič.

- **Obvodový zemnič** – se navrhuje aby byl minimálně 80 % své délky v kontaktu s půdou. Instaluje se jako uzavřená soustava ve vzdálenosti 1 m od objektu a hloubce 0,5 m pod povrchem. (11)



Obrázek č. 11: Obvodový zemnič (11)

- **Základový zemnič** – uložený v základech objektu lze jej tedy využít pouze u nových objektů. Může být proveden jako mříž s oky maximálně 10 m pod celým základem, vždy minimálně 50 mm v betonu (izolace nesmí být proložena mezi zemničem v betonu a půdou). (11)



Obrázek č. 10: Základový zemnič (11)

2.7 Vnitřní systém ochrany

Úkolem vnitřní ochrany před bleskem je zabránit vzniku nebezpečných rozdílů potenciálů uvnitř chráněného objektu. A ochránit tak případné ohrožení života nebo vzniku materiálních škod. (9)

Hlavním projevem velkého rozdílu potenciálů je jiskření, kterému chceme zabránit. Vzniká mezi jímacími vodiči nebo svody, kterými proudí elektrický proud vyvolaný úderem blesku. Ochranu před vznikem případných nebezpečných rozdílů potenciálů a tedy i jiskření, lze zabránit dvěma základními způsoby. (9)

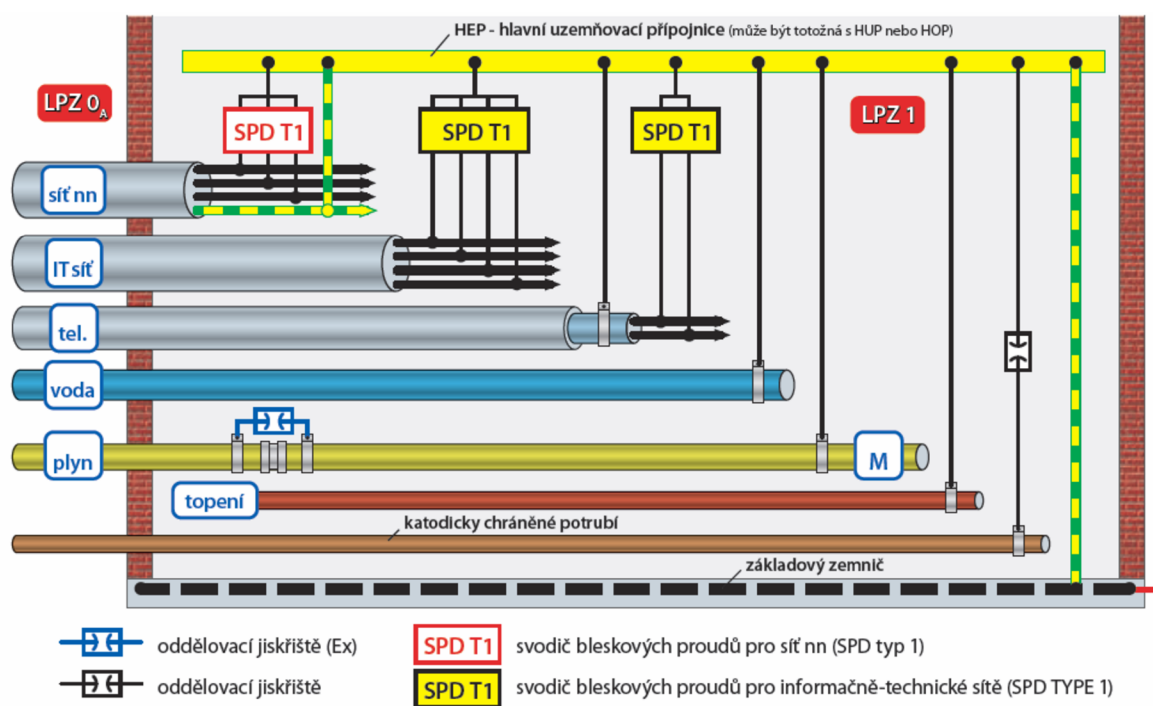
2.7.1 Ekvipotenciální pospojování proti blesku

Po úderu blesku do stavby proudy proudící po svodech a částech stavby vytvoří různé napěťové hladiny, snahou je vytvořit spojováním zkrat. Pokud přes některé části (trubka, vodič atd.) vede proud stávají se zdrojem napětí. (11)

Vyrovnaní potenciálů se dosáhne budou-li do systému ochrany před bleskem zapojeny:

- Kovové konstrukce objektu
- Kovové instalace
- Vnější vodivé součásti a vedení, která jsou spojena s objektem
- Elektrické a elektronické systémy uvnitř chráněného objektu

Soustavu základního vyrovnaní potenciálů v ochraně před bleskem ilustruje obrázek č. 12



Obrázek č. 12: Umístění ekvipotenciálního pospojování (14)

Z obrázku č.12 můžeme pozorovat, že na hlavní uzemňovací přípojnicí jsou připojeny do stavby vstupující kovová potrubí vody, plynu, topení atd. Potrubí která se nemohou připojit přímo se připojují přes jiskřiště, které je schopné přenášet bleskový proud (50kA). Pokud se potrubí připojuje přes jiskřiště, musí být zajištěn souhlas od dodavatele, v tomto případě plynu nebo vody. (11)

2.7.2 Oddělení bezpečnou vzdáleností

Oddělení znamená elektricky izolovaný mezi zařízením vnější ochrany před bleskem (LPS) a kovovými částmi uvažovaného stavebního objektu s dodržáním dostatečné vzdálenosti. Jedná se o vzdálenost, kterou bleskový proud nepřeskočí. (11)
Záleží na:

- Velikosti bleskového proudu
- Délce vedení, na němž se vytváří úbytek napětí
- Prostředí (vzduch, zdivo nebo beton)

Pokud je úbytek na vedení vyšší než elektrická pevnost mezery mezi svodem a vodivou, uzemněnou částí stavby, pak dojde k přeskoku (např. vzduchu). Podobný jev se vyskytuje při úderu blesku do země. (11)

Vypočítaná vzdálenost bude menší pokud:

- Bude větší počet svodů
- Svody, které budou vedeny přímo k zemniči
- Místo určení bude blíže k zemi nebo k jinému vyrovnání potenciálů

Dostatečná vzdálenost se nemusí vypočítávat ani dodržovat, pokud je instalovaný pospojovaný typ hromosvodu, kde je snahou vše dohromady propojit. (11) Také se nemusí dodržovat u objektu s kovovým nebo elektricky vzájemně propojeným ocelovým armováním. (14)

2.7.3 Ochrana proti přepětí

Dnes se používají elektronická zařízení s elektronickými obvody s velkou integrací polovodičových součástek, která jsou citlivá na vznik přepětí a rušení ze sítě, tím může dojít k poškození elektronického zařízení. (7) Přepětí je elektrické napětí, které je vyšší než nejvyšší povolené provozní napětí, při normálních provozních podmínkách. Ve veřejných inženýrských sítích (vodovodní, plynové potrubí) nebo elektrických vedeních mohou proudit vysoké proudy. Proud promění tyto kovové prvky ve zdroj napětí. (11)

Přepětí může vznikat:

- Přímý úder blesku vyvolá cca. 20-ti násobné přepětí než je jmenovité napětí v síti.
- Nepřímý úder blesku – v blízkosti, ale i ve vzdálenosti několik stovek metrů dochází vlivem indukčním a kapacitním vazbám ke vzniku přepětí
- Spínací přepětí – vzniká při spínání indukční nebo kapacitní zátěže jako např. motorů a zářivkových svítidel. Tímto způsobem vznikne až trojnásobné přepětí než jmenovité napětí. Nejčastější zdroje přepětí jsou v průmyslových závodech.
- Statická elektřina – při tření dvou umělých tkanin dochází k nabití a následnému vybití do země. (například: při svlékání svetru dochází k jiskření)

TYP 1 – HRUBÁ OCHRANA

Svodiče bleskových proudů zajišťují ochranu, které jsou schopny vést bleskový proud bez poškození. Svodiče bleskových proudů jsou konstruovány na bázi jiskřiště. Rozdělují se na „otevřená“ a „uzavřená“ jiskřiště. Otevřená jiskřiště vynikají vysokými svodovými schopnostmi, nevýhodou je vyšlehování žhavého plazmatu z pouzdra přepětového ochranného zařízení (SPD), což je velký problém vzhledem k požární bezpečnosti. Uzavřená jiskřiště má menší svodové schopnosti, ale je zde vyřešen problém otevřených jiskřišť s požární bezpečností. Svodiče bleskových proudů se instalují do hlavního rozvaděče. Tuto instalaci musí schválit příslušný dodavatel energie. (12)

TYP 2 – STŘEDNÍ OCHRANA

Svodiče bleskových proudů na bázi varistorů. Svádějí atmosférické přepětí nebo přepětí ze spínacích pochodů v síti, bez poškození. Varistory se používají ke stabilizaci stejnosměrných napětí a také jako přepětová ochrana. Převážně se vyrábějí slinutím karbidu křemičitého (SiC). Elektrické hodnoty závisí z jakých použitých materiálů jsou vyrobeny dále pak na zrnitosti a rozměru tělesa. Výhodou použití varistorů je jejich nízká cena. Instalují se do podružného rozvaděče.

TYP 3 – JEMNÁ OCHRANA

Hlavními prvky třetí ochrany (jemné) jsou varistory a supresorové diody. Tato ochrana se instaluje těsně před chráněným spotřebičem bez dlouhého elektrického vedení od ochrany ke spotřebiči. V případě, že by bylo dlouhé vedení mezi spotřebičem a zásuvkou, mohlo by se ve vodičích zvýšit napětí. Je-li délka vedení mezi typem 1 a 2 menší než 5 metrů, nemusí se ochrana typu 3 instalovat. Obvykle jsou konstruované pro připojení do zásuvkového adaptéru jako přepětová ochrana.

3 Konstrukční řešení fyzikálního vedení materiálem

3.1 Vytápění a temperování venkovních ploch

Údržba dopravních ploch v zimě je velmi náročná. Silnice, mosty, nástupiště i výhybky lze udržet čisté a bez sněhu pomocí systému pro vytápění a temperování ploch s využitím geotermálního tepla. (15)

Výhody v zimním období

- Snížení nebezpečí nehody
- zvýšení bezpečnosti pro ledem ohrožené plochy
- nulové náklady na pracovní sílu pro úklid ploch
- minimální náklady na sůl
- automatická regulace zařízení

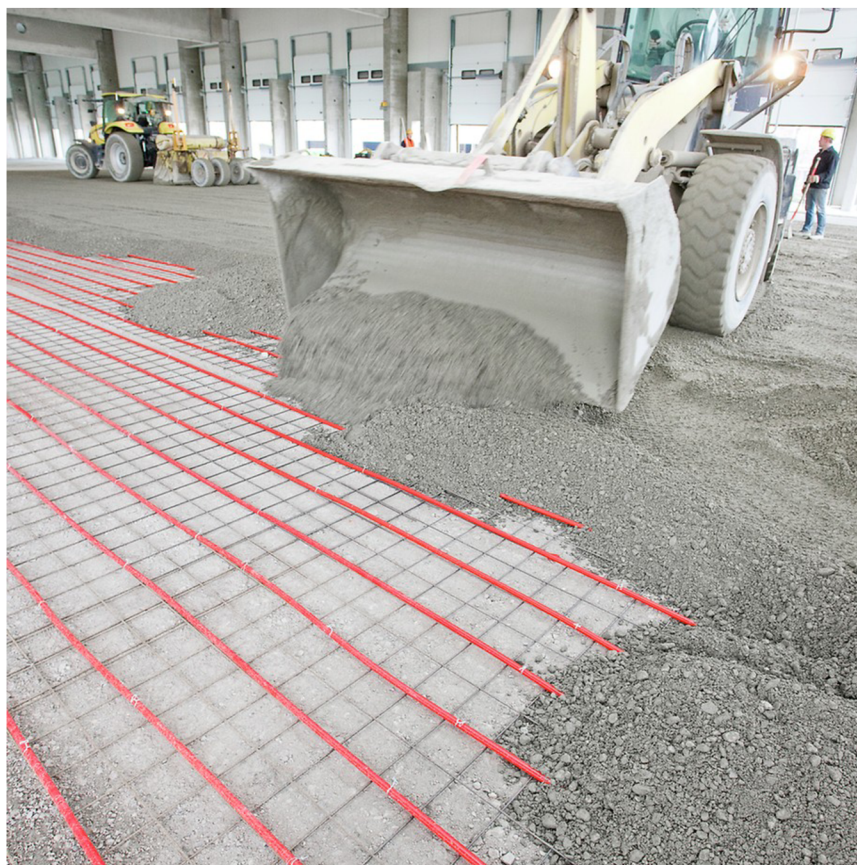
Výhody v letním období

- prodloužení životnosti povrchu
- rychlá regenerace půdy absorpcí slunečního záření
- podpora dodávky tepla do stávající infrastruktury
- snížení tvorby vyjetých kolejí
- redukce možnosti aquaplaningu

Vytápění a temperování volných ploch s využitím regenerativních energií snižují tvorbu emisí CO₂ a snižují zátěž životního prostředí a škody vznikající při solení ploch v zimním období. (15)

Nabízí se široká možnost využití tohoto konstrukčního systému jako jsou:

- nástupiště
- mosty
- parkovací plochy
- vjezd/výjezd do nemocnic a hasičských stanic
- rampy pro nakládku
- vjezd/výjezd z tunelů
- pěší zóny
- letiště: odstavní plochy, jako i startovací a přistávací dráhy
- přistávací plochy pro helikoptéry



Obrázek č. 13: Vytápění podlah v průmyslových halách (16)

Tepelné médium cirkuluje v systému sestávajícím z trubek, oběhového čerpadla a geotermálních sond nebo jiných zařízení na výrobu geotermální energie. V zimě se geotermální teplo přenáší nahoru, ohřeje otevřený prostor (podlahu, vozovku) a udržuje ji bez ledu a sněhu. Pokud je zapotřebí více energie v oblastech bohatých především na sníh, lze připojit tepelné čerpadlo. (15)

Geotermální systémy nemusí být využívány pouze k vytápění, ale také chlazení. V tomto případě je teplo odstraněno z povrchu vozovky a přiváděno do země. Skladování energie v zemi slouží jako základ pro úsporu energie a ekologicky šetrný způsob vytápění a chlazení. (15)

3.2 Elektricky vodivý beton

Slouží jako konstrukční materiál se schopností snímání. Přítomnost funkčních plnidel umožňuje samočinné snímání. Funkční plnivo musí být dobře rozptýleno v betonové matici, které tvoří rozsáhlou vodivou síť uvnitř betonu. Při mechanické deformaci (tah, tlak) materiál mění své elektrické vlastnosti, což ovlivňuje elektrické parametry (např. elektrický odpor, rezistivitu a impedanci) materiálu. Díky těmto vlastnostem má široké využití.

3.3 Elektricky vodivé keramické podlahy

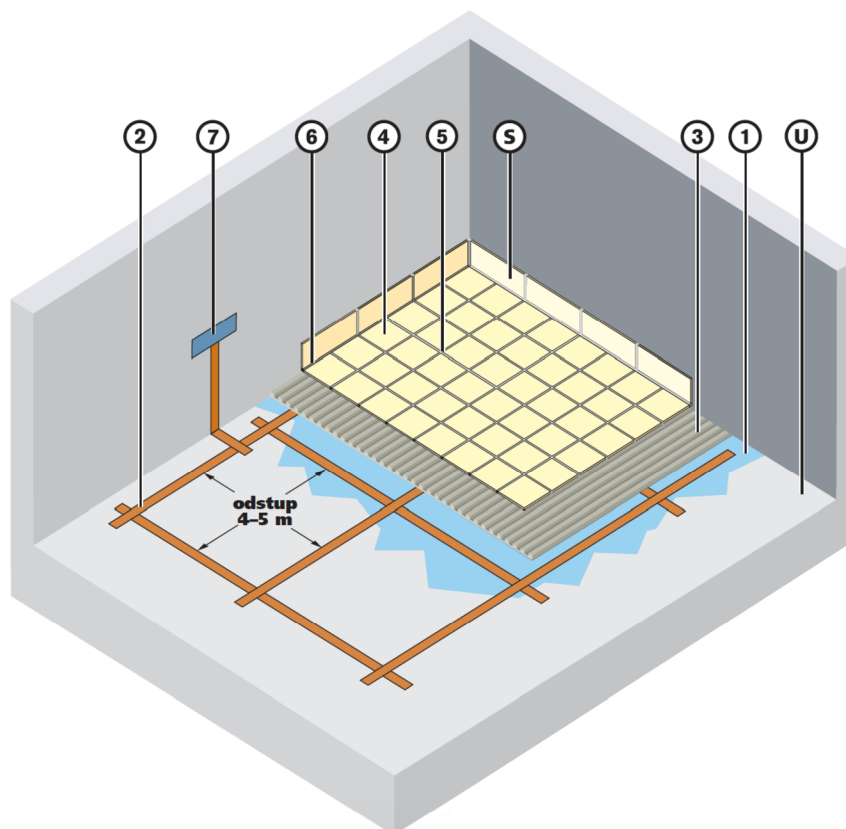
Používají se v prostorách, ve kterých se pracuje s explozivními plyny, párami nebo výbušnými směsmi je nutno provést speciální opatření, která zabezpečí elektrickou vodivost podlahové krytiny. Pro projektování a provádění elektricky vodivých podlah se dodržují následující normy: DIN 18352, DIN 51953. (17)

Tyto podlahy se používají v prostorech s výrobou výbušnin, nabíjecí stanice baterií, plynové stanice, chemický průmysl, výroba laků a jejich zpracování, laboratoře, počítačové a operační sály.

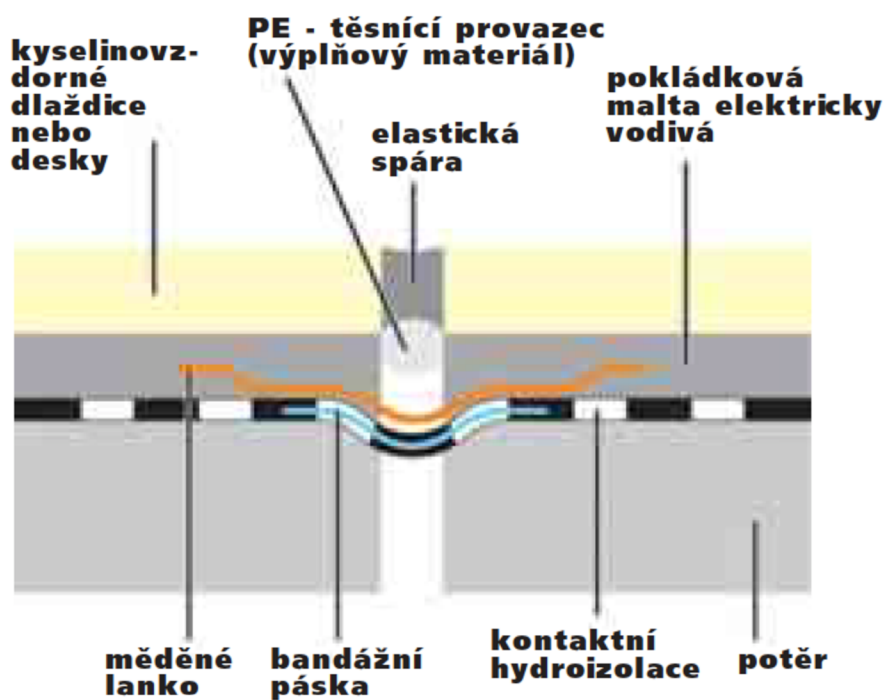
Při chůzi po některých podlahových krytinách a následném dotyku dveřního zvonku může přeskočit jiskra statické elektřiny. Tyto bleskové výboje, které každý z nás zažil, nepředstavují pro člověka žádné nebezpečí, pokud v důsledku úleku nejedná chybně. Ve výše uvedených prostorách je nutno vyloučit elektrické výboje, protože by mohly vést k poškození elektronických součástek nebo k explozi v prostoru. Určující velikost nebezpečí v prostoru je elektrický náboj. Všechny předměty a osoby mají pozitivní nebo negativní náboj, které se za normálních okolností nachází v rovnovážném (neutrálním) stavu. Statická elektřina vzniká při pohybu pevných izolátorů nebo kapalných substancí v důsledku mechanického tření, např. při zvedání, posuvu, dělení a vysypávání pevných předmětů a látek nebo kapalin, nebo při proudění plynu a par, které obsahují nepatrné množství jemných pevných částic. Posuny elektrostatických nábojů vedou k rozdílným potenciálům a ke vzniku tzv. "elektrostatického náboje". (17)

Nestejně potenciály se vždy snaží o vzájemné vyrovnání, tzn. že při dotyku elektrostaticky nabitě osoby/předmětu s elektricky vodivou osobou/předmětem dochází ke spontánnímu vyrovnání náboje. Toto vyrovnání rozdílných napětí (jiskra) může vyvolat v explozivní atmosféře zápal. Dalším doprovodným znakem elektrostatických nábojů jsou elektrická pole, která ovlivňují funkci citlivých přístrojů a nebo je ruší. Vznik statické elektřiny nelze nikdy zcela vyloučit, ale její působení lze při volbě vhodných materiálů významně snížit. (17)

Vyhnout se lze vysokému statickému náboji osob a předmětů v tom případě, že nedojde k jejich shromažďování a načítání, nýbrž že se rovnoměrně prostřednictvím podlahy odvedou. Tzn. že přes uzemnění se statická elektřina odvede a vyloučí se vznik bleskového výboje. Vodivost je závislá na elektrickém odporu R . Vodivá je taková podlahová krytina, jejíž vodivý odpor $R < 10^9 \Omega$.



Obrázek č. 14: Skladba systému elektricky vodivé dlažby, 1) Sopro Grundierung, 2) měděný pásek, připojený k podlahové krytině, 3) elektricky vodivé maltové lože, 4,5) dlaždice, 6) koutová spára elastická, 7) uzemnění s připojením pásku, 8) sokl, U) podklad, popř. potěr (17)



Obrázek č. 15: Přemostění dilatačních spár v elektricky vodivých dlažbách (17)

PRAKTICKÁ ČÁST

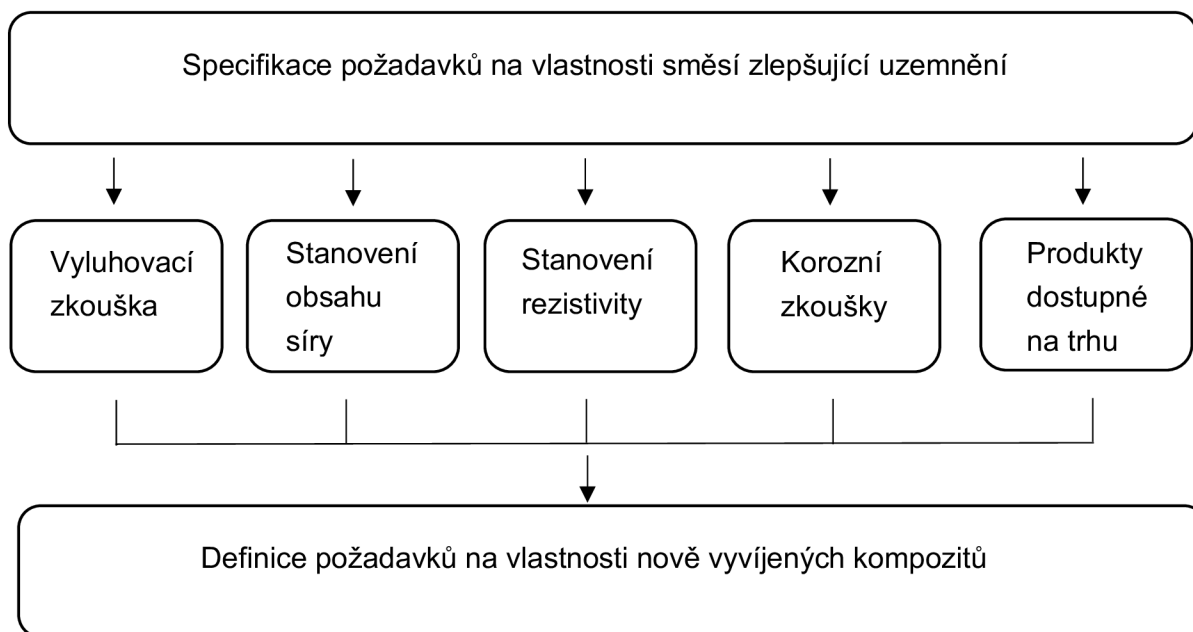
4 CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem práce je výzkum a vývoj vodivého kompozitu pro zlepšení uzemnění v oblastech s nízkou vodivostí. Snahou bude vyvinout bezúdržbový materiál, který nebude vyžadovat přítomnost vlhkosti pro udržení vodivosti a bude vhodný pro použití v oblastech s nízkou vodivostí, jako je skalnatá půda, vrcholky hor a písečná půda. Další důležitou vlastností je nutnost ideálního kontaktu se zemí a neohrožování životního prostředí, například kontaminací podzemních vod. Dílčím cílem bude vyvinout směs šetrnou k životnímu prostředí.

Pro dosažení dílčího cíle bude kladen důraz na využití druhotných surovin. Část plnivových složek se nahradí druhotnými surovinami a sníží se cena kompozitu. Na základě kompatibility jednotlivých surovin bude navržena receptura vyvíjeného kompozitního materiálu pro použití k zlepšení uzemnění. K dosažení cíle budou vytvořena zkušební tělesa z navržených receptur, která se následně odzkouší na hodnotách rezistance a ověří se splnění normových požadavků.

5 METODIKA PRÁCE

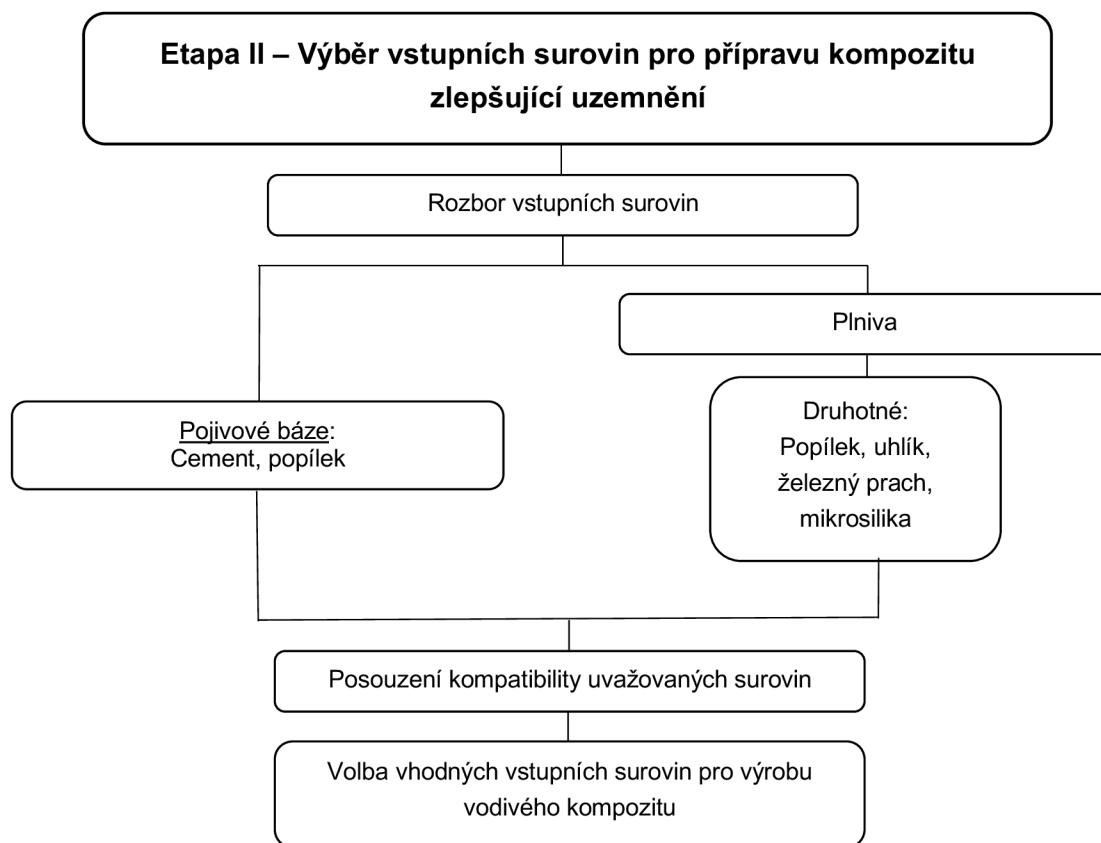
Etapa I: Specifikace požadavků na vlastnosti směsí zlepšující uzemnění



V první etapě bakalářské práce budou specifikovány požadavky na vlastnosti směsí zlepšující uzemnění dle ČSN EN 62561-7. Důležitým požadavkem bude stanovení hodnoty rezistivity, čímž se zjistí schopnost vyvíjeného kompozitu vést elektrický proud. Výstupem první etapy budou shrnuty požadavky na vlastnostech nově vyvíjeného kompozitu.

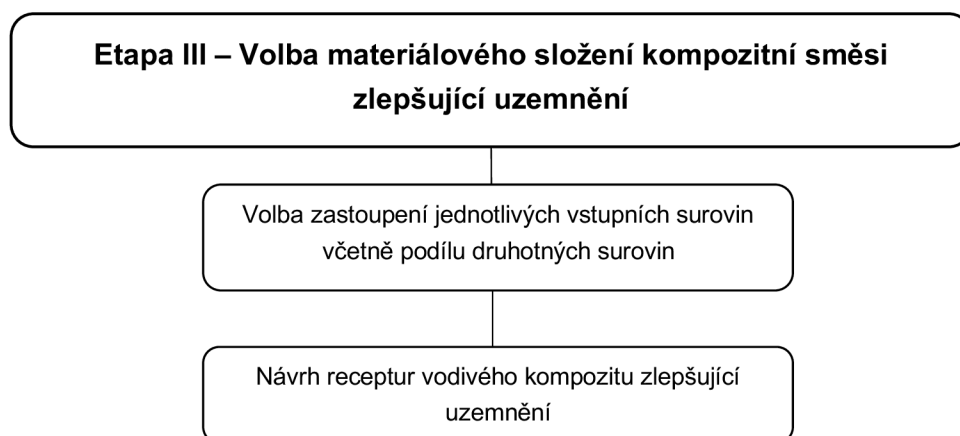
Dodržení požadavků bude následně prověřeno zkouškami specifikovanými ve čtvrté etapě. Snahou bude vyvinout bezúdržbový materiál, který nebude vyžadovat přítomnost vlhkosti pro udržení vodivosti a bude vhodný pro použití v oblastech s nízkou vodivostí, jako je skalnatá půda, vrcholky hor a písečná půda.

Etapa II: Výběr vstupních surovin pro přípravu vodivého kompozitu



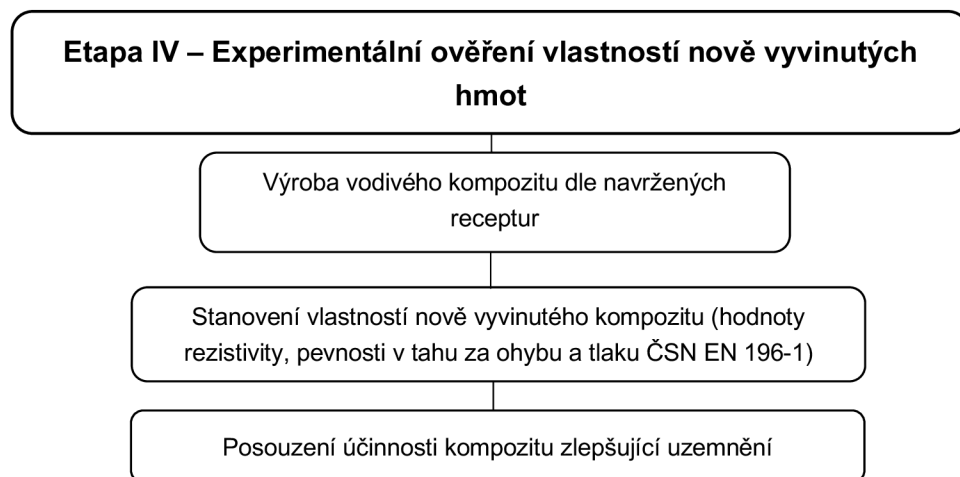
Cílem druhé etapy bude zhodnocení možnosti zastoupení vhodných surovin dle požadavků pro přípravu kompozitu zlepšujícího uzemnění. Nejdříve bude provedena rešerše pojiv a plniv pro přípravu vodivé směsi. Zkoumány budou možnosti náhrady plniva vybranými druhotnými surovinami. Bude se jednat o silikátovou směs, u níž pojivová báze bude stavěna na portlandském cementu. Závěrem bude zvolena vhodná příměs pro výrobu funkčního kompozitu.

Etapa III: Volba materiálového složení kompozitní směsi zlepšující uzemnění



Třetí etapa bude zaměřena na návrh několika receptur nových kompozitních směsí zlepšující uzemnění. Na základě získaných poznatků zpracovaných v teoretické části a předchozích etapách práce bude proveden návrh vhodných vstupních surovin se zaměřením na možné využití druhotných surovin pro snížení dopadu výroby na životní prostředí.

Etapa IV: Experimentální ověření vlastností nově vyvinutých hmot



V závěrečné praktické etapě bakalářské práce budou vytvořeny nové vodivé směsi dle navržených receptur z předchozí etapy. Na vytvořených vzorcích bude provedeno laboratorní testování parametrů v souladu s požadavky vyplývající z první etapy řešení – stanovení rezistivity. Na závěr bude provedeno podrobné zhodnocení dosažených výstupů.

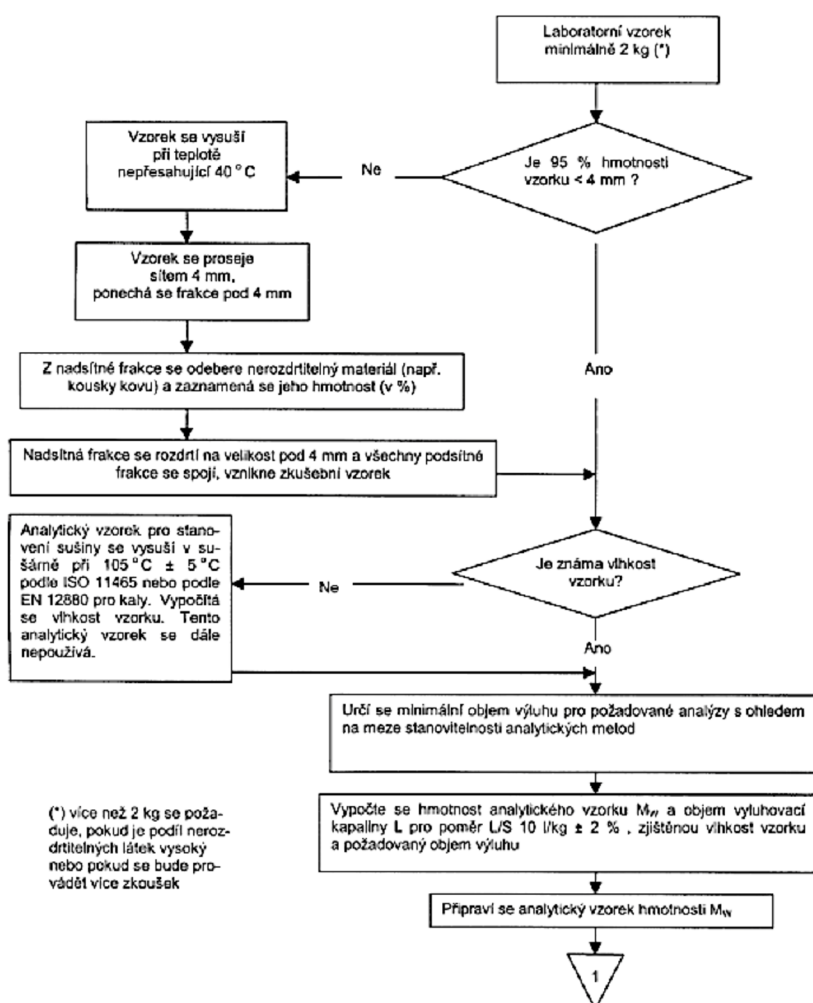
6 ETAPA I: Specifikace požadavků na vlastnosti směsí zlepšující uzemnění

Před samotným návrhem kompozitní směsi je zapotřebí určit požadavky na vlastnosti směsi, které zlepšují uzemnění. Dále musí být známy všechny faktory ovlivňující vodivost (rezistivitu) a specifikovat požadavky na vyvíjený materiál. Závěrem této etapy budou prezentovány dostupné materiály na trhu.

6.1 Vyluhovací zkouška (EN 12457-2)

Vyluhovací zkouška musí být provedena podle EN 12457-2, koncentrace vyloužených složek musí být provedeny v souladu s EN 12506.

Vzorek, který původně nebo po předúpravě má zrnitost menší než 4 mm, se za definovaných podmínek vyluhuje vodou. Tato norma je založena na předpokladu, že se v průběhu zkoušky ustaví úplná nebo téměř úplná rovnováha mezi kapalnou a pevnou fází. Pevný zbytek je odstraněn filtrací. Kritéria jsou dána národními nebo mezinárodními předpisy. (18)



Obrázek č. 16: Schéma postupu pro EN 12457-2 (18)

Stanovení vyloužených iontů

Norma ČSN EN 12506 (zrušená a nahrazena EN 16192)

Tato norma specifikuje metody stanovení hodnoty pH, As, Ba, Cd, Cl⁻, Co, Cr, Cr (VI), Cu, Mo, Ni, NO₂⁻, Pb, celkové S, SO₄²⁻, V a Zn ve vodných výlužích pro charakterizaci odpadů.

Vhodná validovaná metoda zkoušení uvedená v Tabulce 8. se vybere podle druhu výluhu odpadu, koncentračního rozsahu sledovaného ukazatele a očekávaných rušivých elementů.

Výsledky zkoušek se vyjadřují jako koncentrace složek ve výluhu, v µg/l nebo mg/l, kromě stanovení hodnoty pH a elektrické konduktivity.

Ve výluhu se analyzuje celkový obsah složek. Pokud mezi přípravou výluhu a analýzou dojde ke srážení, je nutné zajistit vhodnými metodami (např. opakovaným rozpouštěním, oddělenou analýzou roztoku a sraženiny), že bude stanoven celkový obsah sledovaných ukazatelů. Pokud výluh vznikl postupem, který zahrnuje filtraci membránovým filtrem o velikosti pórů. (19)

Tabulka 8: Ukazatele a metody zkoušení

| Ukazatel | Metoda zkoušení |
|-------------------------------|--|
| pH ^a | ISO 10523 |
| As | EN ISO 11885 EN ISO 11969 |
| Ba | EN ISO 11885 |
| Cd | ISO 8288 EN ISO 11885 |
| Cl ⁻ | ISO 9297 EN ISO 10304-1 EN ISO 10304-2 |
| Co | EN ISO 11885 |
| Cr | EN ISO 11885 |
| Cr(VI) | ISO 11083 |
| Cu | ISO 8288 EN ISO 11885 |
| Mo | EN ISO 11885 |
| Ni | ISO 8288 EN ISO 11885 |
| NO ₂ ⁻ | EN 26777 EN ISO 10304-1 EN ISO 10304-2 EN ISO 13395 |
| Pb | ISO 8288 EN ISO 11885 |
| celková S | EN ISO 11885 |
| SO ₄ ²⁻ | EN ISO 10304-1 EN ISO 10304-2 |
| V | EN ISO 11885 |
| Zn | ISO 8288 EN ISO 11885 |

^a při hodnotě pH < 3 nebo pH > 10 se použije stejná metoda, ale je třeba si uvědomit, že nepřesnost se může zvýšit

6.2 Stanovení síry (ISO 4689–3)

Tato mezinárodní norma určuje vážkovou metodu pro stanovení obsahu síry jako je síran barnatý.

Metoda je použitelná pro stanovení síry v koncentračním rozsahu 0,01 % do 1,0 %.

Navážka se rozkládá chlorečnanem draselným a směsí kyseliny chlorovodíkové a dusičné. Roztok se odpaří do sucha, soli se rozpustí v kyselině chlorovodíkové a nerozpustný zbytek se odfiltruje.

Nerozpustný zbytek se vyžihá a odpařením s kyselinou fluorovodíkovou a dusičnou se odstraní oxid křemičitý. Zbylé části se vytaví s uhlíčanem sodným, tavenina se vylouží a výluh se zfiltruje. Filtrát se okyselí a spojí s hlavním roztokem. Zbylé železo se zredukuje na dvojmocnou formu a po úpravě kyselosti se přidá roztok chloridu barnatého. Síran barnatý se odfiltruje a stanoví vážkově.

Materiál zkoušce vyhovuje, pokud všechny naměřené hodnoty jsou menší než 2 %. Zaznamenané hodnoty této zkoušky musí být uvedeny v dokumentaci výrobku.

6.3 Stanovení rezistivity (ČSN EN 62561-7)

Využívá se čtyřelektrodová metoda pro měření rezistivity. Reprezentativní vzorky materiálů by měly být odebrány z originálního balení, jak je stanoveno výrobcem. Tři vzorky směsi zlepšující uzemnění musí být zkoušeny ve čtyřelektrodovém přípravku na zkoušení zeminy.

Čtyřelektrodová metoda využívá přiloženého napětí ve vnějších elektrodách, které zajistí průchod proudu vzorkem. Úbytek napětí na vnitřních elektrodách je měřen voltmetrem a výsledný odpor je vypočítán. Rezistance (odpor) materiálu může být také měřena přímo.

Hodnota rezistance (odporu) každé směsi zlepšující uzemnění se převede na hodnotu rezistivity za použití vztahu.

$$\rho = \frac{R \times A}{a}$$

kde je

ρ rezistivita vzorku [Ωcm]

R rezistance (odpor) [Ω]

A plocha oblasti kolmá ke směru proudu [cm^2]

a vzdálenost mezi vnitřními elektrodami, měřeno od vnitřní hrany elektrody [cm]

Zkušební přístroje

- Všechny komerčně dostupné měřicí přístroje zemního odporu mají dvě proudové a dvě napěťové svorky nebo nízkofrekvenční střídavý zdroj, vysokou vstupní impedanci ampérmetru a voltmetru. Typické zapojení na přípravek pro měření směsi zlepšující uzemnění je patrné s různými typy přístrojů viz obrázek
- Čtyřelektrodový přípravek na měření směsi zlepšující uzemnění je vyroben z odolného nevodivého materiálu se čtyřmi trvale připojenými elektrodami z měkké nebo nerezové oceli. Přípravky jsou běžně komerčně dostupné nebo mohou být zkonstruovány se známými vnitřními rozměry.
- Propojovací kabely

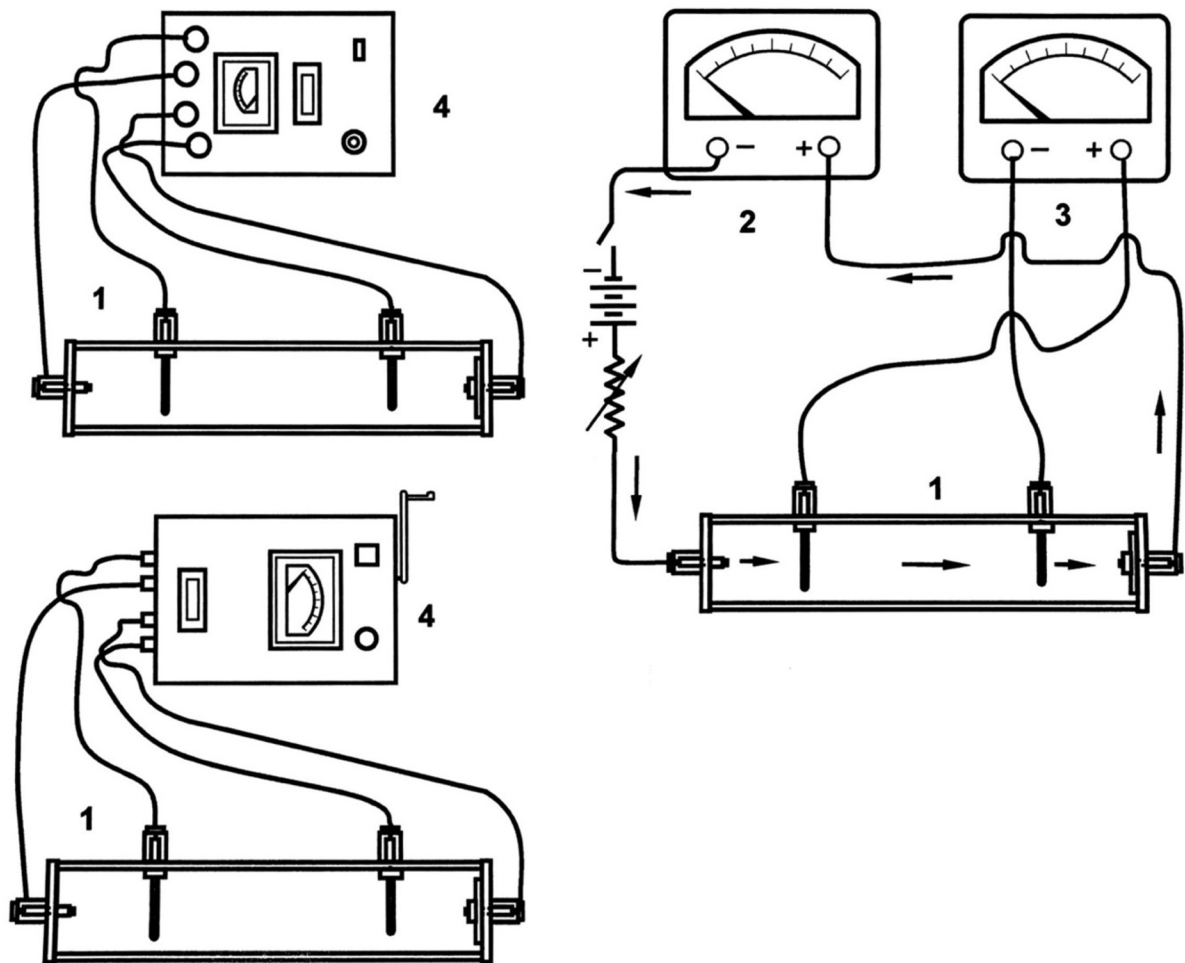
6.3.1 Zkušební postup

Směsi zlepšující uzemnění musí být připraveny v souladu s pokyny výrobce. Pokud je materiál připraven k instalaci bez potřebných dalších příprav, pak se směs zlepšující uzemnění zkouší v takovém stavu, jak byla převzata.

Měření rezistivity musí být provedeno po dobu, kterou stanovuje výrobce, aby mohlo dojít k případnému dozrání vzorku.

Vzorek směsi zlepšující uzemnění musí být adjustován v přípravku tak, aby byl zajištěn dobrý elektrický kontakt mezi směsí a elektrodovým systémem.

Rezistance (odpor) vzorku R se měří pomocí měřiče zemního odporu nebo technickou metodou (výpočtem ze změřených hodnot napětí a proudu) a rezistivita každého vzorku se vypočte dle zmíněných informací z kapitoly 6.3 (20)



Obrázek č. 17: Konfigurace čtyř elektrodového měření zemního odporu v přípravku

6.4 Korozní zkoušky (ČSN EN 62561-7)

Tato zkušební metoda zahrnuje postup stanovení korozivnosti materiálů používaných jako směsí pro zlepšení uzemnění. Tato zkouška je důležitá, protože materiály zlepšující uzemnění nesmí fyzikálně ani chemicky reagovat se zemničem a poškozovat ho tak.

Třísvorkový operační zesilovač může být použit pro stanovení pozitivní a negativní změny potenciálu a k záznamu proudů potřebných pro získání příslušných potenciálů.

Příprava zkoušky

Připraví se směs materiálu zlepšujícího uzemnění, do vzorku se umístí tři elektrody (pracovní, referenční a aktivní) do materiálu podle polarizační metody měření rezistance (odporu). Připojí se k operačnímu zesilovači. Pracovní elektrodou musí být materiál reprezentující zemní elektrodu (například měď nebo pozinkovaná ocel). Aktivní elektrody musí být grafitové a referenční elektroda je většinou z Cu/CuSO₄ (18)

Materiál zlepšující uzemnění, který je použit v tvrzeném nebo pevném stavu, musí být zkoušen až po uplynutí doby zrání. Materiál zlepšující uzemnění, který je určen pro použití v suchém stavu, musí být zkoušen s minimálně 40% obsahem vody.

Pro měděné zemniče musí být polarizační odpor $> 4 \Omega \times m^2$ pro neagresivní prostředí a $> 8 \Omega \times m^2$ pro agresivní prostředí. U galvanizovaných zemničů musí být polarizační odpor $> 3 \Omega \times m^2$ pro neagresivní prostředí a $> 7,6 \Omega \times m^2$ pro agresivní prostředí. (20)

Tabulka 9: Shrnutí potřebných parametrů na vyvíjený kompozit dle ČSN EN 62561-7

| Doporučené specifikace | | |
|------------------------|---|---|
| Dodržování norem | Plná shoda s ČSN EN 62561-7 Charakteristické vyluhování zkušební metoda 1311 | |
| Parametr | Doporučené hodnoty | Testovací metoda |
| Loužení | Arsenic < 1.5 mg/L, Barium < 60 mg/L Cadmium < 0.15 mg/L, Chromium < 3.0 mg/L, Lead < 1.5 mg/L, Mercury < 0.06 mg/L, Elenium < 1.0 mg/L | EC 62561-7 EN 12457-2 |
| Obsah síry | < 2% | ISO 14869-1 |
| Rezistivita | <2 $\Omega \cdot cm$ pro prášek <20 $\Omega \cdot cm$ pro smíšený a vytvrzený materiál | Stlačený prášek dle ASTM G187-12 Smíšený a vytvrzený dle ASTM D991- 89 |
| Koroze | Pro měděné elektrody, musí být polarizační odpor > 8 $\Omega \times m^2$ pro agresivní prostředí Pro galvanizované zemní elektrody, musí být polarizační odpor > 7.6 $\Omega \times m^2$ pro agresivní prostředí | IEC 62561-7, kapitola 5.5, agresivní prostředí |

6.5 Produkty zlepšují uzemnění pro ochranu stavebních konstrukcí dostupné na zahraničním trhu

- **ERICO – Ground Enhancement materiál (GEM)**

Společnost ERICO nabízí materiál pro vylepšení uzemnění půdy (GEM) - vynikající vodivý materiál, který řeší problémy s uzemněním. Tento materiál plně vyhovuje normě ČSN EN 62561-7. Tato nová norma zavádí měřítko pro korozi a rezistivitu, která při prvotním vývoji této směsi chyběla.

Jedná se o materiál s nízkým odporem, nekorozní, založený na uhlíku, který zlepšuje účinnost uzemnění, zejména v oblastech se špatnou vodivostí. Jeho faktor odporu je menší než $2 \Omega\text{cm}$.

Směs obsahuje portlandský cement, který se při vyztužení stane vodivým betonem, který je stálý, bezúdržbový a nikdy se nevyluhuje ani nevymyje. Zlepšuje účinnost uzemnění bez ohledu na půdní podmínky. Je ideálním materiálem pro použití v oblastech s nízkou vodivostí, jako je skalnatá půda, horské vrcholy a písčiná půda.

Pro vertikální aplikace může být směs instalována ve formě pevného nebo suchého stavu. GEM nastavuje standard pro snížení odporu uzemnění, udržování trvalého nízkého odporu a zajištění vysoké vodivosti po dobu životnosti uzemňovacího systému.

Navíc směs nepříznivě neovlivňuje půdu a nebude vylučovat ionty ani kontaminovat podzemní vodu. (21)

- **HARGER – Ultrafill (GEM)**

Jedná se o materiál s nízkým odporem na bázi uhlíku a dramaticky snižuje odolnost zemního systému v náročných podmínkách půdy. Ultrafill neobsahuje bentonit, který může ve velmi suchých podmínkách způsobit smršťování kolem zemní elektrody, čímž se stane neúčinnou.

Je ideální pro použití v skalnaté půdě, písku, šterku nebo v jiném podloží s nízkou vodivostí. Může se využít jako suchý zásyp pro použití kolem zemních tyčí a soustav.

Je snadno použitelný, bezpečný a účinný. Na rozdíl od jiných zásypů je bezprašný a nevyžaduje míchání ve vodě před instalací. Může být použit v rýze nebo ve svislé poloze. (22)

- **SANKOSHA – SAN – EARTH**

Je práškový granulovaný vodivý materiál vyrobený z chemicky stabilních látek. Od svého uvedení na trh v roce 1979 byl o směs velký zájem mezi mnoha zákazníky a byla oceněna za účinnost při snižování rezistivity. Na tuto směs bylo zažádáno o deset různých patentů týkající se uzemnění.

Materiál lze použít v různých aplikacích včetně prevence statické elektřiny a elektrických vln, ale nejčastěji se používá jako uzemňovací materiál, díky jeho jednoduché aplikaci a účinnosti.

Materiál se používá ve dvou podobách, jako suchý prášek, který lze rozložit na zem (například ve stavební rýze), anebo vytvoření tekuté směsi, kterou lze použít v konstrukci. (23)

Vynikající vlastnosti pro uzemnění

SAN-EARTH, obvykle instalovaný ve formě suchého prášku, je pohodlný i účinný. Umožňuje ideální kontakt se zemí na velkých efektivních plochách a má vlastnosti mnohem lepší než tradiční techniky uzemnění.

Elektrolytická odolnost proti korozi

Za normálních podmínek dochází k elektrolytické reakci, pokud je kov ukrytý v zemi vystaven pozitivnímu elektrickému proudu. Tato reakce způsobená iontovou vodivostí vede k vážné korozi kovu. Tuto podmínku je možné zabránit použitím SAN-EARTH. Zakrytí kovu pomocí této směsi vytváří vedení mezi kovem a směsí, což snižuje elektrolytickou reakci a brání korozi kovu.

Cenově výhodné uzemnění

Při uzemnění pomocí SAN-EARTH se obecně nepožaduje žádná voda. Po instalaci absorbuje vlhkost z okolní půdy a zpevňuje se. Překážky v uzemnění s nízkou rezistivitou, jako jsou kameny nebo písky, nezasahují do uzemnění a nemusí být odstraněny. Vzhledem k tomu, že směs může být použita jako suchá nebo tekutá, může být provedena bezproblémová instalace i v případě, že je úsek ve sklonu.

Ekologicky bezpečné

SAN-EARTH je ekologicky bezpečný materiál, protože se skládá z velmi bezpečných inertních chemických látek. Neroztaví se do půdy, ani se nemění na elektrolyt. (23)

7 ETAPA 2: Výběr vstupních surovin pro přípravu vodivého kompozitu

Etapa se zabývala řešením vstupních surovin. Vstupní suroviny byly děleny na pojiva a plniva, která jsou zastoupena například expandovaným grafitem a ocelovými vlákny. Zástupci druhotných surovin jsou železité odprašky, popílek a ocelová vlákna. Následně byly vyhodnoceny suroviny s vhodnými vlastnostmi, které se zakomponují do receptur na vyvíjený materiál.

7.1 Požadavky, které ovlivňují funkci vodivého kompozitu

Aby kompozit vyhovoval jeho účelům, musely být stanoveny závislosti, které mohou ovlivnit funkčnost vyvíjeného kompozitu

- **Závislost na použití vodivého plniva**

Vyvíjený vodivý kompozit se skládá ze stejných přísad jako běžný cementový kompozit. Rozdíl je v přidavku vodivého plniva ve vhodném množství, které zajistí zlepšení elektrické vodivosti, jako jsou ocelová vlákna, uhlíkové částice nebo kovové odprašky. (24) Xiaoming Fan, v publikaci (25) zmiňoval, že k dosažení stabilní elektrické vodivosti stačí již 1% zastoupení uhlíkových částic nebo produktů na bázi uhlíku k dosažení elektrické vodivosti. (24)

- **Závislost na homogenizaci směsi**

Velký důraz musí být kladen na homogenizaci z důvodu propojení veškerých vodivých surovin v kompozitu. V tomto kontextu lze měřit rezistivitu k posuzování velikosti a rozsahu propojitelnosti pórů. (24)

- **Závislost na vlhkosti**

Zatímco měření elektrického odporu betonu vypadá velmi jednoduše na první pohled, složitá mikrostruktura betonu ztěžuje nalezení spolehlivé techniky. Beton je porézní "kompozitní" materiál a v závislosti na obsahu vlhkosti (tj. stupni nasycení pórů) může vykazovat vodivé nebo izolační vlastnosti. Například zkušební vzorek může vykazovat velmi vysoký elektrický odpor, když je suchý, ale stejný beton by měl v nasyceném stavu mnohem nižší odpor. Navíc beton má kapacitní vlastnosti, což znamená, že může mít elektrický náboj. (26)

- **Závislost na teplotě**

Tok elektrického proudu v betonu je výsledkem iontového pohybu v roztoku pórů a pohyblivost iontů je ovlivněna teplotou. Obecně vzrůstající teplota zvyšuje mobilitu iontů, což snižuje elektrický odpor. Bylo zjištěno, že změna teploty o 1 °C může mít za následek 3% změnu elektrického odporu betonu. Proto je důležité sledovat změny teploty při testování betonových vzorků na elektrický odpor. (26)

7.2 Pojiva

Označujeme jimi látky, které lze upravit do tekuté nebo kašovitě formy a následně vlivem chemických reakcí přecházejí do stavu pevného. Mohou tedy spojovat nesoudržná zrna nebo kusy různých látek v soudržnou hmotu. Proces zpevňování lze rozdělit na dvě navazující stádia tuhnutí a tvrdnutí. U stádia tuhnutí ztrácí hmota svoji původní zpracovatelnost a přechází do formy pevné látky. Při fázi tvrdnutí nabývá pevná látka vyšších pevností, která je potřebná při využití stavebního pojiva v konkrétní aplikaci. (27)

7.2.1 Cementová pojiva

Cement je jemně mletá anorganická látka, která svými vlastnostmi patří do skupiny hydraulických pojiv, po smíchání s vodou vytváří kaši, která tuhne a tvrdne působením hydratačních reakcí a procesů. Po zatvrdnutí zachovává svoji stálost i ve vodě. Pro výrobu kompozitu je možné použít cementy, jejichž vhodnost je prokázána splněním požadavků dle ČSN EN 197-1. (28)

Tabulka 10: Požadavky na mechanické a fyzikální vlastnosti cementů ČSN EN 197-1 (29)

| Pevnostní třída | Pevnost v tlaku [MPa] | | | Počátek tuhnutí [minut] | |
|-----------------|-----------------------|--------|-----------------------|-------------------------|------|
| | Počáteční pevnost | | Normalizovaná pevnost | | |
| | 2 dny | 7 dnů | 28 dnů | | |
| 32,5 N | - | ≥ 16,0 | ≥ 32,5 | ≤ 52,5 | ≥ 75 |
| 32,5 R | ≥ 10,0 | - | | | |
| 42,5 N | ≥ 10,0 | - | ≥ 42,5 | ≤ 62,5 | ≥ 60 |
| 42,5 R | ≥ 20,0 | - | | | |
| 52,5 N | ≥ 20,0 | - | ≥ 52,5 | - | ≥ 45 |
| 52,5 R | ≥ 30,0 | - | | | |

Výběr druhu a pevnostní třída cementu musí být zvolena s ohledem na:

- Konkrétní použití betonu a technologii provádění betonové konstrukce (např. u vysokopevnostních betonů se volí cement s pevnostní třídou 52,5)
- Podmínky okolního prostředí specifikované vlivem prostředí, kterým bude beton vystaven
- Podmínky ošetřování (např. proteplování)
- Klimatické pevnosti (vývoj pevnosti)

7.2.2 Polymerní pojiva

Betony obsahující cementové pojivo mají mnoho dobrých vlastností, ale také některé nevýhody. Mezi ně patří zejména pomalý růst pevností a malá chemická odolnost. Proto se v dnešní době zkoušela možnost náhrady portlandského cementu pojivy z polymerů. Stavební hmoty s obsahem makromolekulárních hmot ve formě pojiv se dnes nazývají polymerbetony.

- **Epoxidová**

V polymerbetonech na podkladě epoxidových pryskyřic se jako plnivo používá promytý a suchý písek o vhodné zrnitosti. Epoxidované polymerbetony vykazují výbornou přilnavost, velké pevnosti (90 až 120 MPa v tlaku), odolnost proti nárazu, vlivu povětrnosti, nepropustnosti proti vodě a výborné odolnosti proti chemikáliím.

Epoxidové pryskyřice jsou sloučeniny, v jejichž molekule je více než jedna epoxidová skupina, která je velmi reaktivní. Epoxidové pryskyřice lze rozdělit na dvě skupiny: glycidové a epoxidové (oxiranové).

Při vytvrzování se neodštěpují vedlejší produkty a dochází jen k malému smrštění. Tyto vytvrzené produkty mají výbornou přilnavost k materiálům jako jsou kovy, keramika, dřevo, sklo. Mezi jejich další výhody jsou dobré chemické a elektroizolační vlastnosti. Používají se pro slepování železobetonových dílců a nalepování výztuže na beton.

- **Polyesterová**

U polyesterových pojiv se využívají nenasycené polyestery. Nevýhodou oproti epoxidům je to, že součinitel teplotní roztažnosti polyesterových polymerbetonů stoupá s teplotou rychleji. Výhodou je oproti epoxidovaným jejich cena. Polyesterové polymerbetony rychleji tvrdnou a jako plnivo lze použít mokré kamenivo.

Polyesterové pryskyřice jsou roztoky lineárních nenasycených polyesterů. Mohou být zasíťovány vytvrzováním. Během procesu vytvrzování, dochází ke kopolymeraci nenasyceného polyesteru s nenasyceným monomerem. Při kopolymeraci dochází ke smrštění o 5 až 12 %. Polyesterové pryskyřice mají využití při výrobě syntetického kamene z minerálních drtí, litých podlah, pro použití lepidel a tmelů.

7.3 Plniva

Kamenivo plní funkci pevné kostry kompozitu a jeho výhodou je vysoká pevnost v tlaku, nízká pórovitost, dobrá mrazuvzdornost a dlouhá životnost (trvanlivost)

7.3.1 Písek

Jedná se o nezpevněné zástupce skupiny psamitů. Psamity obsahují více než 50 % pískových zrn, jejichž velikost je v rozmezí 0,063 až 2 mm Majoritním obsahem jsou zrna křemene, živce, slídy a v malém množství těžké minerály a jílové minerály. (30)

Dle velikosti částic se písky rozdělují:

| | |
|--------------------|-----------------------------|
| <u>jemnozrné</u> | Velikost částic do 0,063 mm |
| <u>střednězrné</u> | 0,063 - 0,25 mm |
| <u>hrubozrné</u> | 0,25 – 2 mm |

Dělení dle původu:

- Říční písek je hrubší než kopaný, těžší se z koryt řek jejich charakteristikou jsou zaoblená zrna.
- Kopaný písek je velmi jemný písek používaný jako přísada do malt a omítek. Po vyschnutí má dobrou soudržnost a tvrdost.

Křemičitý písek –

Křemičitany jsou sloučeniny oxidu křemičitého SiO_2 . Obsahují nad 95 % SiO_2

Nejčastěji se vyskytují v krystalickém stavu, vyznačují se vysokou tuhostí, čímž se zvyšuje modul pružnosti. Zrnitost křemičitého písku je 0 – 4mm. Výrobci kamenivo roztřídí a nabízí danou frakci např. 0,3 – 0,8 mm, 0,6 -1,2 mm. Křemík je tvrdý a chemicky inertní, má vysokou teplotu tání, která je přičítána síle vazeb mezi atomy. Objemová hmotnost křemičitého písku frakce 0-1 mm byla 2830 kg/m^3 . Oxid křemičitý je využíván pro použití ve směsích podlahových krytin, malt, střešních šindelů a také v keramice, kde příspěvek SiO_2 se využívá u tepelné roztažnosti a k regulaci sušení a smrštění. Hojně se také využívá jako primární surovina pro výrobu skla (31)



Obrázek č. 18: Křemičitý písek frakce 0-1 mm (32)

7.3.2 Expandovaný grafit

Expandovaný grafit se vyrábí úpravou vysoce krystalického přírodního vločkového grafitu se směsí kyseliny sírové a některých dalších oxidačních činidel, které pomáhají při "katalýze" síranu. Za vysokých teplot (~ 1000 ° C) expanduje. Při volné expanzi může konečný objem dosáhnout 100 až 500 násobek původního objemu. Měrný povrch expandovaného grafitu je v rozmezí 20 – 40 m²/g. (33) Objemová hmotnost je 30 kg/m³. Výsledný produkt je vysoce objemná forma grafitu, která se ukázala jako užitečná k ochraně proti požáru, těsnění, elektromagnetické impulzní a radiální stínění, slévárenské výrobky a pro použití v oblasti elektrických zařízení, například při výrobě baterií. (34) Obecně platí, že hrubší vločkovitý grafit má typicky vyšší poměry roztažnosti než menší vločky. Jedinečné vlastnosti expandovaného grafitu zahrnují vysokou tepelnou odolnost, odolnost proti korozi, měkkost, odolnost proti tlaku a odolnost proti záření. (35)



Obrázek č. 19: Expandovaný grafit

7.3.3 Uhlíkové částice CR2

Jedná se o významnou surovinu pro řadu průmyslových odvětví, především pro výrobu pneumatik tedy technické pryže. Uhlíkové částice CR2 jsou forma amorfního uhlíku, který má vysoký měrný povrch. Mohou být charakterizovány distribucí velikosti primárních částic. Průměr několika komerčně vyráběných částic je v rozmezí 10-400 nm, zatímco průměr sazových agregátů se pohybuje od 100 do 800 nm. Objemová hmotnost částic je 180 kg/m³ s obsahem vlhkosti pod 0,4 %. Jako druh uhlíkového materiálu mají uhlíkové částice tyto výhody: nízká objemová hmotnost, vysoká chemická a tepelná stabilita, trvalá elektrická vodivost a nízké náklady v porovnání s ostatními funkčními vlákny. (24)



Obrázek č. 20: Uhlíkové částice CR2

7.3.4 Niklový prášek

Niklový prášek je stříbrné bílé barvy, je tvořený obrusem přechodného kovu niklu, který je velmi tvrdý, tvárný a odolný proti korozi ve vzduchu nebo ve vodě, proto se používá jako ochranný povlak. Díky jeho vlastnostem vychází jako možný uchazeč funkčního plniva do vodivého kompozitu.

Obzvláště vykazuje výborné výsledky u elektrických, tepelných a magnetických vlastností. Hodnota rezistivity při 20 °C je 6,97 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$. Používá se k výrobě elektrických článků s možností mnohonásobného nabíjení. Nikl je klasifikován jako karcinogen, vzhledem k jeho toxicitě je jeho využívání omezováno. Struktura niklového prášku tvoří kulovité částice. (36) Niklový prášek má hodnotu měrného povrchu 0,7 m^2/g . (37)



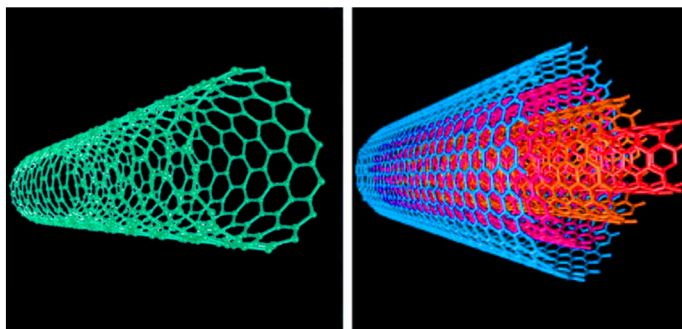
Obrázek č. 21: Niklový prášek (38)

7.3.5 Uhlíkové nanotrubic

Nanotrubic mají nejvyšší poměr pevnosti k hmotnosti jakéhokoli známého materiálu. Vědci NASA spojují uhlíkové nanotrubic s jinými materiály do kompozitů.

Uhlíkové nanotrubic se mohou vyskytovat jako vícestěnné válce atomu uhlíku (MWCNT) a jednostěnné (SWCNT).

Každá válcová stěna se skládá z listu uhlíkových atomů uspořádaných v šestihranných kruzích. Válce mají obvykle průměr od 2 do 10 μm a průměru 5 až 40 nm. U vícestěnných uhlíkových nanotubic je vzdálenost mezi sousedními vrstvami přibližně 0,34 nm, počet stěn v trubici je v rozmezí od 3 do 50. Slouží k posílení kompozitních materiálů. (39) (40)



Obrázek č. 22: Uhlíkové nanotrubic – jednostěnné (vlevo) a vícestěnné (vpravo) (41)

7.3.6 Ocelová vlákna

Použití ocelových vláken přináší zcela odlišné mechanické vlastnosti kompozitu už v prvních hodinách tuhnutí a také po vytvrnutí, kdy jsou vlákna pevně zakotvená. Ocelová vlákna se dělí do několika skupin dle tvaru a průřezu, následně podle použitého materiálu. Ocelová vlákna se vyrábějí v různých pevnostních třídách, dle technologie výroby se dělí na drátěná vlákna, vlákna vyráběná z válcovaného materiálu. (42)



Obrázek č. 23: Ocelové vlákno s kotvícími konci (43)

7.3.7 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna jsou vlákna anorganická s velkým využitím. V porovnání s masivním sklem mají výborné technické vlastnosti jako jsou vysoká pevnost, odolnost vůči vysokým teplotám, nehořlavost, dobrá chemická odolnost a dobré elektrické vlastnosti. Vlastnosti skleněných vláken jsou vhodné při výrobě kompozitních materiálů. (44)

Délka vlákna je obvykle 12 mm, jsou alkalivzdorná a opatřena povrchovou lubrikací, která je spojuje do pramenů. (42)



Obrázek č. 24: Skleněná vlákna (43)

7.4 Druhotné suroviny

Druhotnou surovinou rozumíme materiály, které lze opětovně použít do výroby jejichž použitím budou nahrazeny primární suroviny. Mohou také vznikat jako vedlejší produkt při výrobě, například popílek v elektrárnách, který je využit k výrobě jiných produktů/surovin anebo přímo jako materiál. Dalším příkladem mohou být zmetky vzniklé při výrobě skla, které jsou následně zpětně rozemlety a roztavením vráceny zpět do výroby. Nejčastěji globální druhotnou surovinou jsou železné a neželezné kovy, sklo, papír a plasty, většinu těchto surovin třídíme přímo u svých domovů nebo je vykupují sběrný odpadů. Při využití těchto surovin se musí dbát na dostupnost, aby se použitím výsledný produkt nezdražil a případná doprava neměla za následky horší ekologický dopad. (45)

7.4.1 Železité odprašky

Jedná se o průmyslový odpad, který vzniká při výrobě surového železa ve vysokých pecích. Objemová hmotnost železitých odprašků je 5180 kg/m^3 . Sypký materiál s kulovitým tvarem zrn do velikosti max. 0,1 mm. Odprašky jsou tvořeny 70 % hm. železa, 15 % hm. oxidu vápenatého, 5 % hm. oxidu křemičitého, 2,5 % hm. oxidu hlinitého, 4,5 % hm. zinku, 1,5 % hm. olova, dále v malém množství další prvky. (46)



Obrázek č. 25: Železité odprašky

7.4.2 Popílek

Popílek (fly ash) je získáván elektrostatickým nebo mechanickým odlučováním prachových částic ze spalin. Vlastnosti popílků jsou závislé na kvalitě spalovaného uhlí a technologii spalovacího procesu. Fluidní popílek je pro beton nepřipustný. (47) (48)

Jedná se o kulovité sklovité částice, chemické složení zahrnuje 50 % SiO_2 , 25–30 % Al_2O_3 a od 3–8 % FeO . Obsah aktivního SiO_2 , zajišťuje pucolánovou aktivitu (latentní hydraulicitu) podobnou chování cementu. Díky této schopnosti může být popílek počítán mezi příměsi II druhu. (30)

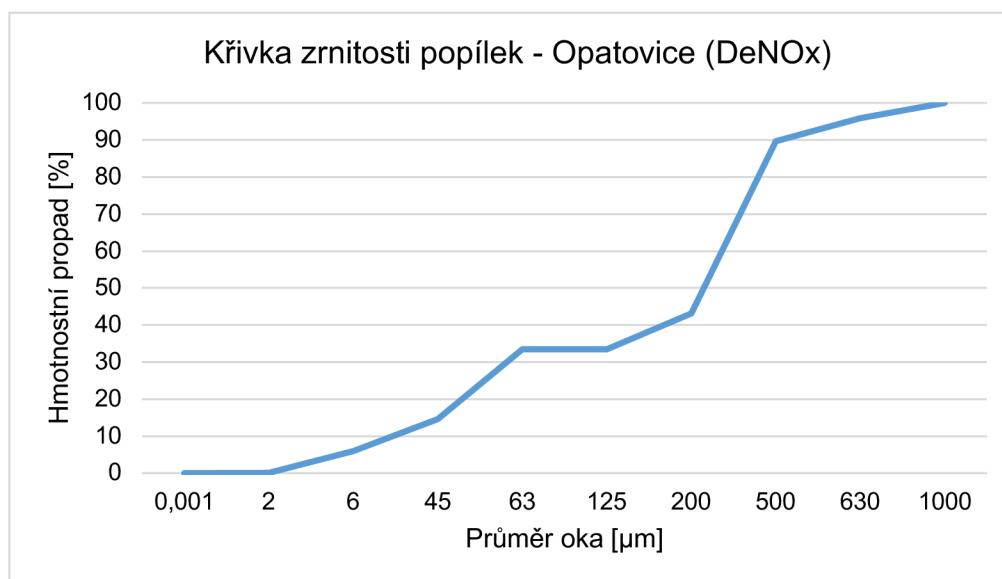
Popílek při použití do betonu zlepšuje čerpatelnost a zpracovatelnost betonu, zpomalení tuhnutí a tvrdnutí, což je následkem zpomalení vývoje hydratačního tepla. Zvyšuje vodní součinitel, neboť část vody se spotřebuje k adsorpci na povrchu zrn popílku. Maximální množství aktivního popílku (příměs II druhu) se omezuje podílem (popílek/cement) $\leq 0,33$ hmotnosti. (48)

Tabulka 11: Základní fyzikální vlastnosti popílků (49)

| Veličina | Jednotka | Rozmezí |
|--------------------------------|----------------------|-----------|
| Objemová hmotnost | [kg/m ³] | 2000-2500 |
| Sypná hmotnost | [kg/m ³] | 800-1100 |
| Průměr zrna | [μm] | 10-30 |
| Měrný povrch dle Blaina | [m ² /kg] | 200-550 |



Obrázek č. 26: Popílek (50)



Graf č. 2: Křivka zrnitosti popílku - Opatovice

7.4.3 Mikrosilika

Jemný šedý prášek, křemičité odprašky složené především z amorfního oxidu křemičitého. Vzniká jako vedlejší produkt při výrobě křemíku. Převážně obsahuje 80 – 98 % SiO_2 ve tvaru kulatých zrn o průměru nejčastěji okolo 0,15 μm . Mikrosilika se řadí mezi pucolány, chemicky reaguje s Ca(OH)_2 a vytváří dostatek C-S-H. Důsledkem je vyšší pevnost a chemická odolnost. (51)



Obrázek č. 27: Mikrosilika (52)

7.4.4 Odpadní drcené sklo

S výrobky skla se denně setkáváme pro jeho široké použití, vlastnosti a možnosti zpracování. Sklo je anorganická amorfnní látka, vyrobena tavením vhodných surovin a následným chlazením bez krystalizace. Chlazení je doprovázeno plynulým zvýšením viskozity, tím se zabrání pohybu molekul. Viskozita má tak vysokou hodnotu, že vznikne pevná látka. Sklo se vyznačuje vysokou propustností světla, tuhostí, tvrdostí, křehkostí a relativně nízkou měrnou tepelnou a elektrickou vodivostí. (53) (54)

V případě recyklace vstupuje sklo jako konečný produkt zpět do výroby jako druhotná surovina při zachování vlastností, která by snížila jeho užitnou hodnotu. Je tedy jediným uměle vytvořeným materiálem, který je schopen mnohonásobné recyklace. Z ekologického hlediska je význam recyklace skla velmi vysoký, z technologického hlediska je jedním z nejjednodušších a nejdokonalejších recyklačních kruhů. Oproti ostatním recyklovatelným materiálům nemusí být před jeho dalším použitím nijak zvlášť upravováno. Vzhledem ke své stavbě nepředstavuje pro své okolí nebezpečnou zátěž, jedinou zátěží s využíváním skla je to, že se nerozkládá a na skládkách se hromadí a přetrvává do doby následné recyklace. (55)



Obrázek č. 28: Odpadní sklo určené k recyklaci (56)

7.5 Shrnutí etapy II

Etapa II popsala charakter uvažovaných vstupních surovin pro vyvíjený vodivý kompozit. Na základě zmíněných vlastností u uvedených materiálů byly vybrány nejvhodnější suroviny.

Jako vhodné pojivo bylo zhodnoceno využít portlandský cement CEM I 42,5 R. Za úvahu stojí jeho použití s přidáním popílku pro uplatnění druhotné suroviny a snížení celkové ceny kompozitu. CEM I 42,5 R byl vybrán z důvodu nižší ceny než CEM I 52,5 R.

Polymerní pojiva jsou nevhodná, z důvodu nevyužití jejich vlastností jakož jsou výborná přilnavost, velké pevnosti (90 až 120 MPa v tlaku), odolnost proti nárazu, vlivu povětrnosti, nepropustnosti proti vodě atd. Tyto vlastnosti by nebyly potřebné, a proto není vhodné je použít do vyvíjeného kompozitu na úkor zvýšení ceny.

Jako primární plnivo byl použit křemičitý písek frakce 0-1 mm, který nemá velká zrna, nenastane tedy k přerušení kontaktu mezi surovinami pro zachování vodivosti v kompozitu. Použitý křemičitý písek měl objemovou hmotnost 2830 kg/m^3 .

Za cíl je vytvořit vodivý kompozit, čehož bude docíleno přidáním elektricky vodivých plniv. Byly vybrány uhlíkové částice s expandovaným grafitem, z důvodu malého procentuálního zastoupení z hmotnosti cementu. Při nízké objemové hmotnosti expandovaného grafitu, která je 30 kg/m^3 , se přidá velký objem materiálu při nízkém hmotnostním podílu k dosažení stabilní elektrické vodivosti. V neposlední řadě byly použity železité odprašky zlepšující elektrickou vodivost, jakožto zástupci kovů a druhotných surovin. Pokud bychom použili ocelová vlákna, mohlo by dojít k nedokonalé homogenizaci z důvodu vytvoření shluků, na kterou je kladen velký důraz. Z tohoto důvodu jsou zvoleny suroviny s nízkou zrnitostí pro dokonalé propojení uhlíkových částic.

8 ETAPA III: VOLBA MATERIÁLOVÉHO SLOŽENÍ KOMPOZITNÍ SMĚSI ZLEPŠUJÍCÍ UZEMNĚNÍ

ETAPA III se zabývala konkrétním zastoupením vybraných surovin uvedených v etapě II a přizpůsobené požadavkům na vodivý kompozit. Závěrem byly předloženy konkrétní návrhy receptur.

8.1 Vhodnost použitých surovin

Výběrem vhodnosti ideálních receptur pro laboratorní testování a docilení požadované vodivosti zkušebního tělesa byla provedena optimalizace a výběr surovin. Jako nejdůležitější byla vybrána 4 kritéria (homogenita, využití druhotných surovin, elektricky vodivé plnivo, cena).

Důraz musí být kladen na zrnitost použitých surovin. Při vysoké zrnitosti materiálu nad 1 mm by došlo k nedokonalé homogenizaci směsi s uhlíkovými částicemi, které mají podstatné uplatnění a slouží jako hlavní elektricky vodící složka.

Využitím elektricky vodivých druhotných surovin, byla snížena ekonomická nákladovost na vyvíjený kompozit.

8.2 Návrh receptur vodivého kompozitu

- **Receptura - R**

Referenční receptura byla zvolena jako základ pro vytvoření dalších receptur se stejným množstvím plniv a pojiv s částečným nahrazením plniva vodivou surovinou.

U referenční receptury bylo vybráno jako pojivo portlandský cement třídy 42,5 s rychlým nárůstem pevnosti. Křemičitý písek frakce 0–1 mm písek a voda. Směs byla připravena z předepsaného složení – 450 g cementu (1 díl), 1350 g písku (3 díly) a 225 g vody (0,5 dílu). Celkové složení receptury udává Tabulka 10.

Tabulka 12: Referenční receptura

| RECEPTURA | |
|-------------------------------|-----------------|
| Vstupní složka | Obsah [% z hm.] |
| CEM I 42,5 R | 25 |
| Křemičitý písek 0-1 mm | 75 |
| Voda | 225 ml |
| Vodní součinitel: 0,5 | |

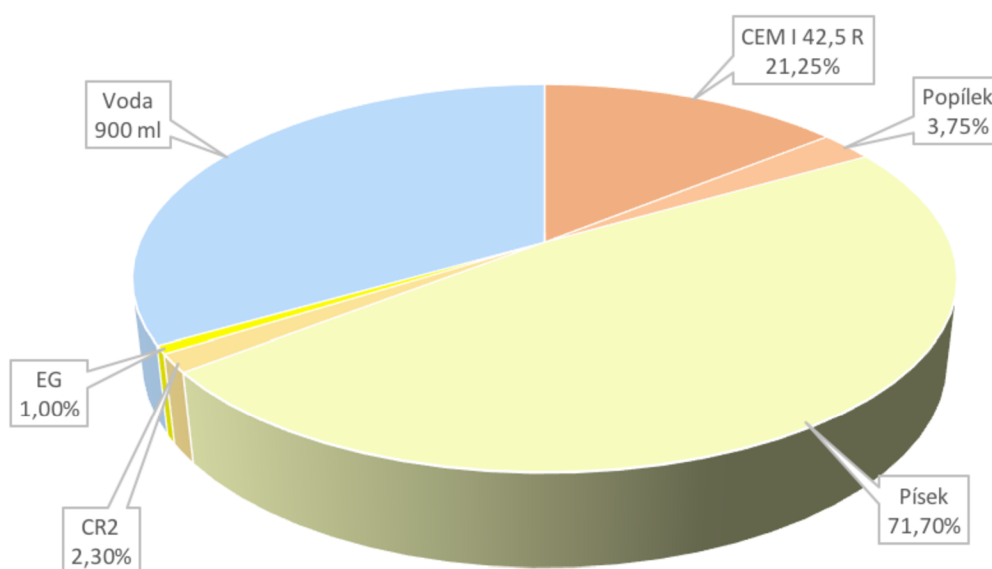
V referenční receptuře nebyl obsažen grafit ani žádný jiný vodivý materiál, z čehož bylo usouzeno, že vzorek nebude schopen elektrické vodivosti.

- **Receptura – C**

Byla navržena na základě poměru u normové malty tedy 1 díl cementu, 3 díly plniva a 0,5 dílu vody. Při míchání směsi se muselo přidat více vody z důvodu obsahu jemných podílů ve směsi. Podíl pojiv a plniv byl zachován. Celková navážka suché směsi byla 1800 g. Výchozí plnivovou složkou byl křemičitý písek, frakce 0-1 mm, který je z části nahrazen funkční složkou potřebnou k vodivosti vyvíjeného kompozitu, expandovaným grafitem s objemovou hmotností 30 kg/m³ a uhlíkovými částicemi 180 kg/m³.

Tabulka 13: Materiálové složení receptury C

| RECEPTURA | |
|------------------------------------|-----------------------------|
| Vstupní složka | Obsah [% z hm. suché směsi] |
| CEM I 42,5 R | 21,25 |
| Popílek – Opatovice (DeNOx) | 3,75 |
| Křemičitý písek 0-1 mm | 71,70 |
| Uhlíkové částice - CR2 | 2,30 |
| Expandovaný grafit - EG | 1,00 |
| Voda | 900 ml |
| Vodní součinitel: 2,00 | |



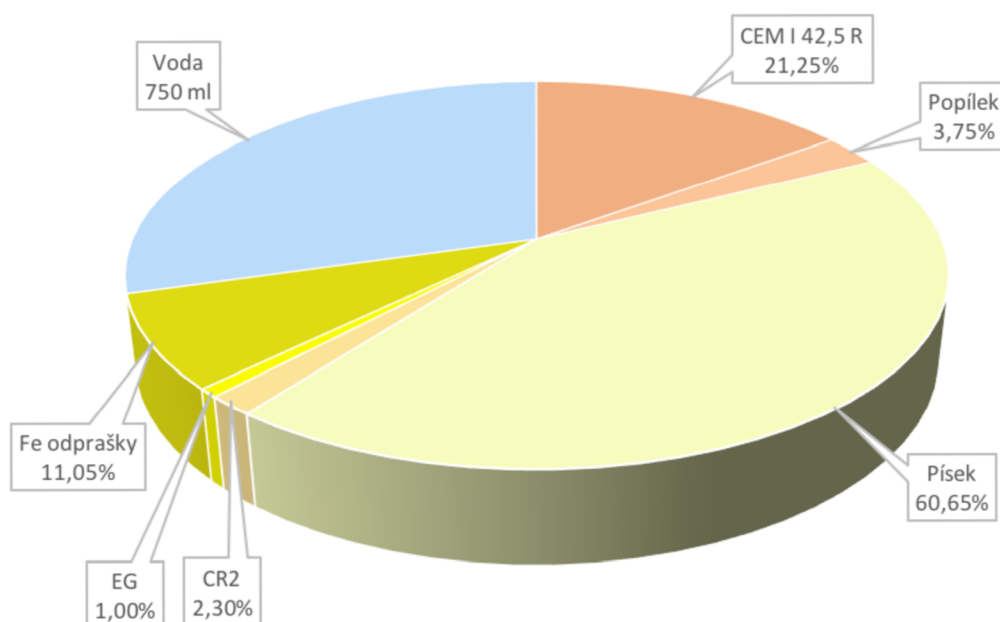
Graf č. 3: Přehledné zastoupení jednotlivých surovin v receptuře C

- **Receptura – CFE**

Byla navržena ve stejném poměru (pojiv / plniv) jako receptura – C, byly použity 3 vodivé složky: expandovaný grafit, uhlíkové částice a železité odprašky pro možné zvýšení vodivosti, které dodala společnost AcelorMittal.

Tabulka 14: Materiálové složení receptury CFE

| RECEPTURA | |
|------------------------------------|-----------------------------|
| Vstupní složka | Obsah [% z hm. suché směsi] |
| CEM I 42,5 R | 21,25 |
| Popílek – Opatovice (DeNOx) | 3,75 |
| Křemičitý písek 0-1mm | 60,65 |
| Uhlíkové částice - CR2 | 2,30 |
| Expandovaný grafit - EG | 1,00 |
| Železité odprašky | 11,05 |
| Voda | 750 ml |
| Vodní součinitel: 1,67 | |



Graf č. 4: Přehledné zastoupení jednotlivých surovin v receptuře CFE

8.3 Shrnutí etapy III

Pro účel ověření výzkumných tezí, uvedených výše, byly vytvořeny 3 receptury, které měly stejný základ v podílu cementu a hmotnosti plniva. V první řadě byly zvoleny vhodné suroviny na základě informací z etapy II. Referenční receptura R je navržena s využitím křemičitého písku frakce 0-1 mm jako plniva. Druhotné suroviny byly použity ve dvou recepturách C a CFE. Popílek z elektráren Opatovice (DeNOx) o velikosti zrn 0,001-1 mm se použil v receptuře C a CFE. Receptura CFE obsahovala navíc oproti receptuře C železité odprašky z hutního podniku ArcelorMittal.

Na základě použitých vodivých surovin bude v závěrečné etapě této práce provedena zkouška stanovení rezistivity u jednotlivých receptur.

9 ETAPA IV: EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ NOVĚ VYVINUTÝCH HMOT

V závěrečné části bakalářské práce byly vytvořeny zkušební vzorky dle receptur z předchozí etapy. Vzorky byly vysušeny v sušárně po dobu 24 hodin při teplotě 80°C, aby bylo zamezeno vlhkosti ve vzorku, která by mohla negativně ovlivnit elektrickou vodivost vyvíjeného kompozitu. Pro ověření vlivu charakteru vstupních surovin se stanovila objemová hmotnost. Základní vlastností vyvíjeného kompozitu v praxi je jeho vodivost, z tohoto důvodu byla u jednotlivých zkušebních těles změřena impedance a vypočítána hodnota rezistivity. V neposlední řadě byla stanovena pevnost v tahu za ohybu a v tlaku na vytvořených vzorcích. Posléze byly výsledné hodnoty z měření porovnány s normovými požadavky na směsi zlepšující uzemnění (ČSN EN 62561-7).

9.1 Výroba zkušebních těles dle navržených receptur

Z každé receptury byla vytvořena 3 zkušební tělesa o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Při vytváření malty byly suché složky důkladně smíchány dohromady pro dosažení dobré homogenizace. Pokud bychom suché složky jednotlivě přidávali do vody, vznikly by hrudky s větším obsahem uhlíku, což by mělo za následek snížení elektrické vodivosti popřípadě její ztrátu. Při přípravě bylo nutno zohlednit množství záměsové vody a její vliv na zpracovatelnost.

Výchozí dávka vody byla vzata z normy ČSN EN 196-1, kde je uvedeno 225 ml na 1800 g suché směsi, která byla dále dle potřeby upravována za účelem dosažení dobré zpracovatelnosti. V porovnání s referenční směsí, která po přidání vody byla vykazována dobrou zpracovatelností. Směs s obsahem popílku a uhlíkových surovin se při stejném množství vody zpracovávala hůře, protože byla velmi suchá. Pro dosažení dobré zpracovatelnosti muselo být výrazně upraveno množství záměsové vody. Úprava byla provedena i u směsi CFE. Spotřeba vody byla uvedena v tabulce u dané receptury.

Nejprve trojformy byly zaplněny do poloviny směsí připravené smísením ostatních složek příslušící dané receptuře. Na horní vrstvu směsi byly umístěny standardní zemnicí Cu dráty o rozměru 2,5 mm² se zahnutým koncem k zamezení vytrhnutí ze zkušebního tělesa (viz. Obrázek č. 27). Vzdálenost mezi vnitřními elektrodami od vnitřní hrany elektrody byla 10 cm. Dráty sloužily jako elektrody k následnému snímání odezvy, načež byla do formy doplněna druhá polovina směsi a zhutněna.

Čerstvé vzorky byly přikryty fólií a po dvou dnech odformovány a uloženy do prostoru s konstantní vlhkostí.



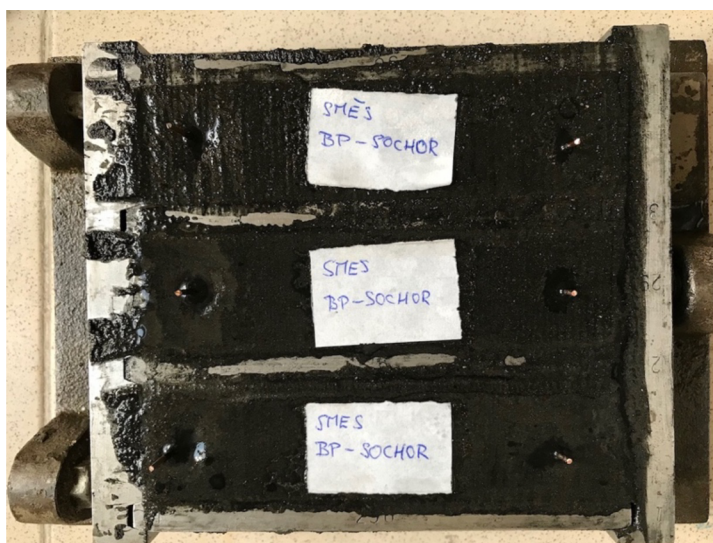
Obrázek č. 29: Měděné dráty 2,5 mm²

- Naplněná forma s referenční recepturou



Obrázek č. 30: Čerstvě naplněná forma s referenční recepturou

- Naplněná forma s recepturou C



Obrázek č. 31: Čerstvě naplněná forma s recepturou C

- **Naplňená forma s recepturou CFE**



Obrázek č. 32: Čerstvě naplněná forma s recepturou CFE

9.2 Popis prováděných zkoušek kompozitu

9.2.1 Objemová hmotnost ztvrdlého zkušebního vzorku

Zkušební těleso bylo zváženo a zjištěn objem měřením každé strany tělesa. Byl stanoven objem V . Při zjištění objemu byl použit vzorec pro výpočet objemové hmotnosti. Výsledek byl zaokrouhlen na nejbližších 10 kg/m^3

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

D_z – objemová hmotnost ztvrdlého kompozitu [kg/m^3]

V – objem vzorku [m^3]

m – hmotnost zkušebního vzorku [kg]

Tabulka 15: Naměřených a vypočítaných hodnot OH

| | m [kg] | l [mm] | b [mm] | h [mm] | V [m ³] | D _z [kg·m ⁻³] | ∅ D _z [kg·m ⁻³] |
|-------------|--------|--------|--------|--------|---------------------|--------------------------------------|--|
| REF1 | 526,34 | 159,49 | 39,15 | 40,92 | 255,50 | 2060 | 2080 |
| REF2 | 557,76 | 159,65 | 39,8 | 41,8 | 265,60 | 2100 | |
| REF3 | 555,45 | 159,35 | 39,9 | 41,8 | 265,80 | 2090 | |
| C1 | 293 | 159,53 | 40,21 | 39,05 | 250,50 | 1170 | 1160 |
| C2 | 300,2 | 159,48 | 39,96 | 39,58 | 252,20 | 1190 | |
| C3 | 289,16 | 159,52 | 39,62 | 40,5 | 256,00 | 1130 | |
| CFE1 | 340,7 | 159,63 | 39,87 | 40,1 | 255,20 | 1330 | 1340 |
| CFE2 | 346,86 | 159,51 | 39,23 | 40,46 | 253,20 | 1370 | |
| CFE3 | 347,19 | 159,69 | 39,8 | 41,7 | 265,00 | 1310 | |

Z vypočítaných hodnot bylo patrné, že přidávkem expandovaného grafitu, který měl nízkou objemovou hmotnost byla snížena i celková hmotnost zkušebních vzorků. Nejnižší hodnotu měl vzorek C. Tato nízká objemová hmotnost byla dána zastoupením expandovaného grafitu s velmi nízkou objemovou hmotností 30 kg/m³.

9.2.2 Stanovení impedance a výpočet rezistivity

Pro měření impedance byla využita čtyřelektrodová metoda. Využívá přiloženého napětí ve vnějších elektrodách a ty zajistí průchod proudu vzorkem. Úbytek napětí na vnitřních elektrodách byl měřen voltmetrem a výsledný odpor byl vypočítán. Rezistance (odpor) materiálu mohla být také měřena přímo.

Hodnota rezistance (odporu) každé směsi zlepšující uzemnění bylo převedeno na hodnotu rezistivity za použití vztahu.

$$\rho = \frac{R \times A}{a}$$

ρ - rezistivita vzorku [$\Omega \cdot \text{cm}$]
 R - rezistance (odpor) [Ω]
 A - plocha oblasti kolmá ke směru proudu [cm^2]
 a - vzdálenost mezi vnitřními elektrodami, měřeno od vnitřní hrany elektrody [cm]



Obrázek č. 33: Měření pomocí přístroje Agilent LCR E4980A

Tabulka 16: Hodnoty rezistance z přístroje Agilent LCR E4980A

| Vzorek | R [Ω] | ϕ R [Ω] |
|--------|--------------------|-----------------------|
| REF1 | $136,8 \cdot 10^6$ | $102,0 \cdot 10^6$ |
| REF2 | $55,9 \cdot 10^6$ | |
| REF3 | $113,4 \cdot 10^6$ | |
| C1 | 434,2 | 456,3 |
| C2 | 430,4 | |
| C3 | 504,4 | |
| CFE1 | 78,4 | 85,2 |
| CFE2 | 101,2 | |
| CFE3 | 76,1 | |

Pomocí výše uvedeného vzorce byla dopočítána rezistivita (ρ) jednotlivých vzorků, která je zaznamenána v tabulce z hodnot rezistance naměřených přístrojem Agilent LCR E4980A. Plocha oblasti kolmá ke směru proudu byla uvažována jako průřez zkušební vzorku. Vzdálenost mezi vnitřními elektrodami byla u vzorků zvolena 10 cm z důvodu ukládání elektrod ve stejné vzdálenosti již při výrobě.

Tabulka 17: Hodnoty dopočítané rezistivity

| | R [Ω] | b [cm] | h [cm] | A [cm ²] | α [cm] | ρ [$\Omega \cdot \text{cm}$] | $\bar{\rho}$ [$\Omega \cdot \text{cm}$] |
|-------------|-------------------------|--------|--------|----------------------|---------------|-------------------------------------|---|
| REF1 | 136,775 $\cdot 10^6$ | 3,915 | 4,092 | 16,020 | 10 | 219,1 $\cdot 10^6$ | 167,1 $\cdot 10^6$ |
| REF2 | 55,897 $\cdot 10^6$ | 3,980 | 4,180 | 16,636 | | 93,0 $\cdot 10^6$ | |
| REF3 | 113,355 $\cdot 10^6$ | 3,990 | 4,180 | 16,678 | | 189,1 $\cdot 10^6$ | |
| C1 | 434,230 | 4,021 | 3,905 | 15,702 | | 681,8 | 724,0 |
| C2 | 430,401 | 3,996 | 3,958 | 15,816 | | 680,7 | |
| C3 | 504,411 | 3,962 | 4,050 | 16,046 | | 809,4 | |
| CFE1 | 78,403 | 3,987 | 4,010 | 15,988 | | 125,4 | 137,4 |
| CFE2 | 101,219 | 3,923 | 4,046 | 15,872 | | 160,7 | |
| CFE3 | 76,086 | 3,980 | 4,170 | 16,597 | | 126,3 | |

Dle hodnot z Tabulky 16 a 17 lze usuzovat, že rezistance a rezistivita u zkoušených vzorků s přidavkem vodivých plniv je nižší o několik řádů což má příznivý dopad na elektrickou vodivost.

9.2.3 Pevnost v tahu za ohybu

Na zkušebních vzorcích byla provedena zkouška pevnosti v tahu za ohybu. Tělesa byla namáhána třibodovým ohybem. Zatěžovalo se kolmo na směr hutnění. Zatěžování probíhalo rovnoměrnou rychlostí až do zlomení.

F_t - zatížení působící na střed tělesa v momentu zlomení [N]

l - vzdálenost podpor [mm]

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_t \cdot l}{b \cdot h^2} \quad [MPa] \quad b - \text{šířka zkušebních těles [mm]}$$

h - výška zkušebních těles [mm]

R_f – pevnost v tahu za ohybu po 7 dnech [MPa]

Tabulka 18: Naměřené a vypočtené hodnoty pevnosti v tahu po 7 dnech

| | l [mm] | b [mm] | h [mm] | F_t [kN] | R_f [MPa] | σR_f [MPa] |
|-------------|----------|----------|----------|------------|-------------|--------------------|
| REF1 | 100 | 39,15 | 40,92 | 2,55 | 5,835 | 5,60 |
| REF2 | 100 | 39,8 | 41,8 | 2,6 | 5,608 | |
| REF3 | 100 | 39,9 | 41,8 | 2,5 | 5,379 | |
| C1 | 100 | 40,21 | 39,05 | 0,25 | 0,612 | 0,44 |
| C2 | 100 | 39,96 | 39,58 | 0,2 | 0,479 | |
| C3 | 100 | 39,62 | 40,5 | 0,1 | 0,231 | |
| CFE1 | 100 | 39,87 | 40,1 | 0,25 | 0,585 | 0,46 |
| CFE2 | 100 | 39,23 | 40,46 | 0,2 | 0,467 | |
| CFE3 | 100 | 39,8 | 41,7 | 0,15 | 0,325 | |

Tabulka 18 ukazuje hodnoty pevnosti v tahu za ohybu po 7 dnech, nejvyšší pevnost byla u referenčního vzorku s hodnotou 5,6 MPa. Nízké pevnosti u vzorků s přísávkem vodivých plniv může být dána vysokým zastoupením jemných podílů. Pro účely výzkumu nemají pevnosti v tahu za ohybu výrazný vliv.

9.2.4 Pevnost v tlaku

Na polovině vzorku se provedla zkouška pevnosti v tlaku. Část vzorku se vložila mezi destičky zkušebního stroje o rozměrech 40 x 40 mm a zatížení se zvyšovalo plynulou rychlostí do doby porušení.

$$f_c = \frac{F_c}{A} \quad [MPa]$$

F_c - zatížení působící na těleso v moment porušení [N]
 A - tlaččná plocha [mm²]

Tabulka 19: Naměřené a vypočtené hodnoty pevnosti v tlaku po 7 dnech

| | A [mm ²] | F _c [kN] | f _c [MPa] | ∅ f _c [MPa] |
|-------------|----------------------|---------------------|----------------------|------------------------|
| REF1 | 1600 | 45 | 28,125 | 27,917 |
| REF2 | 1600 | 45 | 28,125 | |
| REF3 | 1600 | 44 | 27,5 | |
| C1 | 1600 | 1,6 | 1,000 | 0,938 |
| C2 | 1600 | 1,3 | 0,813 | |
| C3 | 1600 | 1,6 | 1,000 | |
| CFE1 | 1600 | 2 | 1,25 | 1,042 |
| CFE2 | 1600 | 1,5 | 0,9375 | |
| CFE3 | 1600 | 1,5 | 0,9375 | |

Pevnost v tlaku po 7 dnech vykazuje stejnou závislost v porovnávaných recepturách jako u pevnosti v tahu za ohybu.

9.3 Shrnutí etapy IV

Závěrečná etapa praktické části práce byla věnována experimentálnímu ověření navržených receptur v rámci etapy III. Byly namíchány směsi daných receptur. V prvním případě referenční, která byla normovou směsí dle normy ČSN EN 197-1. V druhém případě receptura s příměsí uhlíku a ve třetím případě směsnou příměsí uhlíku a železitých odprašků.

Při optimalizaci vhodného plniva byly vybrány suroviny důležitých vlastností pro vyvíjený kompozit. Primární plnivo (křemičitý písek 0-1 mm) u referenční směsi bylo v následujících recepturách částečně nahrazeno elektricky vodivými materiály ve směsi C a CFE byly použity suroviny na bázi uhlíku v množství 3,3 % z hmotnosti suché směsi. Při navrhování byl jako zástupce druhotné suroviny použit popílek v množství 3,75 % z hmotnosti suché směsi v recepturách C a CFE. Železité odprašky byly použity pouze v receptuře CFE s obsahem 11,05 % z hmotnosti suché směsi. Vodní součinitel referenční směsi nebyl pro směsi s obsahem uhlíkových částic použitelný a byla nutná korekce zvýšením obsahu záměsové vody pro dosažení pasty.

Prvotní zkouškou bylo určení objemové hmotnosti v zatvrdlém stavu. Z vypočítaných hodnot bylo patrné, že obsah uhlíkových částic a expandovaného grafitu u směsi C měl vliv na nízkou objemovou hmotnost s hodnotou 1160 kg/m^3 oproti referenčnímu vzorku s hodnotou 2080 kg/m^3 . Důvod nízké objemové hmotnosti byl dán použitím expandovaného grafitu, který byl použit i ve směsi CFE, kde byla objemová hmotnost mírně vyšší z důvodu přidání železitých odprašků. Objemová hmotnost vzorku CFE měla hodnotu 1340 kg/m^3 , která byla dána přídatkem expandovaného grafitu.

Zásadní zkouškou výzkumu byla hodnota rezistivity respektive rezistance, která určila jak je zkušební vzorek schopen vést elektrický proud. Pro zjištění zmíněných hodnot byla využita čtyřelektrodová metoda měření přístrojem Agilent LCR E4980A. Měřily se zkušební vzorky všech tří receptur.

Dále byly dopočítány hodnoty rezistivity z naměřených hodnot rezistance, potřebné k porovnání s normou ČSN EN 62561-7 na směsi zlepšující uzemnění. Hodnoty rezistivity měly podobný trend jako rezistance. Referenční vzorek hodnotu $167,1 \cdot 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$, vzorek C hodnotu $724,0 \Omega \cdot \text{cm}$ a vzorek CFE hodnotu $137,4 \Omega \cdot \text{cm}$. Z výsledných hodnot rezistivity bylo patrné, že ani jedna ze zkoušených receptur nevyhovovala předepsaným normovým požadavkům, které říkají, že pro vytvrzené vodivé materiály musí být hodnota rezistivity nižší než $20 \Omega \cdot \text{cm}$.

V další části byla provedena zkouška pevnosti v tahu za ohybu po 7 dnech. Z vyrobených vzorků měl nejvyšší pevnosti referenční vzorek, který neobsahoval žádné vodivé materiály ani druhotné suroviny, vykazoval pevnosti v tahu za ohybu o hodnotě $5,6 \text{ MPa}$. U vzorku s obsahem expandovaného grafitu a uhlíkových částic CR2 byla pevnost velmi nízká s hodnotou $0,44 \text{ MPa}$, stejně tak tomu bylo u vzorku CFE, kde byla srovnatelná hodnota $0,46 \text{ MPa}$.

Lze konstatovat, že s přidavkem elektricky vodivých plniv byla výrazně snížena celková pevnost. Pevnost v tlaku po 7 dnech vykazovala stejnou závislost v porovnávaných recepturách jako u pevnosti v tahu za ohybu. Dalo by se očekávat vyšších pevností při stanovení po 28 dnech, avšak pevnosti nebyly považovány jako hlavní kritérium výzkumu a jsou pouze doplňkové, norma ČSN EN 62561-7 je nevyžaduje.

Na neuspokojivé výsledky rezistivity mohla mít vliv celá řada faktorů. Mezi ně patřila: nedokonalá homogenizace při přípravě; použití nevhodných surovin, které mají plnit vodivou funkci; úprava množství použitých surovin; použití plastifikátoru pro lepší konzistenci a zvýšení pevností.

Závěrem bylo konstatováno, že pro dosažení cíle (nízké rezistivity) se na vlivu použitého plniva jako nejvhodnější ze zkoušených receptur jevila receptura CFE s obsahem železitých odprašků, expandovaného grafitu a uhlíkových částic. Vzhledem k nevyhovění normového požadavku by byla nejlepším řešením úprava receptury. V následujícím vývoji kompozitu bude nejpravděpodobněji využita receptura s obsahem uhlíkových částic.

V rámci budoucího výzkumu bude ověřen vliv železitých odprašků na korozi zemnicích elektrod, což bude velmi důležité, protože materiály zlepšující uzemnění nesmí fyzikálně ani chemicky reagovat se zemnicí elektrodou a tak ji poškozovat.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout recepturu kompozitu, kterou bude možné aplikovat za účelem zlepšení uzemnění a tím zvýšení ochrany stavebních konstrukcí před úderem blesku a vznikem přepětí v mnoha oblastech se špatnou vodivostí, jako je skalnatá půda, horské vrcholy a písečná půda. Zejména s využitím druhotných surovin bude dosaženo snížení dopadu výroby na životní prostředí.

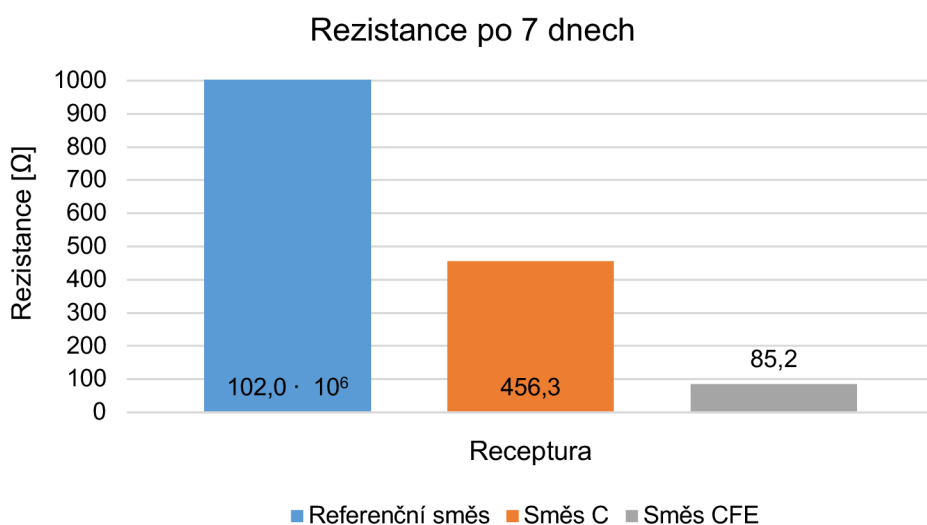
Teoretická část obsahuje dosavadní poznatky ochrany budov před bleskem, možnosti rizik a ztrát, které mohou vzniknout při nekvalitní ochraně. Byly zde vysvětleny základní pojmy návrhu vnější a vnitřní ochrany, včetně ochrany proti předpětí. Práce se také zabývala průzkumem trhu v oblasti vodivých kompozitů zlepšující uzemnění. Tím bylo zjištěno, že se používají materiály na silikátové bázi s použitím uhlíkových plniv. Ani jeden z konkurenčních produktů není dostupný na českém trhu. Představeny byly suroviny pro výrobu vodivého kompozitu s důrazem na schopnost vést elektrický proud s využitím druhotných surovin. Na základě výsledků, byl vhodně zvolen uhlík, který se ve směsi velmi dobře rozptýlil a vytvořil podmínky elektrické vodivosti.

V předposlední etapě práce byly navrženy receptury se zastoupením uhlíkových plniv. Popílek a železité odprašky použity v receptuře jako zástupci druhotných surovin. Z výběru vhodných plniv byly vytvořeny tři receptury, z nichž u dvou byl předpoklad vykazování potřebných vlastností. Poslední etapa se věnovala výrobě zkušebních vzorků z receptur z předchozí etapy a experimentálního ověření požadovaných vlastností. Nejprve byly stanoveny hodnoty objemových hmotností, kde bylo prokázáno, že přidáním expandovaného grafitu a uhlíkových částic se sníží objemová hmotnost. Bylo dokázáno, že již malé množství uhlíkových prvků zlepší hodnotu rezistivity o několik řádů, v porovnání s referenčním vzorkem, kde se nevyskytoval uhlík, ani žádná jiná elektricky vodivá surovina. Pozitivní vliv ve smyslu snížení rezistivity měly i železité odprašky, které u receptury CFE s využitím uhlíku a odprašků vykazovaly nejnižší hodnotu rezistivity ze všech zkoušených vzorků.

Experimentální ověření ukázalo, že se povedlo výrazně snížit rezistivitu. Prokázal se pozitivní vliv příměsí železitých odprašků a uhlíkových částic. Zatím se však nepodařilo dosáhnout normových požadavků na směsi zlepšující uzemnění. Pro zlepšení dosažených výsledků navrhuji úpravu receptury s větším zastoupením uhlíkových a železitých surovin ve směsi.

U vzorků s obsahem uhlíkových surovin a železitých odprašků může docházet k elektrokorozi kovových materiálů. V rámci budoucího výzkumu by mohly být využity inhibitory koroze, které by eliminovaly možnou korozi elektrod. V rámci diplomové práce by bylo vhodné zjistit, zda se nabízí možnost vzniku elektrokoroze, pokud proud nebude veden kompozitem stále, ale jen při udeření blesku. V pokračování výzkumu je plánováno pracovat s cementovou složkou v kombinaci se surovinami na uhlíkové bázi a druhotnými surovinami s dosažením lepších hodnot rezistivity a dosažení potřebných parametrů při rozumné pevnosti.

U referenční hodnoty byl potvrzen předpoklad vysoké hodnoty rezistance. Průměrná hodnota třech referenčních vzorků byla $102,0 \cdot 10^6 \Omega$, jedná se o vzorky s obtížným vedením elektrického proudu. U vzorků C, kde byl zastoupen expandovaný grafit a uhlíkové částice CR2, byla hodnota rezistance nízká $456,3 \Omega$, tudíž je vzorek schopen vést elektrický proud. Nejlepší hodnoty vykazovaly vzorky CFE za použití expandovaného grafitu, uhlíkových částic CR2 ve stejném množství jako u směsi C, kde navíc vzorek CFE obsahoval železité odprašky. Kovové částice snížily hodnotu rezistance s průměrnou hodnotou $85,2 \Omega$. Takto nízká hodnota oproti vzorku C je dána obsahem železitých částic, které mohou spolupůsobit s expandovaným grafitem a uhlíkovými částicemi CR2.



Graf č. 5: Hodnoty rezistance po 7 dnech

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. **Ostrava, Střední škola elektrotechnická.** sse-najizdarne.cz. [Online] [Citace: 29. 1 2017.] http://www.sse-najizdarne.cz/dokumenty/4mb/ochr_pred_bleskem.pdf.
2. **University of Alberta, Faculty of Science.** ualberta.ca. [Online] [Citace: 1. 2 2018.] <https://www.ualberta.ca/biological-sciences/safety/field-safety/lightning#whatis>.
3. **Co.KG., DEHN + SÖHNE GmbH +.** dehn-international.com. [Online] [Citace: 1. 2 2018.] <http://www.dehn-international.com/sites/default/files/uploads/dehn/pdf/lpg-chapters/chapter2.pdf>.
4. **PLOCEK Robert, FJFI ČVUT.** fyzsem.fjfi.cvut.cz. [Online] [Citace: 15. 2 2018.] <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2005-2006/Zima05/proc/divis.pdf>.
5. **KOTYK, Jiří.** [Online] 4 2013. [Citace: 1. 2 2018.] <http://www.kraj.kppardubicka.cz/stranky/cti-prispevky.php?id=626>.
6. **MERAVÝ Jan, KUTÁČ Jiří.** *Ochrana před bleskem a přepětím z pohledu soudních znalců.* Praha, Trenčín : SPBI Ostrava, 2010. ISBN 978-80-7385-081-4.
7. **Solid Team.** *Elektro v praxi 2.* Olomouc : autor neznámý, 2011.
8. **ČSN EN, 62305-1.** *Ochrana před bleskem - Obecné principy.* Praha : Úřad pro technickou normalizaci , metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
9. **BURANT, Jiří.** *Blesk a přepětí : systémová řešení ochran.* Praha : FCC Public, 2006. ISBN 80-86534-10-3.
10. **ČSN EN, 62305-2.** *Ochrana před bleskem - Část 2: Řízení rizika.* Praha : Úřad pro technickou normalizaci , metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
11. **KLIMŠA, David.** *Vnější a vnitřní ochrana před bleskem. 2., aktualiz.* Praha : IN-EL, 2014. ISBN 978-80-86230-98-6.
12. **KOUDELKA, Ctirad.** *Fakulta elektrotechniky a informatiky VŠB.* [Online] 1 2007. [Citace: 10. 2 2018.] http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske/prednasky/pred_ZEP/Ochrana%20pred%20bleskem-CSN.pdf.
13. **ČSN EN, 62305-3.** *Ochrana před bleskem - Část 3: Hmotné škody na stavbách a nebezpečí života. místo neznámé : Úřad pro technickou normalizaci , metrologii a státní zkušebnictví, 2012.*
14. **KUTÁČ Jiří, ROUS Zdeněk, HLADNÝ Zdeněk.** *Hromosvody a zemniče. 2., přeprac. vyd.* Praha : IN-EL, 2008. ISBN 978-80-86230-45-0.
15. **Solutions, REHAU - Unlimited Polymer.** *rehau.com.* [Online] [Citace: 5. Duben 2018.] <https://www.rehau.com/download/1398624/vytapeni-chlazení-ti-cz.pdf>.
16. **Solutions, REHAU.** *rehau.com.* [Online] [Citace: 5. Duben 2018.] <https://www.rehau.com/cz-cs/stavebnictvi-podnikatele/vytapeni-a-chlazení/plosne-vytapeni-chlazení---specialni-oblasti-pouziti/vytapeni-prumyslovych-ploch#tab1>.
17. **Sopro Bauchemie, GmbH.** *sopro.com.* [Online] [Citace: 7. 12 2017.] <download.sopro.com/public/cz-cz/09.pdf>.
18. **ČSN EN, 12457-2.** *Charakterizace odpadů - Vyluhování - Ověřovací zkouška vyluhovatelnosti zrnitých odpadů a kalů - Část 2: Jednostupňová vsádková zkouška při poměru kapalné a pevné fáze 10 l/kg pro materiály se zrnitostí menší než 4 mm. místo neznámé : Úřad pro technickou normalizaci , metrologii a státní zkušebnictví, 2013.*
19. **ČSN EN, 16192.** *Charakterizace odpadů - Analýza výluhů. místo neznámé : Úřad pro technickou normalizaci , metrologii a státní zkušebnictví, 2012.*

20. **ČSN EN, 62561-7.** Součásti systému ochrany před bleskem (LPSC) - Část 7: Požadavky na směsi zlepšující uzemnění. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
21. **erico.com.** [Online] [Citace: 12. 3 2018.] <https://www.erico.com/category.asp?category=R2387#catalog-documents>.
22. **Harger Lightning & Grounding.** [Online] [Citace: 12. 3 2018.] <http://www.harger.com/products/idx.cfm?subc3id=33&p=1&oiid=0&thid=69&footid=15&footinfoid=352>.
23. **Sankosha SAN-EARTH.** [Online] [Citace: 12. 3 2018.] <http://www.sankosha-usa.com/pdf/san-earth-tech.pdf>.
24. **HAN, Baoguo., Xun YU, Jinping OU.** *Self-sensing concrete in smart structures.* ISBN: 978-0-12-800517-0.
25. **Fan, X., Fang, D., Sun, M.** *Springer link.* [Online] Wuhan University of Technology and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011. [Citace: 25. 4 2018.] <https://doi.org/10.1007/s11595-011-0226-0>.
26. **LAYSSI Hamed, GHODS Pouria, SALEHI Mustafa, ALIZADEH Aali.** **Electrical Resistivity of Concrete. *Concrete international.*** [Online] 5 2015. [Citace: 15. 4 2018.] https://www.giatecscientific.com/wp-content/uploads/2015/05/Concrete_Electrical_Resistivity.pdf.
27. **VŠB - katedra stavebních hmot a hornického stavitelství.** [Online] [Citace: 20. 3 2018.] http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka_pojiva.html#cementy.
28. **BYDŽOVSKÝ Jiří, NOVÁK Jan.** *Maltoviny - Laboratoře, Modul 01.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2006.
29. **ČSN EN, 197-1 ed. 2.** Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. místo neznámé : Úřad pro technickou normalizaci , metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
30. **SVOBODA, Luboš a kol.** *Stavební hmoty, 3. vydání.* 2013. ISBN 978-80-260-4972-2.
31. **Select Sand, corp.** [Online] [Citace: 10. 5 2018.] <http://www.selectsandscorp.com/what-is-silica-sand/>.
32. **Písek, K.** [Online] [Citace: 15. 5 2018.] <http://www.k-pisek.cz/filtracni-pisek-pro-male-a-stredne-velke-bazeny-50kg-pytle>.
33. **Graphit Kropfmühl, GmbH.** [Online] [Citace: 20. 5 2018.] https://www.gk-graphite.com/fileadmin/user_upload/Expandierter_Graphit.pdf.
34. **Carbons, Asbury.** [Online] [Citace: 25. 3 2018.] <http://asbury.com/technical-presentations-papers/materials-in-depth/expandable-flake-graphite/>.
35. **GRAPHEX, Mining.** [Online] [Citace: 24. 3 2018.] <http://www.graphexmining.com.au/wp-content/uploads/2016/06/160613-Expandable-Graphite-Presentation.pdf>.
36. **Goodfellow.** [Online] [Citace: 29. 4 2018.] <http://www.goodfellow.com/E/Nickel-Powder.html>.
37. **Valejapan.** [Online] [Citace: 23. 5 2018.] <http://valejapan.com/?p=1661&lang=en?&lang=en>.
38. **Amazon.** [Online] [Citace: 29. 4 2018.] <https://www.amazon.com/Nickel-Silver-Powder-63-Cu-18-Ni/dp/B015HGL7QC>.
39. **Encyclopedia Britannica.** [Online] [Citace: 27. 4 2018.] <https://www.britannica.com/science/fullerene#ref234437>.

40. **UnderstandingNano.** [Online] [Citace: 26. 4 2018.]
<http://www.understandingnano.com/what-are-carbon-nanotubes.html>.
41. **TAN, Ruxian, Yongji SHI, Zhongyu Hou.** Carbon Nanotube - Based Chemiresistive Sensors. [Online] [Citace: 25. 4 2018.] <http://www.mdpi.com/1424-8220/17/4/882>.
42. **HELA, Rudolf.** *Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební - Technologie betonu 2, Modul M01.* BRNO 2007.
43. **Krampeharex.** [Online] [Citace: 20. 4 2018.] <http://www.krampeharex.cz/vlakna-do-betonu>.
44. **GRÉGR, Jan. Czech Design.** [Online] [Citace: 26. 4 2018.]
<http://www.czechdesign.cz/temata-a-rubriky/sklenena-vlakna-historie-a-soucasnost>.
45. **Vítejte na Zemi.** [Online] [Citace: 29. 4 2018.]
http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=co_je_druhotna_surovina&site=odpady
46. **SOKOLÁŘ, Radomír.** *Možnosti využití vybraných odpadních látek při tvorbě keramického střepu.* Brno : Vutium, 2008. ISBN 978-80-214-3571-1.
47. **Silotransport.** [Online] [Citace: 20. 4 2018.] <https://www.silotransport.cz/popilek>.
48. **HELA, Rudolf.** *Technologie betonu 1, Modul M01.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2005.
49. **BENSCHIEDT, N. a Rudolf HELA.** *Příručka Popílek v betonu: základy výroby a použití.* místo neznámé : Hostivice: ČEZ Energetické produkty vydává pro ASVEP. ISBN 978-80-260-4226-6.
50. **Indiamart.** [Online] [Citace: 25. 4 2018.] <https://www.indiamart.com/proddetail/fly-ash-f-class-8954860012.html>.
51. **MELICHAR Tomáš, PROCHÁZKA David.** [Online] [Citace: 25. 3 2018.]
http://www.betontks.cz/sites/default/files/2011-6-66_0.pdf.
52. **Silica, Fume.** [Online] [Citace: 25. 3 2018.]
https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&ved=2ahUKEwjWgqbD_YjbAhXB8qQKHS7TBcsQjhx6BAGBEAM&url=https%3A%2F%2Fwww.indiamart.com%2Fpr odetail%2Fmicro-silica-fume-4840507348.html&psig=AOvVaw1pF7dQLjy61B0LiZ3bof-o&ust=1526516974604437.
53. **Asociace sklářského a keramického průmyslu ČR.** [Online] [Citace: 15. 4 2018.]
<http://www.askpcr.cz/o-skle/co-je-sklo/>.
54. **VŠB - katedra stavebních hmot a hornického stavitelství.** [Online] [Citace: 15. 4 2018.] <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/sklo.html>.
55. **ARTGLAS RECYKLING.** [Online] [Citace: 15. 4 2018.] <http://artglas-recykling.pl/cs/recyklace-skla/>.
56. **Reciclagem.** [Online] [Citace: 15. 4 2018.] <https://a-reciclagem.blogs.sapo.pt/3964.html>.

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| Obrázek č. 1: Sestupný negativní výboj (mrak-země) | 13 |
| Obrázek č. 2: Sestupný pozitivní výboj (mrak-země)..... | 13 |
| Obrázek č. 4: Vzestupný pozitivní výboj (země-mrak)..... | 13 |
| Obrázek č. 3: Vzestupný negativní výboj (země-mrak)..... | 13 |
| Obrázek č. 5: Divišův bleskosvod (5) | 14 |
| Obrázek č. 6: Přehled součástí rizik dle příčin poškození (6) | 15 |
| Obrázek č. 7: Metoda valící se koule (7)..... | 20 |
| Obrázek č. 8: Ochranný prostor vymezený ochranným úhlem (3)..... | 21 |
| Obrázek č. 9: Systém mřížové soustavy u ploché a sedlové střechy (3)..... | 22 |
| Obrázek č. 11: Základový zemnič (11)..... | 24 |
| Obrázek č. 10: Obvodový zemnič (11) | 24 |
| Obrázek č. 12: Umístění ekvipotenciálního pospojování (14)..... | 25 |
| Obrázek č. 13: Vytápění podlah v průmyslových halách (16)..... | 29 |
| Obrázek č. 14: Skladba systému elektricky vodivé dlažby, 1) Sopro Grundierung, 2) měděný pásek, připojený k podlahové krytině, 3) elektricky vodivé maltové lože, 4,5) dlaždice, 6) koutová spára elastická, 7) uzemnění s připojením pásku, 8) sokl, U) podklad, popř. potěr (17)..... | 31 |
| Obrázek č. 15: Přemostění dilatačních spár v elektricky vodivých dlažbách (17) | 31 |
| Obrázek č. 16: Schéma postupu pro EN 12457-2 (18)..... | 36 |
| Obrázek č. 17: Konfigurace čtyř elektrodového měření zemního odporu v přípravku..... | 40 |
| Obrázek č. 18: Křemičitý písek frakce 0-1 mm (32)..... | 47 |
| Obrázek č. 19: Expandovaný grafit | 48 |
| Obrázek č. 20: Uhlíkové částice CR2..... | 48 |
| Obrázek č. 21: Niklový prášek (38) | 49 |
| Obrázek č. 22: Uhlíkové nanotrubičky – jednostěnné (vlevo) a vícestěnné (vpravo) (41) . | 49 |
| Obrázek č. 23: Ocelové vlákno s kotvícími konci (43)..... | 50 |
| Obrázek č. 24: Skleněná vlákna (43) | 50 |
| Obrázek č. 25: Železité odprašky..... | 51 |
| Obrázek č. 26: Popílek (50) | 52 |
| Obrázek č. 27: Mikrosilika (52)..... | 53 |
| Obrázek č. 28: Odpadní sklo určené k recyklaci (56)..... | 53 |
| Obrázek č. 29: Měděné dráty 2,5 mm ² | 60 |
| Obrázek č. 30: Čerstvě naplněná forma s referenční recepturou | 60 |
| Obrázek č. 31: Čerstvě naplněná forma s recepturou C..... | 60 |
| Obrázek č. 32: Čerstvě naplněná forma s recepturou CFE | 61 |
| Obrázek č. 33: Měření pomocí přístroje Agilent LCR E4980A..... | 63 |

SEZNAM GRAFŮ

| | |
|---|----|
| Graf č. 1: Velikost ochranných úhlů (3) | 21 |
| Graf č. 2: Křivka zrnitosti popílku - Opatovice..... | 52 |
| Graf č. 3: Přehledné zastoupení jednotlivých surovin v receptuře C..... | 56 |
| Graf č. 4: Přehledné zastoupení jednotlivých surovin v receptuře CFE | 57 |
| Graf č. 5: Hodnoty rezistance po 7 dnech | 70 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|--|----|
| Tabulka 1: Škody a ztráty na stavbách podle různých míst úderu blesku (8) | 16 |
| Tabulka 2: Typické hodnoty pro přípustné riziko R_T (10)..... | 17 |
| Tabulka 3: Doporučené třídy LPS (11)..... | 18 |
| Tabulka 4: Parametry bleskové koule (11)..... | 19 |
| Tabulka 5: Parametry mřížové jímací soustavy (13)..... | 21 |
| Tabulka 6: Typické hodnoty vzdáleností mezi svody (13) | 22 |
| Tabulka 7: Provedení zemničů (7) | 24 |
| Tabulka 8: Ukazatele a metody zkoušení | 37 |
| Tabulka 9: Shrnutí potřebných parametrů na vyvíjený kompozit dle ČSN EN 62561-7 ... | 41 |
| Tabulka 10: Požadavky na mechanické a fyzikální vlastnosti cementů ČSN EN 197-1 (29) | 45 |
| Tabulka 11: Základní fyzikální vlastnosti popílků (49) | 52 |
| Tabulka 12: Referenční receptura..... | 55 |
| Tabulka 13: Materiálové složení receptury C | 56 |
| Tabulka 14: Materiálové složení receptury CFE..... | 57 |
| Tabulka 15: Naměřených a vypočítaných hodnot OH | 62 |
| Tabulka 16: Hodnoty rezistance z přístroje Agilent LCR E4980A..... | 63 |
| Tabulka 17: Hodnoty dopočítané rezistivity | 64 |
| Tabulka 18: Naměřené a vypočtené hodnoty pevnosti v tahu po 7 dnech..... | 65 |
| Tabulka 19: Naměřené a vypočtené hodnoty pevnosti v tlaku po 7 dnech | 66 |